UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE GESTIÓN MINERA

Modelo de plan de emergencia mediante análisis Bow tie para la gestión de riesgos por emanación de CO en una contrata minera

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero de Gestión Minera

AUTOR(ES)

Berrio Figueroa, Maria Jose	0000-0001-6785-1043
Kcomt Diaz, Gianfranco	0000-0002-5054-0684

ASESOR(ES)

Peña Castillo, Manuel Faustino	0000-0003-1867-8779

Lima, 16 de Junio de 2025

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo, ante todo, a nuestras familias, por ser nuestro pilar en cada etapa de este camino. A nuestros padres, por su amor, su apoyo incondicional y por enseñarnos, con su ejemplo, a nunca rendirnos.

A nuestras madres, por su fortaleza, sus consejos y por estar siempre, en las buenas y en las malas.

También dedicamos esta tesis a nosotros mismos, por no bajar los brazos, por seguir adelante a pesar de los obstáculos, y por haber llegado juntos hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas que nos acompañaron, guiaron y brindaron su apoyo a lo largo del desarrollo de esta tesis, así como durante toda nuestra formación académica. Este trabajo no habría sido posible sin la colaboración, el compromiso y la confianza de cada uno de ustedes.

A nuestros profesores y profesoras, les agradecemos por su dedicación, vocación y entrega. Sus enseñanzas, tanto dentro como fuera del aula, han dejado una huella significativa en nuestra formación profesional y personal. Cada orientación, cada reflexión y cada espacio de aprendizaje fue fundamental para nuestro crecimiento.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un modelo de plan de emergencia enfocado en reducir los riesgos asociados a la exposición al monóxido de carbono (CO) en operaciones de minería subterránea, específicamente dentro de una contrata minera ubicada en el centro del Perú. Este gas representa un peligro significativo para la salud de los trabajadores, ya que es tóxico, inodoro e incoloro, y puede acumularse rápidamente en ambientes confinados, como los socavones mineros, en ausencia de una ventilación adecuada.

A partir de esta problemática, se propone la aplicación del análisis Bow Tie, una herramienta visual que permite identificar las causas que pueden provocar un evento crítico, las posibles consecuencias y las medidas de control que deben implementarse para prevenir o mitigar estos riesgos. El modelo desarrollado en este estudio incluye la revisión de información histórica, monitoreos de gases, análisis de peligros (mediante matrices IPERC) y la elaboración de diagramas que representan claramente los escenarios de riesgo y las acciones necesarias.

El resultado es un plan de emergencia diseñado específicamente para el caso de exposición a CO, que mejora los protocolos existentes mediante la incorporación de acciones concretas, responsables asignados, equipos necesarios y procedimientos de evacuación y rescate. Además, se proponen mejoras como el uso de sensores automáticos, capacitaciones específicas y simulacros periódicos.

Esta propuesta busca fortalecer la seguridad de los trabajadores, mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias y cumplir con la normativa vigente del sector minero. Asimismo, constituye un modelo replicable para otras contratistas que operan en condiciones similares, contribuyendo a una gestión de riesgos más efectiva y preventiva en el sector.

Palabras clave: Seguridad minera, monóxido de carbono, plan de emergencia, contrata minera, análisis Bow Tie, ventilación, minería subterránea, riesgo ocupacional.

Emergency Plan Model Based on Bow tie Analysis for CO Gassing Risk Management in a Mining Contracting Company

ABSTRACT

This professional research work develops an emergency plan model aimed at reducing the risks associated with exposure to carbon monoxide (CO) in underground mining operations, specifically within a contracting company located in central Peru. Carbon monoxide represents a significant hazard to workers' health due to its toxicity, odorless and colorless nature, and its ability to accumulate rapidly in confined spaces such as mine tunnels, especially in areas with insufficient ventilation.

To address this issue, the Bow Tie analysis methodology is applied—a visual risk assessment tool that helps identify the causes of a critical event, the possible consequences, and the necessary control measures to prevent or mitigate the risk. The model developed in this study is based on a review of historical data, gas monitoring records, hazard assessments using IPERC matrices, and the creation of diagrams that clearly illustrate risk scenarios and control strategies.

The result is a specific emergency plan focused on CO exposure, improving the existing protocols by including concrete actions, assigned roles, required equipment, and evacuation and rescue procedures. In addition, enhancements are proposed such as automated gas sensors, targeted training sessions, and periodic emergency drills.

This proposal seeks to enhance worker safety, improve emergency response capabilities, and ensure compliance with current mining safety regulations. Moreover, the model is designed to be replicable for other contracting companies operating under similar conditions, contributing to a more effective and preventive risk management approach in the mining sector.

Keywords: Mining safety, carbon monoxide, emergency plan, contracting company, Bow Tie analysis, ventilation, underground mining, occupational risk

TSP G. Kcomt y M. Berrio.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	8%	5%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	2%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	www.trc.pe Fuente de Internet	1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
7	Llatasi, Fanny Luz Calizaya. "Propuesta e implementación de un sistema de gestión de seguridad para reducir los riesgos y peligros según ISO 45001 en la corporación Caliz S.A.C. - Puno", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1%
8	Submitted to upb Trabajo del estudiante	<1%
9	repositorio.usmp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	safetya.co Fuente de Internet	

Tabla de Contenido

1. CAPÍTULO 1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO 10

1.1 ANTECEDENTES 10

1.2 DESCRIPCION DE LA ORGANIZACIÓN 13

1.3 DEFINICION DEL PROBLEMA 18

1.4 OBJETIVOS 21

1.4.1 Objetivo General 21

1.4.2 Objetivos Específicos 21

1.5 INDICADORES DE ÉXITO 22

1.6 PLANIFICACION DEL PROYECTO 22

2. CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO 25

2.1. MARCO CONCEPTUAL 25

2.1.1. Seguridad y Salud Ocupacional 25

2.1.2. Riesgo 25

2.1.3. Peligro 25

2.1.4. Evaluación de Riesgos 25

2.1.5. IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles) 25

2.1.6. Jerarquía de Controles 26

2.1.7. Emanación de CO 26

2.1.8. PETS (Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro) 27

2.1.9. Gestión de Emergencias 27

2.1.10. Espacios Confinados 27

2.1.11. Plan de Emergencia 27

2.1.12. Simulacro 28

2.1.13. Ventilación Minera 28

2.1.14. Monitoreo de Gases 28

2.1.15. Análisis Bow tie 28

2.1.16. Indicadores de Seguridad 28

2.1.17. Liberación de gases por explosivos 29

2.2 ESTÁNDARES, FRAMEWORKS Y BUENAS PRÁCTICAS 30

2.3 BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO 32

3. CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO 33

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCION 33

3.1.1. Diagrama del Objetivo Especifico 1..... 33

3.1.2. Diagrama del Objetivo Especifico 2 34

3.1.3. Diagrama del Objetivo Especifico 3..... 34

3.1.4. Diagrama del Objetivo Especifico 4..... 35

3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCION..... 37

3.2.1. Metodología del Objetivo Especifico 1..... 37

3.2.2. Metodología del Objetivo Especifico 2..... 39

3.2.3. Metodología del Objetivo Especifico 3..... 44

3.2.4. Metodología del Objetivo Especifico 4..... 45

3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO 47

3.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS..... 63

3.4.1. OBJETIVO ESPECIFICO 1:..... 63

3.4.2. OBJETIVO ESPECIFICO 2:..... 64

3.4.3. OBJETIVO ESPECIFICO 3:..... 65

3.4.4. OBJETIVO ESPECIFICO 4:..... 65

4. CAPITULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 67

4.1 CONCLUSIONES..... 67

4.2 RECOMENDACIONES..... 68

INDICE DE TABLA

Tabla 1 Ruta para llegar a la unidad minera 14
Tabla 2 Indicadores de logro 22
Tabla 3 Resumen de Índices de Seguridad 47
Tabla 4 Tabla actividades con equipos móviles con altos niveles de CO 49
Tabla 5 Análisis comparativo del plan de emergencia anterior junto con análisis bow tie 55
Tabla 6 Controles designados en el plan de emergencia en base al analisis bow tie. 56
Tabla 7 Plan de acción propuesto-aplicada antes de la emergencia 57
Tabla 8 Plan de acción propuesto-aplicada durante la emergencia 57
Tabla 9 Plan de acción aplicada después de la emergencia 58
Tabla 10 Programa de capacitación 2025 con mejoras del análisis Bow tie 60
Tabla 11 Avance del programa de simulacros 2025 61
Tabla 12 Porcentaje por encima de los Limites Permisibles en Actividades Criticas 63
Tabla 13 Porcentaje por encima de los Limites Permisibles en Equipos Mecanizados 63
Tabla 14 Índice de Riesgo de Actividades Criticas Identificadas 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Acceso a la unidad minera desde Cerro de Pasco 14
Figura 2 Zona del Porvenir, con cortes en el grupo Pucará 15
Figura 3 Columna estratigráfica del Complejo Pasco 16
Figura 4 Árbol de problema 19
Figura 5 Flujograma de la planificación del proyecto 24
Figura 6 Fórmula del índice de accidentabilidad 29
Figura 7 Fórmula del índice de frecuencia 29
Figura 8 Fórmula del índice de severidad 29
Figura 9 Diagrama Frameworks 31
Figura 10 Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 1 34
Figura 11 Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 2 34
Figura 12 Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 3 35
Figura 13 Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 4 35
Figura 14 Diagrama de Flujo de la Propuesta 36
Figura 15 Reporte consolidado de seguridad 38
Figura 16 Formato de monitoreo de Monóxido de carbono y otros gases en las labores mineras 39
Figura 17 Formato de IPERC continuo 41
Figura 18 Matriz IPERC linea base 42
Figura 19 Programa anual de inspecciones de monitoreo de gases 43
Figura 20 Representación gráfica del analisis Bow tie 44
Figura 21 Formato de Plan de respuesta a emergencia 46
Figura 22 Indicadores de seguridad 2024 47
Figura 23 Estadística de niveles más elevados de CO por áreas 48
Figura 24 Gráfico resumen de actividades críticas con exposición de CO 48
Figura 25 Promedio de niveles de CO por equipos móviles en interior mina 49
Figura 26 Promedio de Monóxido de Carbono (CO) en actividades con equipos móviles 50
Figura 27 Actividades críticas identificadas con exposición de CO en Voladura 50
Figura 28 Actividades críticas identificadas con exposición de CO en limpieza y acarreo 51
Figura 29 Actividades críticas identificadas con exposición de CO en perforación de frentes 51
Figura 30 Evaluación de riesgo 51
Figura 31 Tabla de resumen de Actividades Criticas según Áreas con Mayor CO 52
Figura 32 Analisis Bow Tie 53
Figura 33 Indicadores de seguridad 2025 62

1. CAPÍTULO 1
DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

La minería subterránea impone condiciones operativas de alto riesgo, particularmente en lo referido a la exposición de los trabajadores a contaminantes gaseosos producto de la actividad mecanizada. Entre estos, el monóxido de carbono (CO) destaca por su elevada toxicidad, su carácter inodoro e incoloro, y su capacidad de interferir en el transporte de oxígeno a nivel celular. En escenarios confinados, como los que caracterizan a las labores subterráneas, la presencia de CO puede alcanzar niveles críticos con rapidez, generando un riesgo latente de intoxicación aguda e incluso fatal. En contratas mineras, donde los recursos técnicos y organizacionales suelen ser limitados en comparación con la operación principal, la carencia de planes específicos para gestionar este tipo de contingencias representa una vulnerabilidad estructural. Por tanto, se requiere el desarrollo de modelos de emergencia que no solo contemplen la reacción ante el evento, sino que integren una visión preventiva y sistémica del riesgo.

En este contexto, una de las fuentes principales de emisión de CO en minas subterráneas corresponde al uso intensivo de maquinaria con motores de combustión interna. La gestión inadecuada del caudal de aire fresco para diluir estos gases, sumada a sistemas de ventilación que operan al límite de su capacidad, incrementa significativamente la exposición del personal a condiciones peligrosas. Estudios recientes evidencian que muchas contratas no cuentan con mecanismos efectivos de monitoreo, ni con procedimientos claros para actuar frente a una acumulación repentina de CO. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de contar con un modelo de gestión de riesgos que articule la identificación de peligros, la evaluación de escenarios críticos y la implementación de barreras de control adecuadas. En esta línea, se reconoce el potencial del análisis Bow tie como herramienta metodológica para estructurar un plan de emergencia específico frente a la amenaza que representa la emanación de CO, adaptado a las condiciones reales de una contratista minera (Grishin et al., 2020).

La etapa de voladura en minería subterránea representa una fuente crítica de generación de monóxido de carbono (CO), especialmente cuando se utilizan explosivos que no garantizan una combustión completa. Estudios como el de Martel et al. (2004) han

demostrado que el CO puede migrar a través de fracturas inducidas en la roca y alcanzar espacios confinados alejados del sitio de detonación, representando un riesgo directo de intoxicación para los trabajadores. Este fenómeno se agrava cuando las condiciones geológicas, como la presencia de material poco permeable o la cercanía a zonas subterráneas cerradas, facilitan la acumulación del gas. Las pruebas de campo realizadas por estos autores revelaron que, en ciertos casos, las concentraciones de CO superaron los 20 000 ppm tras una voladura, nivel altamente tóxico que requiere acciones inmediatas de evacuación y ventilación.

La complejidad de estos accidentes, sumada a la multiplicidad de causas y consecuencias, ha llevado a la necesidad de utilizar metodologías visuales y estructuradas para la gestión del riesgo. En este contexto, la metodología Bow Tie se ha consolidado como una herramienta eficaz para identificar los eventos causales de un accidente y las medidas de control asociadas a cada fase del riesgo. Zhang et al. (2017) explican que este enfoque permite representar de manera clara tanto los eventos iniciadores (a través del análisis de árbol de fallas) como las posibles consecuencias (mediante el árbol de eventos), facilitando así la identificación de barreras preventivas y mitigadoras. La metodología ha demostrado ser efectiva en contextos reales, como en el caso de una mina china donde se aplicó el modelo para analizar el derrumbe de rocas presentado en labores horizontales, logrando mapear causas inmediatas y establecer acciones correctivas con base en estándares de seguridad nacionales,

Más allá de su valor descriptivo, también permite estructurar un sistema de gestión del riesgo ocupacional que considere las particularidades del entorno laboral minero, incluyendo factores técnicos, humanos y organizacionales. Bazaluk et al. (2024) proponen una versión ampliada del modelo tradicional, integrando variables del contexto interno y externo que influyen directamente en la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los eventos peligrosos. Esta adaptación no solo mejora la precisión del análisis, sino que también permite cuantificar el riesgo acumulado mediante escalas que consideran la interacción simultánea de múltiples factores, como condiciones ambientales adversas, fallas operativas o deficiencias ergonómicas. Aplicado a escenarios de minería subterránea, este enfoque posibilita la identificación anticipada de combinaciones de factores críticos que podrían superar los umbrales aceptables de riesgo, proporcionando una base sólida para implementar medidas preventivas antes de que se materialice el evento. En consecuencia, esta técnica se consolida no solo como una herramienta de

análisis, sino también como un soporte operativo para la toma de decisiones dentro de los sistemas de seguridad y salud ocupacional.

Recientes investigaciones han apostado por su integración con técnicas de análisis cuantitativo para fortalecer su utilidad en la identificación de puntos críticos. Xu y Xu (2018) proponen un modelo compuesto que combina el análisis de relaciones grises con el modelo Bow Tie, permitiendo evaluar la seguridad de operaciones mineras a través de indicadores ponderados objetiva y subjetivamente. Una vez identificados los eslabones débiles mediante evaluación estadística, utilizado para descomponer estos puntos críticos en sus causas raíz y consecuencias posibles, y establecer medidas preventivas y mitigadoras con mayor precisión. Esta integración aporta un valor significativo a la gestión de la seguridad y salud ocupacional, ya que permite no solo visualizar las amenazas, sino también priorizarlas según su impacto real en la seguridad del trabajador. En este sentido, la metodología se convierte en una herramienta operativa y estratégica para el diseño de planes de emergencia que respondan a la realidad dinámica y multidimensional de las faenas mineras subterráneas.

Complementando este enfoque, Matsimbe, et al. (2020) aplicaron la metodología Bow Tie en el análisis de accidentes ocurridos en la mina de carbón Kaziwiziwi, en Malawi, destacando su utilidad como herramienta visual para la identificación de peligros, eventos principales, barreras preventivas y de mitigación, así como factores de escalamiento. Su estudio demostró que el modelo Bow Tie no solo facilita una comprensión integral de los escenarios de riesgo, sino que también permite identificar vacíos en la gestión de seguridad, fortaleciendo la planificación de respuestas ante emergencias. Al implementar esta metodología, los investigadores lograron descomponer dos accidentes fatales en sus elementos causales, revelando deficiencias en las barreras existentes y proponiendo mejoras prácticas en el diseño de controles. Esta evidencia empírica refuerza la aplicabilidad del Bow Tie como una herramienta eficaz tanto para el análisis retrospectivo de incidentes como para la prevención proactiva en contextos mineros complejos, donde la integración de múltiples factores operacionales y humanos exige estrategias visuales y sistemáticas de gestión del riesgo.

Adicional a ello, Ozfirat, et al. (2023) aplicaron esta metodología para analizar los riesgos prioritarios en las plantas de superficie de una operación minera, integrándola con la

matriz de riesgos como técnica preliminar. El estudio identificó que el área de almacenamiento y el entorno laboral presentaban el mayor puntaje de riesgo, por lo que se desarrolló un análisis detallado Bow Tie que permitió descomponer este evento principal en amenazas específicas, tales como el diseño inadecuado del área de stock, deficiencias en la iluminación nocturna, falta de mantenimiento en grúas y ambientes polvorientos. Mediante la representación gráfica de causas, barreras preventivas y reactivas, consecuencias y factores de escalamiento, los autores lograron visualizar los puntos críticos del sistema y proponer controles efectivos. Esta aplicación práctica demuestra cómo el modelo Bow Tie no solo facilita la comprensión y gestión proactiva del riesgo, sino que también permite una toma de decisiones más informada en entornos complejos y dinámicos como la minería a cielo abierto y subterránea.

Por otro lado, Tong et al. (2025) plantean una evolución en el uso del modelo Bow Tie al integrarlo con redes bayesianas y lógica difusa para enfrentar la incertidumbre inherente a los eventos de ingreso de agua en minas de carbón. Este enfoque Bow Tie-Bayesiano permite no solo identificar y visualizar los factores de riesgo clave, sino también realizar inferencias causales y diagnósticas, evaluar la sensibilidad de los factores y predecir trayectorias críticas de desarrollo del accidente. A diferencia de su uso tradicional, donde el Bow Tie se limita a representar vínculos causales y barreras de seguridad, en este caso se convierte en el núcleo estructural de una arquitectura analítica más robusta que incorpora datos históricos, juicios expertos y simulaciones probabilísticas. Esta transformación metodológica es especialmente relevante en escenarios de alta complejidad como la minería subterránea, donde múltiples factores humanos, técnicos y ambientales interactúan de forma no lineal. El estudio concluye que esta integración mejora significativamente la capacidad para prevenir accidentes, optimizar las respuestas post-evento y diseñar estrategias de control más efectivas basadas en evidencia cuantificable y rutas causales verificadas.

1.2 DESCRIPCION DE LA ORGANIZACIÓN

Área de estudio

1.2.1. Ubicación

La operación subterránea se encuentra ubicada en el Complejo Cerro Pasco, en el centro de Perú. Se halla en el distrito de San Francisco de Asís de Yarusyacán, a 13 km de la ciudad de Cerro de Pasco, justo al kilómetro 340 de la Carretera

Central (que va de Lima a Huánuco). Se ubica en la Cordillera Central, esto afecta directamente a las comunidades de Parán, Lacsanga y Santo Domingo de Apache.

1.2.2. Acceso

Para acceder a la unidad minera desde Lima, el tiempo aproximado es de 6h con 30 min y se sigue la siguiente ruta:

Tabla 1

Ruta para llegar a la unidad minera

RUTA	DISTANCIA
Lima – Cerro de Pasco	251 km
Cerro de Pasco – Unidad Minera	13.2 km

Nota. La tabla muestra la ruta desde Cerro de Pasco para llegar a la unidad minera

Figura 1

Acceso a la unidad minera desde Cerro de Pasco

Nota. Adaptado de "Ruta de acceso de Cerro de Pasco a la unidad El Porvenir", por Google Maps, 2025

1.2.3. Geología regional

La geología del Complejo Pasco está compuesta por una secuencia que inicia con rocas del Grupo Mitu (Triásico). Seguidamente, se encuentra el Grupo Pucará, de edad Triásico-Jurásica, dentro de este se destaca la Formación Chambará, subdividida en cuatro niveles (A, B, C y D), los cuales se distinguen por sus características litológicas y estratigráficas (Lavado M., 2014; Dávila D. et al., 2016).

Encima del Grupo Pucará, de forma discordante, se observa el Grupo Goyllarisquizga (Cretácico), compuesto por rocas silicoclásticas con

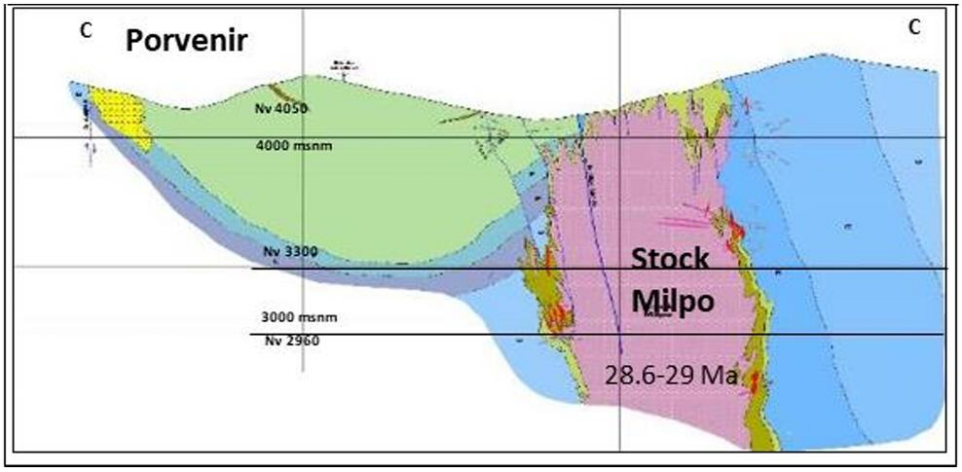
intercalaciones de sills andesíticos. A continuación, se encuentra la Formación Chulec, también del Cretácico, compuesta principalmente por capas calcáreas.

De manera discordante sobre todas estas unidades anteriores, se encuentra la Formación Pocobamba, de edad Paleoceno-Eoceno.

Dentro del complejo Pasco se encuentran 3 cuerpos intrusivos como el stock Milpo, Santa Bárbara y San Gerardo, cuya edad varía entre 28.6 y 29.4 millones de años (U-Pb, Meffre, S. & Thompson, J., 2016). Estos intrusivos cortan al Grupo Pucará, originando mineralización del tipo skarn y generando vetas de sulfuración intermedia, particularmente asociadas al intrusivo San Gerardo, en la zona de Atacocha.

Figura 2

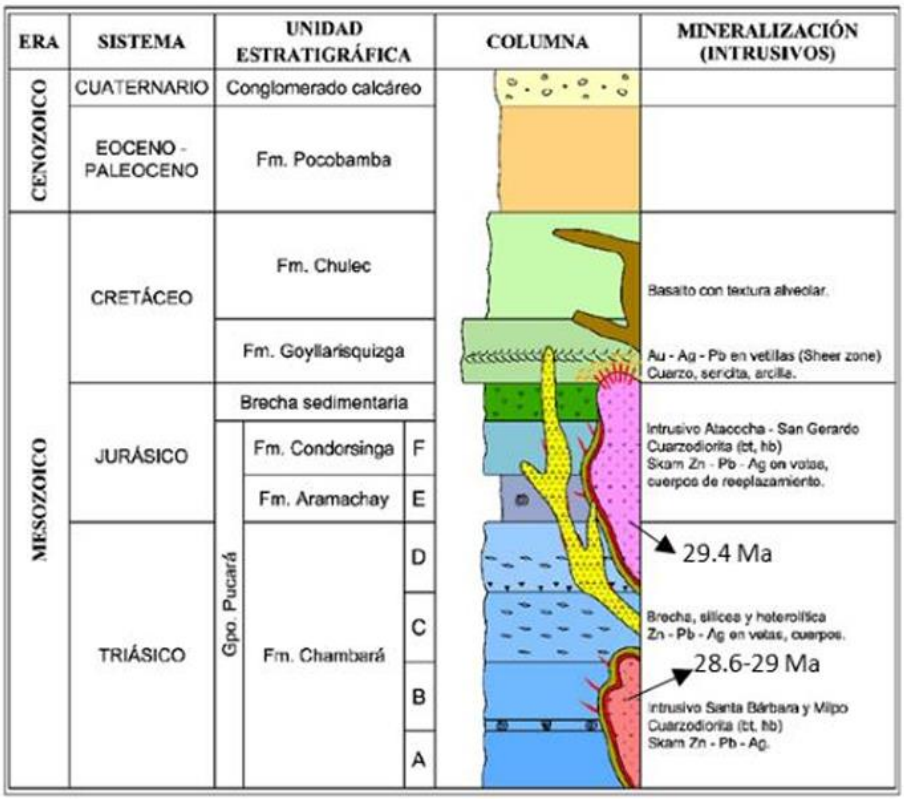
Zona del Porvenir, con cortes en el grupo Pucará



Nota. Ubicación de la zona donde se encuentra la operación minera a tratar, vista en Sección C-C´, 2019

Figura 3

Columna estratigráfica del Complejo Pasco



Nota. Se muestra la era, sistema, columna y mineralización de los intrusivos, por Lavado M. 2014, Davila D. et al, 2019

1.2.4. Geología local

La región donde se ubica la unidad minera está caracterizada por una secuencia de formaciones geológicas que incluyen:

- Grupo Pucará (Triásico Superior - Cretácico Inferior): Compuesto principalmente por calizas con rumbo N20W y buzamientos mayores de 50° hacia el noreste.
- Grupo Goyllarisquizga (Cretácico Inferior): Secuencia arenácea que descansa en discordancia sobre el Grupo Pucará.
- Formación Machay: Calizas que se encuentran en discordancia sobre el Grupo Goyllarisquizga.

Estas formaciones están intruidas por cuerpos hipoabisales de composición dacítica y andesítica. (Róger Cabos Y., 2005)

Un rasgo estructural significativo en la zona es la falla regional Milpo-Atacocha, que influye en la geología local.

Este yacimiento es un depósito típico de skarn, donde la mineralización se desarrolla en el contacto entre las calizas del Triásico Superior y rocas intrusivas de composición granodiorítica a dacítica. Esta mineralización se presenta tanto en el exoskarn (formado en las calizas) como en el endoskarn (dentro de las rocas intrusivas). Además, se identifican vetas y cuerpos tipo manto de reemplazo, con una menor presencia de mineralización diseminada en las unidades intrusivas. (Ingemmet, 2025)

Al oeste de la falla Milpo-Atacocha, dentro del Grupo Goyllarisquizga, la mineralización se caracteriza por vetas y diseminaciones

1.2.5. Clima y relieve

El clima en la zona donde se desarrolla la actividad minera se caracteriza por ser frío y húmedo, propio de las elevadas cumbres y punas del departamento de Pasco. Las temperaturas durante la noche suelen mantenerse bajas, mientras que en el día pueden alcanzar valores superiores a los 15°C. Un ejemplo representativo es Cerro de Pasco, situado a más de 4,300 metros sobre el nivel del mar, donde la temperatura máxima anual promedio es de 12.4°C, la mínima promedio se sitúa en -0.6°C, y la precipitación acumulada anual alcanza los 1,182.7 msnm. Además, en estas zonas altas es frecuente la presencia de precipitaciones sólidas, como nieve o granizo, especialmente entre julio y octubre.

Por otra parte, el relieve en la zona de la operación minera es accidentado, caracterizado por valles interandinos de origen fluvio-glaciar con pendientes abruptas. Esta topografía es resultado de una intensa actividad tectónica seguida de profundos procesos erosivos. La elevación más destacada alcanza los 4,380 metros sobre el nivel del mar. Gran parte del yacimiento está cubierto por material morrénico, acompañado de una vegetación típica de la región.

1.2.6. Área de desarrollo del trabajo

El área de trabajo donde se pondrá en práctica el modelo de Plan de Emergencia Basado en Análisis Bow tie para la Gestión de Riesgos por emanación de CO será dentro de las labores subterráneas horizontales de una contrata minera cercana a la unidad minera el porvenir.

1.3 DEFINICION DEL PROBLEMA

a. Identificación y formulación del problema

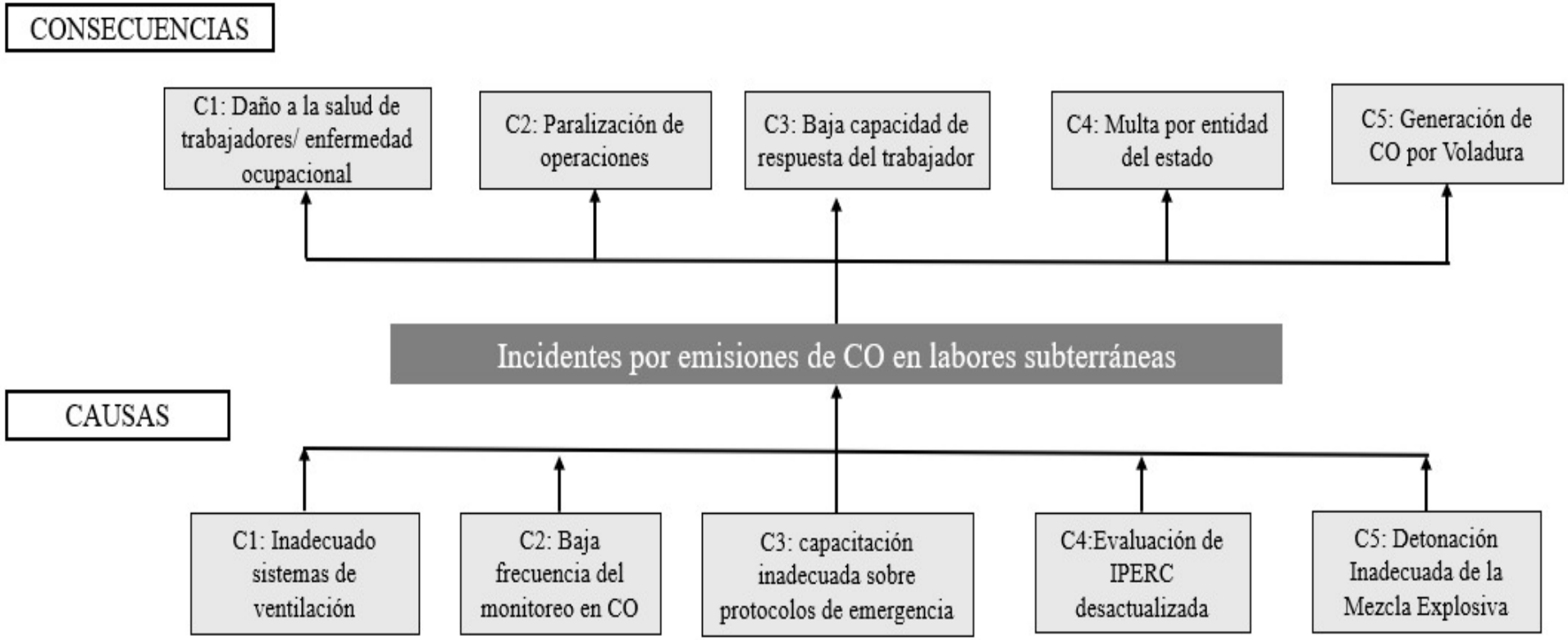
En las operaciones mineras subterráneas, uno de los riesgos críticos asociados a la seguridad ocupacional es la emanación no controlada de monóxido de carbono (CO), un gas tóxico, incoloro e inodoro que, al combinarse con la hemoglobina, impide el transporte adecuado de oxígeno en la sangre. Este compuesto puede alcanzar concentraciones peligrosas en espacios confinados, especialmente en zonas con poca ventilación o circulación de aire, generando ambientes que comprometen gravemente la salud y seguridad de los trabajadores. En una contrata minera, la gestión de este tipo de riesgo requiere herramientas sistemáticas y preventivas, ya que las condiciones operativas están sujetas a variaciones en los protocolos de seguridad establecidos por la empresa principal. Esto hace necesaria una gestión integral del riesgo basada en la coordinación efectiva, el monitoreo continuo y una sólida capacidad de respuesta ante emergencias.

Actualmente, en diversas contratas mineras se evidencia la ausencia de un sistema estructurado que permita identificar, analizar y controlar de manera eficiente los escenarios de riesgo asociados a la emanación de CO. Esta deficiencia limita la capacidad de respuesta ante eventos críticos y expone tanto al personal como a los activos a consecuencias potencialmente catastróficas, como intoxicaciones agudas por exposición al CO, pérdidas humanas, interrupciones operativas y sanciones por parte de entidades fiscalizadoras.

El Análisis Bow tie es una metodología que combina el análisis de causa-raíz con el análisis de consecuencias. Su objetivo es mostrar de manera clara el nivel de riesgo y ayudar a identificar y fortalecer las medidas preventivas y de mitigación. Este modelo busca mejorar la forma en que se anticipan, enfrentan y controlan los eventos relacionados con gases tóxicos como el CO, a través de una herramienta visual y operativa que facilite la toma de decisiones, fortalezca la capacitación del personal y asegure el cumplimiento normativo, especialmente con lo establecido en el D.S. 024-2016-EM y sus modificatorias.

En resumen, la formulación del problema se basa en ¿Cómo implementar un plan de emergencia, basado en el análisis Bow tie, que permita gestionar de forma eficaz el riesgo por emanación de CO en una contratista minera?

Figura 4
Árbol de problema



Nota. La presente figura, muestra las causas y efectos del problema central del proyecto de investigación.

b. Justificación teórica, justificación Metodológica y justificación práctica

Justificación teórica

El análisis Bow tie se presenta como una herramienta metodológica consistente para el diseño de un plan de emergencia orientado a la gestión del riesgo por emanación de monóxido de carbono (CO). Esta técnica integra los enfoques del análisis de causas (como el árbol de fallas) y de consecuencias (similar al árbol de eventos), permitiendo una representación gráfica clara de los escenarios de riesgo, desde sus causas generadoras hasta sus impactos potenciales, junto con las barreras preventivas y de mitigación asociadas. Su aplicación se fundamenta en los principios de la gestión del riesgo operacional y se encuentra alineada con los lineamientos establecidos en los sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional conforme a la norma ISO 45001. Además, su carácter visual y didáctico facilita una comprensión integral del riesgo por parte de los distintos actores organizacionales, promoviendo la identificación de puntos críticos en los procesos y fortaleciendo la capacidad de respuesta frente a eventos no deseados.

Justificación Metodológica

Desde el punto de vista metodológico, el análisis Bow tie proporciona una estructura clara y visual que facilita la identificación de peligros, causas, consecuencias y barreras de control, lo cual es esencial en la construcción de planes de emergencia eficaces. Esta herramienta metodológica permite no solo mapear riesgos, sino también evaluar la efectividad de los controles existentes y detectar fallas en la gestión actual del riesgo. Su implementación en una contrata minera permite estandarizar la evaluación de escenarios de emergencia, mejorar la planificación operativa y fomentar la participación del personal en el proceso. Además, su enfoque visual favorece la comprensión del riesgo en todos los niveles jerárquicos, desde operarios hasta jefaturas, promoviendo una toma de decisiones más informada y proactiva.

Justificación práctica

El desarrollo de un Modelo de Plan de Emergencia se sustenta en la normativa y los estándares vigentes, tales como el Decreto Supremo N.º 024-2016-EM (Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería), que establece la obligación de que las empresas mineras y contratistas cuenten con planes de emergencia específicos, actualizados y adecuados a sus riesgos operativos. Asimismo, la norma internacional ISO 45001 promueve un enfoque preventivo basado en la identificación, evaluación y control de riesgos, fortaleciendo así la gestión integral de la seguridad.

Adicionalmente, el D.S. N.º 024-2016-EM y sus modificatorias, en conjunto con los estándares técnicos sobre exposición a gases peligrosos, como el monóxido de carbono (CO), refuerzan la necesidad de implementar metodologías eficaces para la prevención, mitigación y control de riesgos en minería subterránea. La evidencia documentada de accidentes relacionados con la acumulación de gases, así como los casos de aplicación del análisis Bow Tie en escenarios como fallas de ventilación o riesgos asociados a voladuras, respaldan la pertinencia y efectividad de este enfoque. Herramientas tecnológicas como el software BowTieXP, los sistemas de monitoreo continuo de gases, y los protocolos de capacitación y simulacros de emergencia, constituyen recursos clave para facilitar la implementación operativa del modelo propuesto. La participación de los comités de seguridad minera, brigadas de emergencia y trabajadores capacitados, en coordinación con el titular minero, garantiza una ejecución efectiva del plan. Finalmente, los beneficios prácticos esperados incluyen la reducción de tiempos de respuesta ante emergencias, la disminución de hallazgos en las auditorías de seguridad, menor número de incidentes y desviaciones de los requisitos del DS 024-2016-EM, así como una mejora en la cultura de seguridad por parte de los trabajadores, lo que demuestra la efectividad y necesidad de implementar este modelo en la contrata minera.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Proponer un modelo de Plan de Emergencia basado en el análisis Bow tie para la gestión de riesgos por emanación de CO en una contrata minera al centro del Perú

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar las áreas críticas que presenten incidentes por emisión de CO en interior mina.
- Analizar los factores de riesgo que pueden generar eventos de emisión de CO
- Representar gráficamente las causas, consecuencias y controles en el Análisis Bow tie
- Diseñar un modelo de plan de emergencia basado en los resultados del análisis Bow tie.

1.5 INDICADORES DE ÉXITO

Tabla 2

Indicadores de logro

OBJETIVO ESPECIFICO	INDICADOR DE LOGRO
1. **Determinar las actividades críticas que presenten incidentes por exposición de CO en interior mina**	• Índices de seguridad • Gráfica comparativa de niveles de CO por actividad o labor
2. **Identificar los peligros que pueden generar incidentes por la inhalación de CO**	• Matriz IPERC- LINEA BASE • IPERC continuo • Porcentaje de cumplimiento del programa de Inspecciones
3. **Representar gráficamente las causas, consecuencias y controles en el Análisis Bow tie**	• Diagrama Bow tie.
4. **Diseñar un modelo de plan de emergencia basado en los resultados del análisis Bow tie**	• Análisis comparativo entre el plan de emergencia anterior y el actual

1.6 PLANIFICACION DEL PROYECTO

La fase inicial del proyecto se centrará en el levantamiento de información relevante sobre los riesgos asociados a la emanación de CO en la contrata minera. Esto incluirá la revisión de la documentación histórica sobre incidentes previos relacionados con la acumulación de CO y la identificación de las áreas críticas dentro de la mina que están más expuestas a este riesgo. Se revisarán las cartillas IPERC del personal de seguridad y operativos para obtener datos directos sobre las condiciones que favorecen la acumulación de CO. Además, se evaluarán los sistemas de ventilación y monitoreo de gases presentes en las instalaciones.

Luego, se procederá a identificar y analizar el riesgo utilizando el Análisis Bow tie. Este análisis permitirá identificar las causas y consecuencias del evento crítico, que es la emanación de CO y las barreras existentes para prevenir o mitigar dicho riesgo. Se definirá el evento crítico (la liberación o acumulación peligrosa de CO) y se elaborará un

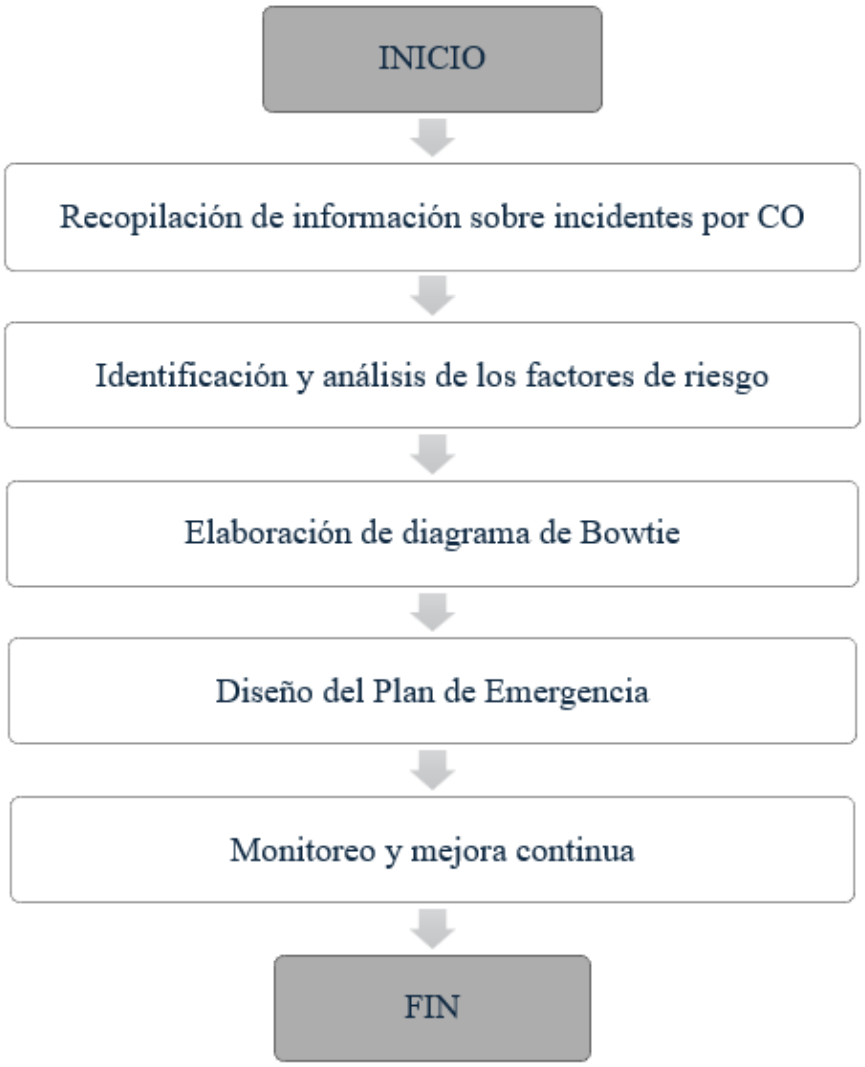
diagrama Bow tie que representará gráficamente las relaciones entre las causas, consecuencias y barreras de control.

Seguidamente, se procederá al diseño del plan de emergencia, el cual incluirá procedimientos específicos para la evacuación, protocolos de respuesta ante la exposición al CO y la asignación de roles y responsabilidades para cada miembro del equipo en caso de una emergencia. También se establecerán los mecanismos de comunicación durante una emergencia y se definirá el recurso necesario para implementar el plan (como equipos de protección personal y herramientas de monitoreo). Además, se desarrollarán programas de capacitación para los trabajadores y se organizarán simulacros para evaluar la efectividad del plan.

Una vez diseñado el plan de emergencia, se procederá a su implementación dentro de la contrata minera. Esto incluirá la ejecución de los procedimientos establecidos, la realización de simulacros prácticos con el personal operativo, y la evaluación del desempeño durante los simulacros. Los resultados obtenidos en los simulacros servirán para identificar posibles ajustes en el plan y garantizar que sea adecuado para enfrentar situaciones reales de emergencia. Además, se llevará a cabo un monitoreo continuo del plan, para verificar su efectividad y realizar ajustes según sea necesario.

Figura 5

Flujograma de la planificación del proyecto



Nota. La presente figura, muestra las etapas de planificación del proyecto a realizar de inicio a fin

2. CAPÍTULO 2
MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Seguridad y Salud Ocupacional

La Seguridad y Salud Ocupacional (SSO) es el conjunto de políticas, procedimientos y prácticas destinadas a proteger la vida, la salud y el bienestar de los trabajadores durante el desempeño de sus actividades laborales. Su objetivo es prevenir accidentes de trabajo, enfermedades ocupacionales y daños a la salud, promoviendo ambientes de trabajo seguros y saludables. (ISO, 2018)

2.1.2. Riesgo

El riesgo es definido como la posibilidad de que ocurra un evento peligroso, que pueda producir daño a las personas, al medio ambiente o a los activos, combinado con la severidad de las consecuencias de dicho evento. (D.S. N° 024-2016-EM, 2016)

2.1.3. Peligro

Un peligro es una fuente, situación o acto que tiene el potencial de causar daño en términos de lesiones, enfermedades, daño a la propiedad, al ambiente laboral o una combinación de estos. (D.S. N° 024-2016-EM, 2016)

2.1.4. Evaluación de Riesgos

La Evaluación de Riesgos es el proceso sistemático de identificar, analizar y valorar los peligros presentes en una actividad, para determinar la probabilidad y consecuencias de la ocurrencia de eventos no deseados.

2.1.5. IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles)

El IPERC es una metodología estructurada que permite identificar peligros, evaluar los riesgos asociados y establecer controles para eliminarlos o minimizarlos de manera sistemática. Dentro de un Modelo de Plan de Emergencia mediante análisis Bow tie para gestionar los riesgos de emanación de CO en una contrata minera, el IPERC cumple un rol fundamental al:

- Detectar las fuentes de generación o acumulación de CO en las labores subterráneas.

- Evaluar la probabilidad y severidad de incidentes derivados de liberaciones de gas.
- Determinar los controles críticos (preventivos y mitigadores) que deben implementarse.
- Servir de base para construir el diagrama Bow tie, organizando los eventos iniciadores, amenazas, consecuencias y barreras de control.
- Integrarse al Programa Anual de Seguridad y Salud Ocupacional y actualizarse ante cambios en procesos, incidentes o nueva normativa, como exige el Artículo 97 del D.S. N° 024-2016-EM.

2.1.6. Jerarquía de Controles

Es un principio fundamental en la gestión de riesgos que establece un orden de prioridad para eliminar o controlar peligros en el lugar de trabajo. Para el caso de emanación de CO consiste en aplicar las medidas de control en el siguiente orden

- **Eliminación:** Rediseñar procesos para evitar acumulaciones de CO, por ejemplo, modificando secuencias de ventilación o minimizando actividades que liberen gases.
- **Sustitución:** Utilizar métodos de trabajo que reduzcan la generación de gases, como emplear tecnologías de minería mecanizada que no generen subproductos gaseosos.
- **Controles de Ingeniería:** instalar sistemas de ventilación forzada adecuados., incorporar detectores automáticos de CO interconectados a alarmas o implementar sistemas de ventilación de emergencia activados automáticamente.
- **Controles Administrativos:** Aplicar PETS (Procedimientos Escritos de Trabajo Seguro) específicos para operaciones en espacios confinados, capacitar periódicamente a los trabajadores en detección de gases y uso de sistemas de emergencia o señalizar adecuadamente las zonas de riesgo.
- **Equipos de Protección Personal (EPP):** Dotar a los trabajadores de detectores personales de CO y equipos de respiración autónoma en zonas críticas.

2.1.7. Emanación de CO

La emanación de monóxido de carbono (CO) en minería subterránea hace referencia a la liberación de este gas tóxico e incoloro en el interior de labores mineras subterráneas, generalmente como resultado de combustiones incompletas provocadas por explosivos,

incendios, equipos diésel, reacciones químicas u oxidación. Debido a las condiciones de confinamiento, escasa ventilación y acumulación de gases, el CO representa un riesgo crítico para la salud y seguridad de los trabajadores, ya que puede provocar intoxicación aguda, pérdida de conciencia o muerte, al interferir con el transporte de oxígeno en el cuerpo.

2.1.8. PETS (Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro)

El Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro (PETS) es un documento técnico que detalla de manera muy precisa y particularizada cómo realizar actividades críticas o de alto riesgo, tales como trabajos en espacios confinados, manipulación de sustancias peligrosas (como el CO), ingreso a áreas de ventilación restringida, trabajos de rescate o evacuación (Instituto de Seguridad Minera [ISEM], 2020).

2.1.9. Gestión de Emergencias

Es el proceso mediante el cual se coordinan esfuerzos antes, durante y después de un evento crítico para minimizar sus impactos sobre las personas, el ambiente y las operaciones. Incluye las fases de prevención, preparación, respuesta y recuperación (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2020).

2.1.10. Espacios Confinados

Son áreas limitadas o cerradas que no están diseñadas para una ocupación continua de personas, pero que permiten el acceso ocasional para realizar trabajos específicos. Estos espacios suelen tener entradas y salidas restringidas, ventilación limitada y pueden acumular gases peligrosos como CO, lo que representa riesgos graves para la vida y la salud de los trabajadores. En minería, los espacios confinados como túneles, galerías o cámaras subterráneas requieren procedimientos especiales de control, monitoreo de gases y planes de emergencia, siendo un aspecto crítico en la gestión de riesgos mediante el análisis Bow tie (Instituto de Seguridad Minera [ISEM], 2017).

2.1.11. Plan de Emergencia

Es un documento formal que establece los procedimientos y recursos necesarios para actuar ante eventos críticos que puedan afectar la seguridad de los trabajadores o las operaciones. Este plan define las responsabilidades, rutas de evacuación, sistemas de alerta, centros de reunión seguros, protocolos de rescate y comunicación. Su propósito es minimizar las consecuencias del evento y facilitar una recuperación rápida y ordenada de las actividades (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2020).

2.1.12. Simulacro

Un simulacro es un ejercicio planificado y controlado que recrea una situación de emergencia con el objetivo de entrenar al personal, evaluar la efectividad de los procedimientos, validar los tiempos de respuesta y corregir fallos en la gestión de emergencias. En minería, los simulacros son esenciales para preparar a los trabajadores ante riesgos críticos como la emanación de CO asegurando que sepan cómo actuar rápidamente para proteger su vida y la de sus compañeros.

2.1.13. Ventilación Minera

Es el proceso de suministrar aire fresco y extraer el aire viciado en las instalaciones subterráneas de una mina, con el objetivo de mantener un ambiente seguro para los trabajadores. Esto incluye el control de gases peligrosos como el CO, metano y otros contaminantes, la regulación de la temperatura y la humedad, y la provisión de oxígeno suficiente para evitar condiciones de asfixia o intoxicación (Instituto de Seguridad Minera [ISEM], 2020).

2.1.14. Monitoreo de Gases

Es el proceso continuo de medir y controlar la concentración de gases peligrosos en el ambiente de trabajo, especialmente en espacios confinados o subterráneos, como las minas. Este monitoreo se realiza mediante el uso de sensores y detectores que alertan sobre la presencia de gases, monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) y otros gases tóxicos o explosivos.

2.1.15. Análisis Bow tie

El análisis Bow tie es una herramienta de gestión de riesgos que proporciona una representación gráfica clara del evento crítico, conectando las causas que lo pueden originar (lado izquierdo) con las consecuencias que resultan si ocurre (lado derecho). Entre ambos lados se ubican las barreras preventivas (antes del evento) y las barreras de mitigación (después del evento). La estructura del Bow tie ayuda a visualizar las defensas existentes, identificar debilidades en el sistema y fortalecer la capacidad de respuesta ante emergencias.

2.1.16. Indicadores de Seguridad

Los indicadores de seguridad permiten cuantificar el desempeño de la organización en la prevención de incidentes laborales, midiendo de forma objetiva los resultados obtenidos y facilitando la toma de decisiones para mejorar la gestión de riesgos

a. **Índice de Accidentabilidad (IA)**

Es un indicador general que refleja el número total de accidentes registrados en un periodo determinado, en relación con el total de trabajadores o el número de horas hombre trabajadas. Permite tener una visión global del nivel de seguridad en la operación minera.

Figura 6
Fórmula del índice de accidentabilidad

$$Indice\ de\ Accidentabilidad = \frac{Indice\ de\ Frecuencia\ \times Indice\ de\ Seguridad}{1000}$$

Nota. Formula extraída del DS 024-2016-EM

b. **Índice de Frecuencia (IF)**

Mide la cantidad de accidentes incapacitantes ocurridos en relación con el total de horas hombre trabajadas, expresado por un millón de horas. Indica con qué frecuencia ocurren accidentes.

Figura 7
Fórmula del índice de frecuencia

$$IF = \frac{\text{Nº accidentes x 1'000,000}}{\text{Horas hombre trabajadas}} \quad \text{(Nº Accidentes = Incapacitantes + Mortales)}$$

Nota. Formula extraída del DS 024-2016-EM

c. **Índice de Severidad (IS)**

Mide el impacto o gravedad de los accidentes en función del número de días perdidos debido a lesiones, en relación con el total de horas trabajadas. Expresa cuánto afecta un accidente a la operación.

Figura 8
Fórmula del índice de severidad

$$IS = \frac{\text{Nº días perdidos o cargados x 1'000,000}}{\text{Horas hombre trabajadas}}$$

Nota. Formula extraída del DS 024-2016-EM

2.1.17. Liberación de gases por explosivos

Se refiere a la emisión de productos gaseosos generados como resultado de la detonación de sustancias explosivas utilizadas para fracturar roca. Durante este proceso, la reacción química de la explosión produce una mezcla de gases que pueden incluir monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH_3) y

otras sustancias potencialmente tóxicas. Estos gases, conocidos como gases de voladura, pueden poner en riesgo la salud de los trabajadores si no se controlan adecuadamente mediante ventilación, tiempos de espera y monitoreo de aire.

2.2 ESTÁNDARES, FRAMEWORKS Y BUENAS PRÁCTICAS

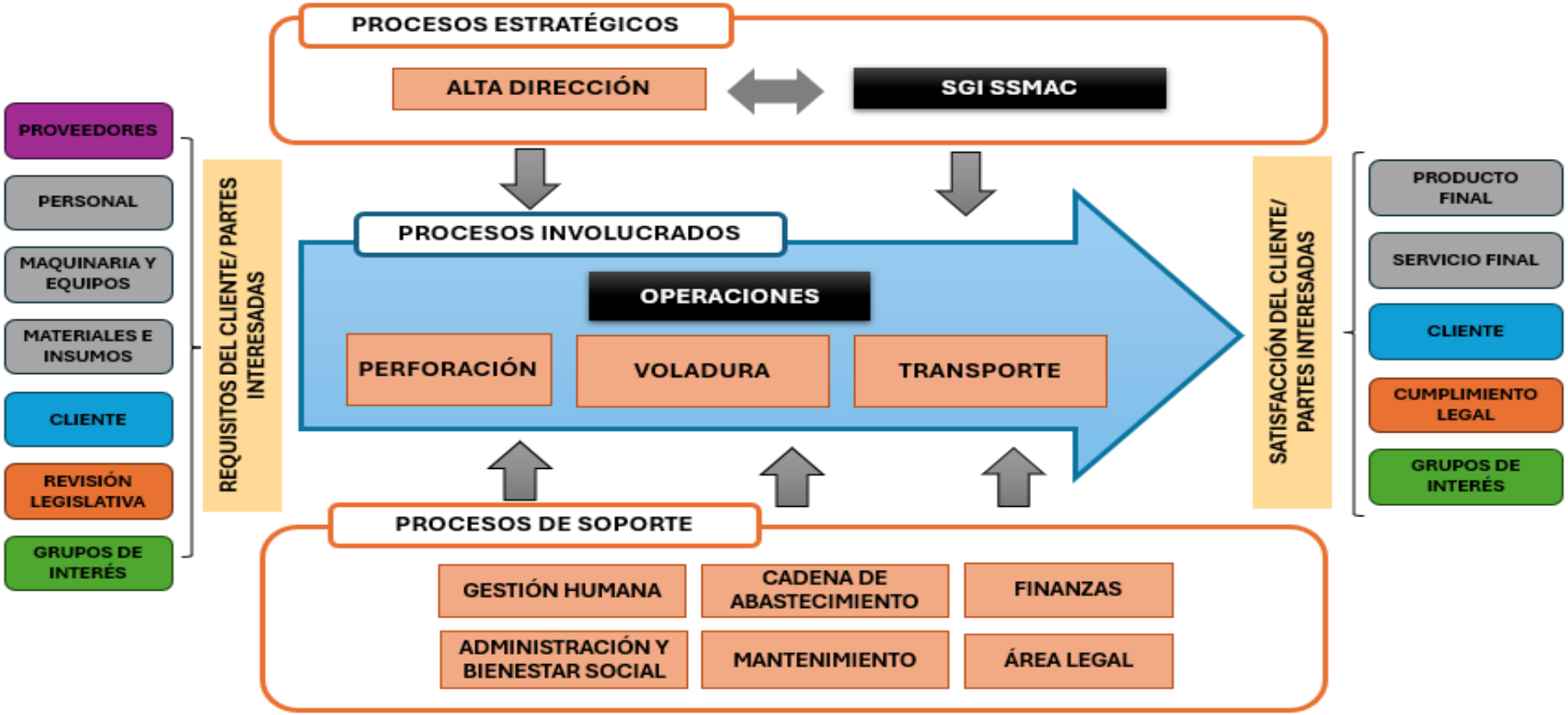
En la implementación de un Modelo de Plan de Emergencia para la gestión de riesgos por emanación de CO en una contrata minera, es fundamental respaldar este enfoque con estándares internacionales, frameworks de gestión de riesgos y buenas prácticas que aseguren la efectividad y continuidad del plan, garantizando la seguridad de los trabajadores y la integridad de la operación minera.

En la minería del Perú, el Decreto Supremo N° 024-2016-EM, que regula la seguridad y salud ocupacional en las actividades mineras, establece disposiciones clave para la actualización del IPERC y el análisis de riesgos, de igual manera la ISO 45001:2018 y la ISO 31000:2018 son consideradas como estándares internacionales fundamentales para la estructuración de este plan.

Asimismo, para garantizar la efectividad de las medidas adoptadas, se emplean diferentes frameworks que integran herramientas como el Análisis Bow tie, que proporciona una representación gráfica clara de los riesgos y las barreras de control. Este análisis se convierte en un modelo visual que facilita la comprensión de los riesgos por emanación de CO y las estrategias de mitigación adoptadas. El Bow tie XP es una herramienta avanzada que permite identificar los peligros, definir las amenazas, y describir las consecuencias de los incidentes, todo ello basado en un sistema de barreras críticas que reducen la probabilidad y el impacto de las emanaciones de CO.

Finalmente, referente a buenas prácticas, la más esencial es la participación multidisciplinaria, ya que es fundamental involucrar a expertos de diversas áreas, como geólogos, ingenieros de ventilación, ingenieros de voladura y personal de maquinaria pesada, de seguridad y operaciones, para garantizar que el análisis de riesgos y la definición de barreras estén basados en el conocimiento técnico más actualizado y preciso. Por último, los simulacros de emergencia son indispensables. Estos deben ser diseñados de manera específica para escenarios de emanación de CO, probando la efectividad de las barreras, procedimientos de evacuación y la rapidez de respuesta del personal. La retroalimentación de estos simulacros debe incorporarse en el proceso de mejora continua del plan de emergencia.

Figura 9
Diagrama Frameworks



Nota. El presente diagrama muestra en que procesos se centrará la problemática

2.3 BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO

El Decreto Supremo N.º 024-2016-EM y sus modificatorias, que aprueba el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería en Perú, establece disposiciones clave para la gestión de riesgos, incluyendo aquellos asociados a la emanación de CO en operaciones mineras.

En el artículo 95 se detalla la obligación de cada trabajador de realizar la identificación de peligros y evaluación de riesgos de manera continua, lo cual es esencial para detectar y controlar riesgos asociados a la emanación de CO.

Asimismo, el artículo 96 establece una jerarquía para el control de riesgos: eliminación, sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos y equipos de protección personal. Esta jerarquía es fundamental en el análisis Bow tie, ya que permite identificar y establecer controles de prevención y mitigación. Por ejemplo, ante un riesgo de emanación de CO, la prioridad debe ser implementar sistemas automáticos de monitoreo de gases (control de ingeniería) antes que limitarse a entregar mascarillas (equipo de protección personal). De manera similar, el Artículo 97 garantiza que el riesgo de emanación de CO sea identificado, evaluado y controlado de manera actualizada y documentada, sirviendo como base sólida para construir un análisis Bow tie efectivo y un plan de emergencia operativo. En cuanto a los límites máximos permisibles, el Anexo 15 del DS N.º 024-2016-EM y sus modificatorias, establece que las concentraciones de gases en el ambiente de trabajo, incluido el CO, deben mantenerse por debajo de los límites de exposición ocupacional (LEO) para agentes químicos, protegiendo así la salud de los trabajadores.

Por otra parte, en el capítulo XVII del DS N.º 024-2016-EM y sus modificatorias, en el Artículo 148, aborda el Plan de Preparación y Respuesta ante Emergencias, exigiendo que se definan procedimientos específicos para la evacuación y el rescate en situaciones que involucren gases peligrosos. Para un riesgo de emanación de CO, se debe de establecer rutas de evacuación rápidas, tener equipos de rescate y disponer de protocolos de rescate de personas inconscientes en espacios confinados. Sin un plan claro, la reacción ante una emanación puede ser lenta o desorganizada, aumentando el riesgo de fatalidades.

Finalmente, el Artículo 155 establece la obligación de realizar simulacros de emergencia de forma periódica, con el objetivo de evaluar la eficacia de los planes y procedimientos establecidos. Los resultados de los simulacros deben retroalimentar el análisis Bow tie, permitiendo mejorar continuamente los controles de prevención y mitigación.

3. CAPÍTULO 3
DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCION

En este capítulo se desarrolla la propuesta de un modelo de plan de emergencia para la gestión de riesgos por emanación de monóxido de carbono (CO) en interior mina, utilizando como eje metodológico el análisis Bow Tie. La propuesta se estructura en cuatro fases consecutivas, las cuales se encuentran alineadas con los objetivos específicos del estudio.

La primera fase comprende la identificación de las áreas críticas dentro de la operación minera subterránea, mediante la revisión de reportes históricos de monitoreo de gases y análisis de índices de seguridad. Esta fase culmina con la elaboración de la lista de actividades con mayor vulnerabilidad de exposición al CO.

La segunda fase se enfoca en la identificación de los peligros y consecuencias asociados a actividades que han registrado condiciones inseguras vinculadas a la exposición a CO. Para ello, se utiliza la matriz IPERC de línea base y el IPERC continuo como fuentes principales de información.

En la tercera fase se aplica el análisis Bow Tie, partiendo de la definición del evento principal y determinando sus causas, consecuencias, así como las barreras de control preventivas y mitigadoras. Esta fase permite la construcción del diagrama Bow Tie, el cual sirve como base estructural para la toma de decisiones.

Finalmente, en la cuarta fase se diseña el modelo del plan de emergencia, integrando los hallazgos de las fases anteriores y considerando protocolos de actuación, roles de respuesta, medios de evacuación y planes de contingencia. Asimismo, se analizan incidentes previos para enriquecer el diseño del plan y asegurar su aplicabilidad. El resultado se consolida en un informe técnico del plan de emergencia, orientado a fortalecer la capacidad de respuesta de la contrata minera frente a eventos críticos relacionados con la exposición a CO.

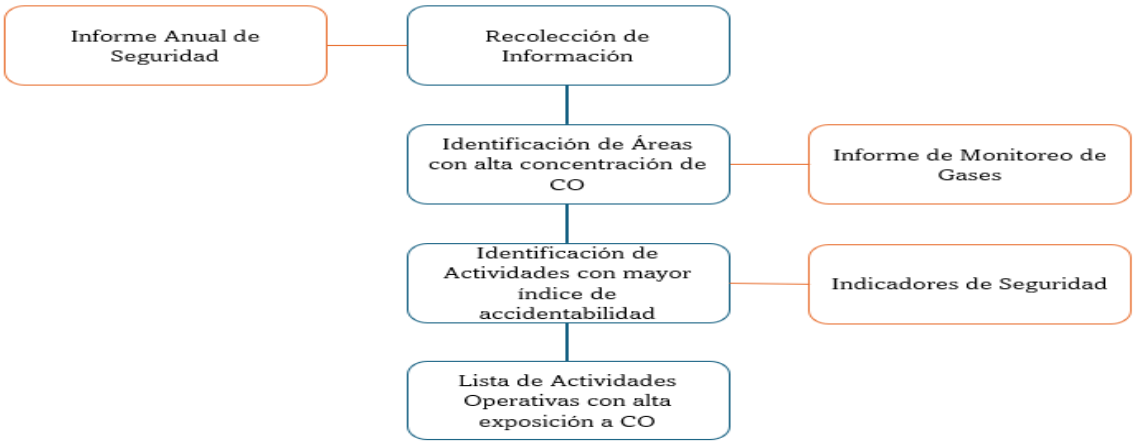
3.1.1. Diagrama del Objetivo Especifico 1

Para el desarrollo del primer objetivo específico, se recopila información de actividades que han reportado condiciones inseguras relacionadas con la presencia de CO. Esta

información se contrasta con los informes de monitoreo ambiental junto con los indicadores de seguridad.

Figura 10

Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 1: Determinar las actividades críticas que presenten incidentes por exposición de CO en interior mina

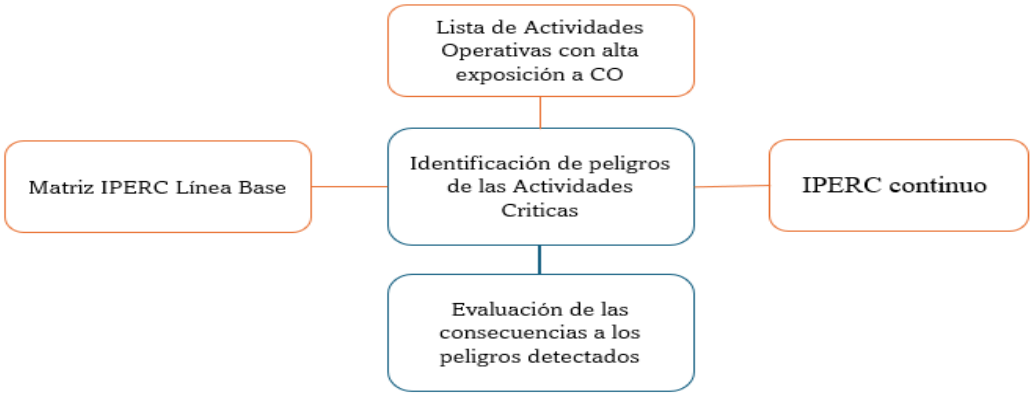


3.1.2. Diagrama del Objetivo Especifico 2

Para el desarrollo del segundo objetivo específico, se utilizan la matriz IPERC de línea base y el IPERC continuo como herramientas principales para identificar peligros asociados a actividades operativas que han registrado condiciones inseguras relacionadas con la presencia de CO, analizando las consecuencias de dichos peligros.

Figura 11

Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 2: Identificar los peligros que pueden generar incidentes por la inhalación de CO

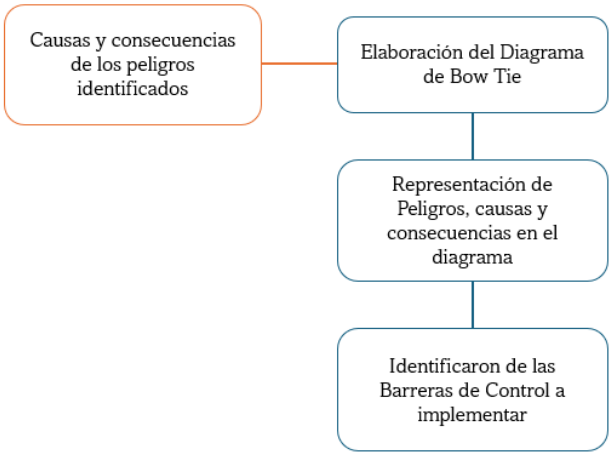


3.1.3. Diagrama del Objetivo Especifico 3

Una vez identificado los peligros, se procede a elaborar el diagrama Bow Tie representando sus causas más probables y consecuencias potenciales. Así como también las barreras de control a implementar

Figura 12

Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 3: Representar gráficamente los peligros, causas, consecuencias y controles en el Análisis Bow tie



3.1.4. Diagrama del Objetivo Especifico 4

En esta etapa se desarrollan e implementan las barreras identificadas en el análisis Bow Tie como acciones concretas dentro del plan de emergencia. Se elaboran procedimientos operativos, se asignan roles, y se definen los recursos, rutas de evacuación y sistemas de respuesta ante una emergencia por CO.

Figura 13

Diagrama de Proceso del Objetivo Especifico 4: Diseñar un modelo de plan de emergencia basado en los resultados del análisis Bow tie

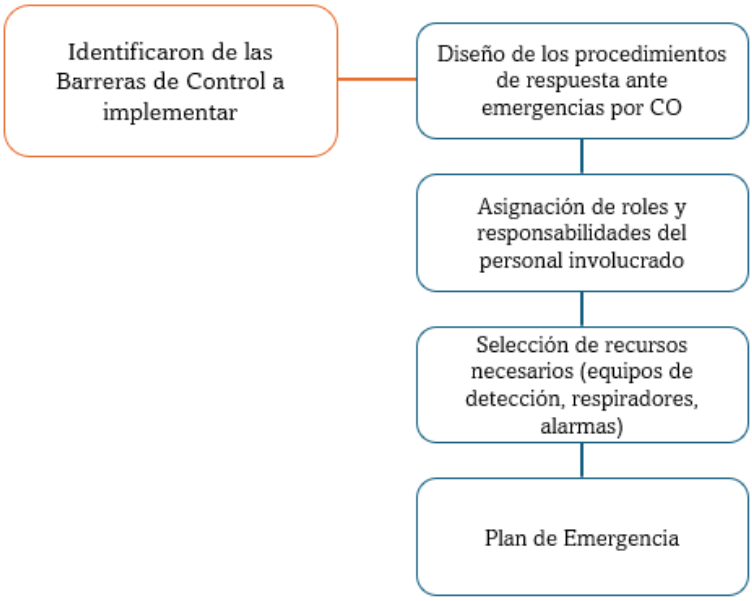
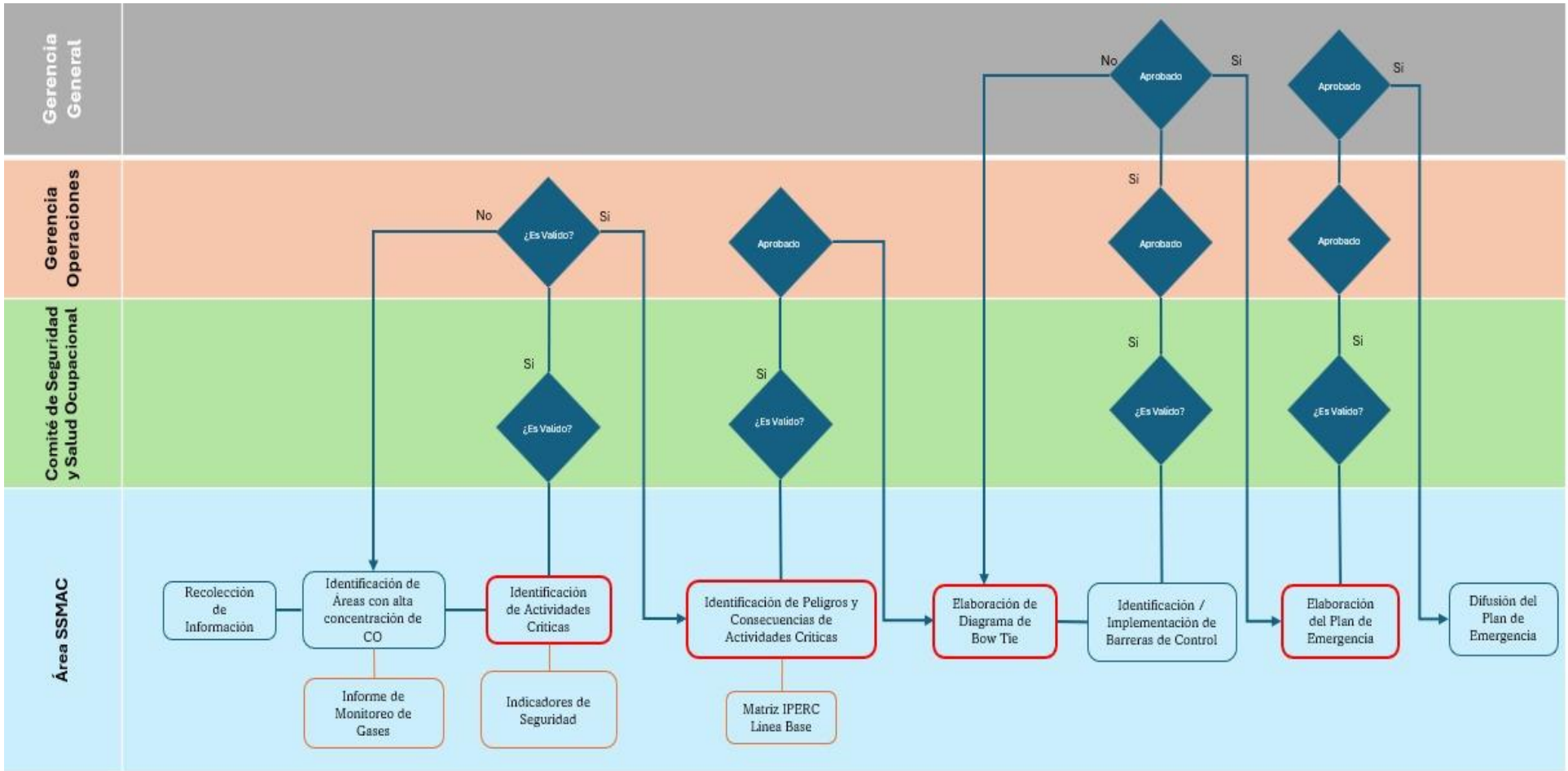


Figura 14

Diagrama de Flujo de la Propuesta



Nota. Se presenta diagrama de flujo a realizarse durante este trabajo

3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCION

Metodología

La metodología propuesta para optimizar la gestión de riesgos asociados a la exposición a monóxido de carbono (CO) tiene como problemática central la ocurrencia de incidentes y condiciones inseguras relacionadas con la emanación de gases, los cuales representan un riesgo significativo para la salud de los trabajadores y la continuidad operativa en interior mina. En esta sección, se detalla el proceso metodológico desarrollado para aplicar la herramienta Bow Tie, desde la identificación de actividades críticas a partir de registros históricos hasta la elaboración de un plan de emergencia específico. El análisis integra indicadores técnicos como los índices de seguridad, los informes de monitoreo de gases, las matrices IPERC, los reportes de inspección y la trazabilidad de eventos previos. A lo largo del proceso, se prioriza la evaluación de información existente sin intervención directa en campo, lo que permite una interpretación objetiva y estructurada de los factores de riesgo, sus consecuencias y los controles aplicables

3.2.1. Metodología del Objetivo Especifico 1

El proceso iniciará con la recolección y revisión de los índices de seguridad (figura 15) de la operación minera, tales como la frecuencia de incidentes relacionados con exposición a gases, reportes de casi accidentes, condiciones subestándares y paradas operativas por atmósferas contaminadas. Esta información permitirá detectar patrones y áreas con mayor recurrencia de eventos vinculados al CO. En paralelo, se recopilarán y analizarán los informes históricos y actuales de monitoreo ambiental de gases y de equipos portátiles utilizados por el personal (Figura 16). Se evaluarán los registros de concentración de CO en distintos frentes de trabajo, considerando variables como tiempo de exposición, condiciones de ventilación y ubicación geográfica dentro de la mina. Con ambos insumos, se realizará un cruce de datos para correlacionar eventos de riesgo con actividades específicas, tales como perforación, voladura, carguío o mantenimiento en zonas con ventilación limitada. Posteriormente, se aplicará una matriz de priorización de riesgos que considere la frecuencia de incidentes, los niveles de concentración de CO y la severidad de las consecuencias. Las actividades que presenten mayor riesgo serán clasificadas como críticas.

Figura 15

Reporte consolidado de seguridad

Código:	MT-SSMAC-000-008	MATRIZ
Fecha:	01/01/2023	REPORTE CONSOLIDADO SST - SEPROCAL
Versión:	02	

MES	Nro TRABAJ	HORAS HOMBRE TRABAJADAS		N° ACC. MORTAL	N° DE INCIDENTES														Enfermedades Ocupacionales				Indice de Frecuencia de accidentes (IF)		Indice de severidad de accidentes (IS)		Indice de Accidententabilidad (IA)		CAPACITACIONES			
					Accidente Incapacitante (AI)		Dias Perdidos		Accidente Leve (AL)		Incidentes		Daño Material (DM)		Medio Ambiente (MA)		Incidente Peligroso (IP)		N°EO	N° Trabaj. exp. al agente	Tasa de Incidencia	N° Trabaj. con cáncer prof.							MES		ACUMULADO	
		MES	ACUM		Mes	Acum	Mes	Acum	Mes	Acum	Mes	Acum	Mes	Acum	Mes	Acum	Mes	Acum					Mes	Acum	Mes	Acum	Mes	Acum	HHC	IND.	HHC	IND
Enero																																
Febrero																																
Marzo																																
Abril																																
Mayo																																
Junio																																
Julio																																
Agosto																																
Setiembre																																
Octubre																																
Noviembre																																
Diciembre																																
PROMEDIO																																
META				0																												

Nota. La figura muestra un formato de reporte de las estadísticas de seguridad durante el año

Figura 16

Formato de monitoreo de Monóxido de carbono y otros gases en las labores mineras

CÓDIGO:	FM-SSMAC-200-023	FORMATO	Seprocal
FECHA:	21.07.2022		
VERSIÓN:	02	MONITOREO DE MONOXIDO DE CARBONO Y OTROS GASES EN LAS LABORES MINERAS	Pag. 1 de 1

FECHA : _____ TURNO DÍA ☐ NOCHE ☐

RESPONSABLE DE MEDICION: _____ EQUIPO DE MEDICION / N° SERIE : CÓDIGO : _____

HORA	NIVEL LABOR	CONCENTRACION					DESCRIPCION DE ACTIVIDAD	ACCIONES CORRECTIVAS EN CASO DE SOBRE PASAR EL LMP.	NUEVA MEDICION DESPUES DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS
		CO 25 PPM	NO2 5 PPM	O2 19.5 %	CO2 5000 PPM	H2S 5 PPM			

* Establecido en el Reglamento de Seguridad y SSO D.S 024-2016-EM Anexo 15, y su modificatoria D.S.023-2017-EM

_____
INSPECTOR DE SSO

Nota. Se observa el formato de monitoreo de gases de la contrata minera, realizada por un integrante del área de seguridad.

3.2.2. Metodología del Objetivo Especifico 2

Para analizar los factores de riesgo que pueden generar incidentes por la inhalación de CO en interior mina, se seguirá un proceso estructurado que integra la aplicación de la matriz IPERC Línea Base (figura 18), el IPERC Continuo (Figura 17) y el cumplimiento del Programa Anual de Inspecciones. En primer lugar, se elabora o actualiza la matriz IPERC Línea Base, identificando las actividades rutinarias en interior mina que involucren emisiones de CO, como el uso de maquinaria a combustión o trabajos en zonas mal ventiladas. A cada peligro identificado se le asigna un nivel de riesgo según su probabilidad y severidad, y se establecen controles preventivos como sistemas de ventilación, sensores de gases y procedimientos operativos seguros. En segundo lugar, se aplica el IPERC Continuo en campo antes de iniciar cada jornada o tarea, donde los trabajadores evalúan en tiempo real las condiciones del entorno, verificando la presencia de gases, el estado de los equipos de ventilación y cualquier señal de riesgo inminente.

En caso de identificar una condición peligrosa, se paraliza la tarea y se informa al supervisor para su corrección inmediata.

Finalmente, el Programa Anual de Inspecciones de Seguridad (Figura 19), contempla evaluaciones periódicas en zonas críticas de la mina, verificando el funcionamiento de los controles establecidos y detectando nuevas condiciones de riesgo. Los hallazgos se documentan y se gestionan mediante planes de acción correctivos. La información obtenida de estas tres herramientas se consolida en el Comité de Seguridad para actualizar matrices de riesgo, reforzar controles y retroalimentar los sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional.

Figura 17

Formato de IPERC continuo

Seprocal	IPERC CONTINUO	CÓDIGO : FM-SSMAC-200-039
		FECHA : 23/03/2024
		VERSIÓN : 3.0
	SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN	PÁGINA : 1 DE 1

AREA:	NIVEL:	LABOR:
TURNO:	FECHA:	HORA INICIO:
ACTIVIDAD:		

DATOS DEL PERSONAL:

ITEM	NOMBRES	OCUPACIÓN	FIRMA
1			
2			
3			
4			

MATRIZ BÁSICA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

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

FRECUENCIA

NIVEL DE RIESGO	DESCRIPCION	PLAZO PARA LA CORRECCION
ALTO	Riesgo intolerable, requiere controles inmediatos. Si no se puede controlar el peligro se paraliza los trabajos operacionales en la labor.	0-24 Horas
MEDIO	Iniciar medidas para eliminar/reducir el riesgo. Evaluar si la acción se puede ejecutar de manera inmediata.	0-72 Horas
BAJO	Este riesgo puede ser tolerable.	1 Mes

MONITOREOS DE GASES:

RESPONSABLE	HORA	% OXIGENO (02) 19.5 - 22.5	PPM MONOXIDO DE CARBONO (CO) <25	PPM NITROSO (NO2) <3	PPM DIOXIDO DE CARBONO (C02) <5000

IPERC:

DESCRIPCION DE PELIGRO	RIESGO	EVALUACIÓN IPER			MEDIDAS DE CONTROL A IMPLEMENTAR	EVALUACIÓN RIESGO RESIDUAL		
		A	M	B		A	M	B
	SI NO	N° PETAR				SI NO		
1.- ¿La tarea requiere generación de PETAR?					2.- ¿Cuento con todas las condiciones seguras para iniciar mi actividad?			

Si marca "NO" en el ítem N° 2 no realice la actividad, haga uso de su Derecho de Decir No y comunique al líder de inmediato

CONTROLES QUE DEPENDEN DE MI PARA CONTROLAR EL PELIGRO Y REDUCIR EL RIESGO:

ITEM	SECUENCIA PARA LAS ACCIONES DE CONTROL
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

GESTION DE LA SUPERVISION:

HORA	NOMBRE DEL SUPERVISOR	MEDIDA CORRECTIVA	FIRMA

Nota. Se observa el formato de IPERC continuo que cada trabajador debe completar de manera obligatoria para cada actividad

Figura 18

Matriz IPERC linea base

Codigo	: MT - SSMAC - 200	IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL - (IPERC LINEA BASE)	Seprocal
Fecha	: 10/01/2025		
Versión	: 08	OPERACIONES	Pag. 1 de 1

N°	SUPERINTENDENCIA / JEFATURA	PROCESO	SUBPROCESO	ACTIVIDAD	TAREAS	PUESTOS DE TRABAJO	TIPO DE ACTIVIDAD (Rutinaria y No Rutinaria /R-E)	REALIZADA POR (M, C, M/C)	PELIGRO	DETALLE DEL PELIGRO	RIESGO		CAUSAS DEL RIESGO	SST	TEMPORALIDAD (Pasado, Actual, Futuro)	EVALUACION DEL RIESGO /			SITUACION (Normal, Anormal y Emergencia)	RESUMEN SGSSO	LEGAL	PARTES INTERESADAS	IMPORTANCIA		CONTROLES						MITIGACIÓN	RIESGO RESIDUAL	ACCIONES
											RIESGO	CONSECUENCIAS				GRAVEDAD	PROBABILIDAD	EXPOSICION		RIESGO / IMPACTO PURO			REQUIERE CONTROLES	REQUIERE PLANES DE EMERGENCIA	1) ELIMINACIÓN	2) SUSTITUCIÓN	3) CONTROLES DE INGENIERIA	4) CONTROL ADMINISTRATIVO	5) EPP´S	6) PLAN DE EMERGENCIA			
1																																		
2																																		

Nota. Se presenta el formato de la matriz IPERC línea base utilizada por la contrata minera para la identificación de peligro

Figura 19

Programa anual de inspecciones de monitoreo de gases

Código:	PRO-SSMAC-200-005	ANEXO N° 3	Seprocal
Fecha:	7/12/2023		
Versión:	05	PROGRAMA DE INSPECCIONES - 2024	Pag. 1 de 1

ITEM	ACTIVIDAD	ESTADO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	RESPONSABLE	OBSERV.	CUMP %
1	Monitoreo de gases	P	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	Seguridad	Diario	0%
		E															
2	Inspección del Comité de Seguridad y Salud Ocupacional	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	CSST	Mensual	0%
		E															
3	Inspección Cruzada	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
4	Equipos de protección personal (EPPS)	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
5	Sistemas Contra incendios (extintores)	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
6	Camillas	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
7	Botiquines	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
8	Lava ojos	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
9	Kit antiderrame	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
10	Estación de rescate	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
11	Inspección de barretillas	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
12	Inspección de estación de emergencias	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
13	Señalización	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
14	Escaleras	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Seguridad	Mensual	0%
		E															
15	Instalaciones Eléctricas	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Operaciones	Mensual	0%
		E															
16	Labores mineras	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Operaciones	Semanal	0%
		E															
17	Bombas	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Operaciones	Mensual	0%
		E															
18	Labores en sostenimiento	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Geomecánica	Mensual	0%
		E															
19	Equipos livianos y pesados	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Mensual	0%
		E															
20	Herramientas manuales y eléctricas	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Mensual	0%
		E															
21	Guardas de protección	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Mensual	0%
		E															
22	Equipo para trabajos de soldadura y/o Oxicorte	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Mensual	0%
		E															
23	Sistema de izaje	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Mensual	0%
		E															
24	Sistema de Bloqueo	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Mensual	0%
		E															
25	Taller de mantenimiento	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Mantenimiento	Semanal	0%
		E															
26	Comedor	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Bienestar Social	Mensual	0%
		E															
27	Campamento	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Bienestar Social	Mensual	0%
		E															
28	Oficina	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Administración	Mensual	0%
		E															
29	Almacén	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Logistica	Semanal	0%
		E															
30	Bodega	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Logistica	Semanal	0%
		E															
31	Materiales peligrosos	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Logistica	Semanal	0%
		E															
32	Portones de voladura	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Voladura	Semanal	0%
		E															
33	Sistema anticaida	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Voladura	Semanal	0%
		E															
34	Polvorines	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Voladura	Semanal	0%
		E															
35	Transporte de explosivos	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Voladura	Semanal	0%
		E															
36	Anfoloader	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Voladura	Semanal	0%
		E															

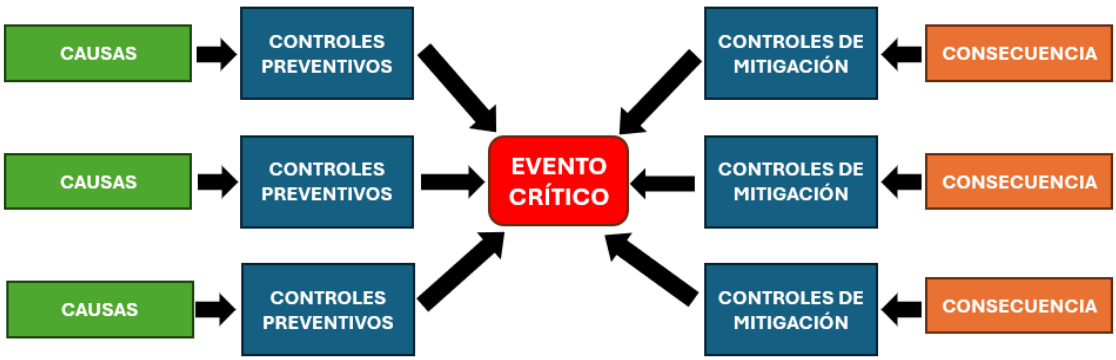
Nota. Se muestra la frecuencia de inspecciones de gases que debe realizarse durante el año

3.2.3. Metodología del Objetivo Especifico 3

Para representar gráficamente las causas, consecuencias y controles de un incidente por inhalación de CO en interior mina, se aplicará la metodología del análisis Bow Tie utilizando el diagrama correspondiente. El proceso inicia con la definición clara del evento principal, que en este caso será "Inhalación de CO en interior mina". Una vez identificado el evento central, se procede a listar todas las amenazas o causas que podrían desencadenarlo, como el uso de maquinaria a combustión interna en espacios confinados, fallos en el sistema de ventilación o deficiencia en la detección de gases. Posteriormente, se identifican las consecuencias derivadas, tales como intoxicación, pérdida de conciencia, lesiones graves, evacuaciones de emergencia, paralización de operaciones o enfermedades ocupacionales. A continuación, se determinan los controles preventivos (ubicados a la izquierda del evento en el diagrama), que son las barreras diseñadas para evitar que las amenazas den lugar al evento principal, como la implementación de ventilación forzada, el mantenimiento regular de equipos, el uso de sensores de CO, procedimientos operativos estandarizados y capacitación del personal. Del lado derecho del diagrama, se colocan los controles de mitigación, que son las acciones o sistemas diseñados para reducir el impacto si el evento llegara a ocurrir; estos incluyen equipos de escape autónomos, rutas de evacuación señalizadas, entrenamiento en primeros auxilios y activación de planes de emergencia. Finalmente, con toda esta información estructurada, se elabora el diagrama Bow Tie (Figura 20) utilizando herramientas gráficas o software especializado, representando visualmente las relaciones entre causas, evento, consecuencias y sus respectivos controles, facilitando así la comprensión del riesgo y la toma de decisiones en seguridad operativa.

Figura 20

Representación gráfica del analisis Bow tie



Nota. Se analizan las causas y consecuencias del evento crítico y se añaden los controles preventivos y de mitigación

3.2.4. Metodología del Objetivo Especifico 4

Para diseñar un modelo de plan de emergencia basado en los resultados del análisis Bow Tie, se seguirá una metodología estructurada que integre las lecciones aprendidas y mejore la capacidad de respuesta ante incidentes por inhalación de CO en interior mina. El proceso iniciará con la revisión del análisis Bow Tie, identificando las amenazas más probables, las consecuencias más críticas y los controles preventivos y de mitigación relacionados con la exposición a CO. A partir de este análisis, se procederá a la evaluación del plan de emergencia anterior (Figura 21), utilizando su informe final como referencia comparativa. Esta revisión permitirá identificar debilidades, omisiones o medidas ineficaces aplicadas anteriormente en situaciones similares. Luego, se desarrollará el nuevo modelo del plan de emergencia, estableciendo protocolos específicos de activación de la emergencia, incluyendo alertas tempranas, roles de respuesta, rutas de evacuación, puntos de reunión y coordinación con servicios médicos. También se detallarán los recursos necesarios, como equipos de respiración autónoma, detectores portátiles de gases, botiquines, vehículos de evacuación y equipos de comunicación. Posteriormente, se diseñarán los procedimientos operativos de respuesta y rescate, asegurando que se alineen con los controles de mitigación identificados en el Bow Tie. El modelo incluirá un cronograma de simulacros, la asignación de responsables por área y un mecanismo de evaluación posterior para incorporar oportunidades de mejora. Finalmente, el plan será validado por el Comité de Seguridad y Salud Ocupacional, asegurando su viabilidad y alineación con la normativa vigente, y será difundido y capacitado entre todo el personal operativo. Así, el nuevo modelo integrará tanto los datos técnicos del análisis de riesgos como la experiencia adquirida en planes previos, fortaleciendo la preparación ante emergencias por acumulación de CO en interior mina.

Figura 21

Formato de Plan de respuesta a emergencia

Código:	PM-SSMAC-200-003	PLAN	Seprocal
Fecha:	10/12/2023	PLAN DE PREPARACION DE RESPUESTA A EMERGENCIAS	
Versión:	01		Pág. 1 de 138

PLAN DE PREPARACIÓN DE RESPUESTA A EMERGENCIAS

OPERACIONES SEPROCAL SAC

SEGURIDAD, PRODUCTIVAD Y CALIDAD

2024

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
JEFE DE SEGURIDAD CIP	COMITÉ DE SEGURIDAD	GERENTE DE OBRA CIP 99698
Fecha de elaboración: 04/12/2023	Fecha de revisión: 06/12/2023	Fecha de aprobación: 06/12/2023

Nota. Se presenta la portada del Plan de Respuesta a Emergencias con las respectivas fechas de elaboración, revisión y aprobación, y personas quienes participaron.

3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO

a. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1:

Determinar las actividades críticas que presenten incidentes por exposición de CO en interior mina

El siguiente gráfico presenta los principales indicadores de seguridad recopilados durante el periodo de evaluación, con el objetivo de identificar las actividades críticas que presentan mayor exposición a monóxido de carbono (CO) en interior mina.

Figura 22

Indicadores de seguridad 2024

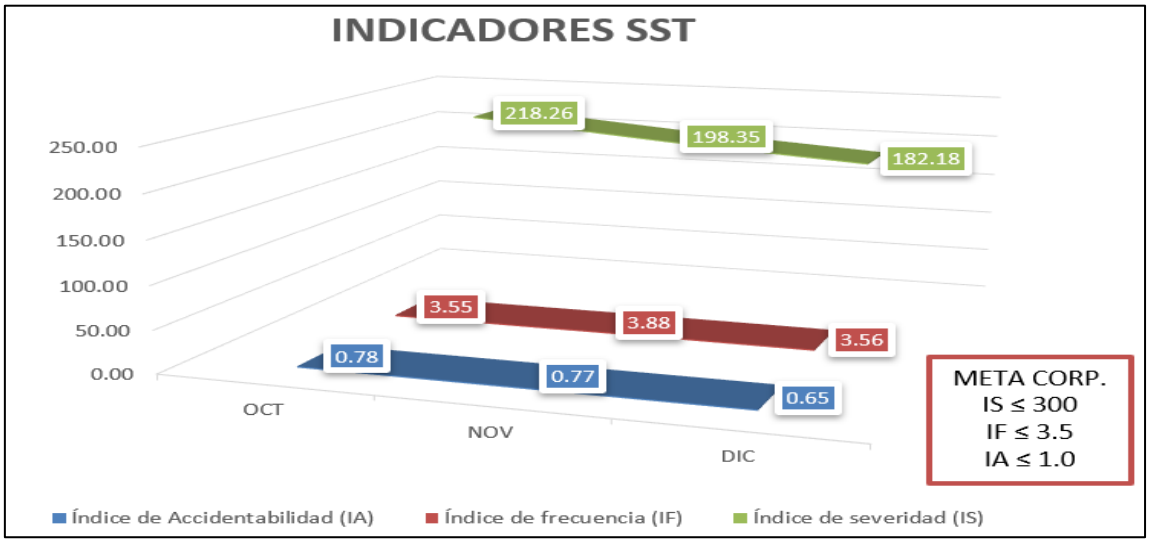


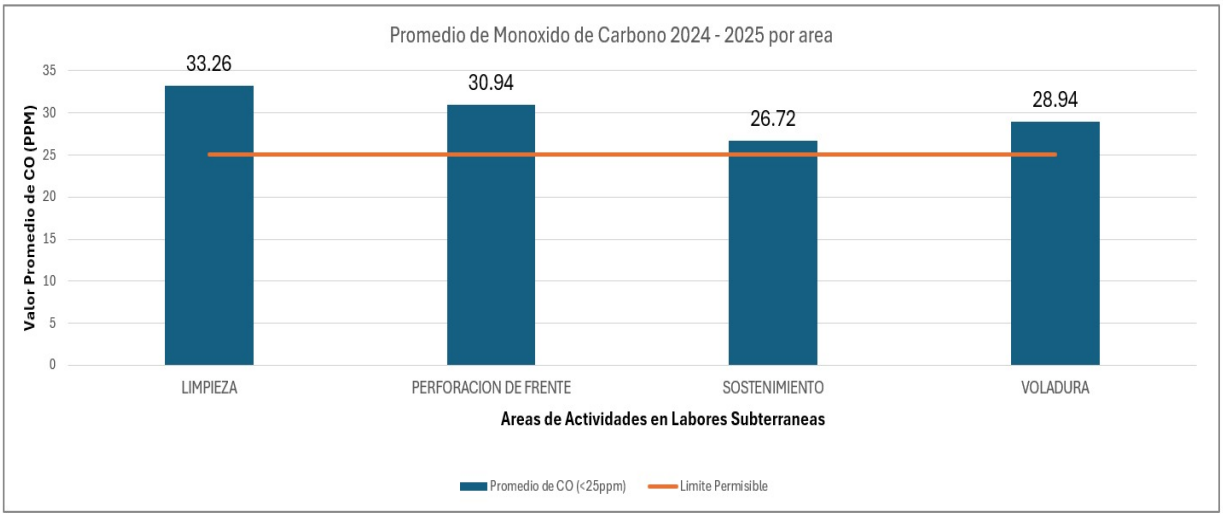
Tabla 3

Resumen de Índices de Seguridad

Índices de Seguridad	Octubre	Noviembre	Diciembre
Índice de Severidad	218.26	198.35	182.18
Índice de Frecuencia	3.55	3.88	3.56
índice de Accidentabilidad	0.78	0.77	0.65

Para determinar las actividades críticas por exposición al CO, se tomaron los resultados de los informes de monitoreo de los meses de octubre 2024 a enero 2025, los cuales obtuvieron mayores índices de niveles de CO comparado con el límite máximo permisible de este gas, tal como se presenta en la Figura 23.

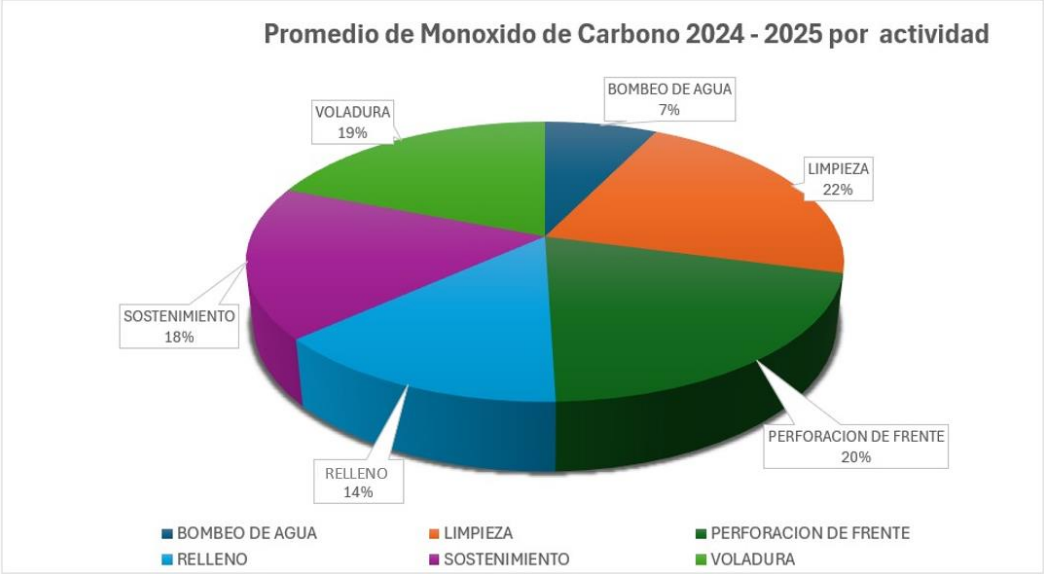
Figura 23
Estadística de niveles más elevados de CO por áreas



Nota. Se presenta un promedio de los niveles de monóxido de carbono más elevados por áreas

La información recolectada proviene de los controles de monitoreo realizados por los jefes de guardia, lo que otorga confiabilidad a los resultados obtenidos. La Figura 24 resume visualmente las actividades más críticas en cuanto a exposición al CO, destacando aquellos procesos o labores que requieren una atención prioritaria en la implementación de medidas de control.

Figura 24
Gráfico resumen de actividades críticas con exposición de CO



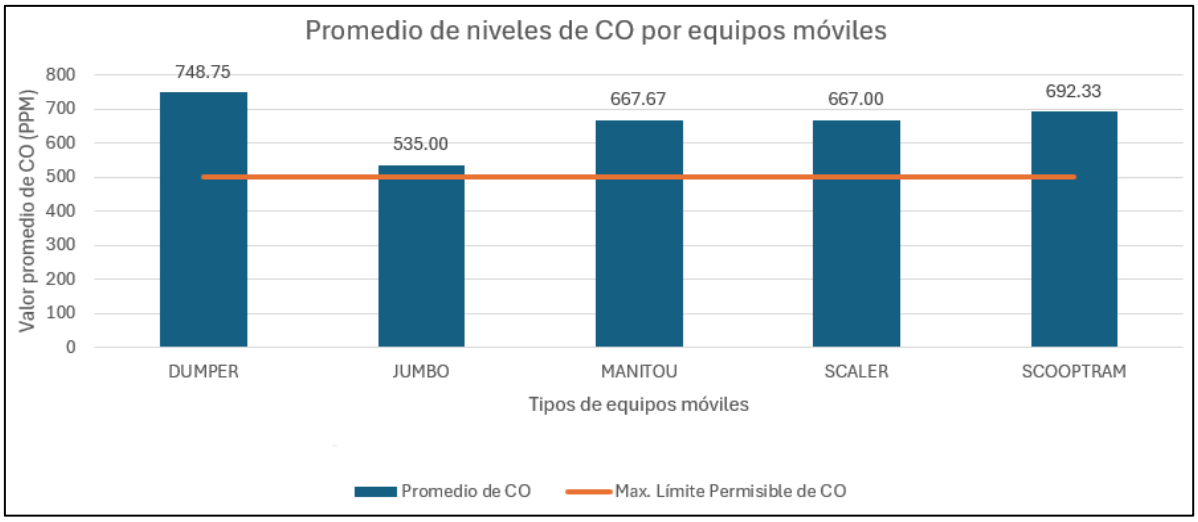
Nota. Se presenta un resumen de las actividades más críticas a exposición de CO

Del mismo modo, se dispone de equipos móviles destinados a realizar estas tareas dentro de las operaciones mineras. Para este propósito, se emplea un equipo denominado

analizador de gases de combustión, cuya función es monitorear y registrar semanalmente las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en los gases de escape de los equipos que operan en el interior de la mina. Estas concentraciones deben mantenerse por debajo de quinientos (500) partes por millón (ppm) de CO. A continuación, se presentan los valores obtenidos entre los meses de junio 2024 a enero 2025.

Figura 25

Promedio de niveles de CO por equipos móviles en interior mina



Nota. Se presenta un promedio de los niveles de monóxido de carbono en equipos móviles

Adicional a ello, se muestra la relación de equipos móviles que son utilizados en cada una de las actividades de interior mina, los cuales presentan un mayor índice de promedio de emisión de CO.

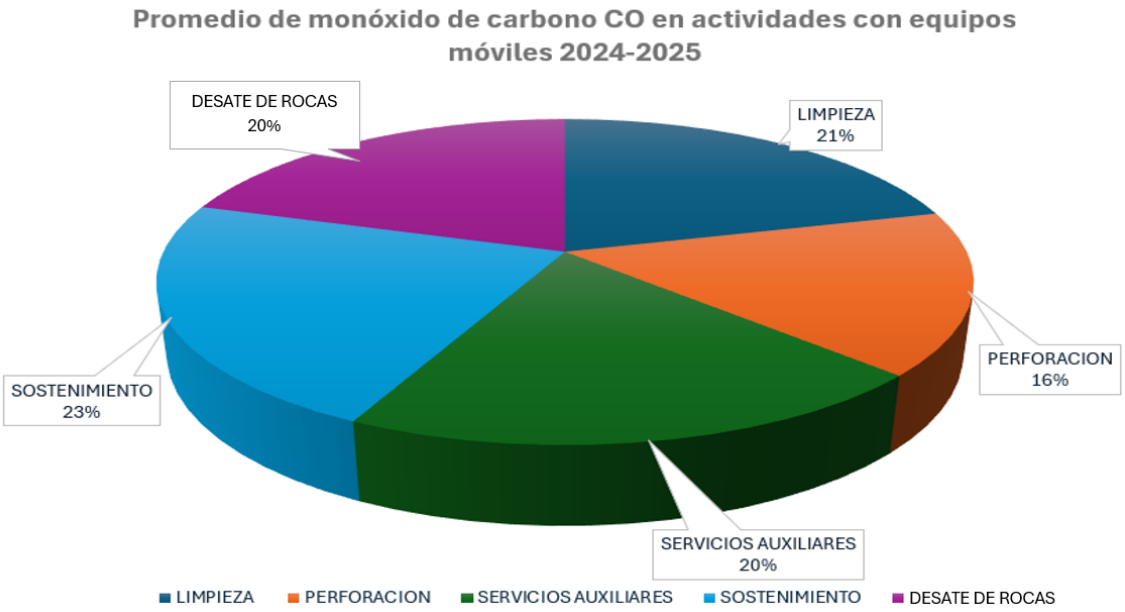
Tabla 4

Tabla actividades con equipos móviles con altos niveles de CO

Nivel	Labor	Equipo	Código del Equipo	Actividades
3890	S/N 963	MANITOU	EP-SEP-MA-05	SERVICIOS AUXILIARES
-100	TALLER	DUMPER	EP-SEP-DP-10	SOSTENIMIENTO
3890	GN 847N	SCOOPTRAM	EP-SEP-SO-03	LIMPIEZA
3890	S/N 963	MANITOU	EP-SEP-MA-05	SERVICIOS AUXILIARES
-100	TALLER	DUMPER	EP-SEP-DP-10	SOSTENIMIENTO
3890	GN 847N	SCOOPTRAM	EP-SEP-SO-03	LIMPIEZA

Figura 26

Promedio de Monóxido de Carbono (CO) en actividades con equipos móviles



b. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2:

Identificar los peligros que pueden generar incidentes por la inhalación de CO

Una vez identificado las operaciones críticas que presentan unos mayores niveles de monóxido de carbono (CO), pasamos con la identificación de actividades críticas en cada una de las operaciones, para ello utilizaremos las matrices IPERC.

Figura 27

Actividades críticas identificadas con exposición de CO en Voladura

SUBPROCESO	ACTIVIDAD	PUESTOS DE TRABAJO	PELIGRO	DETALLE DEL PELIGRO	RIESGO		Causas que ocasionan el riesgo	TEMPORALIDAD (Pasado, Actual, Futuro)	EVALUACION DEL RIESGO / IMPACTO			SITUACION (Normal, Anormal y Emergencia)	RESUMEN SGSSO
					RIESGO	CONSECUENCIAS			GRAVEDAD	PROBABILIDAD	EXPOSICION		RIESGO / IMPACTO PURO
VOLADURA	Carguio y chispeo para voladura de frentes	Maestro cargador, ayudante cargador	Gases / Vapores / Niebla	Inhalación de Gases tóxicos	Inhalación	Muerte	Gases producto del disparo,Ventilación inadecuada	A	32	8	4	N	1024
VOLADURA	Eliminación de tiros cortados	Maestro cargador, ayudante cargador	Gases / Vapores / Niebla	Presencia de gases por la eliminación de tiros cortados	Inhalación	Asfixia	Gases producto del disparo,Ventilación inadecuada	A	32	4	4	N	512

Nota. El cuadro muestra los peligros y riesgos de las actividades críticas a exposición de CO en voladura

Figura 28

Actividades críticas identificadas con exposición de CO en limpieza y acarreo

PROCESO	SUBPROCESO	ACTIVIDAD	TAREAS	PUESTOS DE TRABAJO	PELIGRO	DETALLE DEL PELIGRO	RIESGO		Causas que ocasionan el riesgo	TEMPORALIDAD (Pasado, Actual, Futuro)	EVALUACION DEL RIESGO			SITUACION (Normal, Anormal y Emergencia)	RESUMEN SGSSO
							RIESGO	CONSECUENCIAS			GRAVEDAD	PROBABILIDAD	EXPOSICION		RIESGO / IMPACTO PURO
AVANCE	LIMPIEZA Y ACARREO	Limpieza de sumideros con scooptram	Verificar la ventilación	Operador de Scoop	Gases / Vapores / Niebla	Inhalación de Gases tóxicos	Inhalación	Asfixia	Gases producto del disparo,Ventilación inadecuada	A	32	4	4	N	512
AVANCE	LIMPIEZA Y ACARREO	Limpieza de frente con scoop diesel	Limpie el mineral y/o desmonte del frente	Operador de Scoop	Gases / Vapores / Niebla	Inhalación de Gases tóxicos	Inhalación	Daños a la salud	Gases producido por los equipos, Falta de ventilación	A	32	4	5	N	640
AVANCE	LIMPIEZA Y ACARREO	Transporte de mineral o desmonte con dumper	Ingreso a camara carguio	Operador de Dumper	Gases / Vapores / Niebla	Inhalación de Gases tóxicos	Inhalación	Daños a la salud	Gases producido por los equipos, Falta de ventilación	A	32	4	5	N	640

Nota. El cuadro muestra los peligros y riesgos de las actividades críticas a exposición de CO en limpieza y acarreo

Figura 29

Actividades críticas identificadas con exposición de CO en perforación de frentes

Nº	PROCESO	SUBPROCESO	ACTIVIDAD	PUESTOS DE TRABAJO	TIPO DE ACTIVIDAD (Rutinaria y No Rutinaria /R-E)	REALIZADA POR (M, C, M/C)	PELIGRO	DETALLE DEL PELIGRO	RIESGO		Causas que ocasionan el riesgo	TEMPORALIDAD (Pasado, Actual, Futuro)	EVALUACION DEL RIESGO / IMPACTO			SITUACION (Normal, Anormal y Emergencia)	RESUMEN SGSSO
									RIESGO	CONSECUENCIAS			GRAVEDAD	PROBABILIDAD	EXPOSICION		RIESGO / IMPACTO PURO
94	AVANCE	PERFORACIÓN	Perforación de frentes con jumbo electrohidráulico	Operador jumbo, ayudante de equipo de perforación	R	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo generado durante la Perforación	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador,Falta de presion de agua en la perfoarcion	F	32	4	5	N	640
95	AVANCE	PERFORACIÓN	Perforación en breasting con jumbo electrohidráulico	Operador jumbo, ayudante de equipo de perforación	NR	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo generado durante la Perforación	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador,Falta de presion de agua en la perfoarcion	F	32	4	5	N	640

Nota. El cuadro muestra los peligros y riesgos de las actividades críticas a exposición de CO en perforación

Figura 30

Evaluación de riesgo

TIPO	DESCRIPCIÓN DEL RIESGO	VALORES DEL RIESGO CONTROLADO	Acción	NIVEL DE EFICACIA
A	Muy alto	700 a > 1000	Eliminar / Estudios Urgentes / PETS / Plan de Acción de Objetivos y Metas (Riesgo residual > 399)	71% a 99%
B	Alto	400 a 699	Habilitación Formal / PETS / Monitoreo Periódico / Entrenamiento / Plan de Acción de Objetivos y Metas (Riesgo residual > 399	55% a 70%
C	Medio	100 a 399	PETS / Entrenamiento / Plan de Acción	45% a 54%
D	Bajo	< 99	Tolerar / Instructivo	20% a 44%

Figura 31

Tabla de resumen de Actividades Criticas según Áreas con Mayor CO

PROCESO	SUBPROCESO	ACTIVIDAD	PUESTOS DE TRABAJO	TIPO DE ACTIVIDAD (Rutinaria y No Rutinaria /R-E)	REALIZADA POR (M, C, M/C)	PELIGRO	DETALLE DEL PELIGRO	RIESGO		Causas que ocasionan el riesgo	TEMPORALIDAD (Pasado, Actual, Futuro)	EVALUACION DEL RIESGO / IMPACTO			SITUACION (Normal, Anormal y Emergencia)	RESUMEN SGSSO
								RIESGO	CONSECUENCIAS			GRAVEDAD	PROBABILIDAD	EXPOSICION		RIESGO / IMPACTO PURO
AVANCE	VOLADURA	Carguio y chispeo para voladura de frentes	Maestro cargador, ayudante cargador	R	C	Gases / Vapores / Niebla	Inhalación de Gases tóxicos	Inhalación	Muerte	Gases producto del disparo,Ventilación inadecuada	A	32	8	4	N	1024
AVANCE	LIMPIEZA Y ACARREO	Limpieza de frente con scoop diesel	Operador de Scoop	R	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo producto de la remoción de la carga	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador	F	32	4	5	N	640
AVANCE	LIMPIEZA Y ACARREO	Carguío de mineral o desmonte con scoop a dumper	Operador de Scoop, operador de dumper	R	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo producto de la remoción de la carga	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador	F	32	4	5	N	640
AVANCE	LIMPIEZA Y ACARREO	Transporte de mineral o desmonte con dumper	Operador de Dumper	R	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo producto de la remoción de la carga	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador	F	32	4	5	N	640
AVANCE	PERFORACIÓN	Perforación de frentes con jumbo electrohidráulico	Operador jumbo, ayudante de equipo de perforación	R	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo generado durante la Perforación	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador,Falta de presion de agua en la perfoarcion	F	32	4	5	N	640
AVANCE	PERFORACIÓN	Perforación en breasting con jumbo electrohidráulico	Operador jumbo, ayudante de equipo de perforación	NR	C	Particulados / Polvo	Presencia de polvo generado durante la Perforación	Inhalación	Daños a la salud	Falta de Ventilación, Uso inadecuado del respirador,Falta de presion de agua en la perfoarcion	F	32	4	5	N	640
AVANCE	VOLADURA	Eliminación de tiros cortados	Maestro cargador, ayudante cargador	R	C	Gases / Vapores / Niebla	Presencia de gases por la eliminación de tiros cortados	Inhalación	Asfixia	Gases producto del disparo,Ventilación inadecuada	A	32	4	4	N	512

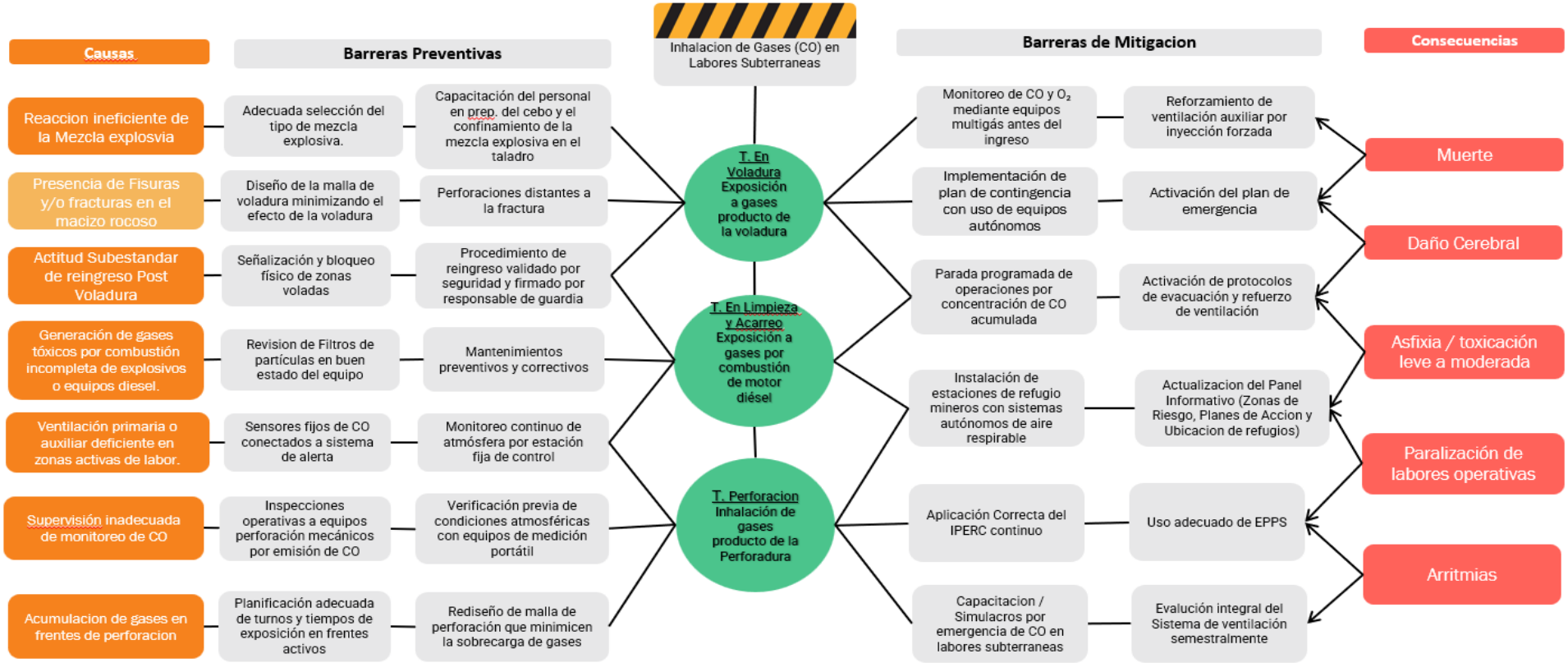
c. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3:

Representar gráficamente las causas, consecuencias y controles en el Análisis Bow tie

Para el cumplimiento del tercer objetivo específico, se desarrolló un análisis Bow Tie con el fin de identificar y evaluar los riesgos asociados a la exposición a gases tóxicos en el entorno subterráneo.

Figura 32

Análisis Bow Tie



d. RESULTADOS DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 4:

Diseñar un modelo de plan de emergencia basado en los resultados del análisis Bow tie

Para este resultado, se presenta un cuadro comparativo entre el Plan de Preparación y Respuesta ante Emergencias (PPRE SEPROCAL 2024) y un modelo mejorado construido a partir del análisis Bow Tie, centrado en la gestión del riesgo por emanación de monóxido de carbono (CO) en labores subterráneas. Esta comparación no solo evidencia las diferencias metodológicas y operativas entre ambos enfoques, sino que además incorpora planes de acción orientados a cerrar brechas, fortalecer barreras de control y optimizar la respuesta ante emergencias por exposición al CO. La propuesta busca aportar una herramienta práctica para la toma de decisiones en seguridad minera basada en la prevención estructurada.

Tabla 5

Análisis comparativo del plan de emergencia anterior junto con análisis bow tie

Criterio	PPRE SEPROCAL 2024	Bow Tie de CO	Planes de Acción
Identificación del Riesgo	Hipótesis accidental: parada del sistema de ventilación (8.12) y gaseamiento por pérdida de ventilación	Se especifica el evento: *Inhalación de CO por voladura, limpieza con equipos diésel o perforación*	Actualizar el IPERC e incluir exposición a CO como escenario crítico específico, diferenciando origen del gas
Causas	Mencionadas de forma general (ventilación, voladura)	Detalle técnico: mezcla explosiva ineficiente, fisuras, fallas de ventilación, supervisión deficiente, acumulación de gases, y actitudes subestándares por parte del personal.	Elaborar matriz de causa–efecto y asociarla a planes de mantenimiento, formación y supervisión
Barreras Preventivas	Procedimientos post-voladura, uso de sensores, mantenimiento	Diseño técnico de malla, sensores, procedimientos validados, señalización y bloqueo, inspecciones a equipos, planificación de turnos y tiempos de ingreso	Implementar check lists de validación de barreras por turno (ej. reingreso autorizado, mapeo de CO, diseño controlado de malla)
Evento Crítico	Emergencia general por pérdida de ventilación o gases	Evento central definido: *Exposición a CO < 25 ppm*	Definir umbrales críticos de CO en protocolos, con activación automática de alarmas y niveles
Barreras de Mitigación	Brigada de emergencia, evacuación, refugios, autorrescatador	Detalladas: equipos autónomos, estaciones de refugio, protocolos por situación (voladura, limpieza, perforación), paradas programadas.	Integrar estas barreras en el procedimiento específico del PUE 10; realizar simulacros diferenciados por tipo de evento
Consecuencias	Muerte, asfixia, paralización de operaciones	También incluye arritmias, daño cerebral, toxicidad leve/moderada	Agregar análisis médico-toxicológico en plan de acción post-evento y registro de incidentes sin pérdida
Clasificación por Niveles	Nivel 1, 2 y 3 según gravedad; activación de CIE, COE o CC	No jerarquiza, pero asocia barreras a escenarios	Asociar cada ítem del Bow Tie a un nivel de emergencia definido (ej. detección preventiva = Nivel 1, síntomas visibles = Nivel 2)
Roles y Responsables	Definidos por función en emergencia (CIE, jefe mantenimiento, seguridad)	No especifica roles, pero se infiere por barrera (ej. jefe ventilación = barrera técnica)	Asignar responsables por barrera en fichas operativas (ej. jefe de ventilación = responsable de presión mínima en ductos)
Monitoreo y Evaluación	Informe post emergencia, simulacros anuales (sección 9.2.1)	No incluye ciclo de retroalimentación formal	Incorporar revisión semestral del Bow Tie en la reunión de seguridad y el programa anual de simulacros
Capacitación	Capacitación general en uso de refugios, PAS, EPP	Incluye formación técnica en explosivos, malla, IPERC, simulacros específicos de CO	Crear módulo exclusivo: “Gestión y prevención de exposición a CO”, con escenarios diferenciados por fuente de emisión

Como complemento al análisis comparativo entre el Plan de Preparación y Respuesta ante Emergencias (PPRE SEPROCAL 2024) y el modelo basado en el análisis Bow Tie para la gestión del riesgo por exposición a monóxido de carbono (CO), se presenta a continuación una tabla que vincula directamente las barreras identificadas en el Bow Tie con los roles operativos definidos en el PPRE. Esta integración permite asignar responsabilidades específicas a cada actor involucrado, asegurando una gestión más eficiente, trazable y orientada a la prevención y mitigación de eventos críticos en labores subterráneas.

TABLA 6
Controles designados en el plan de emergencia en base al analisis bow tie.

Barrera / Control (Bow Tie)	Tipo	Responsable según PPRE SEPROCAL 2024	Función Específica
Mantenimiento preventivo de equipos diésel	Preventiva	Jefe de Mantenimiento	Asegurar que los motores funcionen en condiciones óptimas y no generen exceso de CO. Registro y ejecución del mantenimiento.
Instalación y monitoreo de sensores fijos/portátiles de CO	Preventiva	Jefe de Seguridad y Salud Ocupacional	Verificar funcionamiento y calibración de sensores, asegurar su presencia en zonas críticas.
Diseño seguro de voladura (mezcla explosiva y ventilación)	Preventiva	Residente / Asistente Residente	Validar parámetros técnicos antes de cada voladura. Coordinar con jefe de ventilación y operaciones.
Supervisión del tiempo de espera post-voladura	Preventiva	Jefe de Brigada / Supervisor de Guardia	Controlar y registrar el tiempo de reentrada segura. Validar medición de gases antes del ingreso.
Bloqueo e identificación de zonas sin ventilación	Preventiva	Oficial de Seguridad / Jefe de Ventilación	Supervisar cierre físico, señalización y actualización en planos.
Entrenamiento en uso de autorrescatadores y refugios	Mitigación	Jefe de Planeamiento / Jefe de Seguridad	Desarrollar programa de capacitación técnica y realizar simulacros de emergencia por gases.
Disponibilidad y revisión de autorrescatadores funcionales	Mitigación	Jefe de Logística	Garantizar stock, revisión y ubicación estratégica de equipos de rescate autónomos.
Activación del protocolo de evacuación ante alarma de CO	Mitigación	Comandante de Incidente en Escena (CIE)	Declarar emergencia, coordinar evacuación, activar comunicaciones por canal 10.
Apoyo médico en casos de intoxicación	Mitigación	Jefe de Administración / Médico Ocupacional	Coordinar traslado, atención médica y análisis post-exposición. Control de reportes clínicos.
Evaluación y seguimiento post-evento	Evaluación / Mejora	Comité de Operaciones de Emergencia (COE)	Revisar causas, fallas de barreras, y aplicar acciones correctivas en base a los resultados del Bow Tie.

El ítem 8.12 del Plan de Preparación y Respuesta ante Emergencias (PPRE SEPROCAL 2024) aborda la gestión de emergencias ante la parada del sistema de ventilación en labores subterráneas, una de las situaciones de mayor criticidad en minería por su vínculo

directo con la exposición a gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO). A partir del análisis Bow Tie aplicado a este riesgo, se propone una mejora estructural del procedimiento existente, con el fin de fortalecer la prevención, optimizar la respuesta inmediata y garantizar condiciones seguras para el reingreso del personal, incorporando barreras técnicas, operativas y organizacionales específicas.

TABLA 7
Plan de acción propuesto-aplicada antes de la emergencia

Acción	Mejora propuesta
Planificación y control preventivo	Incluir en el plan anual de mantenimiento un checklist semanal de revisión de todos los ventiladores. Validar la operatividad de sensores de presión diferencial y caudal.
Simulación de riesgo	Ejecutar simulaciones semestrales con escenarios de parada de ventilación y acumulación de gases, para identificar zonas de alto riesgo.
Alarmas automáticas	Instalar sistemas de monitoreo en tiempo real con alarmas visuales y sonoras (panel de control) ante caída de presión o corte de energía en ventiladores críticos.
Entrenamiento específico	Incluir un módulo obligatorio: "Respuesta ante falla de ventilación y exposición a CO" para personal de interior mina, ventilación y operaciones.
Asignación de rutas seguras	Establecer zonas de evacuación prioritaria y puntos de encuentro con aire forzado alternativo en cada zona minera.

TABLA 8
Plan de acción propuesto-aplicada durante la emergencia

Acción	Mejora propuesta
Activación inmediata	El Centro de Control activa automáticamente la emergencia en base al sensor crítico del sistema de ventilación. Nivel de respuesta según número de ventiladores afectados.
Paralización estructurada	El Jefe de Guardia debe coordinar la paralización de frentes y equipos diésel. Prohibición expresa de actividades que generen gases (voladuras, limpieza con diésel).
Evacuación escalonada	Evacuar por zonas según prioridad de riesgo y estado de ventilación (ver mapeo IPERC de ventilación). Uso obligatorio de autorrescatadores.

Monitoreo continuo	Equipos de ventilación y brigadas deben realizar mediciones atmosféricas cada 15 minutos. Registrar CO, O_2, CH_4, temperatura y humedad.
Comunicación de contingencia	Asegurar que cada cuadrilla tenga acceso a radio portátil. Establecer señal de evacuación de emergencia (pito/luces/alarma).

TABLA 9
Plan de acción aplicada después de la emergencia

Acción	Mejora propuesta
Evaluación atmosférica integral	El jefe de ventilación debe validar el restablecimiento de caudal con mediciones en todos los puntos críticos.
Liberación por zona	Solo se permitirá el reingreso progresivo tras comprobar CO < 25 ppm y O_2 > 19.5%. Registrar cada ingreso con ficha digital.
Revisión de barreras fallidas	El Comité de Seguridad y el CRE deben analizar qué barreras del Bow Tie fallaron y documentar lecciones aprendidas.
Simulacro posterior al evento real	Ejecutar simulacro tipo *post mortem* en los 7 días siguientes para verificar mejoras operativas y puntos críticos.

La siguiente sección describe cómo debe iniciarse la ejecución del plan de emergencia mejorado en una situación real, integrando los elementos del análisis Bow Tie y el protocolo operativo del PPRE SEPROCAL 2024.

1. Detección del Evento Crítico (Disparador)

- Sensor fijo detecta caída de presión/caudal en ventiladores principales o auxiliares.
- O personal reporta a través de radio condiciones anormales: aire estancado, gases acumulados, falta de flujo.

2. Activación Automática del Plan

- El Centro de Control registra la falla y comunica activación del PPRE – Protocolo 8.12.
- Se determina el nivel de emergencia según el tipo de falla:
    - Nivel 1: Falla localizada, con redundancia operativa activa.
    - Nivel 2: Falla en múltiples ventiladores, con exposición latente.
    - Nivel 3: Falla total o acumulación confirmada de CO > 25 ppm.

3. Acciones Inmediatas (Primeros 5 minutos)

- El Comandante de Incidentes en Escena (CIE) detiene actividades en interior mina.
- Se activa evacuación ordenada por zonas, según mapa de riesgo.
- Todo el personal debe portar autorrescatadores y dirigirse a los puntos seguros o refugios.

4. Coordinación Operativa

- El Jefe de Ventilación y su equipo verifican físicamente la fuente del problema.
- Las brigadas de emergencia miden concentraciones de CO y O_2 cada 15 minutos.
- El Comité de Operaciones de Emergencia (COE) monitorea la evolución desde superficie.

5. Comunicación

- Se establece contacto inmediato por canal 10 con todo el personal en interior mina.
- Se informa al área médica, administración y jefatura de turno.
- Si hay personal atrapado o sin comunicación, se activa protocolo de búsqueda y rescate.

6. Condiciones para el Reingreso

- Solo se autoriza el reingreso una vez restablecido el sistema de ventilación y verificadas:
    - CO < 25 ppm
    - O_2 > 19.5%
    - Comunicación activa en todas las zonas

TABLA 10

Programa de capacitación 2025 con mejoras del análisis Bow tie

N°	TEMA	PÚBLICO OBJETIVO	ESTADO	CAPACITACION		2025												Total	EJECUTADO
				INTERNA	EXTERNA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		
1	Prevención de accidente por gaseamiento	Personal que ingresa a mina(Min, top, plan, man, log)	P	1		1												1	100%
			E			1													
2	Llenado de IPERC	Personal que ingresa a mina(Min, top, plan, man, log)	P	1			1											1	100%
			E				1												
3	Respuesta a Emergencias por áreas específicas.	Todas las areas	P		1			1										1	100%
			E					1											
4	Primeros Auxilios	Todas las areas	P		1				1									1	100%
			E						1										
5	Notificación, investigación y reporte de incidentes, incidentes peligrosos y accidentes de trabajo.	Todas las areas	P	1						1								1	98%
			E							1									
6	Uso del autorescatador	Personal que ingresa a mina(Min, top, plan, man, log)	P	1							1							1	0%
			E																
7	Riesgo por exposición a CO	Todas las areas	P	1								1						1	0%
			E																
8	Sistemas de ventilación en minería	Todas las areas	P	1									1					1	0%
			E																
9	Uso correcto de sensores de gas y equipos de detección de CO	Personal que ingresa a mina(Min, top, plan, man, log)	P	1										1				1	0%
			E																
10	Procedimiento de evacuación y tiempos de respuesta ante detección de CO	Personal que ingresa a mina(Min, top, plan, man, log)	P	1											1			1	0%
			E																
11	Barreras organizacionales: roles, responsabilidades y comunicación en emergencias	Todas las areas	P	1												1		1	0%
			E																
12	Analisis Bow tie	Todas las areas	P		1												1	1	0%
			E																

TABLA 11

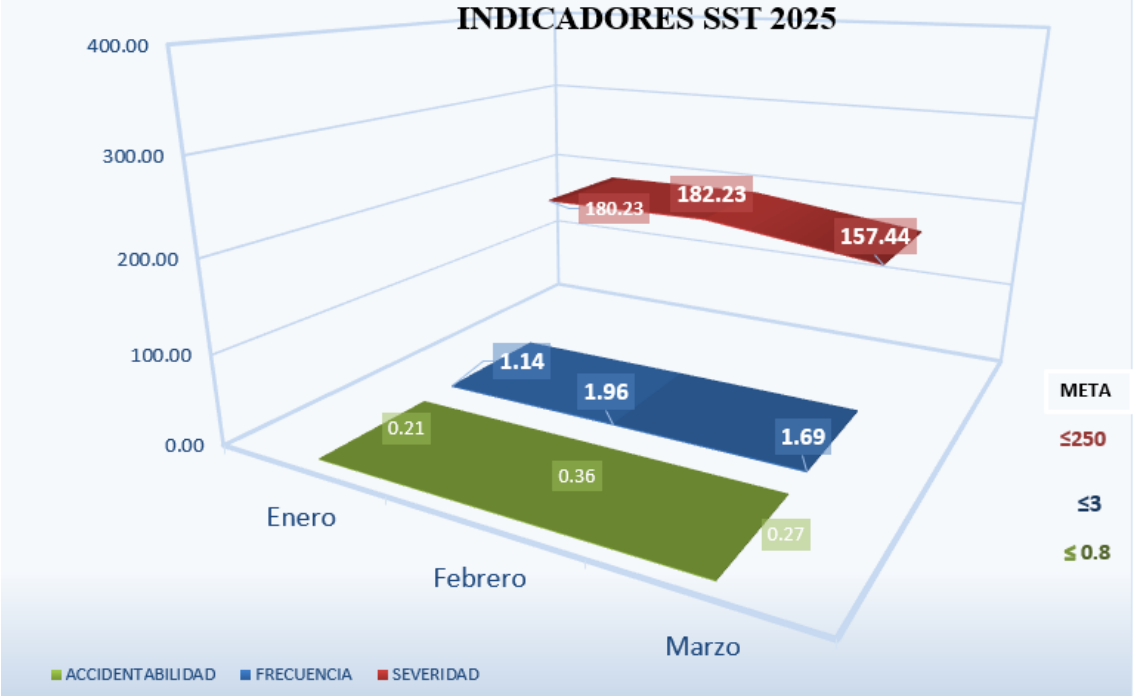
Avance del programa de simulacros 2025

N°	HIPOTESIS ACCIDENTAL	TIPO DE ACCIDENTE/ACCION INVOLUCRADA	ZONA	ESTADO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	RESPONSABLE	CUMP %
1	Victima por intoxicación por gaseamiento por CO	Intoxicación por Gases	Mina	P		1									1		Residente de Obra	50%
				E		1												
2	Victima por accidente vehicular en interior mina	Atropello a personal	Mina	P								1					Residente de Obra	0%
				E														
3	Victima por caida de roca en mina	Caida de rocas	Mina	P					1								Residente de Obra	100%
				E					1									
3	Fuga de sustancias quimicas	Derrame	Mantenimiento	P											1		Residente de Obra	0%
				E														

La Figura 33 muestra la evolución de los indicadores de seguridad correspondientes al periodo de enero a marzo de 2025. Se evidencia una mejora progresiva en dichos indicadores tras la implementación del análisis Bow Tie, lo que sugiere una gestión más efectiva de los riesgos críticos y una mayor efectividad en la respuesta organizacional frente a posibles incidentes.

Figura 33

Indicadores de seguridad 2025



3.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.4.1. OBJETIVO ESPECIFICO 1:

Determinar las actividades críticas que presenten incidentes por exposición de CO en interior mina.

El análisis de los informes de monitoreo correspondientes a los meses de octubre a diciembre de 2024 permitió identificar las actividades operativas con mayor riesgo de exposición a monóxido de carbono (CO) en el interior de la mina. Los resultados obtenidos, mediante detectores portátiles utilizados por inspectores de seguridad y jefes de guardia, evidenciaron concentraciones de CO que superan el límite máximo permisible establecido por la normativa vigente,

TABLA 12

Porcentaje por encima de los Limites Permisibles en Actividades Criticas

Actividad	Limite Permisible (PPM)	Promedio de CO (PPM)	% Superado por el LMP
Limpieza	25.00	33.26	33.04%
Perforación		30.94	23.76%
Voladura		28.94	15.76%
Sostenimiento		26.72	6.88%

Asimismo, se identificó equipos mecanizados en relación con las actividades con mayor porcentaje superado sobre los limites permisibles

TABLA 13

Porcentaje por encima de los Limites Permisibles en Equipos Mecanizados

Equipo	Limite Permisible (PPM)	Promedio de CO (PPM)	% Superado por el LMP
Dumper	500.00	748.75	49.75%
Jumbo		535.00	7.00%
Manitou		667.67	33.53%
Scaler		667.00	33.40%
Scooptram		692.33	38.46%

A partir de esta información, se determinaron las actividades críticas con mayor presencia de este gas, como limpieza y acarreo, perforación de frentes y voladura, resaltan con una mayor presencia de Monóxido de Carbono (CO) en sus actividades

3.4.2. OBJETIVO ESPECIFICO 2:

Identificar los peligros que pueden generar incidentes por la inhalación de CO

A partir de la identificación de las operaciones críticas con mayores niveles de monóxido de carbono (CO), se procedió a analizar las actividades específicas dentro de cada proceso, utilizando como herramienta la matriz IPERC (Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y Controles). Este análisis permitió reconocer, de 18 peligros identificados por inhalación de gases de Monóxido de Carbono, 7 de actividades criticas que presentan un alto nivel de índices de riesgos. os peligros asociados a la posible inhalación de este gas. Los resultados, representados en las figuras 24, 25 y 26, muestran que las actividades críticas con mayor riesgo de exposición al CO se concentran en tres procesos principales: voladura, limpieza y acarreo, y perforación de frentes. Estas actividades presentan condiciones propicias para la generación o acumulación de CO, debido al uso de explosivos, presencia de equipos con combustión interna y deficiencias en la ventilación.

TABLA 14

Índice de Riesgo de Actividades Criticas Identificadas

Área	Actividad Critica	Índice de Riesgo	% de Índice de Riesgo	Clasificación
Voladura	Iniciación de la Voladura	1024	21.621%	Muy Alto
Limpieza	Limpieza de frentes con Scooptram	640	13.513%	Alto
Limpieza	Carguío de Mineral o desmonte con Scoop a Dumper	640	13.513%	Alto
Limpieza	Transporte de Mineral	640	13.513%	Alto
Perforación	Perforación de frentes con Jumbo Hidráulico	640	13.513%	Alto
Perforación	Perforación en breasting con Jumbo Hidráulico	640	13.513%	Alto
Voladura	Eliminación de tiros cortados	512	10.81.8%	Alto

3.4.3. OBJETIVO ESPECIFICO 3:

Representar gráficamente las causas, consecuencias y controles en el Análisis Bow tie

Como resultado del cumplimiento del tercer objetivo específico, se elaboró un análisis Bow Tie para las actividades críticas de voladura, limpieza y acarreo en interior mina, considerando la exposición a monóxido de carbono (CO) como evento principal a controlar. A través de este análisis, se identificaron dos causas principales por actividad y se establecieron múltiples barreras preventivas organizadas de manera secuencial, reflejando un enfoque técnico y adaptado a las condiciones subterráneas. Asimismo, se definieron barreras correctivas o mitigantes que permitirían reducir las consecuencias en caso de materializarse el evento crítico. Este enfoque permitió representar visualmente y de forma estructurada los riesgos asociados, facilitando la comprensión integral de las interacciones entre causas, controles y consecuencias. Los resultados obtenidos proporcionan un marco de referencia práctico para fortalecer la toma de decisiones en seguridad y mejorar la capacidad de respuesta ante incidentes relacionados con gases tóxicos en operaciones subterráneas.

3.4.4. OBJETIVO ESPECIFICO 4:

Diseñar un modelo de plan de emergencia basado en los resultados del análisis Bow tie

El análisis comparativo entre el Plan de Preparación y Respuesta a Emergencias actual de SEPROCAL y la propuesta mejorada basada en el análisis Bow Tie evidencia una serie de oportunidades de mejora en la gestión del riesgo por exposición a monóxido de carbono (CO) en minería subterránea. Si bien el plan vigente presenta una estructura normativa sólida y protocolos generales para diferentes escenarios de emergencia, no aborda de forma específica ni detallada el riesgo asociado a la inhalación de CO, limitando así su eficacia ante eventos críticos relacionados con atmósferas contaminadas. En cambio, la propuesta basada en Bow Tie permite una visualización clara de las causas operativas, el evento crítico y sus consecuencias, integrando además barreras preventivas y de mitigación concretas, lo que facilita la toma de decisiones y la planificación estratégica. Además, se propone el uso de herramientas tecnológicas como el software BowTieXP y sistemas de monitoreo continuo, así como la inclusión de indicadores específicos de control del CO, fortaleciendo la capacidad de anticipación y respuesta ante

este tipo de riesgos. En conjunto, los resultados demuestran que la implementación de un modelo de plan de emergencia apoyado en el análisis Bow Tie no solo mejora la gestión del riesgo, sino que también aporta mayor claridad operativa, control técnico y efectividad en la protección de la vida y la salud del personal minero.

4. CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Las actividades con mayor superación del límite permisible de CO fueron la limpieza de la roca fragmentada (33.04%), perforación de frentes con Jumbo Hidráulico (23.76%) y voladura con ANFO (15.76%). Estos resultados justifican su categorización como actividades de riesgo alto, en emanación de gases tóxicos como el Monóxido de Carbono. En ello, los vehículos que presentaron mayor emisión de gases fueron Dumper (49.75%), Scooptram (38.49%) y Manitou (33.53%).

2. La actividad que presenta un mayor nivel de riesgo identificado mediante análisis IPERC, es la iniciación de la voladura en los frentes de trabajo, el cual represento el 21.62% de nivel de riesgos de los peligros identificados en relación con la emisión de CO. Lo que evidencia la necesidad urgente de mejorar los controles dentro de la actividad de voladura.

3. El análisis Bow Tie permitió representar gráficamente 7 causas principales y más de 8 barreras preventivas y de mitigación, destacando deficiencias en ventilación, supervisión y monitoreo como puntos críticos a reforzar ver (Figura 32).

4. El modelo de plan de emergencia basado en el análisis Bow Tie fortaleció significativamente la gestión del riesgo por exposición a monóxido de carbono (CO), al optimizar el programa de capacitaciones previamente establecido. A mayo, se logró un cumplimiento del 42 % respecto al total de capacitaciones programadas, evidenciando avances en la implementación progresiva del plan.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Se sugiere formalizar la revisión periódica del análisis Bow Tie, estableciendo su actualización semestral como parte del Programa Anual de Seguridad y Salud Ocupacional. Esta revisión permitirá incorporar los hallazgos de auditorías, eventos recientes, cambios operativos o tecnológicos, asegurando que las barreras identificadas sigan siendo efectivas y pertinentes. Asimismo, se sugiere que esta evaluación sea realizada de forma multidisciplinaria, involucrando al comité de seguridad, personal técnico y representantes operativos.

2. En relación con la capacitación, se recomienda desarrollar un módulo específico titulado "Gestión y prevención de exposición a CO", el cual debe estar dirigido tanto al personal operativo como a los mandos intermedios. Este módulo debe incluir contenidos sobre fuentes de emisión de CO, interpretación de lecturas de sensores, uso de equipos de protección respiratoria, rutas de evacuación y actuación ante casos de intoxicación. La capacitación debe ser reforzada periódicamente y validada mediante simulacros prácticos.

3. Se recomienda optimizar los procedimientos post-voladura estandarizando los tiempos de espera antes del reingreso, en función del tipo de explosivo, diseño de la malla y eficiencia de la ventilación. Esto debe complementarse con listas de verificación y mediciones obligatorias de CO. Asimismo, se sugiere establecer un sistema de respuesta escalonada ante emergencias, activando medidas preventivas desde 25 ppm y evacuaciones a partir de 50 ppm, lo que permitirá una gestión más ágil y efectiva del riesgo.

4. Se recomienda fortalecer el sistema de monitoreo de gases en interior mina mediante la instalación de sensores fijos y portátiles de CO en puntos estratégicos, especialmente en zonas con antecedentes de acumulación de gases y escasa ventilación. Estos sensores deben contar con alarmas visuales y sonoras, y estar integrados a un sistema centralizado de monitoreo en tiempo real. Esto permitirá detectar de forma temprana cualquier condición peligrosa y activar automáticamente los protocolos de emergencia establecidos.

5 REFERENCIAS

Bazaluk, O., Tsopa, V., Okrasa, M., Pavlychenko, A., Cheberiachko, S., Yavorska, O., Deryugin, O., & Lozynskyi, V. (2024b). Improvement of the occupational risk management process in the work safety system of the enterprise. *Frontiers In Public Health*, *11*. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1330430

Cabos, R. (2005). Potencial minero en la región Pasco (Tomo 2). Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/PMP-109.pdf

Chećko, J., Howaniec, N., Paradowski, K., & Smolinski, A. (2021). *Gas migration in the aspect of safety in the areas of mines selected for closure*. Resources, 10(7), 73. https://doi.org/10.3390/resources10070073

DECRETO SUPREMO Nº 024-2016-EM. (2016, julio). Gobierno del Perú. Recuperado 27 de abril de 2025, de https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/741887-024-2016-em

He, Z., Wu, Q., Wen, L., & Fu, G. (2018b). A process mining approach to improve emergency rescue processes of fatal gas explosion accidents in Chinese coal mines. *Safety Science*, *111*, 154-166. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.006

Instituto de Seguridad Minera. (2017). Guía para el trabajo seguro en espacios confinados en minería subterránea. https://www.irem.org.pe

Instituto de Seguridad Minera. (2020). Guía para la elaboración de procedimientos escritos de trabajo seguro (PETS). https://www.irem.org.pe

Instituto Geológico y Minero de España. (2019). Riesgos geológicos en minería subterránea. https://www.igme.es

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2020). Guía para la elaboración de planes de gestión reactiva ante emergencias y desastres. https://www.indeci.gob.pe

International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. https://www.iso.org

LEY DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO. (2011, 20 agosto). Diario Oficial el Peruano. https://diariooficial.elperuano.pe/Normas/obtenerDocumento?idNorma=38

Matsimbe, J., Ghambi, S., & Samson, A. (2020, 23 diciembre). *Application of the Bow Tie Method in Accident Analysis: Case of Kaziwiziwi Coal Mine*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3754129

Meng, X., Liu, Q., Luo, X., & Zhou, X. (2018). Risk assessment of the unsafe behaviours of humans in fatal gas explosion accidents in China's underground coal mines. *Journal Of Cleaner Production*, *210*, 970-976. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.067

Mervin, T., Cristhian, M., & Hebert, A. (2019). *Estilos de mineralización en el Complejo Pasco*. Nexa Resources Perú. https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=48638

Ozfirat, M. K., Ozfirat, M., Yetkin, M., & Muharrem, K. (2023). Risk Management for Surface Plants in Mines Using Risk Matrix and Bow Tie Analysis. *Acta Montanistica Slovaca*, *28*(v28/i1), 47-58. https://doi.org/10.46544/ams.v28i1.05

Tong, X., Zheng, X., Jin, Y., Dong, B., Liu, Q., & Li, Y. (2025). Prevention and control strategy of coal mine water inrush accident based on case-driven and Bow-Tie-Bayesian model. *Energy*, 135312. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135312

Wang, J., & Sifamen, V. (2024). Exploring industrial hazards and implementing risk control measures in the mining sector. *Journal Of Infrastructure Policy And Development*, *8*(8), 6255. https://doi.org/10.24294/jipd.v8i8.6255

Xu, Q., & Xu, K. (2018). Mine safety assessment using gray relational analysis and bow tie model. *PLoS ONE*, *13*(3), e0193576. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193576

Zhang, C., Wei, Y., Li, Z., & Zhao, Y. (2017). Hazard-Based Design of the Bow-Tie Method to Prevent and Mitigate Mine Accidents. *Journal Of Failure Analysis And Prevention*, *18*(1), 29-40. https://doi.org/10.1007/s11668-017-0367-3