



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



[Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



CONSTANCIA

N° 085-DI-FIMM-2025

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **TESIS** cuyo título es:

**“DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACION EN LA EXPANSION
DE LAS ZONAS DE EXPLOTACION MINERA - MINA
INMACULADA - AYACUCHO 2023”**

Presentado por:

MESIAS CARDENAS JUAN CARLOS

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 17%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. **En Ica 3 de noviembre de 2025.**

Atentamente,

.....
DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE INVESTIGACION DE LA FIMM

**UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS Y METALURGIA**



**DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA
EXPANSIÓN DE LAS ZONAS DE EXPLOTACIÓN MINERA –
MINA INMACULADA – AYACUCHO 2023**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Desarrollo en ciencias puras, ciencias de la tierra e ingeniería de procesos

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

PRESENTADO POR

BACH. JUAN CARLOS MESIAS CARDENAS

ICA, PERÚ

2025

Dedicatoria

A Dios, por siempre bendecirme y
ser la guía en mis pasos, a mis Madres que
sin ellas nada de esto sería posible, a mi abuela
en el cielo por ser mi inspiración profesional
y a grandes autores que inspiraron esta investigación.

Agradecimiento

Gracias a mis madres, sin ustedes no sería posible
A mi alma mater, la FIMM de la Universidad San Luis Gonzaga.
A los jefes y profesionales de la unidad minera.

Siempre agradecido con todos.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas.....	viii
Índice de figuras	ix
Resumen	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Situación problemática	12
1.2. Antecedentes.....	14
1.2.1. Internacionales	14
1.2.2. Nacionales	18
1.3. Bases teóricas	22
1.3.1. Ventilación de minas.....	22
1.3.1.1. Definición	22
1.3.1.2. Objetivos.....	23
1.3.1.3. Sistema de ventilación de minas	24
1.3.1.4. Factores considerados.....	26
1.3.1.5. Evaluación del sistema de ventilación.....	29
1.3.1.6. Consecuencias de la ventilación deficiente.....	31
1.3.1.7. Análisis de la normativa D.S. 023-2017-EM en ventilación	35

1.3.1.8.	<i>Cálculo de caudal de aire</i>	38
1.4.	Formulación de los problemas	43
1.4.1.	<i>Problema general</i>	43
1.4.2.	<i>Problemas específicos</i>	43
1.5.	Justificación.....	43
1.6.	Objetivos	44
1.6.1.	<i>Objetivo general</i>	44
1.6.2.	<i>Objetivos específicos</i>	44
1.7.	Hipótesis.....	45
1.7.1.	<i>Hipótesis específica</i>	45
1.7.2.	<i>Hipótesis específica</i>	45
II.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA	46
2.1.	Tipo de investigación.....	46
2.2.	Nivel de investigación.....	46
2.3.	Diseño de investigación.....	46
2.4.	Población y muestra.....	46
2.4.1.	<i>Población</i>	46
2.4.2.	<i>Muestra</i>	47
2.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	47
2.6.	Técnicas de análisis e interpretación de datos	47
III.	RESULTADOS	49
3.1.	Generalidades de la unidad minera	49

3.1.1.	<i>Ubicación</i>	49
3.1.2.	<i>Geología</i>	49
3.2.	Diseño de ventilación de minas	51
3.3.	Antecedentes del proyecto	52
3.4.	Objetivos del proyecto	52
3.5.	Trabajo de gabinete	53
3.6.	Evaluación del circuito actual.....	53
3.7.	Cobertura de aire fresco.....	55
3.8.	Condiciones atmosféricas.....	55
3.9.	Ventilación auxiliar	55
3.10.	Circuito de ventilación actual	57
3.11.	Proyección del sistema de ventilación para la infraestructura de las zonas Bárbara, Salvador, Millet y Divina	57
3.11.1.	<i>Calculo de requerimiento de caudal</i>	58
3.11.1.1.	<i>Por equipos diesel</i>	58
3.11.1.2.	<i>Por personal</i>	61
3.11.1.3.	<i>Requerimiento total</i>	62
3.11.2.	<i>Sistema de ventilación proyectado</i>	63
3.11.2.1.	<i>Disposición y ubicación de RB de ventilación</i>	63
3.11.2.2.	<i>Diámetro óptimo del RB</i>	63
3.11.2.3.	<i>Ventiladores principales</i>	65
3.11.2.4.	<i>Ventiladores auxiliares</i>	66

3.11.2.5.	<i>Esquema conceptual del sistema de ventilación proyectado</i>	67
3.11.2.6.	<i>Esquema conceptual del sistema de ventilación Salvador y Bárbara</i>	68
3.11.2.7.	<i>Esquema conceptual del sistema de ventilación Divina y Millet</i>	68
IV.	DISCUSION	70
V.	CONCLUSIONES	73
VI.	RECOMENDACIONES	74
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
VIII.	ANEXOS	81
	Anexo N°1: Operacionalización de variables	82
	Anexo N° 2: Matriz de consistencia.....	83
	Anexo N° 3: Métodos de minado.....	85
	Anexo N° 4: Hidrogeología.....	96

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Bocaminas y rampas de ingreso de aire en la mina Inmaculada</i>	53
Tabla 2. <i>RB de ingreso de aire en la mina Inmaculada</i>	53
Tabla 3. <i>RB de salida de aire en la mina Inmaculada</i>	54
Tabla 4. <i>Temperaturas medidas en la mina Inmaculada</i>	55
Tabla 5. <i>Cantidad de equipos diésel anual - Desarrollo</i>	58
Tabla 6. <i>Cantidad de equipos diésel anual - Explotación</i>	58
Tabla 7. <i>Cantidad de equipos diésel anual - Explotación para Millet y Divina</i>	58
Tabla 8. <i>Cantidad de equipos diésel anual – Millet y Divina</i>	59
Tabla 9. <i>Factor de utilización y disponibilidad mecánica de los equipos diésel</i>	59
Tabla 10. <i>Requerimiento de caudal aire por equipos diésel - Desarrollo</i>	60
Tabla 11. <i>Requerimiento de caudal de aire por equipos diésel – Explotación</i>	60
Tabla 12. <i>Requerimiento de caudal de aire por equipos diésel – Transporte de personal</i>	60
Tabla 13. <i>Requerimiento de caudal de aire por equipos diésel</i>	61
Tabla 14. <i>Requerimiento de aire fresco debido al personal que laborará en interior mina</i>	61
Tabla 15. <i>Requerimiento total de aire fresco para el minado</i>	62
Tabla 16. <i>RB de ventilación proyectados; nomenclatura, longitud, diámetro y coordenadas de ubicación</i>	63
Tabla 17. <i>Características técnicas aproximadas de los ventiladores principales proyectados</i>	66
Tabla 18. <i>Características técnicas aproximadas de los ventiladores auxiliares proyectados</i>	66

Índice de figuras

Figura 1. <i>Ubicación de la Unidad Minera Inmaculada</i>	49
Figura 2. <i>Isométrico de la estructura de la mina Inmaculada</i>	52
Figura 3. <i>Infraestructura del sistema de ventilación actual de la mina Inmaculada</i>	54
Figura 4. <i>Ventilador auxiliar apagado en frente de avance</i>	55
Figura 5. <i>Cambio abrupto en el diámetro de dos ductos de ventilación empalmados</i>	56
Figura 6. <i>Tabique hecho con sacos de arena en una instalación auxiliar</i>	56
Figura 7. <i>Unifilar del circuito actual de ventilación de la mina Inmaculada</i>	57
Figura 8. <i>Gráfica de los costos totales, de capital y operativos en relación con el diámetro óptimo del RB</i>	64
Figura 9. <i>Ubicación de los RB de ventilación proyectados para la nueva infraestructura de minado de las vetas Salvadora, Bárbara, Millet y Divina</i>	65
Figura 10. <i>Esquema proyectado del sistema de ventilación para la explotación de las vetas Bárbara, Salvador, Millet y Divina</i>	67
Figura 11. <i>Esquema proyectado del sistema de ventilación para la explotación de las vetas Bárbara y Salvador</i>	68
Figura 12. <i>Esquema proyectado del sistema de ventilación para la explotación de las vetas Divina y Millet</i>	69

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo determinar que el diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023. Es de tipo aplicada, descriptiva, no experimental, la muestra estará conformada por las vetas Salvadora, Bárbara, Millet y Divina de la Minera Inmaculada, en el año 2023. La expansión queda supeditada al diseño de ventilación: frente a una demanda de 1,131,750 cfm, la oferta alcanza 595,294 cfm (53%), por lo que se debe cerrar un déficit de 536,456 cfm. La revisión del sistema halló restricciones RB-08 y RB-13 obstruidos, estrechamiento en BM-4560, fugas y uso intermitente de auxiliares que disminuyen el caudal útil y aumentan la resistencia. El dimensionamiento, calculado con potencia, dotación y un +15% por fugas, definió metas con velocidades de 25–250 m/min y $T \leq 28$ °C, ajustadas al pico de simultaneidad. Como configuración objetivo, se plantea operar ventiladores principales en paralelo (2x300,000 y 2x250,000 cfm), reactivar RB-18 (300,000 cfm) y abrir siete RB espaciados 500 m, logrando cobertura ≥ 95 % y estabilidad térmica.

Palabras Claves: *expansión de mina, sistema de ventilación, ventilación de minas.*

Abstract

The objective of this study is to determine whether the design of the ventilation system influences the expansion of mining areas – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023. It is an applied, descriptive, non-experimental study, and the sample will consist of the Salvadora, Bárbara, Millet, and Divina veins of the Minera Inmaculada mine in 2023. The expansion is contingent upon the ventilation design: faced with a demand of 1,131,750 cfm, the supply reaches 595,294 cfm (53%), meaning that a deficit of 536,456 cfm must be closed. The system review found obstructed RB-08 and RB-13 restrictions, narrowing in BM-4560, leaks, and intermittent use of auxiliaries that decrease useful flow and increase resistance. The sizing, calculated with power, capacity, and a +15% allowance for leaks, defined targets with speeds of 25–250 m/min and $T \leq 28$ °C, adjusted to the peak of simultaneity. As a target configuration, the plan is to operate main fans in parallel (2×300,000 and 2×250,000 cfm), reactivate RB-18 (300,000 cfm), and open seven RBs spaced 500 m apart, achieving $\geq 95\%$ coverage and thermal stability.

Keywords: *mine expansion, ventilation system, mine ventilation.*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

En la operación subterránea peruana, la incorporación progresiva de frentes y áreas a mayor profundidad reconfigura la demanda de ventilación, pues los planes de mina separan exploración, preparación y metas mensuales y organizan avances por zonas y niveles [1]. Bajo ese contexto, una industria centrada en vetas y cuerpos, con programas anuales de exploración, desarrollo y preparación, requiere gobernar con rigor los servicios auxiliares para sostener simultáneamente productividad y seguridad operativa [2].

En minería subterránea, la ventilación consiste en disponer medios y prácticas para garantizar caudal de aire fresco suficiente a personal y equipos, mientras se diluyen y evacúan contaminantes y calor. Su tamaño se define por normativa (DS-023-2017-EM) y por la carga, dotación, equipos diésel y un margen de fugas, usualmente cercano al 15% del caudal subtotal [3].

La necesidad de evaluar el sistema crece con la expansión de la operación. Informes locales han registrado coberturas de apenas 56%, lo que obliga a replantear ejes, ventiladores y secciones, modelando en Ventsim antes de ejecutar las obras; además, recomiendan evaluaciones técnicas integrales semestrales para sostener el control operacional [4].

En el ámbito internacional, VentSim se aplica en minas complejas como carbón con metano para trazar circuitos que cumplan caudales y velocidades legales vigentes y para probar escenarios con reguladores y ventiladores auxiliares hasta lograr diluciones seguras [5].

A nivel nacional, diagnósticos han cuantificado requerimientos de 1,015,113 cfm con coberturas del 53%, lo que obliga a instalar ventiladores principales para

revertir déficits; además, se sintetizan las funciones de VentSim, validación, selección de ventiladores, análisis económico y propagación de gases [6].

Además, en operaciones andinas, la red combina ventiladores principales de 150–300 kcfm y secundarios de 30–110 kcfm, con balances de ingreso superiores a 1 000 000 cfm, a fin de sostener ventilación por múltiples bocaminas y raise borers, evidenciando la escala y la complejidad de estas redes [7].

En este marco, la unidad de análisis corresponde a la mina Inmaculada (Ayacucho). La expansión hacia vetas nuevas Millet y Divina junto con la ampliación en el noreste de Ángela (Zona Salvador) obliga a actualizar el capítulo de ventilación y a proyectar la red. Entre el 22 y el 24 de octubre de 2023 se realizó una inspección técnica para levantar la condición del sistema operativo, configurado en extracción con ventiladores axiales principales y múltiples bocaminas (niveles 4300, 4400, 4500 y 4560). La proyección se apoya en un modelo en VentSim, en línea con los antecedentes metodológicos locales.

Las causas se asocian a crecimiento sin reajuste de resistencias y caudales; déficits de cobertura que exigen nuevos ejes y ventiladores; fugas en mangas y tabiques alrededor del 15% que elevan la demanda efectiva; y finalmente, complejidad geométrica que obliga a reconfigurar rutas y diámetros de raise borers.

Las consecuencias podrían recaer en más tiempo de despeje posvoladura, mayor riesgo térmico y de gases, y cuellos en zonas críticas. Como respuesta factible, la evaluación y diseño plantean redistribuir e incrementar capacidad en ventiladores principales y secundarios, ampliar secciones y raises para reducir pérdidas de carga, automatizar ventilación y evaluar semestralmente para calibrar el modelo y el control energético.

En síntesis, la expansión de Inmaculada obliga a rediseñar la ventilación con base en datos, simulación y normas, cerrando brechas de cobertura y asegurando caudales, presiones y tiempos de despeje compatibles con operación segura y continua.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Internacionales

En Ecuador, **Muñiz L. y Palacios C.** [8], en **2019**, en su investigación, el cual planteó como **objetivo**: “Diseñar el sistema de explotación y un circuito de ventilación para la veta Cornella, a través de una metodología de ingeniería que considere los parámetros técnicos, económicos, sociales y ambientales, para la extracción de los recursos minerales”. Fue una investigación descriptiva, cuantitativa, técnicas de campo. Al término se **concluyó** que:

- Se ha optado por emplear scrappers con una potencia de 25 hp y palas de arrastre de 1 m³ para las operaciones de acarreo de material, facilitando así la alimentación de los vagones y el transporte del mineral hacia el exterior de la mina. Asimismo, se ha calculado un caudal de aire de 431.18 m³/min, destinado a abastecer las vetas Cornella y Vizcaya, utilizando como base los parámetros medidos directamente en campo.
- El circuito de ventilación propuesto consiste en un sistema impelente que incorpora un ventilador axial instalado en la superficie, en la entrada del pozo desfondado, y una manga de ventilación de 800 mm de diámetro que se extiende a lo largo de 1500 m. Complementariamente, se utilizan blowers, actualmente

operativos en la mina, para la extracción de gases y la correcta circulación del aire dentro del sistema de ventilación.

En Ecuador, **Valarezo M.** [9], en 2020, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Diseñar el sistema de ventilación en la concesión minera Cebral en la Concesión Minera R-Nivel, Zaruma”. Fue una investigación cuantitativa, no experimental, de campo y descriptivo. Al término los autores **concluyeron** que:

- El diseño propuesto para la ventilación se fundamenta en un caudal inicial de 400 CFM, suministrado por la tubería ya establecida en la mina. Con este caudal, se activa la primera turbina, que opera a 764.01 rpm, y a través de un sistema de poleas –con una polea principal de 30 cm y una secundaria de 50 cm– se potencia el rendimiento del ventilador hasta lograr 2292.03 rpm, resultando en el desplazamiento de la columna de aire a lo largo de 775.84 m. Este resultado es crucial para respaldar las futuras actividades de exploración y explotación minera.
- Respecto al sistema de desagüe, se identificaron deficiencias en la recolección de aguas subterráneas. Como medida correctiva, se implementaron mejoras en las cunetas, incorporando una membrana filtrante de 0.5 m y la instalación de un tanque de recolección con una capacidad de 12 m³, optimizando así la eficiencia y funcionalidad del sistema de desagüe en el contexto minero.

En Colombia, **Ibáñez J. y Montoya D.** [5], en 2022, en su investigación el cual plantearon como **objetivo**: “Diseñar el circuito de ventilación de la

mina Carbones Torre Fuerte S.A.S. para mejorar las condiciones de circulación del aire mediante un estudio técnico y económico”. Asimismo, fue una investigación de tipo mixta, enfoque cuantitativo, no experimental, descriptivo. Al término los autores **concluyeron** que:

- La infraestructura eléctrica en muchas minas de pequeña escala es prácticamente inexistente, debido tanto a su ubicación remota que impide la conexión al sistema interconectado nacional, como a los altos costos que implicaría extender la red hasta el punto de bocamina o mantener una operación basada en generadoras de ACPM. Como consecuencia, la ventilación forzada queda relegada, ya que garantizar un suministro continuo de energía de calidad representa un desafío económico considerable, lo que lleva a depender de la ventilación natural para cubrir las necesidades de aire en el interior de los socavones.
- En la actualidad, la mina Carbones Torre Fuerte S.A.S. opera bajo condiciones de ventilación que no son las óptimas, lo que plantea la necesidad de realizar un estudio posterior que valore el impacto económico de la reposición continua de las maderas. Este análisis permitiría determinar el retorno de la inversión, evaluando si los costos asociados a mejorar las condiciones de ventilación pueden ser justificables financieramente y, en consecuencia, si es viable que la empresa implemente las modificaciones necesarias para optimizar tanto la seguridad como la eficiencia operativa.

En Ecuador, **Mogrovejo J. y Valarezo M.** [10], en 2022, en su investigación el cual plantearon como objetivo: “Proponer un nuevo

sistema de explotación que sea el más adecuado para la explotación aurífera de la mina Kristian David, ubicada en el cantón Pasaje, provincia de El Oro”. Asimismo, fue una investigación de tipo descriptiva, de campo, observacional y no experimental. Al término los autores concluyeron que:

- Con base en la caracterización geomecánica realizada, se ha determinado que el sistema de explotación óptimo consiste en un esquema de subniveles, adoptando niveles principales con medidas de 2,15 x 2,30 metros y subniveles de 1,75 x 2,30 metros. El análisis reveló que la propuesta de diseño es compatible con la situación actual de la mina, dado que se dispone del equipo necesario para su ejecución. En consecuencia, el nuevo plan contempla la apertura de dos piques ciegos, dos niveles y la incorporación de seis subniveles adicionales, sumándose a la infraestructura ya existente.
- Para acceder a estos niveles y subniveles, se utilizarán tres piques actualmente operativos, a los que se agregarán dos piques adicionales que funcionarán como vías de acceso para el personal y el transporte del mineral. Estos nuevos piques se proyectan con un ángulo de inclinación de 80 grados y una profundidad de 100 metros cada uno, de modo que cada uno permita la comunicación entre tres subniveles y dos niveles consecutivos (conexión entre el Nivel 3 y el Nivel 4, y entre el Nivel 4 y el Nivel 5). En conjunto, la implementación de este sistema permitirá alcanzar una profundidad total de 420 metros desde la bocamina.

1.2.2. Nacionales

En Huancayo, **Lozano P.** [6], en el año 2019, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Realizar un plan de mejoramiento de ventilación en zonas cuerpos en Cia Minera Casapalca S.A.”. Asimismo, fue una investigación cuantitativa, nivel descriptivo, método científico y diseño descriptivo explicativo. Al término **concluyó** que:

- Se ha identificado que los ventiladores instalados en el sector Cuerpos no alcanzan su capacidad de diseño, como se evidencia en los casos de los ventiladores 109 y 110, que extraen alrededor de 359 151 cfm, en contraste con la capacidad de 300 000 cfm diseñada para el Raise Boring 131, lo cual implica un aprovechamiento subóptimo a partir del Nv. 18 en dicho sector.
- Por otro lado, el elevado consumo de energía eléctrica en el sector se atribuye, en parte, a que los diámetros de los Raise Boring 593 y 600 son de tan solo 2,1 m en promedio, lo que resulta insuficiente para cubrir las nuevas exigencias, especialmente considerando que este sector concentra el 79% de la producción minera. Además, la configuración en serie de los ventiladores principales, ejemplificada por la instalación en el RB 593 de un ventilador de 150 000 cfm apoyado por dos unidades de 60 000 cfm, se utiliza para contrarrestar la alta resistencia del sistema de ventilación. Por ello, se estima que la optimización de la ventilación en el sector Cuerpos requerirá una inversión de US\$ 2 086 675,75, monto que se justifica por la relevancia operativa y productiva del área.

En Cusco, **Loayza A.** [11], en el 2021, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Simular el sistema de ventilación actual y en base a ello, proyectar un sistema de ventilación para el 2021 cumpliendo los requerimientos de planeamiento a corto plazo de la Unidad Operativa Pallancata”. Asimismo, fue una investigación aplicada, descriptiva, evaluativa, experimental, nivel comparativo explicativo. Al término el autor **concluyó** que:

- Para el desarrollo del sistema de ventilación proyectado, se ha considerado indispensable cumplir con la LOM de la Unidad Operativa Pallancata, la cual contempla que para 2019 la zona “Pablo” disponga de 14 pisos. Con el fin de satisfacer el requisito de un flujo de aire de 478,055 cfm, se analizaron cuatro alternativas de ventilación, siendo la Alternativa 02 la más idónea para la instalación de un ventilador de 150,000 cfm, ya que ofrece una cobertura del 104 %, junto con un flujo de entrada de 478,055 cfm y uno de escape de 495,521 cfm, lo que se refleja en costos mensuales de energía de \$109,348 y operativos de \$104,530.
- En otro aspecto del diseño, se evaluó la instalación de dos ventiladores de 150,000 cfm para asegurar el avance en la profundización de la Zona Pablo, comprendida entre los niveles Nv. 4280 y Nv. 4200. Dentro de las cuatro alternativas planteadas para este escenario, la opción RC 04 2, que incorpora dos ventiladores de la marca TOMOCORP, se identificó como la alternativa de menor costo, optimizando así los recursos y cumpliendo con los requerimientos del proyecto.

En Cusco, **Ccanque J.** [4], en el año 2023, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Determinar el nuevo sistema de ventilación para evacuar el aire viciado de las labores, y el costo de inversión por la ejecución e implementación de la chimenea RB 338 en la cia Minera Alpayana S.A.”. Asimismo, fue una investigación aplicada, nivel descriptivo, experimental de campo. Al término el autor **concluyó** que:

- En la unidad minera Alpayana S.A., particularmente en el área Cuerpos, la infraestructura de ventilación inicial presentó una cobertura del 89% y un déficit de 143,106.73 cfm, lo que indica que los requerimientos operacionales de la mina no fueron satisfechos adecuadamente. Luego de la implementación del proyecto RB 338, la cobertura aumentó al 98.7% y el déficit disminuyó a 19,427.20 cfm. La instalación de un ventilador de superficie de 200,000.0 cfm resultó en mejoras sustanciales tanto en el volumen como en la calidad del aire que ingresa a la mina, asegurando así la seguridad de los empleados y optimizando el rendimiento de los equipos y el personal.
- El proyecto incluyó una reconfiguración de la estructura de ventiladores: el número de ventiladores principales aumentó de tres a cuatro, mientras que el número de ventiladores secundarios disminuyó de seis a cuatro, y los ventiladores auxiliares se redujeron de cincuenta y siete a cuarenta y dos. Los datos de consumo de energía indican un aumento en el consumo de los ventiladores principales, que pasaron de 644.544,0 kWh/mes a 913.104,0 kWh/mes. Por el contrario, el consumo de los

ventiladores secundarios disminuyó de 358.080,0 kWh/mes a 196.944,0 kWh/mes, mientras que el consumo de los ventiladores auxiliares disminuyó de 764.657,46 kWh/mes a 539.067,06 kWh/mes. Los ajustes dieron como resultado un ahorro total de 118.166,40 kWh al mes, lo que se traduce en un beneficio económico de \$5.908,32 mensuales.

En Huancayo, **Solier J. [7], en el año 2023**, en su investigación el cual planteó como **objetivo**: “Determinar la manera como afecta la demanda de aire, el monitoreo, los parámetros y la estandarización del sistema de ventilación principal, en los indicadores de la Unidad Minera Andaychagua”. Asimismo, fue una investigación de tipo aplicada, nivel explicativo, método deductivo, diseño correlacional. Al término el autor **concluyó** que:

- La evaluación del sistema de ventilación de la Unidad Minera Andaychagua indica que la demanda de aire, junto con el monitoreo y estandarización de parámetros, afecta significativamente los indicadores de desempeño ($p < 0,05$). El caudal de aire que ingresa a la mina es de 27.848 m³/min, mientras que el caudal de salida es de 29.077 m³/min, superando el requerimiento de 26.072 m³/min. El monitoreo revela velocidades que van desde los 28 a los 60,9 m/min, registrándose temperaturas máximas de 33,6 °C y 34,6 °C en puntos críticos, mientras que los niveles de gases se mantienen por debajo de los umbrales permisibles.

- Los parámetros del sistema revelan que las secciones poseen un área promedio de 18,8 m², una temperatura promedio de 28,6 °C, un nivel de humedad de 78,3%, una presión de 643 hPa y una resistencia de 0,02057 Ns²/m⁸. A pesar de que los accesorios de la manga se evaluaron con una evaluación de desempeño de pobre a regular, las métricas generales indican una cobertura del 110%, una duración de ventilación de 120 minutos y eficiencias del 81,2% para los ventiladores principales y del 60,2% para los ventiladores auxiliares, lo que culmina en una eficiencia total del 72,9%. Los costos mensuales de energía ascienden a \$188.888, mientras que el costo de construcción de Raise Boring es de \$1.267 por metro, lo que resalta la necesidad de equilibrar el rendimiento del sistema con la inversión requerida.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Ventilación de minas

1.3.1.1. Definición

La ventilación en minería se entiende como el mantenimiento de un flujo continuo de aire a través de todas las labores subterráneas, con el objetivo de sostener una atmósfera respirable y condiciones seguras para la actividad extractiva. En la práctica, el sistema introduce desde la superficie aire fresco hacia el interior y expulsa al exterior el aire viciado o contaminado, logrando así diluir y remover los contaminantes generados por las operaciones bajo tierra. El suministro debe asegurar volumen (caudal) y calidad adecuados para preservar un ambiente saludable, aproximadamente 21% de oxígeno y concentraciones bajas de gases

tóxicos, polvo y calor. La gestión contempla la ventilación principal, que configura el circuito general de toda la mina, y la ventilación auxiliar dirigida a frentes específicos, garantizando que ningún sector con presencia de personal quede sin la debida renovación de aire en todo momento [12].

En términos operativos, ventilar una explotación subterránea exige configurar un circuito con caminos de entrada de aire limpio (ductos o chimeneas) y rutas de salida del aire usado (chimeneas o galerías de retorno), enlazadas por las diversas labores mineras. El movimiento del caudal en ese circuito se logra mediante ventiladores mecánicos, que aseguran circulación a lo largo de toda la red. Desde la superficie, el aire nuevo desciende por shafts, rampas y galerías de ventilación y se distribuye hacia niveles y frentes; en paralelo, el aire contaminado se reúne en las vías de retorno que lo llevan a superficie. Durante su recorrido, la corriente ventilante diluye gases peligrosos entre ellos metano liberado por la roca y gases de explosivos y ayuda a acondicionar el ambiente al arrastrar polvo y calor, antes de su descarga al exterior. En síntesis, la finalidad del sistema es sostener un entorno subterráneo respirable en todos los sectores, retirar contaminantes y modular las condiciones termoambientales para resguardar la salud y la vida de quienes trabajan bajo tierra [13].

1.3.1.2. Objetivos

Objetivo general: mantener en la mina un entorno seguro y saludable mediante la renovación continua del aire, en forma sostenida, en todos los turnos y áreas. En esencia, la ventilación subterránea preserva la vida

y sostiene condiciones aceptables de trabajo en las labores. Para ello, debe suministrarse un caudal suficiente de aire fresco que diluya con rapidez los contaminantes peligrosos por debajo de los límites de exposición ocupacional y expulse al exterior el aire viciado [13].

Objetivos específicos. En una explotación subterránea, la ventilación articula metas concretas estrechamente vinculadas con la seguridad y la eficiencia, garantizar al personal una fracción de oxígeno adecuada para la respiración, es decir, 20–21 % O₂ en el aire evitando episodios de hipoxia; aportar el aire comburente requerido por motores diésel e instalaciones subterráneas para su desempeño correcto; impedir la aparición de atmósferas explosivas al mantener gases inflamables, como el metano, por debajo de su límite explosivo; y diluir/remover los gases tóxicos y el polvo en suspensión originados por voladuras, equipos diésel y el macizo rocoso, manteniéndolos bajo los límites permisibles [14].

A la par, el sistema modula el clima en las labores al disipar el calor geotérmico y el generado por la maquinaria, con el fin de prevenir el estrés térmico del trabajador. En conjunto, estos propósitos sostienen un ambiente respirable, previenen intoxicaciones, explosiones por gas, enfermedades pulmonares y golpes de calor, y permiten que la operación avance con eficiencia en cumplimiento de la normativa de seguridad vigente [15].

1.3.1.3. Sistema de ventilación de minas

Se entiende por sistema de ventilación de mina el conjunto de medidas de ingeniería y componentes que posibilitan la circulación del aire a través de todas las zonas de la explotación subterránea. Está formado por

excavaciones que cumplen función de conductos galerías, rampas y chimeneas además de equipos mecánicos y dispositivos de control del flujo. En su configuración básica, contempla [13], [14], [15]:

- puntos de ingreso que aportan aire fresco bocaminas o pozos de ventilación de bajada;
- puntos de retorno chimeneas o salidas por donde se evacúa el aire usado;
- ventiladores principales encargados de mover grandes caudales, usualmente instalados en superficie o en bocas de chimeneas;
- ventiladores auxiliares y ductos flexibles que conducen aire hacia frentes o desarrollos; y
- elementos de control de la ventilación, tales como puertas, compuertas (reguladores), cortinas y sellos, que encauzan la corriente por las rutas requeridas.

En la práctica, la circulación se configura como un bucle de ingreso y retorno, el aire fresco se introduce desde superficie y, por un conducto principal rampa o pique de ventilación, desciende hasta los niveles operativos subterráneos. A partir de allí se deriva, a través de galerías conductoras, hacia frentes y zonas activas. La corriente cargada de polvo, gases y calor se recoge por galerías de retorno que convergen en una chimenea o salida principal, donde ventiladores extractores inducen su expulsión al exterior [15].

Conviene subrayar que la ventilación debe concebirse como un sistema vivo, capaz de ajustarse al crecimiento de la explotación. Cada vez que se habilitan galerías o zonas nuevas, el circuito general se modifica y se

extiende, ya sea prolongando ductos o levantando chimeneas adicionales para garantizar que el aire limpio alcance esos sectores y que el aire usado se evacúe con eficacia. El diseño, por tanto, descansa en una ingeniería cuantitativa: se estiman pérdidas de carga, resistencias de los distintos tramos y se define la configuración y potencia de los ventiladores con el objetivo de lograr un balance operativo: caudal suficiente en todos los frentes con la menor energía posible. En última instancia, la ventilación de mina es una arquitectura integrada de conductos, ventiladores y dispositivos de control que sostiene una circulación estable en toda la obra subterránea y, con ello, resguarda la integridad del personal y la continuidad de las operaciones [16].

1.3.1.4. Factores considerados

El dimensionamiento y diseño de la ventilación de una mina depende de numerosos factores técnicos y operativos, los cuales determinan cuánto aire es necesario y cómo debe distribuirse. Los principales factores a considerar son [17], [18]:

- Número de trabajadores. La presencia de personal bajo tierra condiciona de forma directa la demanda de oxígeno y la generación de CO_2 y calor metabólico. A medida que aumenta la dotación, debe incrementarse el caudal de aire fresco tanto para la respiración como para diluir el CO_2 exhalado. En consecuencia, una guardia numerosa en zonas profundas exige más flujo para conservar ~21% de O_2 y mantener el CO_2 por debajo de 0.5%.
- Extensión y sección de las labores. La longitud acumulada de galerías y su sección transversal determinan el volumen de aire a

desplazar y la resistencia al flujo. Explotaciones más extensas o con frentes remotos requieren caudales superiores para ventilar todas las áreas, mientras que galerías de menor sección incrementan las pérdidas de carga por fricción y obligan a seleccionar ventiladores de mayor potencia.

- Maquinaria de combustión interna. La magnitud y potencia del parque diésel en operación (scoops, camiones, jumbos, etc.) determinan la ventilación necesaria. Sus motores generan CO y NOx, partículas diésel y calor, que deben diluirse con abundante aire fresco. Cuanto mayor sea el número de equipos y su potencia trabajando a la vez, mayor será el caudal requerido para sostener los contaminantes bajo límites permisibles.
- Emanaciones de gases del macizo rocoso. En ciertos yacimientos afloran gases naturales metano asociado a vetas carbonosas o sulfurosas, y radón en litologías uraníferas. Si la ventilación no alcanza en operación regular, tales gases tienden a acumularse. Por eso, cuando la geología anticipa liberaciones, deben contemplarse caudales que aseguren su dilución por debajo de niveles peligrosos.
- Condiciones térmicas (temperatura y humedad). Con la profundidad y la propia actividad extractiva, la temperatura sube. Si el macizo o el aire superan alrededor de 24–27 °C, se incrementa la ventilación para extraer el aire caliente e introducir reemplazo más frío. A su vez, en climas húmedos o ante infiltraciones de agua caliente, crece la humedad relativa y se dificulta la disipación de

calor corporal; la circulación forzada ayuda a controlarla. En síntesis, en minas calientes la ventilación cumple también una función de refrigeración.

- Uso de madera u otros materiales combustibles. Cuando el sostenimiento recurre a madera entibados, cuadros u otras sustancias susceptibles de descomponerse o arder, se añade una carga de contaminantes. En su degradación u oxidación, la madera consume oxígeno y libera CO_2/CH_4 ; por ello, en explotaciones con alto porcentaje de estructura de madera debe contemplarse caudal adicional para compensar dichas emisiones. La normativa peruana incorpora, además, un factor de corrección que depende del porcentaje de sostenimiento construido en madera.
- Altitud de la operación. Al aumentar la elevación sobre el nivel del mar, disminuye la masa de aire por unidad de volumen; por ello, en faenas andinas (>3000 m s. n. m.) cada metro cúbico aporta menos oxígeno que a nivel del mar. Para entregar la misma cantidad de O_2 se debe mover un caudal mayor. En consecuencia, los criterios de ventilación corrigen el caudal por persona según la altitud y se reconoce que, a esas alturas, la combustión de los motores diésel pierde eficiencia, elevando la emisión de gases y, con ello, el requerimiento de ventilación.

Además de los factores principales, es imprescindible integrar variables operacionales. La producción diaria, tonelaje de mineral extraído es determinante porque las voladuras y el movimiento de mineral generan polvo y gases en proporción a la producción. El método de minado puede

concentrar la actividad en zonas específicas, elevando requerimientos de aire locales. Y la confiabilidad de los equipos de ventilación exige un diseño con redundancias o capacidad adicional para cubrir la eventual falla de un ventilador. En conjunto, el ingeniero de ventilación debe ponderar integralmente factores humanos, geológicos, térmicos y operacionales para establecer el caudal de aire necesario y configurar un sistema capaz de suministrarlo de manera adecuada [19].

1.3.1.5. Evaluación del sistema de ventilación

Antes de ampliar zonas de explotación, resulta imprescindible auditar el sistema de ventilación en operación para establecer su condición y desempeño. El proceso comprende campañas de medición en sitio, la revisión de los parámetros de diseño y su contraste con los estándares exigibles. En el Perú, el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería dispone evaluaciones integrales semestrales del sistema y, además, evaluaciones parciales cada vez que se introduzcan cambios significativos en las labores o en los circuitos de aire. Estas tareas las ejecuta personal especializado en ventilación, que aplica técnicas de mapeo aforos de caudal y lecturas de presión en distintos puntos para diagnosticar el comportamiento del sistema [19], [20].

Un indicador central es el balance de caudales: el total que ingresa a la mina frente al que abandona por los retornos. En condiciones adecuadas deben ser casi idénticos; la norma establece que la diferencia no supere el 10%, señal de un circuito bien sellado y con pérdidas acotadas. En terreno, la verificación se realiza con anemómetros o sensores en los accesos principales de ingreso y en las chimeneas de retorno,

comparando los resultados para identificar fugas o aportes de aire anómalos [20].

La comprobación de suficiencia del sistema pasa por establecer si la ventilación disponible cubre la demanda real. Para ello se integran los requerimientos teóricos de aire por personal, equipos, control térmico, entre otros, y ese total se contrasta con el caudal efectivamente suministrado en mina. Ese contraste define si la oferta satisface los consumos previstos en operación. Cuando la capacidad instalada, por ejemplo, la suma de caudales de los ventiladores principales queda por debajo de la demanda estimada, se concluye que el sistema está subdimensionado para la condición actual o la prevista. Suele ocurrir que una zona profunda de nueva explotación no reciba los m^3/min de aire fresco necesarios, anticipando un déficit en la expansión proyectada. La evaluación busca ubicar estos cuellos de botella de ventilación y priorizar su corrección. Se detectan áreas deficitarias con aforos de velocidad en frentes y con control de concentraciones gaseosas. Si se observa CO_2 por encima de 0.5 % en volumen, o contaminantes diésel (NO_2 , CO) cercanos a sus límites, se infiere ventilación insuficiente en ese sector [21].

Dentro de la evaluación, se incorpora un esquema de seguimiento ambiental continuo o por campañas. La normativa exige medir, en labores y vías principales, así como en frentes activos, los parámetros clave de la calidad del aire, fracción de oxígeno, niveles de CO_2 , presencia de gases tóxicos (CO , NO_x , SO_2) y temperatura del ambiente. Se consideran criterios habituales de seguridad mantener O_2 por encima de 19.5%, CO_2 claramente por debajo de 0.5%, CO menor a 25 ppm y $\text{NO}_2 < 3$ ppm;

cualquier superación apunta a deficiencias de ventilación o a fuentes de contaminación no controladas [21].

Concluidas las mediciones, los resultados se contrastan con el plan de ventilación vigente y con lo establecido por la norma. El Artículo 252 del reglamento peruano requiere documentar, como parte de la evaluación integral, la ubicación de estaciones de medición, el estado de ventiladores y dispositivos de control, y la cartografía actualizada de la red de ventilación, entre otros contenidos. A partir de ello se elaboran informes técnicos con representaciones de la red, tablas que enfrentan caudales medidos y requeridos por zona, y un paquete de recomendaciones. Estas suelen abarcar optimizaciones de configuración sellado de fugas, reubicación o adición de controles, ampliaciones de capacidad instalar ventiladores adicionales o de mayor potencia en superficie, o abrir nuevas chimeneas y ajustes operativos limitar la simultaneidad de equipos diésel cuando el aire es insuficiente y reforzar el mantenimiento para reducir emisiones [20], [21].

1.3.1.6. Consecuencias de la ventilación deficiente

Cuando la ventilación es insuficiente en una mina subterránea, la operación queda expuesta a peligros para la salud y la seguridad, con potencial de accidentes mayores. El déficit de renovación de aire provoca acumulación de gases tóxicos, reducción del oxígeno disponible, formación de atmósferas explosivas por gases inflamables, incremento de temperatura y humedad, y altas concentraciones de polvo, entre otros [13].

El mecanismo es directo, si el caudal no alcanza para diluir los contaminantes, estos se concentran con rapidez. Los motores diésel generan monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x); las tronaduras aportan cantidades significativas de CO, NO_x y humos nitrosos; y tanto la respiración humana como la combustión consumen O₂ y producen CO₂. En esas condiciones, un sistema ventilatorio deficiente permite que las mezclas gaseosas alcancen niveles peligrosos en poco tiempo [15].

La exposición aguda al CO por encima de 100 ppm provoca intoxicación cefalea, mareos, náuseas y, a concentraciones mayores, puede ser mortal en minutos. Asimismo, niveles elevados de NO_x ocasionan irritación pulmonar severa y pueden conducir a edema pulmonar. Se registran episodios de envenenamiento por CO tras explosiones o incendios, agravados por la incapacidad del sistema para despejar ese gas. Aun sin alcanzar umbrales letales, un ambiente con CO₂ excesivo o con déficit de oxígeno induce fatiga y merma la atención, elevando la probabilidad de errores y de incidentes adicionales o accidentes laborales graves [15].

Entre los riesgos más severos de un sistema ventilatorio deficiente está la aparición de atmósferas con potencial explosivo. En yacimientos en particular polimetálicos el macizo libera metano (CH₄). Cuando su fracción en el aire oscila entre ~5% y 15% la mezcla se vuelve detonante. La barrera principal es la ventilación, que mantiene la concentración por debajo del límite; como nivel de alerta suele adoptarse 1%. Si el barrido de aire no basta, el CH₄ y otros inflamables, como H₂S en minas sulfuradas, se acumulan y, ante una chispa de equipos o explosivos,

pueden detonar. Además, la combustión de explosivos en labores con pobre renovación genera bolsas de gases detonantes, con riesgo de explosión secundaria si no se ventila y se aguarda el tiempo debido [14]. Una implicancia inmediata de un sistema ventilatorio deficiente es la caída del oxígeno ambiental por debajo del mínimo admitido de 19.5%. Esto ocurre cuando gases asfixiantes desplazan al O₂ en sectores con renovación insuficiente, el caso típico es la acumulación de CO₂ inerte originado por detonaciones o por la respiración en recintos confinados. Las consecuencias son rápidas, con 17% de O₂ aparece disnea; si el contenido baja a 10–12% puede producirse pérdida de conciencia y asfixia. La minería tradicional presenta la mezcla empobrecida en oxígeno y enriquecida en CO₂, capaz de apagar lámparas y vidas. De ahí la necesidad de sostener un barrido continuo de aire fresco alto en O₂ en todas las zonas habitadas; si ello falla, la hipoxia se instala progresivamente: primero surge fatiga y torpeza, elevando la probabilidad de errores y accidentes, y luego, si no se restituye el oxígeno, sobrevienen el colapso y la muerte [13].

Cuando la renovación de aire es insuficiente, surgen problemas térmicos severos. En labores profundas o emplazadas en climas cálidos, el aire estancado se caldea y, sin un barrido adecuado, las temperaturas en los frentes superan los rangos de confort, por encima de 30 °C de temperatura efectiva. Ello precipita estrés térmico, deshidratación, calambres, agotamiento y, en los casos límite, golpes de calor fatales. La humedad relativa elevada empeora el cuadro porque entorpece la sudoración y el enfriamiento del cuerpo. La acumulación de calor y la exposición a aire

mal renovado acarrear riesgos serios para la salud del minero en el largo plazo. Frente a este escenario, la medida más directa es incrementar la ventilación para extraer calor y humedad; si ello no ocurre, suelen requerirse soluciones onerosas enfriadores o aire acondicionado, con el añadido de que el personal permanece expuesto mientras tales medidas se implementan [18].

Cuando la renovación de aire es insuficiente, el material particulado queda en suspensión y se acumula en las labores; ese polvo de roca sílice, carbón, entre otros que no es arrastrado por corrientes ventilantes termina ingresando al aparato respiratorio del personal. El resultado es un incremento de enfermedades pulmonares crónicas, como silicosis, neumoconiosis del carbón y otras formas de fibrosis pulmonar, padecimientos históricamente asociados a operaciones con ventilación deficiente y escaso control de polvo. En paralelo, ambientes viciados suelen ir de la mano con prácticas improvisadas o fuera de norma, lo que acarrea costos legales y económicos: las autoridades pueden clausurar temporalmente frentes mal ventilados, y la productividad cae porque el personal rinde menos en aire de mala calidad fatiga mayor, pausas frecuentes para recuperarse, etc. En conjunto, una ventilación pobre compromete vida, salud y producción, abre la puerta a intoxicaciones agudas, explosiones, asfixia, enfermedades ocupacionales y daños materiales; por ello, asegurar una buena ventilación es un imperativo en cualquier explotación subterránea [19].

1.3.1.7. Análisis de la normativa D.S. 023-2017-EM en ventilación

En agosto de 2017 se promulgó el D.S. N° 023-2017-EM, con el propósito de actualizar el marco normativo a la luz de avances técnicos y lecciones de seguridad minera. Esta norma modificó el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. 024-2016-EM), incorporando disposiciones más estrictas y específicas sobre ventilación en labores subterráneas. Se añadió el Anexo 38, que establece explícitamente y con claridad el procedimiento para determinar la “demanda de aire” de una mina subterránea en función de múltiples factores operacionales. Asimismo, el anexo diferencia entre operaciones CON equipos diésel y SIN equipos diésel, al reconocer que la presencia de maquinaria de combustión interna incrementa los requerimientos de ventilación y condiciona el dimensionamiento del sistema [3].

El D.S. 023-2017-EM, al modificar el Reglamento, fija en el Artículo 247 una escala altitudinal de caudal mínimo por persona ya descrita: 3 m³/min a baja altura, con incremento progresivo hasta 6 m³/min por encima de 4000 m. Con ello, la normativa nacional consolida un estándar antes implícito en guías técnicas y obliga a dimensionar los sistemas de ventilación según la cota geográfica, aspecto relevante en el Perú. En paralelo, el Artículo 252 amplía el marco para definir la demanda de aire de la mina como la suma de requerimientos por: (a) trabajadores, (b) condiciones de temperatura de confort y (c) operación de equipos petroleros (diésel) [3].

Cuando la operación no emplea equipos diésel, se debe considerar igualmente el caudal necesario para diluir los gases de voladura,

conforme al Anexo 38, que proporciona fórmulas específicas. Un rasgo distintivo es que, por primera vez en la regulación peruana, se incorpora formalmente al cálculo ventilatorio la consideración de dos factores adicionales: el consumo de madera al interior de la mina y la temperatura ambiente de las labores [3].

El Art. 252, literal d), en su segundo párrafo, dispone que la madera utilizada en labores de sostenimiento debe incorporarse al cálculo de ventilación por las emisiones de CO₂ y CH₄ que genera; además, establece una escala que relaciona el caudal adicional con el porcentaje de consumo de madera. En términos operativos, si el sostenimiento en madera alcanza del 20% al 40% de la producción, se agrega 0.60 m³/min por tonelada producida; si se sitúa entre 41–70%, el incremento es de 1.00 m³/min/t; y cuando supera el 70%, corresponde 1.25 m³/min/t. Esta exigencia resulta innovadora: la contribución de CO₂ asociada a la madera no siempre se cuantificaba y ahora las empresas deben incluirla en sus cálculos de ventilación; por ejemplo, operaciones con sostenimiento tradicional en vetas angostas tendrán que verificar si su uso de madera obliga a aumentar los caudales [3].

De igual modo, el Art. 252, literal d), en su tercer párrafo, dispone que, para conservar el confort térmico, el dimensionamiento debe incluir una velocidad mínima del aire de 30 m/min (0.5 m/s) cuando la temperatura de la labor se ubique entre 24 °C y 29 °C. En otros términos, en sectores cálidos debe asegurarse un flujo que impida alzas térmicas sostenidas. En operación, esto se traduce en un caudal $Q = 30 \text{ m/min} \times \text{Área} \times \text{Niveles afectados}$, conforme al Anexo 38. Con esta incorporación, la regla obliga

a que, cuando las temperaturas comiencen a aproximarse a 30 °C, se programen incrementos de ventilación o medidas de refrigeración; dejar que el calor aumente sin mitigación deja de ser una alternativa [3].

En cuanto a equipos diésel, el DS 023-2017-EM fija un criterio determinante: el Art. 252 literal e) demanda que el aire asignado a motores petroleros no sea menor de 3 m³/min por HP de potencia efectiva, con ajuste según la disponibilidad mecánica y la utilización, e incorporando además la altitud, el calor de los motores y sus emisiones. De este modo, el estándar de 3 m³/min por HP adquiere rango legal. A la vez, se obliga a calcular con precisión la potencia efectivamente en servicio aplicando factores de disponibilidad y uso promedio para dimensionar el caudal que diluya los contaminantes [3].

De esta regla se deriva una obligación operativa adicional: verificar periódicamente las emisiones de los equipos diésel. El Art. 254 ordena monitorear semanalmente el CO en los escapes y mantenerlo < 500 ppm. El vínculo es directo: si un equipo supera ese umbral, corresponde intervenir el mantenimiento y la combustión, o incrementar la ventilación en el sector donde opera, de modo que el desempeño mecánico y el control ventilatorio queden plenamente coordinados [3].

En balance, el D.S. 023-2017-EM convirtió la normativa peruana de ventilación subterránea en un marco más estrictamente técnico: dejó atrás mandatos genéricos y los reemplazó por procedimientos cuantificables y intervalos verificables que las operaciones deben satisfacer. La comunidad especializada ha destacado esta actualización por su

convergencia con prácticas internacionales y su orientación explícita a evitar eventos vinculados a ventilación insuficiente [3].

1.3.1.8. Cálculo de caudal de aire

A. Por personal

El caudal de aire requerido por el personal se calcula en función del número de trabajadores presentes simultáneamente en la mina (o en una sección de la mina) y de una tasa de ventilación por persona. La expresión básica es [2]:

$$Q_T = q_{per} \times N$$

Designa el caudal unitario de aire fresco asignado a cada persona y N corresponde a la dotación de la guardia más numerosa. El valor se adopta desde estándares de higiene minera, en el Perú, el umbral mínimo es 3 m³/min por trabajador hasta 1500 m s. n. m. Para altitudes superiores, la regulación establece una progresión, 4 m³/min entre 1500–3000 m, 5 m³/min entre 3000–4000 m y 6 m³/min por trabajador sobre 4000 m s. n. m. Esta gradiente derivada del Art. 247 busca equiparar la masa de oxígeno aportada a cada trabajador independientemente de la cota de la operación, compensando la menor presión parcial de O₂ en altura.

B. Por equipos

La operación de equipos móviles diésel dentro de la mina introduce gases de escape y partículas que, en faenas

mecanizadas, constituyen a menudo la principal carga del sistema de ventilación. Por ello se dimensiona un componente específico de caudal destinado a diluir y evacuar dichas emisiones: el caudal por equipos. La lógica de cálculo parte de la potencia total que efectivamente opera en simultáneo (expresada en HP o kW) y de un requerimiento unitario de aire por unidad de potencia. La normativa fija el umbral: cada HP de motor diésel debe contar con al menos 3 m³/min de aire fresco [2].

En términos operativos, el dimensionamiento se expresa como:

$$Q_{Eq} = (3m^3 / \text{min HP}) \times P_{efec} \times f_{disp} \times f_{util}$$

donde P_{efec} es la suma de HP de todos los equipos diésel en condición de operación, f_{disp} representa la disponibilidad mecánica promedio y f_{util} la utilización simultánea. Estos factores reflejan que no toda la flota trabaja a la vez ni al 100% de carga. Esta metodología está respaldada por la ley peruana, que exige que “el requerimiento de aire para los equipos con motor petrolero no sea menor de 3 m³/min por HP, en función de su disponibilidad mecánica y utilización [2].

C. Por uso de madera

En múltiples explotaciones subterráneas en particular las de vetas angostas o filones se recurre a la madera para el sostenimiento (entibados, cuadros) y para usos auxiliares

como áreas de almacenamiento. Al permanecer bajo tierra, este material entra en procesos de degradación (oxidación y pudrición biológica) que consumen oxígeno y liberan dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Aunque, comparadas con otras fuentes, dichas emisiones suelen ser bajas, en operaciones con altos volúmenes de madera pueden acumularse y deteriorar la calidad del aire. De ahí que la normativa peruana incorporara un componente específico de ventilación asociado al consumo de madera, con el fin de asegurar que esas emanaciones también sean adecuadamente diluidas [2].

El caudal requerido por madera, se determina según la proporción de madera utilizada respecto de la producción de la mina. El D.S. 023-2017-EM establece que, cuando la madera empleada en sostenimiento u otras labores supera el 20% de los insumos en relación con el tonelaje producido, debe añadirse ventilación extra en función directa de la producción. En detalle, el Art. 252, literal d), segundo párrafo, fija la escala siguiente: si el consumo de madera es 20–40 % del total, se incorpora 0.60 m^3/min por tonelada; si es 41–70 %, 1.00 m^3/min por tonelada; y si excede 70 %, 1.25 m^3/min por tonelada [2].

La relación de cálculo se expresa como:

$$Q_M = u \times T$$

donde T es la producción (toneladas por guardia) y u el factor que corresponde según la escala indicada.

D. Por temperaturas

El clima subterráneo temperatura y humedad del aire determina de forma directa las condiciones de trabajo y la seguridad. La ventilación cumple aquí un papel de control térmico al evacuar el calor que proviene del macizo rocoso a grandes profundidades, del metabolismo del personal y de la energía disipada por motores y voladuras. Para dimensionar el aire necesario con este objetivo, la normativa incorpora un criterio operativo basado en la velocidad mínima que debe alcanzar la corriente ventilante en determinados rangos de temperatura [2].

Conforme al D.S. 023-2017-EM, cuando el ambiente de trabajo se sitúa entre 24 °C y 29 °C, el diseño debe asegurar un flujo capaz de generar 30 m/min (0.5 m/s) como velocidad mínima en esas labores, a fin de mantener una “temperatura de confort” aceptable. En términos prácticos, el Anexo 38 traduce este requerimiento en una expresión de cálculo: el caudal térmico se obtiene como:

$$Q_{Te} = V_{min} \times A \times N_v$$

, donde V_{min} es 30 m/min, A representa el área de sección promedio de la labor (m^2) y N_v corresponde al número de niveles o labores que superan 23 °C y, por tanto, demandan este caudal adicional.

E. Por fugas

Dado que la hermeticidad absoluta no existe en redes de ventilación subterránea, siempre aparecen fugas y filtraciones. El escape de aire puede darse por grietas en las paredes, labores inactivas mal selladas, puertas de ventilación que no cierran a totalidad o divisiones entre circuitos que no son completamente estancas. El efecto práctico es claro: una fracción del aire inyectado no alcanza los frentes previstos, sino que retorna antes de tiempo o recircula por rutas no planificadas. Por esa razón, el dimensionamiento incorpora un margen de seguridad específico para cubrir tales pérdidas [2].

En la práctica se adopta un porcentaje del caudal requerido como reserva de fugas. La práctica peruana recogida en el Anexo 38 indica 15% del total como caudal de fugas:

$$Q_{Fugas} = 0.15 \times (Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te} + Q_{Eq})$$

F. Caudal total

Con ello, el caudal total de diseño queda:

$$Q_{Total} = Q_{Tr} + Q_{Ma} + Q_{Te} + Q_{Eq} + Q_{Fugas}$$

1.4. Formulación de los problemas

1.4.1. Problema general

¿De qué manera el diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera la evaluación del sistema actual de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?
- ¿De qué manera el cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?
- ¿De qué manera la disposición y ubicación de ventiladores influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?

1.5. Justificación

La investigación sobre el diseño de sistemas de ventilación en la expansión de áreas mineras es crucial para optimizar las condiciones operativas y garantizar la seguridad de los trabajadores. La implementación de sistemas de ventilación adecuados minimiza la exposición a contaminantes y mejora la eficiencia energética de las minas, lo que se traduce en beneficios económicos y una reducción de los accidentes laborales. Un diseño optimizado mitiga eficazmente las emisiones nocivas, preservando así la calidad del aire local y reduciendo el impacto ambiental de las operaciones mineras. Este proyecto facilita la integración de tecnologías innovadoras que garantizan la estabilidad estructural

y funcional de los sistemas, permitiendo la adaptación a futuras expansiones y mejoras en la infraestructura minera.

La investigación emplea análisis sistemáticos y modelos predictivos para evaluar escenarios de riesgo y eficiencia, esenciales para desarrollar protocolos de ventilación robustos. La integración de metodologías teóricas y prácticas asegura la recopilación de datos precisos y la verificación de las soluciones propuestas, facilitando así la replicabilidad y escalabilidad del sistema en diversas condiciones operativas. En consecuencia, se aborda la necesidad de innovación en los procesos de ventilación minera, lo que produce importantes ventajas en seguridad, eficiencia y sostenibilidad ambiental, posicionando así a la industria minera para un futuro más responsable y tecnológicamente avanzado.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar que el diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar que la evaluación del sistema actual de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.
- Determinar que el cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.

- Determinar que la disposición y ubicación de ventiladores influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis específica

El diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023

1.7.2. Hipótesis específica

- La evaluación del sistema actual de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.
- El cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.
- La disposición y ubicación de ventiladores influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Tipo de investigación

La investigación aplicada es un proceso sistemático que transfiere conocimientos teóricos para abordar problemas prácticos, utilizando metodologías rigurosas y empíricas para producir soluciones innovadoras en contextos del mundo real. Este enfoque se define por su enfoque interdisciplinario, la incorporación de métodos analíticos y tecnológicos y su fuerte vinculación con los sectores productivos y sociales [22].

2.2. Nivel de investigación

Nivel descriptivo [23], La investigación descriptiva es un enfoque metodológico centrado en la recopilación y el análisis sistemático de datos para identificar y documentar las características, comportamientos y relaciones dentro de fenómenos o poblaciones específicas sin intervenir ni manipular variables.

2.3. Diseño de investigación

La investigación no experimental se define por su énfasis en la observación y análisis sistemático de los fenómenos en su contexto natural, sin intervención directa o manipulación de variables, facilitando así una representación precisa de la realidad bajo investigación.[24].

2.4. Población y muestra

2.4.1. Población

La población de investigación se refiere al grupo específico de individuos, elementos o unidades de análisis que poseen características definidas y sirven como punto focal de un estudio en particular. Este concepto se apoya en criterios de inclusión y exclusión que garantizan la representatividad y relevancia de los datos recolectados [25]. En ese sentido, la población estará conformada por

todas las zonas de expansión para explotación minera, en la Unidad Minera Inmaculada, en el año 2023.

2.4.2. Muestra

La muestra del estudio se refiere a una porción seleccionada de la población total, elegida con el propósito principal de extrapolar los hallazgos a todo el grupo [26]. En ese sentido, la muestra de estudio estará conformada por las vetas Salvadora, Bárbara, Millet y Divina.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica de análisis de documentos es un proceso sistemático de examen, interpretación y extracción de datos relevantes de documentos y fuentes escritas, cuyo objetivo es establecer una base teórica y empírica para el proyecto de investigación [27]. Además, La técnica de observación es un proceso sistemático para registrar, analizar y comprender comportamientos y fenómenos en su entorno natural, sin intervención o alteración de las condiciones de estudio. Esta metodología se basa en protocolos estructurados y herramientas específicas para facilitar la recogida objetiva de datos [28].

Los instrumentos utilizados serán los reportes e informes de ventilación de minas, plan de minado, fichas de recolección de datos principales, fichas de cálculo de requerimiento de aire fresco en las vetas seleccionadas.

2.6. Técnicas de análisis e interpretación de datos

El procesamiento de datos se llevará a cabo utilizando Microsoft Excel 2016, herramienta que permite aplicar técnicas de estadística descriptiva para demostrar los resultados de la presente investigación. En este proceso, se iniciará con una revisión exhaustiva de la información recopilada, orientada a detectar y corregir errores o ausencias, lo que asegurará que los datos se

organicen de manera lógica y coherente. A continuación, se procederá a clasificar las respuestas en categorías específicas, garantizando que cada una sea exclusiva, y se estructurará la información en tablas estadísticas mediante el uso de herramientas informáticas. Finalmente, se realizará una evaluación detallada de los resultados a través de técnicas descriptivas, lo que permitirá interpretar de forma precisa los hallazgos obtenidos durante el estudio.

III. RESULTADOS

3.1. Generalidades de la unidad minera

3.1.1. Ubicación

Ubicada entre los 4,200 y 4,800 m s. n. m., la Unidad Minera Inmaculada se emplaza sobre el cinturón metalogénico epitermal Puquio-Caylloma, en el distrito de Oyolo, provincia de Páucar del Sara Sara, departamento de Ayacucho, al sur del Perú. Sus coordenadas geográficas son 14°57'19" de latitud sur y 73°14'34" de longitud oeste; en el sistema UTM (WGS-84) corresponden a 8,345,872 m Este y 688,980 m Norte, Zona 18.

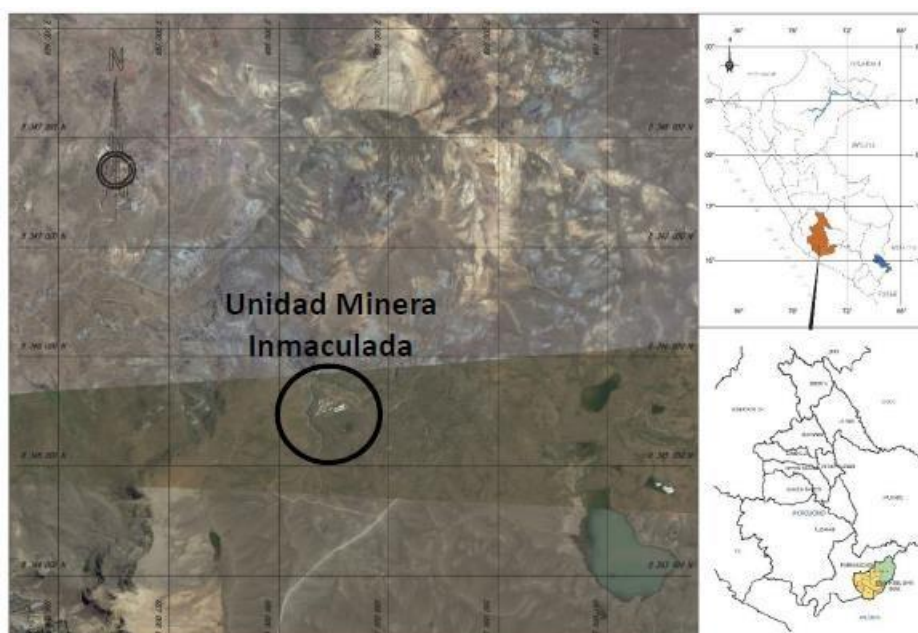


Figura 1. *Ubicación de la Unidad Minera Inmaculada*

3.1.2. Geología

Geología regional

El emplazamiento de la Unidad Minera Inmaculada se inscribe en la franja Cenozoica Puquio-Caylloma, donde los yacimientos se relacionan con cuerpos volcánicos e intrusivos que alimentan sistemas de vetas epitermales tanto de baja como de alta sulfuración. En consecuencia, el conjunto regional exhibe un

predominio de rocas volcánicas del Mesozoico (Cretácico) y del Cenozoico (Paleógeno y Neógeno), acompañadas en menor proporción por secuencias sedimentarias afectadas por intrusivos cenozoicos.

En términos litoestratigráficos y ordenadas cronológicamente, en la zona se reconocen la Formación Soraya (Mesozoico–Jurásico) y la Formación Mara (Mesozoico–Cretácico Inferior), seguidas por el Grupo Tacaza (Cenozoico–Oligoceno Medio–Mioceno Inferior), cuyas subunidades incluyen: Brecha–Debris Flow y Lava Andesítica; Tobas Líticas y Tobas de Lapilli andesíticas; y Areniscas con Conglomerados. Completa la secuencia la Formación Quellopata (Cenozoico–Mioceno). Dentro de estas formaciones y del mencionado grupo se han identificado, además, stocks subvolcánicos, domos y diques que intruyeron el basamento durante etapas del Mesozoico y del Cenozoico, confirmando la impronta magmática que estructura la arquitectura geológica del distrito.

Geología local

El depósito explotado por la Unidad Minera Inmaculada corresponde a un sistema epitermal de baja sulfuración (LS) con mineralización de metales preciosos. En el ámbito de la propiedad, las unidades más antiguas reconocidas son las formaciones Mara y Soraya (Cretácico). Mara yace por debajo de Soraya y está integrada por horizontes de limolitas, areniscas y conglomerados de estratos gruesos; Soraya, por su parte, reúne dos tipos principales de sedimentos: areniscas calcáreas y areniscas de grano fino a medio.

Estas rocas mesozoicas se disponen, en discordancia, bajo el conjunto volcánico del Grupo Tacaza Oligoceno medio, cuya potencia varía aproximadamente entre 600 y 800 m. Es dentro de esta secuencia volcánica donde se alojan las ocurrencias minerales conocidas de la concesión. Por encima del Tacaza afloran

unidades del Mioceno, Alpbamba y Aniso, caracterizadas predominantemente por tobas.

Tanto Mara y Soraya como el propio Grupo Tacaza han sido afectados por intrusiones ígneas. Dichas intrusiones se han emplazado como pequeños domos riolíticos y, además, cortan las unidades mediante stocks y diques de composición andesítica, poniendo de manifiesto la impronta magmática que estructura y controla parte de la mineralización en el distrito.

3.2. Diseño de ventilación de minas

La operación Inmaculada, que explota la veta Ángela, dispone de cuatro bocaminas de ingreso de aire localizadas en los niveles 4300, 4400, 4500 y 4560. El esquema principal de ventilación opera en extracción y se sustenta en dos ventiladores axiales colocados en los collares de los RB 11 y 09, con capacidades de 150,000 cfm y 300,000 cfm, respectivamente. En paralelo, el RB de ventilación N° 18 fue objeto de una ampliación de diámetro de 2.5 a 3.1 m, intervención cuyo cierre se programó para diciembre de 2023; concluida la obra, se reinstalaría en el collar de dicho RB un ventilador de 300,000 cfm que había sido enviado a mantenimiento.

En este contexto, los días 22 y 24 de octubre de 2023, SRK visitó las instalaciones de la mina Inmaculada con el propósito de inspeccionar el sistema de ventilación vigente, para que sirviera como base para proyectar la ventilación de las nuevas vetas a explotar: Millet y Divina. Para 2020 HOCPLC solicitó, como parte del alcance del presente estudio, actualizar el capítulo de ventilación para la nueva infraestructura diseñada y ampliar el sistema de ventilación en la zona Nor este de la veta Angela, denominada Zona Salvador.

Para sustentar la proyección, el Departamento de Ventilación de Minas proporcionó a SRK el modelo actualizado del sistema, desarrollado en Ventsim. Dicho modelo se empleó como base para desarrollar la proyección del sistema de ventilación de las cuatro zonas incluidas en el estudio: Bárbara, Salvador, Millet y Divina.

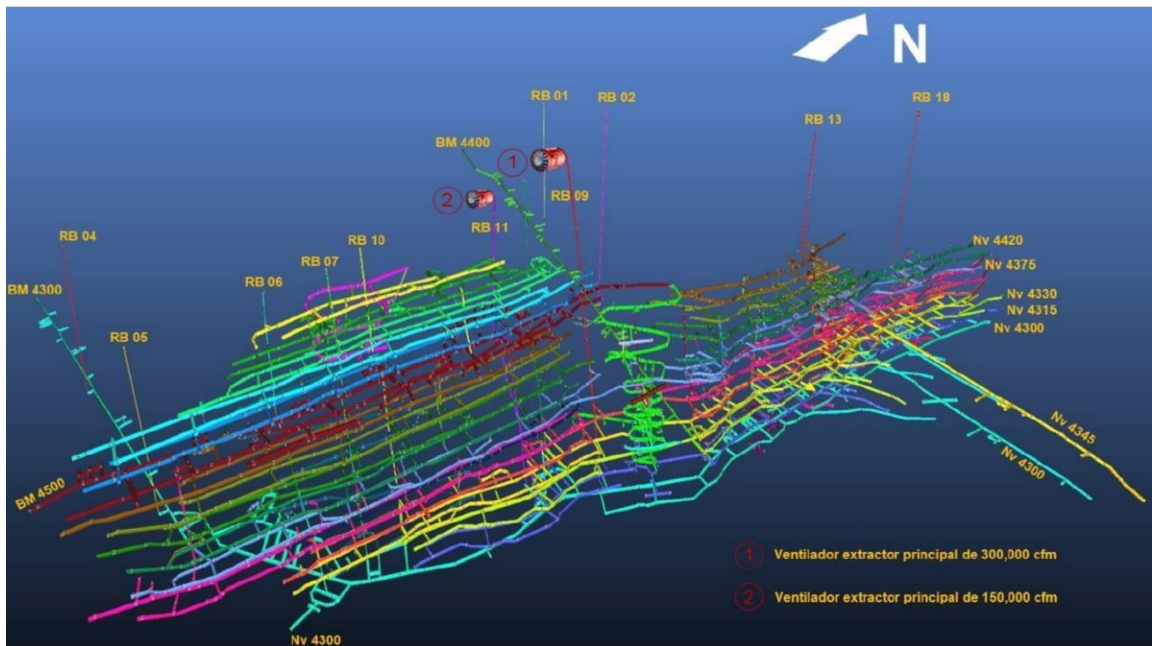


Figura 2. *Isométrico de la estructura de la mina Inmaculada*

3.3. Antecedentes del proyecto

Para las áreas Bárbara, Salvador, Millet y Divina, Hochschild debe estructurar un plan de minado acompañado por un esquema ventilatorio capaz de asegurar el aporte de aire fresco requerido. Dichas cantidades se determinan en función de la potencia y simultaneidad de los equipos diésel, de la dotación de personal en interior mina y de los criterios contemplados en el D.S. N° 023-2017-EM.

3.4. Objetivos del proyecto

El objetivo del estudio es diseñar el sistema de ventilación que permita sostener el plan de minado de las zonas Bárbara, Salvador, Millet y Divina.

3.5. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete comprendió: primero, el diseño del sistema de ventilación en Ventsim Visual, tomando base la infraestructura prevista en el plan de minado; y luego, la elaboración del informe final, donde se expone el funcionamiento del sistema de ventilación simulado para el plan y se consignan los costos de capital y de operación.

3.6. Evaluación del circuito actual

La mina dispone de 11 ingresos de aire fresco: 4 bocaminas y 7 RB. Según el modelo actual entregado por Inmaculada, la BM del nivel 4560 aporta caudal reducido por el regulador del portal; además, los RB 08 y 13 no contribuyen al circuito principal del sistema por estar obstruidos.

Tabla 1.
Bocaminas y rampas de ingreso de aire en la mina Inmaculada

Ingresos	Cota superficie (m.s.n.m.)	Dimensiones (m x m)
BM Nv 4300	4300	4.4 x 4.3
BM RP Nv 4400	4400	4.6 x 4.3
BM Nv 4500	4500	4.4 x 3.7
BM Nv 4560	4560	4.6 x 4.1

Tabla 2.
RB de ingreso de aire en la mina Inmaculada

Ingresos	Longitud (m)	Diámetro (m) / Dimensiones (m x m)	Observaciones
RB 01	242	1.5	Activo
RB 02	366	1.5 x 1.5	Activo
RB 04	239	1.5	Activo
RB 05	238	1.5	Activo
RB 06	34	1.5	Activo
RB 07	43	1.5	Activo
RB 08*	119	1.5	*Obstruido
RB 10	50	2.4	Activo
RB 13*	183	2.4	*Colapsado

El movimiento del aire en la mina se genera con dos ventiladores principales instalados en superficie, ubicados en los RB 09 y 11: en el RB 09 opera un ventilador extractor de 300,000 cfm, y en el RB 11 funciona otro de 150,000 cfm. El RB 18 se utilizaba como vía de extracción de aire viciado, con un ventilador extractor de 300,000 cfm montado en su collar. Durante la visita, ese RB estaba en proceso de ampliación de diámetro de 2.5 m a 3.1 m; el ventilador que allí operaba fue retirado y enviado a mantenimiento.

Tabla 3.
RB de salida de aire en la mina Inmaculada

Salidas	Longitud (m)	Diámetro (m)	Observaciones
RB 11	79	3.1	Ventilador extractor de 150,000 cfm
RB 09	159	3.0	Ventilador extractor de 300,000 cfm
RB 18*	242	2.5	Ventilador extractor de 300,000 cfm

El diseño del sistema de ventilación para las vetas Divina y Millet tomará en cuenta la reactivación del RB 18 con el diámetro ampliado ya a 3.1 m.

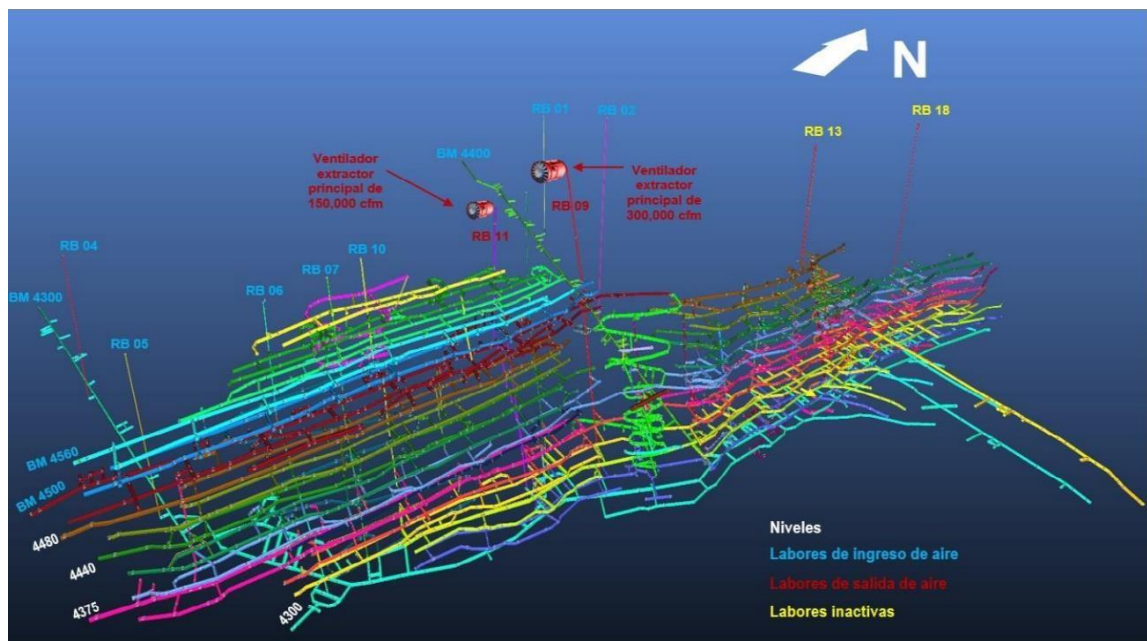


Figura 3. *Infraestructura del sistema de ventilación actual de la mina Inmaculada*

3.7. Cobertura de aire fresco

El estudio de ventilación de Inmaculada (agosto de 2023) determinó un aporte de 595,294 cfm de aire fresco, mientras que la demanda total estimada alcanza 1,131,750 cfm. En consecuencia, la cobertura efectiva del sistema se sitúa en 53%.

3.8. Condiciones atmosféricas

Durante la visita, se midió las temperaturas en los sectores más profundos de la mina

Tabla 4.
Temperaturas medidas en la mina Inmaculada

Labor	Nivel	TBS (°C)	TBH (°C)
Rp 4300	4300	23.8	15.4
GL 6859 W	4300	26.3	20.5
GL 6859 NE	4300	25.8	21.4
TJ 4700, Vn 6	4460	23.7	20.2

La diferencia entre las temperaturas secas y húmedas es de aproximadamente 5.5 °C. Esto refleja el confort experimentado en dichos lugares.

3.9. Ventilación auxiliar

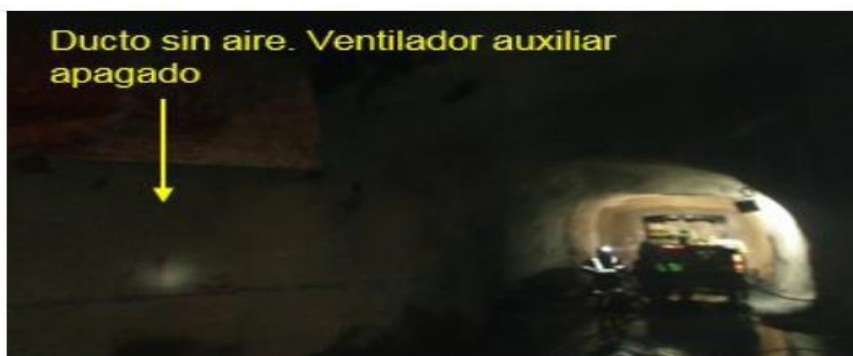


Figura 4. Ventilador auxiliar apagado en frente de avance

En el recorrido en interior mina, se verificaron las siguientes deficiencias:

GL 6859 NE: El ventilador auxiliar que debe suministrar aire fresco al frente donde trabaja un Jumbo se hallaba apagado.

En la mayoría de las labores se comprobó que los ductos flexibles de ventilación estaban dañados con aberturas y tramos rasgados, lo que hacía que parte del aire fresco destinado a los frentes se escapara antes de llegar. Asimismo, el tendido carecía de uniformidad: se identificaron transiciones súbitas en la sección de los ductos. Tales variaciones abruptas provocan pérdidas por choque y, en consecuencia, disminución de la presión total.



Figura 5. Cambio abrupto en el diámetro de dos ductos de ventilación empalmados

En los montajes de ventiladores auxiliares que toman aire fresco desde un RB, se comprobó que los tabiques de hermeticidad se construyeron con costales de arena; al no garantizar estanqueidad, queda evidente la recirculación del aire viciado.



Figura 6. Tabique hecho con sacos de arena en una instalación auxiliar

3.10. Circuito de ventilación actual

El circuito de ventilación actual de la mina Inmaculada se muestra a partir del modelo en Ventsim proporcionado por Hochschild.

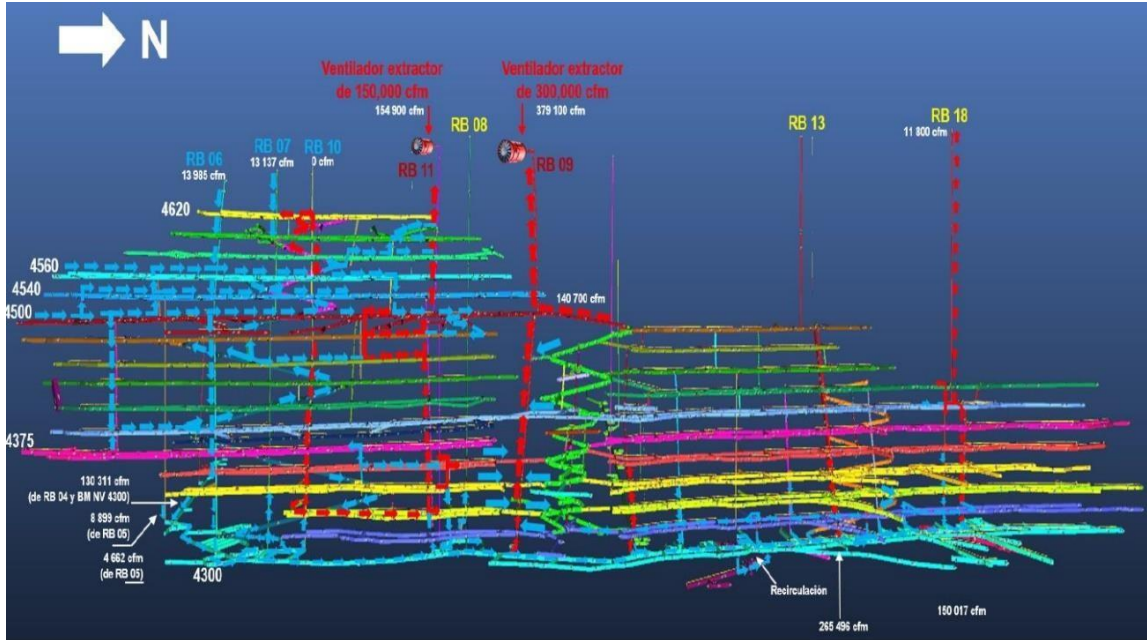


Figura 7. Unifilar del circuito actual de ventilación de la mina Inmaculada

3.11. Proyección del sistema de ventilación para la infraestructura de las zonas Bárbara, Salvador, Millet y Divina

Para las zonas Bárbara, Salvador, Millet y Divina, la infraestructura de ventilación se concibe con propósito doble: diluir los gases de escape de los equipos diésel y mantener, en los laboreos, una velocidad de aire igual o superior a 25 m/min, según exige la legislación minera vigente. Alcanzar ese desempeño requiere anticipar el caudal de aire fresco que deberá suministrarse a las nuevas operaciones, dimensionándolo en función de la potencia y simultaneidad de los equipos diésel previstos y de la dotación de personal que trabajará en interior mina durante las guardias.

3.11.1. Cálculo de requerimiento de caudal

3.11.1.1. Por equipos diesel

Para calcular el requerimiento de caudal, es necesario saber la cantidad de equipos a utilizar para el cumplimiento de los objetivos en la etapa de desarrollo y explotación; además, saber la cantidad de equipos para el transporte de personal en interior mina.

Tabla 5.
Cantidad de equipos diésel anual - Desarrollo

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 1	Cantidad (unidad) año 2	Cantidad (unidad) año 3	Cantidad (unidad) año 4	Cantidad (unidad) año 5	Cantidad (unidad) año 6	Cantidad (unidad) año 7	Cantidad (unidad) año 8	Cantidad (unidad) año 9
Scoop 4.1 yd ³	2	2	3	3	3	2			
Scoop 6.0 yd ³	6	6	5	5	3				
Jumbo	8	8	8	8	6	2			
Volquete de desmonte de Desarrollos 15m ³	14	15	15	14	11	2			
Roboshotcrete	3	3	3	3	2	1			
Mixer	6	6	6	6	4	2			
Equipo empemador	5	5	5	5	4	1			
Manitou	4	4	4	4	3	2	1		
Total de equipos diésel - Desarrollo	48	49	49	48	36	12	1		

Tabla 6.
Cantidad de equipos diésel anual - Explotación

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 1	Cantidad (unidad) año 2	Cantidad (unidad) año 3	Cantidad (unidad) año 4	Cantidad (unidad) año 5	Cantidad (unidad) año 6	Cantidad (unidad) año 7	Cantidad (unidad) año 8	Cantidad (unidad) año 9
Scoop 1.0 yd ³			1	1	1	2	1		
Scoop 1.3 yd ³			2	3	1	1	1		
Scoop 2.5 yd ³	1	1	1	1	1	1	1	1	
Scoop 4.1 yd ³	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Scoop 6.0 yd ³	1	1	2	3	3	3	3	3	3
Jumbo	3	3	4	5	5	5	5	5	4
Volquete de mineral de 15 m ³	21	21	23	23	23	23	23	21	18
Roboshotcrete						1	2	2	1
Mixer						2	4	4	2
Equipo empemador	2	2	2	3	3	3	3	3	2
Manitou	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Total de equipos Diesel - Explotación	34	34	41	45	43	47	49	45	36

Tabla 7. *Cantidad de equipos diésel anual - Explotación para Millet y Divina*

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 1	Cantidad (unidad) año 2	Cantidad (unidad) año 3	Cantidad (unidad) año 4	Cantidad (unidad) año 5	Cantidad (unidad) año 6	Cantidad (unidad) año 7	Cantidad (unidad) año 8	Cantidad (unidad) año 9
Camioneta para supervisión de Desarrollos	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Camioneta para supervisión de Explotación y Servicios	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Camión de explosivos	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Camión utilitario de Desarrollos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Camión utilitario de Explotación y Servicios	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Camión para personal de Desarrollos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Camión para personal de Explotación	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total de equipos Diesel - Traslado de personal	29	29	29	29	29	29	29	29	29

Tabla 8.
Cantidad de equipos diésel anual – Millet y Divina

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 1	Cantidad (unidad) año 2	Cantidad (unidad) año 3	Cantidad (unidad) año 4	Cantidad (unidad) año 5	Cantidad (unidad) año 6	Cantidad (unidad) año 7	Cantidad (unidad) año 8	Cantidad (unidad) año 9
Total de equipos diésel - Explotación	48	49	49	48	36	12	2		
Total de equipos diésel - Explotación	34	34	41	45	43	47	49	45	36
Total de equipos diésel - Traslado de personal	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Total equipos diésel	111	112	119	122	108	88	80	74	65

De acuerdo con la empresa, en el año 4 se va a utilizar la mayor cantidad de equipos diésel con una cantidad de 122.

Por lo tanto, para calcular el volumen de aire fresco necesario para soportar el desarrollo y la explotación que efectuarán los equipos diésel, se consideró aportar 3 m³/min de aire fresco por cada HP desarrollado, según se indica en el D.S. N° 023-2017-EM

Para calcular la capacidad efectiva de potencia de los equipos Diesel se está asumiendo un factor de corrección de 15 % debido a la pérdida de potencia por altura. Además, la utilización y disponibilidad mecánica de los equipos Diesel se presentan a continuación:

Tabla 9.
Factor de utilización y disponibilidad mecánica de los equipos diésel

Equipos diésel	Utilización (%)	Disponibilidad Mecánica (%)
Scoop	0.75	0.85
Jumbo	0.75	0.85
Volquete	0.75	0.85
Roboshotcrete	0.65	0.85
Mixer	0.65	0.85
Equipo empernador	0.65	0.85
Manitou	0.65	0.85
Camioneta	0.45	0.85
Camión de explosivos	0.40	0.85
Camión utilitario	0.60	0.85
Camión personal	0.50	0.85

Con la información ya establecida se procederá a calcular el requerimiento de aire en al año 4 en desarrollo, explotación y transporte de personal.

Tabla 10.
Requerimiento de caudal aire por equipos diésel - Desarrollo

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 4	Potencia Nominal (HP/unidad)	Potencia Efectiva (HP/unidad) *	Utilización (%)	Disponibilidad Mecánica (%)	Flujo de aire por potencia (m ³ /min/HP)	Flujo de aire (cfm) año 4
Scoop 4.1 yd ³	3	193	164	0.75	0.85	3	33,239
Scoop 6.0 yd ³	5	250	213	0.75	0.85	3	71,761
Jumbo	8	150	128	0.75	0.85	3	68,890
Volquete de desmonte de Desarrollos 15m ³	14	350	298	0.75	0.85	3	281,301
Roboshotcrete	3	150	128	0.65	0.85	3	22,389
Mixer	6	350	298	0.65	0.85	3	104,483
Equipo emperrador	5	200	170	0.65	0.85	3	49,754
Manitou	4	150	128	0.65	0.85	3	29,852
Caudal de aire requerido por los equipos diésel - Desarrollo							661,670

Tabla 11.
Requerimiento de caudal de aire por equipos diésel – Explotación

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 4	Potencia Individual (HP/unidad)	Potencia Efectiva (HP/unidad) *	Utilización	Disponibilidad Mecánica	Flujo de aire por potencia (m ³ /min/HP)	Flujo de aire (cfm) año 4
Scoop 1.0 yd ³	1	90	77	0.75	0.85	3	5,167
Scoop 1.3 yd ³	3	90	77	0.75	0.85	3	15,500
Scoop 2.5 yd ³	1	120	102	0.75	0.85	3	6,889
Scoop 4.1 yd ³	1	193	164	0.75	0.85	3	11,080
Scoop 6.0 yd ³	3	250	213	0.75	0.85	3	43,056
Jumbo	5	150	128	0.75	0.85	3	43,056
Volquete de mineral de 15 m ³	23	350	298	0.75	0.85	3	462,138
Roboshotcrete		150	128	0.65	0.85	3	
Mixer		350	298	0.65	0.85	3	
Equipo emperrador	3	200	170	0.65	0.85	3	29,852
Manitou	5	200	170	0.65	0.85	3	49,754
Caudal de aire requerido por los equipos diésel - Explotación							666,492

Tabla 12.
Requerimiento de caudal de aire por equipos diésel – Transporte de personal

Equipos diésel	Cantidad (unidad) año 4	Potencia Individual (HP/unidad)	Potencia Efectiva (HP/unidad) *	Utilización	Disponibilidad Mecánica	Flujo de aire por potencia (m ³ /min/HP)	Flujo de aire (cfm) año 4
Camioneta para supervisión de Desarrollos	3	80	68	0.45	0.85	3	8,267
Camioneta para supervisión de Explotación y Servicios	17	80	68	0.45	0.85	3	46,845
Camión de explosivos	2	100	85	0.40	0.85	3	6,124
Camión utilitario de Desarrollos	1	100	85	0.60	0.85	3	4,593
Camión utilitario de Explotación y Servicios	3	100	85	0.60	0.85	3	13,778
Camión para personal de Desarrollos	1	100	85	0.50	0.85	3	3,827
Camión para personal de Explotación	2	100	85	0.50	0.85	3	7,654
Caudal de aire requerido por los equipos diésel- Traslados							91,088

Tabla 13.
Requerimiento de caudal de aire por equipos diésel

Etapa del proyecto	Flujo de aire (cfm) año 4
Caudal de aire requerido por los equipos diésel - Desarrollo	661,670
Caudal de aire requerido por los equipos diésel - Explotación	666,492
Caudal de aire requerido por los equipos diésel- Traslados	91,088
Total de caudal requerido por equipos Diesel	1,419,251

3.11.1.2. Por personal

Se proyecta un total de 183 personas laborando en mina en la guardia más numerosa. Puesto que el proyecto se ubica a más de 4,000 m.s.n.m., corresponde, según el D.S. N° 023-2017-EM, dotarle a la mina de 6 m³/min de aire fresco por cada persona.

Tabla 14.
Requerimiento de aire fresco debido al personal que laborará en interior mina

Actividad	Personas en guardia más numerosa	Flujo de aire por persona (m ³ /min) *	Flujo de aire (m ³ /min)	Flujo de aire (cfm)
Desarrollo	90	6	540	19,070
Explotación	71	6	426	15,044
Servicios generales y supervisión	22	6	132	4,662
Caudal de aire requerido para el personal				38,776

Al integrar los requerimientos por personal (38,766 cfm) y por equipos diésel (1,419,251 cfm), el total asciende a 1,458,017 cfm, que será la base de dimensionamiento. Sobre esa base, y conforme a lo dispuesto por el D.S. N° 023-2017-EM, debe adicionarse un 15% para cubrir pérdidas por

fugas propias de la red de ventilación; dicho margen, aplicado a la suma indicada, equivale a 218,704 cfm.

3.11.1.3. Requerimiento total

La cifra del requerimiento total de aire fresco para sostener la viabilidad del plan de minado de las vetas Millet y Divina es la suma de los cálculos anteriores; es decir, 1,676,730 cfm.

Tabla 15.
Requerimiento total de aire fresco para el minado

Ítem	Caudal Año 4 (cfm)
Personal	38,776
Equipos diésel	1,419,251
Sub total	1,458,026
Fugas (15%)	218,704
Requerimiento total	1,676,730

Además de asegurar el caudal necesario, el diseño debe comprobar que, en los laboreos de explotación y en las zonas de desarrollo y preparación, la velocidad del aire se mantenga dentro del rango reglamentario: nunca por debajo de 20 m/min ni por encima de 250 m/min.

Se adopta una temperatura de bulbo húmedo de 28 °C como umbral superior de diseño. Cuando en un frente activo se supere ese valor, las labores deben detenerse y, de inmediato, disminuir la carga de equipos o reconfigurar la ventilación auxiliar. Si tales acciones no fueran viables porque los auxiliares operan a su tope o no es factible retirar equipos diésel, corresponde implantar un esquema trabajo–descanso con pausas programadas para la cuadrilla y asegurar hidratación suficiente, de modo que se mitigue el estrés térmico mientras se restablecen condiciones seguras.

3.11.2. Sistema de ventilación proyectado

La determinación del sistema de ventilación que se empleará en el minado de las vetas Salvador, Bárbara, Angela, Millet y Divina está basado en el requerimiento calculado de aire fresco.

3.11.2.1. Disposición y ubicación de RB de ventilación

Tomando como punto de partida la infraestructura proyectada para las nuevas vetas, se definió la perforación de siete (7) RB de ventilación, dispuestos con un espaciamiento radial de 500 m. Este criterio de separación se sustentó en lo constatado durante la visita y en la verificación del modelo en Ventsim: los ventiladores auxiliares de Inmaculada tienen un alcance de 500 m.

Tabla 16.
RB de ventilación proyectados; nomenclatura, longitud, diámetro y coordenadas de ubicación

RB	Longitud desde superficie a primer pie (m)	Diámetro (m)	Coordenadas		
			N	E	Z
V1	248	3.6	8,346,467	689,776	4,665
V2	382	3.6	8,347,392	689,784	4,654
V3	331	3.6	8,347,034	689,866	4,696
V4	279	3.6	8,346,482	689,255	4,667
V5	293	3.6	8,346,075	689,236	4,623
V6	234	3.6	8,346,138	689,908	4,670
V7	230	3.6	8,346,172	690,275	4,657

3.11.2.2. Diámetro óptimo del RB

Para definir el diámetro óptimo se tomaron en cuenta: la chimenea (≈ 450 m de longitud, factor de fricción 0.006 kg/m^3 y vida del proyecto de 9 años); el flujo de aire (densidad 0.72 kg/m^3 y caudal de diseño $600,000 \text{ cfm}$); la eficiencia del ventilador previsto en el collar de la chimenea (65%); los costos directos de perforación de la chimenea, que en este proyecto ascienden a $4,100 \text{ USD/m}$; la tasa interna de retorno, fijada en 35% por el

nivel conceptual del estudio; y el costo de la energía considerado para el proyecto, equivalente exactamente a 0.0967 USD/kW-h.

Con estos insumos se parametrizaron las funciones de costo operativo y de capital, obteniendo una función matemática cuyo argumento desconocido es el diámetro de la chimenea. Luego se calculó su derivada respecto de D y se la igualó a cero, a fin de identificar el diámetro óptimo que hace mínima la curva del costo total del sistema global.

$$\frac{dCT}{dD} = 81,750D - \frac{1,554,236,612}{D^6} = 0$$

El valor de D que satisfizo la igualdad fue 4.1 m.

Además, se reemplazaron una serie de distintos diámetros en la ecuación a fin de obtener las curvas de costos totales, de capital y de operación.

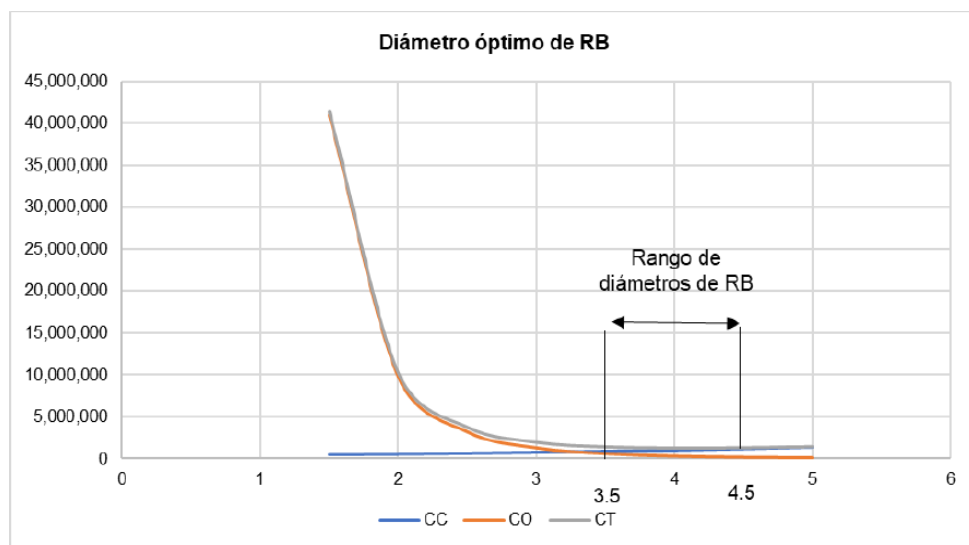


Figura 8. Gráfica de los costos totales, de capital y operativos en relación con el diámetro óptimo del RB

El gráfico muestra que en el rango de diámetros de 3.5 a 4.5 m la curva del costo total alcanza sus mínimos valores. Por lo tanto, un RB de 3.6 m de diámetro permitirá, al igual que uno de 4.1 m, conseguir el menor costo total en el sistema de ventilación.

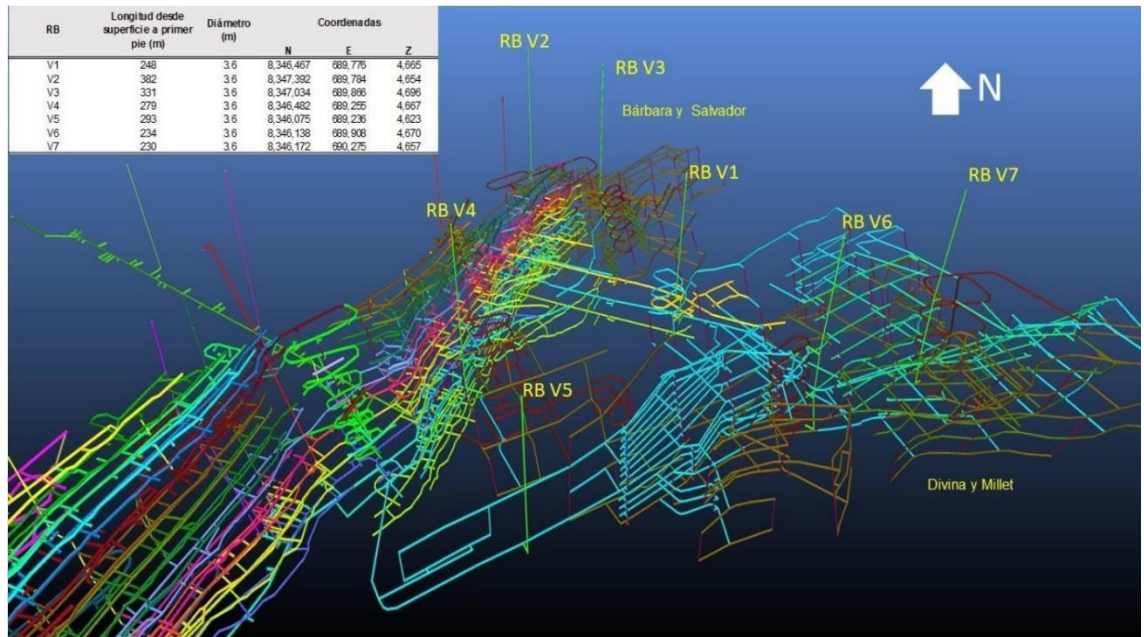


Figura 9. Ubicación de los RB de ventilación proyectados para la nueva infraestructura de minado de las vetas Salvadora, Bárbara, Millet y Divina

3.11.2.3. Ventiladores principales

Se ha establecido que, a lo largo de la vida del proyecto, el requerimiento máximo de aire fresco alcanzará 1,676,730 cfm. Para atender esa magnitud, el diseño contempla cuatro ventiladores extractores de 300,000 cfm y dos extractores de 250,000 cfm. En el momento en que se exija dicho máximo, se operará con dos extractores de 300,000 cfm en paralelo en el RB V1, otros dos de 300,000 cfm también en paralelo en el RB V7, y dos de 250,000 cfm, igualmente en paralelo, en el RB V6. Con esta disposición se inducirá, a través de los RB restantes, un ingreso del orden de 1,700,000 cfm. En la tabla siguiente se presentan las características técnicas aproximadas de los ventiladores principales consideradas en el estudio.

Tabla 17.
Características técnicas aproximadas de los ventiladores principales proyectados

Caudal nominal individual (cfm/unidad)	Presión nominal individual (in w.g./unidad)	Potencia individual (HP/unidad)	Cantidad (unidad)	Caudal nominal total (cfm)	Presión nominal total (in w.g.)	Potencia nominal total (HP)
300,000	9	700	2	600,000	9	1,400
300,000	9	700	2	600,000	9	1,400
250,000	9	700	2	500,000	9	1,400
Total				1,700,000		4,200

3.11.2.4. Ventiladores auxiliares

El requerimiento de aire fresco en el frente se fijó en 50,000 cfm; por ello, el esquema considera ventiladores auxiliares de 60,000 cfm para el sistema de ventilación auxiliar. Cada unidad operará con mangas de 42 pulgadas de diámetro, tendrá un alcance de 500 m, potencia individual de 120 HP y una presión de 8 pulgadas de agua.

A lo largo de la vida del proyecto, se proyecta utilizar, como tope, 18 ventiladores auxiliares con estas especificaciones.

Tabla 18.
Características técnicas aproximadas de los ventiladores auxiliares proyectados

Caudal nominal individual (cfm/unidad)	Presión nominal individual (inw.g./unidad)	Potencia individual (HP/unidad)	Cantidad (unidad)	Caudal nominal total (cfm)	Presión nominal total (inw.g.)	Potencia nominal total (HP)
60,000	8	120	1	60,000	8	120
Total				60,000		120

3.11.2.5. Esquema conceptual del sistema de ventilación proyectado

Según la figura 10, el pico de requerimiento de aire fresco para los proyectos Salvador, Bárbara, Millet y Divina ocurre en el año 4. Para cubrirlo, el esquema de diseño contempla cuatro ventiladores de 300 000 cfm y dos unidades de 250 000 cfm cada una, disponiendo dos extractores en paralelo por RB; con esta configuración, el sistema induce aproximadamente 1 700 000 cfm de ingreso.

La admisión por los RB restantes se ajustará de manera local, modulando el caudal en función de las necesidades de flujo en sus áreas de influencia inmediatas.

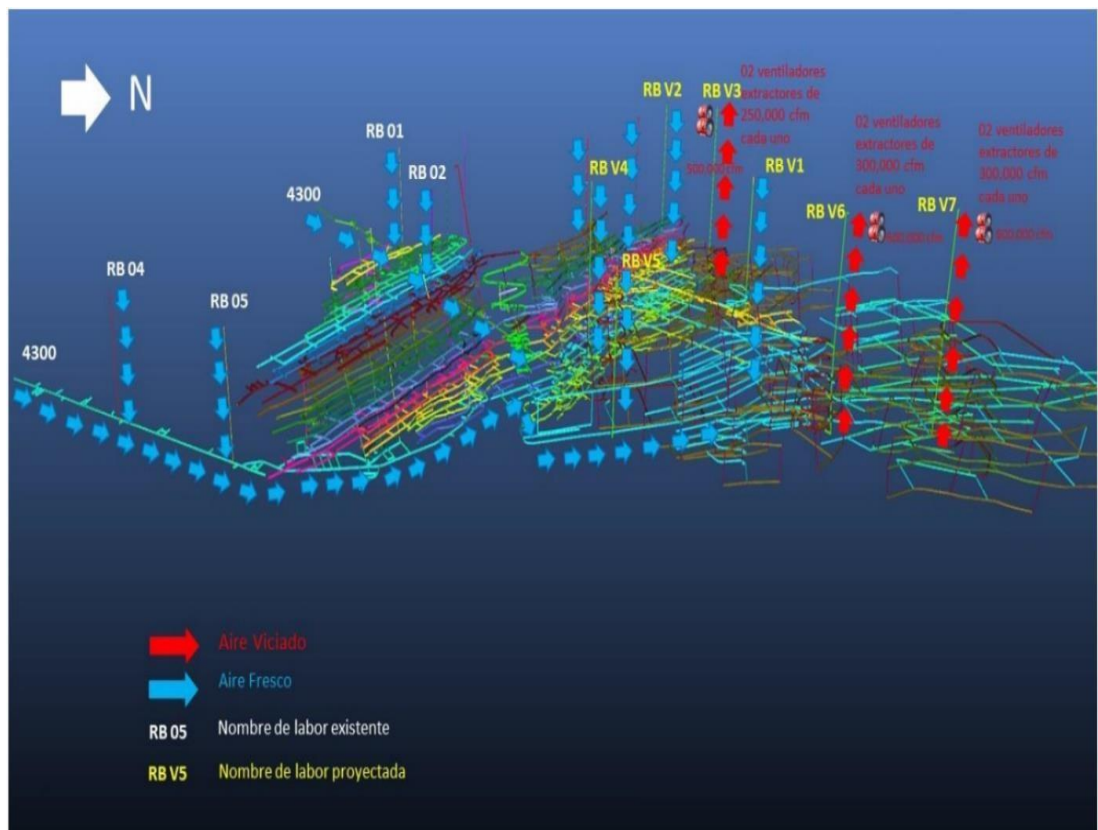


Figura 10. Esquema proyectado del sistema de ventilación para la explotación de las vetas Bárbara, Salvador, Millet y Divina

3.11.2.6. Esquema conceptual del sistema de ventilación Salvador y Bárbara

En la zona NE, que comprende las vetas Bárbara y Salvador, se prevé la ejecución de dos RB: RB V3 y RB V2. El esquema contempla montar en el collar del RB V3 un par de ventiladores extractores de 250,000 cfm cada uno, a través de los cuales se evacuará íntegramente el aire viciado generado en ese sector. La depresión producida por dichos equipos inducirá la entrada de aire fresco por el RB V2, el RB 18 y las bocaminas. La figura 11 presenta el valor del máximo requerimiento de aire fresco previsto para el desarrollo de Salvador y Bárbara.

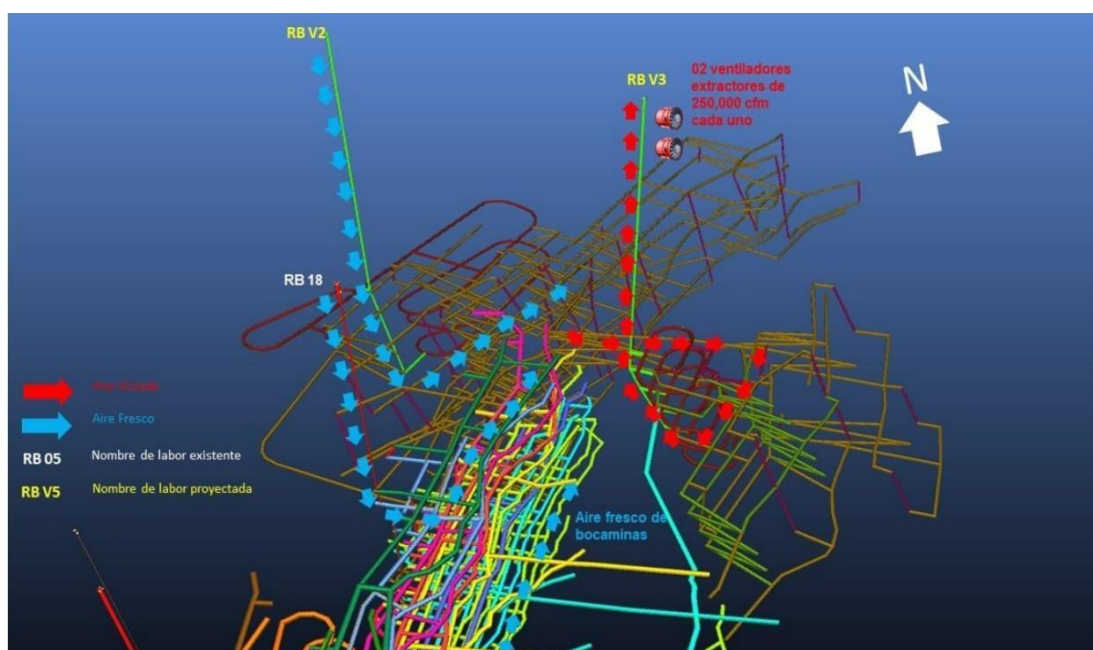


Figura 11. Esquema proyectado del sistema de ventilación para la explotación de las vetas Bárbara y Salvador

3.11.2.7. Esquema conceptual del sistema de ventilación Divina y Millet

En la zona Divina operan actualmente dos extractores: uno de 150,000 cfm instalado en el RB 11 y otro de 300,000 cfm en el RB 09. La depresión

que generan obliga a la admisión de aire fresco a través de las bocaminas y de los RB 10, 07 y 06.

Para la explotación de Divina y Millet se ejecutarán cinco RB: RB V1, RB V4, RB V5, RB V6 y RB V7. El pico de demanda se cubrirá con cuatro extractores de 300,000 cfm: dos se montarán en paralelo en el collar del RB V6 y dos adicionales en el RB V7. Con esta configuración, la depresión inducirá el ingreso de aire por RB V1, RB V4, RB V5 y por las bocaminas. La figura 12-7 muestra el máximo requerimiento de aire fresco previsto para ambos proyectos.

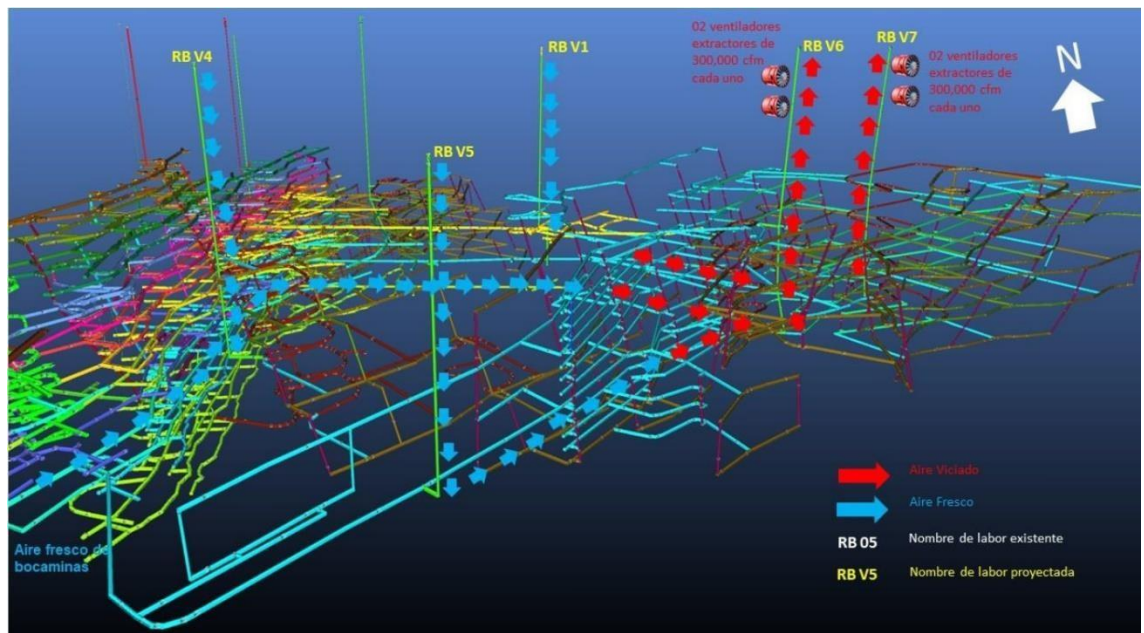


Figura 12. Esquema proyectado del sistema de ventilación para la explotación de las vetas Divina y Millet

IV. DISCUSION

La ampliación de áreas solo procede cuando la ventilación, además de cumplir la norma, ofrece margen para asegurar la dilución de contaminantes y el confort térmico en frentes con alta simultaneidad de equipos diésel. En Inmaculada, el diagnóstico 2023 mostró una clara brecha entre oferta y demanda de caudal y fallas de la ventilación auxiliar; por ello, la estrategia debía dejar las correcciones aisladas y migrar al redimensionamiento del circuito con criterios de capacidad, resistencia y eficiencia energética, incorporando control de velocidades (20–250 m/min) y un umbral $T \leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$, a fin de resguardar desempeño y seguridad operativa.

En relación con el objetivo general, la expansión queda supeditada a la ventilación: con un aporte de 595,294 cfm frente a una demanda de 1,131,750 cfm, la cobertura es 53%. El diagnóstico identificó RB obstruidos, mangas con transiciones abruptas, tabiques sin hermeticidad y ventiladores auxiliares apagados, focos de recirculación y pérdida de caudal.

El diseño eleva el requerimiento a 1,676,730 cfm demanda por diésel y personal más 15 % por fugas, incorpora siete RB espaciados a 500 m, ajusta diámetros (óptimo económico 4,1 m; factible 3,6 m) y dispone ventiladores principales en paralelo: cuatro de 300 000 cfm y dos de 250,000 cfm, además de hasta 18 auxiliares de 60,000 cfm. La coherencia con la evidencia radica en que la expansión se sustenta en dimensionar caudales y reducir resistencias globales. Al contrastar con Muñiz y Palacios (2019), quienes describen un circuito impelente de 431,18 m³/min con ventilador axial superficial y mangas de 800 mm, la escala superior de nuestro requerimiento se explica por tres condicionantes: la simultaneidad de flota (122 equipos), la altitud (>4 000 m s. n. m.) y la exigencia

normativa peruana (3 m³/min por HP y 6 m³/min por persona). En paralelo, la comparación con Valarezo (2020), un sistema que parte de 400 CFM y optimiza el rendimiento por transmisión (2292 rpm) evidencia un consenso en privilegiar la continuidad del flujo; la brecha de magnitud entre propuestas probablemente obedezca a variaciones en el plan de minado, la potencia instalada y el alcance multivetas de cada caso.

Para el primer objetivo específico, evaluar el sistema vigente, coincidimos con Lozano (2019), la cobertura queda condicionada por ventiladores subaprovechados y resistencias elevadas; los RB obstruidos y las mangas dañadas observadas lo confirman con claridad y consistencia técnica. Por ello se prioriza ampliar RB y recuperar la estanqueidad, dado el alto costo de oportunidad del caudal útil perdido en frentes simultáneos. El rediseño unifilar integral y la hermeticidad atacan pérdidas distribuidas y reducen la dependencia de arreglos en serie.

En el segundo objetivo, cálculo del requerimiento, convergemos con Solier (2023): demanda, monitoreo y estandarización de parámetros inciden en los indicadores. El 15 % por fugas, el control de velocidades y el umbral térmico se alinean con gestión por desempeño y trazabilidad. La diferencia con Ibáñez y Montoya (2022), que reportan predominio de ventilación natural por restricciones eléctricas, obedece a escala, acceso a energía y criticidad térmica; aquí, la simultaneidad de equipos impone ventilación forzada.

Respecto del tercer objetivo, disposición y ubicación de ventiladores, convergemos con Loayza (2021) y Ccanque (2023), operar ventiladores principales de alta capacidad en paralelo y reconfigurar RB aumenta cobertura y reduce déficits. Las variaciones frente a los ahorros energéticos de Ccanque

responden al mix de auxiliares y a la resistencia efectiva del circuito; nuestro óptimo de diámetro y el espaciamiento de 500 m buscan minimizar pérdidas de presión y estabilizar la red en el pico del año 4.

V. CONCLUSIONES

- 1º. El diseño de ventilación condicionó la expansión: el sistema entrega 595,294 cfm frente a 1,131,750 cfm; cubre el 53 % y deja un déficit de 536,456 cfm. Con la reactivación del RB 18 (300 000 cfm tras ampliar de 2,5 a 3,1 m), la perforación de 7 RB espaciados 500 m y diámetro 4,1 m, circuito se acerca a umbrales de velocidad y temperatura, habilitando frentes simultáneos sin comprometer la seguridad.
- 2º. La revisión del circuito identificó cuellos de botella: RB 08 y RB 13 obstruidos, restricción en la BM 4560 y ventiladores insuficientes (300,000 cfm en RB 09 y 150,000 cfm en RB 11). A nivel auxiliar se hallaron ductos rasgados, cambios de sección y tabiques con fugas; incluso un frente Jumbo tenía el ventilador apagado. Estas pérdidas y recirculaciones recortan el caudal útil en frentes críticos, incrementan la resistencia y frenan la expansión.
- 3º. El dimensionamiento del aire fresco, calculado desde la potencia y simultaneidad de equipos y la dotación de personal, fijó metas cuantificables. Se adoptó un umbral de bulbo húmedo de 28 °C y velocidades mínimas de 25 m/min (tope 250 m/min), integrando parámetros de modelado por chimenea de 600,000 cfm. Así se alinean demanda, seguridad y desempeño, se anticipan picos de producción sin sacrificar confort y se reducen decisiones reactivas.
- 4º. La configuración de ventiladores y RB fue decisiva: operar en extracción con 300,000 cfm en RB 09 y 150,000 cfm en RB 11, reinstalar 300,000 cfm en RB 18 ya ampliado y ubicar siete RB cada 500 m reduce resistencias y recirculaciones, y mejora presiones y cobertura.

VI. RECOMENDACIONES

- 1º. Para cerrar el déficit de 536,456 cfm, ejecuta una secuencia, primero, restituir 300 000 cfm en el RB-18; luego, operar en extracción con 2×300 000 y 2×250 000 cfm; perforar siete RB cada 500 m; finalmente, ajustar diámetros entre 3,6–4,1 m. Metas: cobertura ≥ 95 %, $T \leq 28$ °C, 25–250 m/min.
- 2º. Suprime los atascos con cinco medidas, rehabilitar RB-08 y RB-13; retirar la restricción BM-4560; sellar tabiques y uniones para limitar fugas a ≤ 15 %; recambiar mangas cada 45 días; y considerar siempre el ventilador encendido en frente. Además, auditorías operativas de 2 veces por semana como mínimo.
- 3º. Implanta un esquema dinámico, caudal por HP y dotación, sumando +15% por fugas y validación con monitoreo continuo. Alarmas al 90% umbrales de velocidad (≥ 25 m/min) y $T (\leq 28^{\circ}\text{C})$. Dimensiona pico de simultaneidad (año 4) con 10–20 % holgura, actualiza trimestralmente y vincula energía/kWh por tonelada.
- 4º. Uniformiza operación en extracción, principales en paralelo y auxiliares por frente. Reponer 300,000 cfm en RB-18, consolidar 2×300 000 y 2×250 000 cfm, y ejecutar siete RB cada 500 m. Ajustar diámetro a 3,6–4,1 m. Cobertura ≥ 98 %, eficiencias ≥ 70 , resistencia equivalente 20–30%. Balanceos trimestrales, con reporte.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agencia Nacional de Minería, “Guía de seguridad para ventilación de minas subterráneas”, 02/12/2017. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/23980938/010318_guia_seg_ventilacion_minas_subterraneas.pdf/52d1871d-37c0-45fe-9951-1b2adff92289
- [2] P. Quispe, “Ventilación de minas subterráneas natural y mecánica (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 2019. Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9886>
- [3] Ministerio de Energía y Minas, “D.S. N°023-2017-EM”, 18/08/2017. [En línea]. Disponible en: http://www.minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=1&idLegislacion=11799
- [4] J. Ccanque, “Optimización del sistema de ventilación a corto plazo mediante la construcción de Raise Boring - CIA Minera Alpayana S.A. - Lima (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 2023. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7518>
- [5] J. Ibáñez y D. Montoya, “Propuesta de mejora en la ventilación de la mina Carbones Torre Fuerte mediante un diseño de circuito de ventilación forzada (Tesis de Especialización en Gerencia de Proyectos)”, Corporación Universitaria Minutos de Dios, Colombia, 2022. Consultado:

- el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/3abf0664-3d0a-4c27-a17a-a4f64c31184c/content>
- [6] P. Lozano, "Incremento de capacidad de ventilación en zonas de Cuerpos en Cia Minera Casapalca S.A. (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2019. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5891>
- [7] J. Solier, "Evaluación del sistema de ventilación principal y sus indicadores en la Unidad Minera Andaychagua (Tesis de Maestría en Gestión Minera)", Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2023. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10485>
- [8] L. Muñoz y C. Palacios, "Diseño del sistema de explotación y circuito de ventilación de la veta Cornella en la mina Sociedad Civil Minera GOLDMINS (Tesis de pregrado)", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2019. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51484>
- [9] M. Valarezo, "Diseño del sistema de ventilación en la concesión minera 'Cebreal' y diseño del sistema de desagüe en la concesión minera 'R-Nivel', Zaruma - El Oro (Tesis de pregrado)", Universidad del Azuay, Ecuador, 2020. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10146/1/15776.pdf>
- [10] J. Mogrovejo y M. Valarezo, "Propuesta de diseño de un nuevo sistema de explotación subterránea para la mina aurífera Kristian David, Pasaje-El

- Oro (Tesis de pregrado)", Universidad del Azuay, Ecuador, 2022. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11985>
- [11] A. Loayza, "Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la Unidad Operativa Pallancata - Ayacucho (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 2021. Consultado: el 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6485>
- [12] E. Vargas, "Ventilación de minas", Sernageomin. [En línea]. Disponible en: [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Ventilacion-en-minas-subterraneas\(ErickVargasSernageomin\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Ventilacion-en-minas-subterraneas(ErickVargasSernageomin).pdf)
- [13] E. Yanes Garin, *Ventilación de Minas*. 1993.
- [14] J. Herrera, "Introducción a la ventilación minera", Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/70227/3/VENTILACION_DE_MINA_LM2B5T3_R0-20190418.pdf
- [15] Zitron, "Ventilación de minas", 12/03/2010. [En línea]. Disponible en: <https://zitron.com/?lang=es>
- [16] P. Jiménez, "Ventilación de minas subterráneas y túneles", 10/11/2011. [En línea]. Disponible en: https://iimp.org.pe/website2/jueves/ultimo261/jm20111110_libro.pdf
- [17] R. Tejeda y F. Mucha, "Evaluación de las condiciones de ventilación para la actualización del sistema integral de ventilación Unidad Minera Yauricocha (Tesis de pregrado)", Universidad Continental, Huancayo,

2022. Consultado: el 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11374>
- [18] J. D. Vega Ricaldi, “Evaluación integral del sistema de ventilación, para que el trabajador desarrolle sus actividades en condiciones normales, en la Empresa Minera Los Quenuales - Unidad Minera Yauliyacu (Tesis de Titulación)”, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2018. [En línea]. Disponible en:
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/861/1/T026_46950581_T.pdf
- [19] J. Vega, “Evaluación integral del sistema de ventilación, para que el trabajador desarrolle sus actividades en condiciones normales, en la Empresa Minera Los Quenuales - Unidad Minera Yauliyacu (Titulación en Ingeniero de Minas)”, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2018.
- [20] J. Cáceres Navarro, “Optimización de costos de ventilación mecánica del sistema de ventilación del nivel 2270 Unidad Minera San Andrés - Marsa (Tesis de Titulación)”, Universidad Nacional del Altiplano, 2019. [En línea]. Disponible en:
http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/14867/Cáceres_Navarro_Juan.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [21] J. Condori y L. Hidalgo, “Evaluación del sistema de ventilación de Mina Conquechaquita”, *14th United States/North American Mine Ventilation Symposium, 2012*, pp. 577–584, 2012, [En línea]. Disponible en:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51761431/Evaluacion_del_sistema_de_ventilacion_de_Mina_Colquechaquita_1-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1649879534&Signature=TpV5xhfLInxQmizKCzJz2Zavpp

[yaeR50m3zTcxbjGJCwxTpdhUCsjVFvucwxwjGk0Q4hxtOxbpTP3eLx~O
jXsFBBVCpB](https://www.researchgate.net/publication/330409452_Metodologia_de_la_Investigacion_Metodos_Tecnicas_y_estructuracion_de_trabajos_academicos)

- [22] S. Carrasco, *Metodología de la investigación científica*. Lima: Editorial San Marcos, 2007.
- [23] C. Ocegueda, *Metodología de la Investigación: Métodos, técnicas y estructuración de trabajos académicos*, 2da ed. México D.F: ALBOX, 2015. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/330409452_Metodologia_de_la_Investigacion_Metodos_Tecnicas_y_estructuracion_de_trabajos_academicos
- [24] R. Hernández, C. Fernández, y M. del P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 6ta ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2014. Consultado: el 14 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- [25] G. Baena, *Metodología de la Investigación*, 3era ed. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2017.
- [26] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la Investigación*, 5ta ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2010. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/8832042/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_5ta_edici%C3%B3n
- [27] J. Yuni y C. Urbano, *Técnicas para investigar. Recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación*, 1era ed., vol. 2do. Argentina: Editorial Brujas, 2014. Consultado: el 4 de noviembre de 2022.

[En línea]. Disponible en: <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2016/01/T%C3%A9cnicas-para-investigar-2-Brujas-2014-pdf.pdf>

- [28] C. Salgado-Lévano, *Manual de investigación. Teoría y práctica para hacer la tesis según la metodología cuantitativa*. Lima (Perú): Universidad Marcelino Champagnat, 2018. Consultado: el 17 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://atarazana.files.wordpress.com/2020/07/manual-tesis-cuantitativa.pdf>
- [29] C. C. Córdoba Quiceno y J. M. Molina Escobar, “Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea”, *Boletín de Ciencias de la TIERRA*, vol. 29, pp. 73–86, 2010, [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n29/n29a06.pdf>

VIII. ANEXOS

Anexo N°1: Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	INDICADORES	TÉCNICA/INSTRUMENTO
<p>DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN</p>	<p>El diseño de ventilación minera hace énfasis en el análisis y desarrollo de sistemas de circulación de aire eficientes y seguros en ambientes subterráneos. Integra principios de mecánica de fluidos, simulaciones por computadora y normas de seguridad industrial. El objetivo es asegurar condiciones ambientales óptimas que reduzcan la concentración de gases tóxicos, polvo y otros contaminantes, salvaguardando así la salud y seguridad de los trabajadores, al mismo tiempo que se mejora la eficiencia energética y la sostenibilidad en las operaciones mineras [29].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del sistema actual de ventilación • Cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado • Disposición y ubicación de ventiladores 	<p>Técnica del ANALISIS DOCUMENTAL</p>
<p>EXPANSIÓN DE ZONAS DE EXPLOTACIÓN MINERA</p>	<p>El objetivo principal es crear soluciones que mejoren la distribución de las corrientes de aire en entornos subterráneos, reduciendo así la acumulación de gases tóxicos y contaminantes y garantizando condiciones de trabajo seguras y eficientes. El objetivo es mejorar la productividad minera mediante la evaluación de parámetros críticos y el desarrollo de modelos escalables y robustos, al tiempo que se garantiza la integridad estructural de las infraestructuras y la salud de los trabajadores, fomentando así una explotación minera sostenible y tecnológicamente avanzada [21].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Expansión en veta Salvadora • Expansión en veta Bárbara • Expansión en veta Millet • Expansión en veta Divina 	<p>Técnica de LA OBSERVACIÓN</p>

Anexo N° 2: Matriz de consistencia

**DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA EXPANSIÓN DE LAS ZONAS DE EXPLOTACIÓN MINERA – MINA
INMACULADA – AYACUCHO 2023**

PROBLEMAS Problema general	OBJETIVOS Objetivo general	HIPÓTESIS Hipótesis general	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿De qué manera el diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?	Determinar que el diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.	El diseño del sistema de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.	Variable X: DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del sistema actual de ventilación • Cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado • Disposición y ubicación de ventiladores 	<p>Tipo: Aplicada</p> <p>Nivel: Descriptivo</p> <p>Diseño: No Experimental</p> <p>Población: la población estará conformada por todas</p>
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Y:		
¿De qué manera la evaluación del sistema actual de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?	Determinar que la evaluación del sistema actual de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.	La evaluación del sistema actual de ventilación influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.	EXPANSIÓN DE ZONAS DE EXPLOTACIÓN MINERA	<ul style="list-style-type: none"> • Expansión en veta Salvadora • Expansión en veta Bárbara 	las zonas de expansión para explotación minera, en la Unidad

<p>explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023? ¿De qué manera el cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023? ¿De qué manera la disposición y ubicación de ventiladores influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023?</p>	<p>explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023. Determinar que el cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023. Determinar que la disposición y ubicación de ventiladores influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023.</p>	<p>– Mina Inmaculada – Ayacucho 2023. El cálculo de requerimiento de aire fresco proyectado influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023. La disposición y ubicación de ventiladores influye en la expansión de las zonas de explotación minera – Mina Inmaculada – Ayacucho 2023</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Expansión en veta Millet • Expansión en veta Divina 	<p>Minera Inmaculada, en el año 2023. Muestra: La muestra estará conformada por las vetas Salvadora, Bárbara, Millet y Divina. Técnicas: El análisis documental y la observación directa</p>
---	---	---	--	--	--

Anexo N° 3: Métodos de minado

La selección del método de minado es función de un número de parámetros relacionados como la calidad geomecánica del mineral y las rocas encajonantes, las dimensiones, forma y buzamiento de la estructura mineralizada. Al seleccionar el método de minado la seguridad del personal encargado de la ejecución es de primordial importancia, por esta razón se optan por métodos donde el operador no ingresa a la labor o tajeo y la extracción se realiza con equipo operado a control remoto y también métodos donde el operador si ingresa a la labor previamente sostenida y segura.

Por otro lado, son importantes también los aspectos económicos como la ley de corte, distribución de ley del mineral, costo de la preparación y costo del minado, el minado masivo o selectivo, grado de mecanización influyen en la decisión de la selección del método de minado.

Existen varios métodos de selección cuantitativa del método de minado, un método conocido y empleado en la industria minera es el método propuesto por Nicholas y modificada por L. Miler, R. Pakalnis & R. Poulin (1995), que considera una serie de parámetros como la geometría general del yacimiento, potencia, buzamiento, distribución de leyes, profundidad, calidad del macizo rocoso y niveles de esfuerzos inducidos.

El procedimiento cuantitativo para la selección del método de minado consiste en asignar a cada parámetro puntajes relativos para cada método de minado conocido según las características propias del yacimiento de interés; los métodos que consigan mayor puntaje serán las que tendrán mayores probabilidades de aplicación.

El procedimiento cuantitativo para la selección del método de minado consiste en asignar a cada parámetro puntajes relativos para cada método de minado conocido según las características propias del yacimiento de interés; los métodos que consigan mayor puntaje serán las que tendrán mayores probabilidades de aplicación.

De la información revisada y procesada se indican las siguientes características, geológicas, geométricas y geomecánicas del cuerpo mineralizado:

- Calidad del macizo rocoso del mineral: Roca mala (RMR = 30 a 45).
- Índice de resistencia de la roca (RSS): $UCS / \sigma_1 = 50/8 = 6.2$ (moderado).
- Forma del yacimiento / tajeo: Tabular.
- Buzamiento de la pared del tajeo: (<50°, 50 – 70° y 70 a 90°).
- Potencia del tajeo <2m, 2-5 m, 5-10m y >10m).
- Ley: moderada a alta.
- Profundidad: 100-400 m.

En las siguientes tablas se muestran los resultados del método cuantitativo para las alternativas de los métodos de minado para las Vetas Bárbara, Millet y Divina. Para la veta Bárbara se ha obtenido como principal método de minado el corte y relleno ascendente seguido del Sublevel Stopping (SLS). Para este nivel de estudio, SRK no ha tomado en cuenta los métodos Square Set, Shrinkage ni tampoco los métodos masivos como block Caving y Sublevel Caving.

En las tablas 7-1, 7-2 y 7-3 se muestra el resumen de las alternativas de método de minado para las vetas Bárbara, Millet y Divina teniendo como principal método el Corte y relleno ascendente seguido del Sublevel Stopping (SLS). La predominancia del método de minado corte y relleno se debe principalmente a la reducción del ancho de minado y buzamientos bajos de las nuevas vetas y sumado a la mala calidad de roca de las cajas cercanas y mineral.

Tabla 5-4: Alternativas de los métodos de minado para la veta Bárbara.

Ancho de minado	Método de minado	Forma	Buz.	Espesor	Ley	Prof.	RMR MIN	RMR CTC	RMR CPC	RSS MIN	RSS CTC	RMR CTC	Puntaje Total
< 5 m	Cut and Fill	4	4	3	4	3	1	5	3	0	3	1	31
	Square Set	1	2	4	3	1	4	4	1	4	4	3	31
	Shrinkage	4	4	4	2	3	1	0	0	0	0	0	18
	Sublevel Stopping	4	4	-10	3	4	3	0	0	0	0	0	8
	Block Caving	2	4	-49	2	3	3	3	3	4	4	4	-17
	Sublevel Caving	4	4	-49	2	2	4	4	2	2	4	1	-20
	Room and Pillar	4	-49	4	0	3	0	0	0	0	0	0	-38

Tabla 5-5: Alternativas de los métodos de minado para la veta Millet.

Ancho de minado	Método de minado	Forma	Buz.	Espesor	Ley	Prof.	RMR MIN	RMR CTC	RMR CPC	RSS MIN	RSS CTC	RMR CTC	Puntaje Total
< 5 m	Cut and Fill	4	4	3	3	3	1	5	3	0	3	1	30
	Square Set	1	2	4	1	1	4	4	1	4	4	3	29
	Shrinkage	4	4	4	2	3	1	0	0	0	0	0	18
	Sublevel Stopping	4	4	-10	4	4	3	0	0	0	0	0	9
	Block Caving	2	4	-49	2	3	3	3	3	4	4	4	-17
	Sublevel Caving	4	4	-49	2	2	4	4	2	2	4	1	-20
	Room and Pillar	4	-49	4	2	3	0	0	0	0	0	0	-36
5 - 10 m	Cut and Fill	4	4	3	3	3	1	5	3	0	3	1	30
	Square Set	1	2	4	1	1	4	4	1	4	4	3	29
	Shrinkage	4	4	4	2	3	1	0	0	0	0	0	18
	Sublevel Stopping	4	4	-10	4	4	3	0	0	0	0	0	9
	Block Caving	2	4	-49	2	3	3	3	3	4	4	4	-17
	Sublevel Caving	4	4	-49	2	2	4	4	2	2	4	1	-20
	Room and Pillar	4	-49	4	2	3	0	0	0	0	0	0	-36
> 10 m	Cut and Fill	4	3	4	3	3	1	5	3	0	3	1	30
	Square Set	1	3	3	1	1	4	4	1	4	4	3	29
	Shrinkage	4	0	4	2	3	1	0	0	0	0	0	14
	Sublevel Stopping	4	1	1	4	4	3	0	0	0	0	0	17
	Room and Pillar	4	0	3	2	3	0	0	0	0	0	0	12
	Block Caving	2	2	-49	2	3	3	3	3	4	4	4	-19
	Sublevel Caving	4	1	-49	2	2	4	4	2	2	4	1	-23

Tabla 5-6: Alternativas de los métodos de minado para la veta Divina.

Ancho de minado	Método de minado	Forma	Buz.	Espesor	Ley	Prof.	RMR MIN	RMR CTC	RMR CPC	RSS MIN	RSS CTC	RMR CTC	Puntaje Total
< 2 m	Cut and Fill	4	3	4	3	3	1	5	3	0	3	1	30
	Block Caving	2	2	0	2	3	3	3	3	4	4	4	30
	Square Set	1	3	2	1	1	4	4	1	4	4	3	28
	Sublevel Caving	4	1	0	2	2	4	4	2	2	4	1	26
	Sublevel Stopping	4	1	3	4	4	3	0	0	0	0	0	19
	Room and Pillar	4	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	10
	Shrinkage	4	0	0	2	3	1	0	0	0	0	0	10
2 - 10 m	Cut and Fill	4	4	3	3	3	1	5	3	0	3	1	30
	Square Set	1	2	4	1	1	4	4	1	4	4	3	29
	Shrinkage	4	4	4	2	3	1	0	0	0	0	0	18
	Sublevel Stopping	4	4	-10	4	4	3	0	0	0	0	0	9
	Block Caving	2	4	-49	2	3	3	3	3	4	4	4	-17
	Sublevel Caving	4	4	-49	2	2	4	4	2	2	4	1	-20
	Room and Pillar	4	-49	4	2	3	0	0	0	0	0	0	-36
> 10 m	Cut and Fill	4	3	4	3	3	1	5	3	0	3	1	30
	Block Caving	2	2	0	2	3	3	3	3	4	4	4	30
	Square Set	1	3	2	1	1	4	4	1	4	4	3	28
	Sublevel Caving	4	1	0	2	2	4	4	2	2	4	1	26
	Sublevel Stopping	4	1	3	4	4	3	0	0	0	0	0	19
	Room and Pillar	4	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	10
	Shrinkage	4	0	0	2	3	1	0	0	0	0	0	10

En resumen, de acuerdo con los resultados del método de selección se ha determinado como alternativa predominante el método de minado corte y relleno ascendente y como segunda opción el método Sublevel Stopping con el uso de relleno en pasta cementado (tajeos por subniveles). En la siguiente tabla se resume las alternativas de los métodos de minado según el ancho de minado y buzamiento de las vetas.

Tabla 5-7: Resumen de alternativas de métodos de minado según evaluación geomecánica

Ancho de minado	Alternativas de métodos de minado	Buzamiento de la estructura	Tipo de perforación
< 2 m	1. Corte y relleno	No aplica	Breasting
2 - 5 m	1. Corte y relleno	No aplica	Breasting / Realce (*)
	2. Tajeo por subniveles longitudinales	Buz > 55°	Taladros largos
5 - 10 m	1. Corte y relleno	No aplica	Breasting / Realce (*)
	2. Tajeo por subniveles longitudinales	Buz > 55°	Taladros largos
> 10 m	1. Corte y relleno en paneleo	No aplica	Breasting
	2. Tajeo por subniveles transversales	Buz > 55°	Taladros largos

(*): Con pre-refuerzo: instalación de cable bolting en techo del tajeo

Fuente: SRK, 2020

5.9 Método de minado con ingreso de personal al tajeo

5.9.1 Corte y relleno ascendente convencional (C&F) y Corte y relleno ascendente en paneleo (D&F)

El método corte y relleno ascendente convencional aplica a anchos de minado menores a 10 m y con buzamientos mayores a 45°. Las labores de estos tajeos deben ser estabilizados debido a que es un método con ingreso de personal. En ese sentido para anchos de minado menor a 2 m se recomienda el uso de hydrabolt de 6 pies de longitud con una capa de shotcrete; para anchos de minado entre 2 a 5 m se recomienda la instalación de Hydrabolt de 7 pies de longitud más shotcrete con un espesor de 2"; así mismo, para labores con anchos de minado entre 5 a 10 m, se recomienda la instalación de pernos tipo hydrabolt con longitudes de 8 a 10 pies más una capa adicional de shotcrete entre 2 a 3" de espesor. En la figura 8-1 se muestra que las labores entre 2 a 5 m serán potencialmente inestable y para labores mayores a 5 m la excavación es inestable, en ambos casos se requiere el uso de un sostenimiento conformado por shotcrete y pernos.

Por otro lado, las dimensiones máximas de los tajeos (Block) de corte y relleno para la zona Bárbara, Divina, Lucy y nuevas vetas deberán tener una longitud de 200 m y una altura de 60 m, en la zona Millet los tajeos deberán tener una longitud máxima de 200 m y una altura de 60 m a excepción de la zona central de Millet de menor calidad de roca la longitud de los tajeos deberá ser 100 a 140 m con una altura de 60 m. Para el caso de las vetas en la zona NE los tajeos deberán

tener una longitud máxima de 160 m y una altura de 60m. Así mismo, las longitudes de los tajeos también deberán ser evaluados desde el punto de vista de productividad relacionados principalmente con los equipos de acarreo en el tajeo.

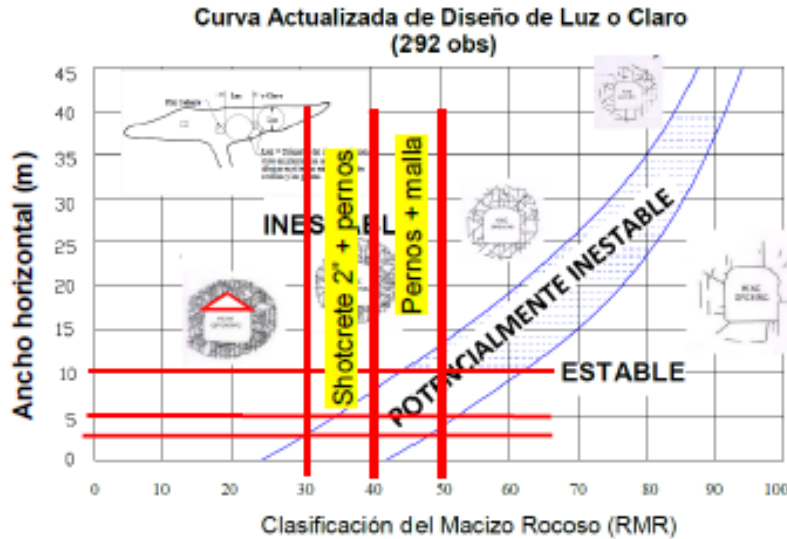


Figura 5-8: Evaluación de la estabilidad de los anchos de minado en corte y relleno a partir de la calidad de roca de la veta y cajas cercanas.

Tabla 5-8: Resumen del sostenimiento recomendado por tipo de labor.

Tipo de labor	Dimensiones		Tipo de roca	Sistema de sostenimiento
	Ancho (m)	Altura (m)		
Desarrollos (Rampas)	4.5	4.5	Roca tipo III	Perno helicoidal 7 pies (1.5x1.5m) + 2" shotcrete
			Roca tipo IV	Perno helicoidal 7 pies (1.2x1.2m) + 2" shotcrete
Preparación (Bps, Ventanas y CX)	4.5	4.5	Roca tipo III	Hydrabolt 7 pies (1.5x1.5m) + 2" shotcrete
			Roca tipo IV	Hydrabolt 7 pies (1.2x1.2m) + 2" shotcrete
Tajeos corte y relleno	< 3	< 3	Roca tipo IV	Hydrabolt 6 pies (1.3 x 1.3 m) + 2" shotcrete
	3-5	3-4.5	Roca tipo IV	Hydrabolt 7 pies (1.5x1.5m) + 2" shotcrete
	5-8	5-6	Roca tipo IV	Hydrabolt 8 pies (1.5x1.5m) + 3" shotcrete
	8-10	5-6	Roca tipo IV	Hydrabolt 10 pies (1.3x1.3m) + 4" shotcrete

Fuente: SRK, 2020

Para cuando el ancho de la estructura supera los 10 m se recomienda el método corte y relleno ascendente en paneles. Este método de minado es una variante del corte y relleno ascendente. La preparación inicia con una galería de 4.5x4.5 m en mineral a lo largo del tajeo en contacto con la caja piso seguido del minado de paneles primarios transversales de 4.5x4 m y la posterior recuperación de los paneles secundarios desde los extremos del block hacia el acceso o batiente;

para los paneles primarios se debe emplear relleno en pasta cementado con una resistencia de 0.2 a 0.3 MPa para cuando se inicia la recuperación del tajeo secundario. En la figura 8-2 se muestra el método de minado corte y relleno convencional y en la figura 8-3 se muestra el método corte y relleno en paneleo.

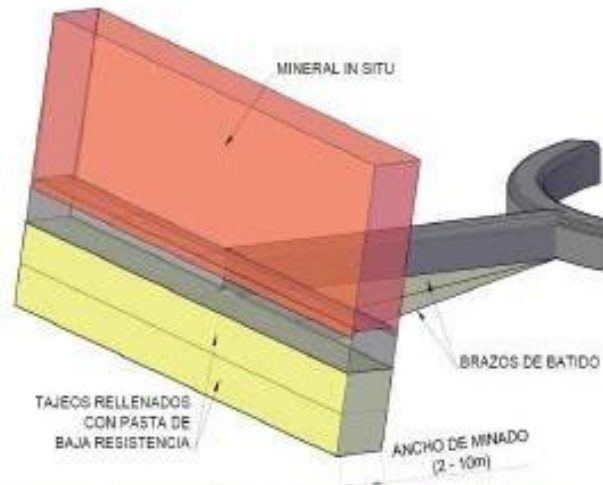


Figura 5-9: Esquemas de los métodos de minado en corte y relleno: Corte y relleno convencional para anchos menores a 10 m.

Fuente: SRK, 2020

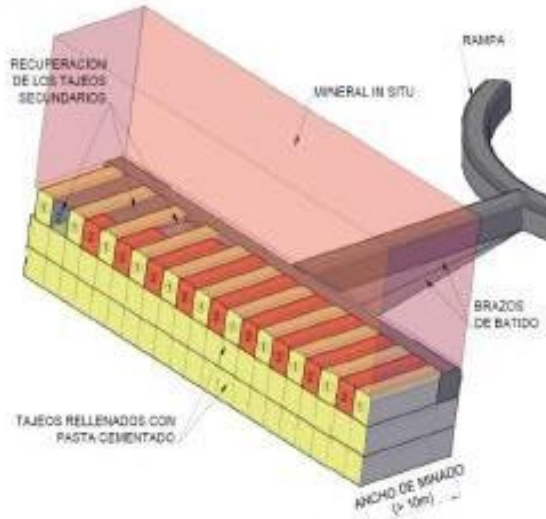


Figura 5-10: Esquemas de los métodos de minado en corte y relleno. Corte y relleno en paneleo para anchos mayores a 10 m.

Fuente: SRK, 2020

Como una mejora en el ciclo de minado se ha visto como alternativa la instalación de cable bolting bulbado como pre-refuerzo para los siguientes cortes hacia techo y caja techo desde la base del primer tajeo del block con la finalidad de realizar el minado en realce y aumentar la eficiencia en el ciclo de minado. En la figura 8-4 se muestra un esquema de la instalación del cable bolting como pre-refuerzo para estructuras con buzamientos mayores a 70° y en la figura 8-5 se muestra un esquema de la instalación de cable bolting para estructuras con buzamientos menores a 70°. Por otro lado, para una mejora en el tiempo del ciclo de minado se plantea como alternativa el uso de relleno en pasta de baja resistencia (< 0.15 MPa) para el fraguado rápido e ingreso del siguiente corte.

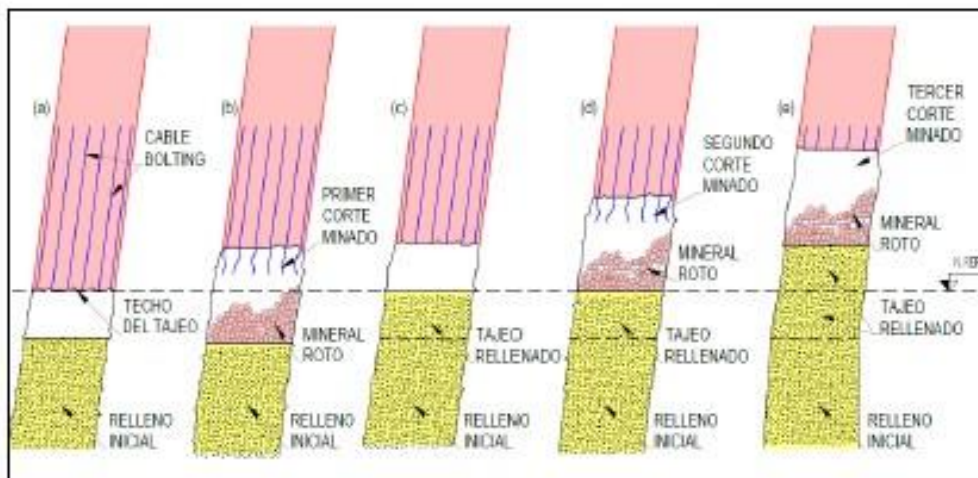


Figura 5-11: Esquema del minado en realce con la instalación de cable bolting (pre-refuerzo) en el techo y caja techo.

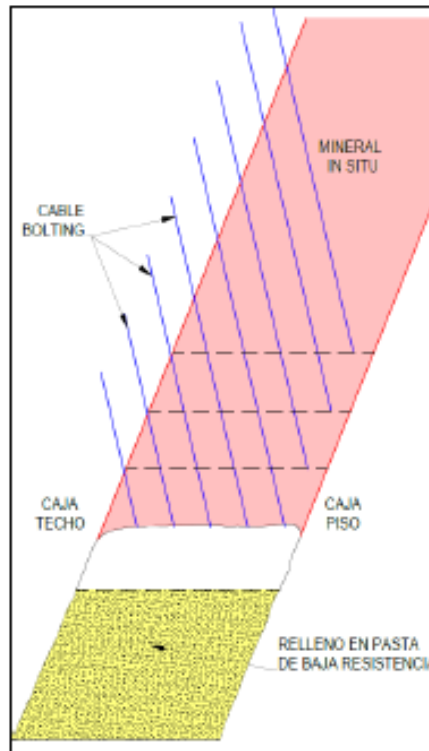


Figura 5-12: Esquema del minado en realce con la instalación de cable bolting (pre-refuerzo) en el techo y caja techo para buzamientos menores a 60°.

5.10 Método de minado sin ingreso de personal al tajeo

5.10.1 Tajeos por subniveles longitudinal (SLSL) y transversal (SLST)

Las dimensiones de los tajeos longitudinales y transversales han sido determinadas con el método gráfico de estabilidad (método empírico) que considera las características geomecánicas de la roca caja cercana (Número de estabilidad) y geométricas del tajeo (Radio hidráulico); así mismo considera el volumen de desprendimiento aceptable de la caja cercana por medio del parámetro llamado "ELOS" en metros (Equivalente lineal de sobre rotura).

Para el análisis de las dimensiones de los tajeos se ha utilizado el gráfico de estabilidad actualizado por Capes, 2009. Los tajeos por subniveles longitudinales serán aplicados a anchos de minado entre 2 a 10 m, con buzamientos mayores a 55°; cada tajeo tendrá una altura de banco de 14 m y sumado la altura de los subniveles superior e inferior llegará a una altura total de 23 m, en base al método gráfico de estabilidad considerando un ELOS de 0.5 m se ha encontrado que las longitudes de los tajeos deben encontrarse entre 10 a 13 m. En la siguiente figura se muestra la longitud de los tajeos en función al buzamiento de la veta.

Tabla 5-9: Evaluación del dimensionamiento de los tajeos por subniveles longitudinales en la veta Bárbara considerando ELOS de 0.5 m.

Tajeo longitudinal	CTC (70°)	CTC (65°)	CTC (55°)	CTC (45°)
Buz.	70	65	55	45
RMR'	39	39	39	39
Q'	0.57	0.57	0.57	0.57
A	1	1.00	1.00	1.00
B	0.3	0.30	0.30	0.3
C	5.94	5.46	4.56	3.76
N'	1.0	0.9	0.8	0.6
RH (m)	3.6	3.5	3.3	3.2
Altura vertical del banco (m)	15	15	15	15
Altura inclinada sin sost. (m).	24	25	28	33
Altura inclinada con sost. (m).	16	17	18	21
Longitud sin sost. (m)	10	10	9	8
Longitud con sost.(m)	13	12	10	9

Para el caso en que el ancho de la veta supere los 10 m, se recomienda el minado con tajeos por subniveles transversales, La longitud del tajeo transversal será como máximo 30 m y el ancho de minado de cada panel de 10 m. En la siguiente tabla se muestra los parámetros considerados y el cálculo del dimensionamiento de las longitudes de tajeos. En la figura 9-1 se muestra el análisis del método gráfico de estabilidad para el minado longitudinal y transversal considerando un ELOS de 0.5 m.

Tabla 5-10: Evaluación del dimensionamiento de los tajeos por subniveles transversales en la veta Divina considerando ELOS 0.5m.

Tajeo transversal	Pared lateral (90°)	CTC (70°)	CTC (65°)	CTC (55°)
Buz.	90	70	65	55
RMR'	49	48	48	48
Q'	1.74	1.56	1.56	1.56
A	1	1.00	1.00	1.00
B	1	0.30	0.3	0.3
C	8	5.94	5.46	4.56
N'	13.9	2.8	2.6	2.1
RH (m)	6.5	4.5	4.3	4.1
Altura vertical del banco (m)	15	15	15	15
Altura inclinada sin sost. (m)	23	24	25	28
Altura inclinada con sost. (m)	-	16	17	18
Longitud sin sost. (m)	30	14	13	12
Longitud con sost.(m)	-	21	18	15

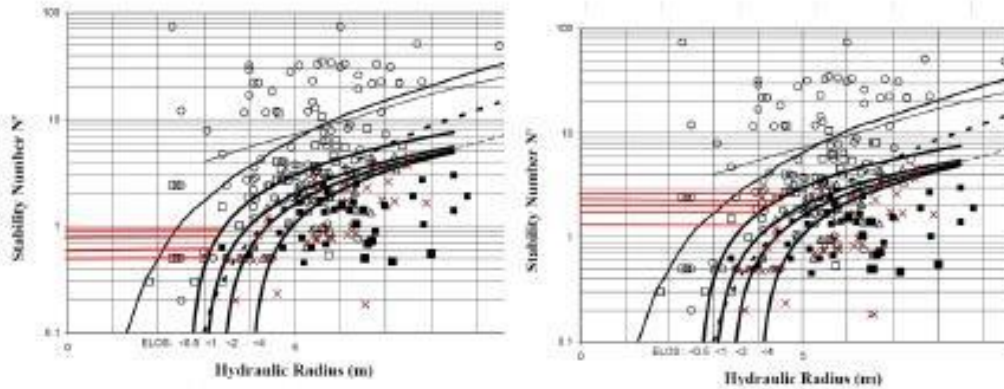


Figura 5-13: Evaluación empírica del dimensionamiento de tajeos por el método gráfico de estabilidad (Capes, 2009). Izquierda: análisis de la Veta Bárbara. Derecha: análisis de la veta Divina

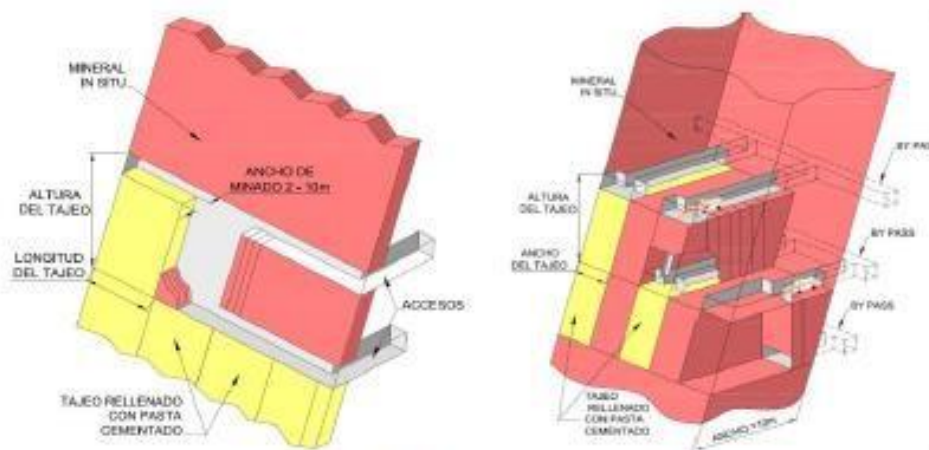


Figura 5-14: Esquemas del método tajeos con subniveles longitudinal y transversal.

5.11 Conclusiones y recomendaciones

5.11.1 Conclusiones:

- La calidad de roca de las cajas y estructuras mineralizadas de las vetas en la zona Millet tienen RMR predominante entre 30 a 40 y en zonas localizadas entre 40 a 50.
- La calidad de roca de las cajas y estructuras mineralizadas de las vetas en la zona Bárbara tiene RMR predominante entre 30 a 40.
- La calidad de roca de las cajas y estructuras mineralizadas de las vetas en la zona Divina tiene un RMR predominante entre 40 a 50.

-
- La calidad de roca de las cajas y estructura mineralizada de las vetas en la zona de vetas nuevas tienen un RMR entre 30 a 40.
 - De manera general se concluye que las estructuras mineralizadas y cajas cercanas de las vetas tienen un RMR entre 30 a 40 y en zonas localizadas entre 40 a 50.
 - Los anchos horizontales para las zonas Bárbara, Nuevas Vetas y Sur Angela son menores a 2 m. Mientras que para las zonas Millet y Divina varían de 2 a 10 m y en sectores localizados anchos mayores a 10 m llegando en zonas muy localizadas a los 25 m.
 - De acuerdo con las características geomecánicas y geométricas las alternativas de métodos de minado estudiadas son: Corte y relleno ascendente (C&F), corte y relleno ascendente en paneleo: (D&F), tajeo por subniveles longitudinales (SLSL) y tajeo por subniveles transversales (SLST).
 - Los sistemas de sostenimiento para las labores de desarrollo, preparación y tajeos en corte y relleno estarán conformados por pernos tipo helicoidal e hydrabolt de 6, 7, 8 y 10 pies de longitud y shotcrete de 2" a 4", según el ancho de la excavación. Así mismo el uso de cable bolting para aumentar la eficiencia del ciclo de minado en corte y relleno.

5.11.2 Recomendaciones:

- Se recomienda realizar logueo geotécnico a partir de las perforaciones diamantinas que se vienen realizando actualmente. Así mismo el desarrollo de ensayos de laboratorio de rocas.
- Para la siguiente fase de estudio se recomienda investigaciones geotécnicas adicionales como perforaciones geotécnicas orientadas y ensayos de laboratorio de mecánica de rocas en las estructuras mineralizadas.
- Para el presente nivel de estudio se recomienda utilizar los métodos de minado Corte y Relleno (C&F) para anchos de minado menor a 10 m y de Corte y Relleno en Paneleo (D&F) para anchos de minado mayores a 10 m considerando que no se cuenta con información geomecánica suficiente que permita optimizar el método de minado.

Anexo N° 4: Hidrogeología

6 HIDROGEOLOGÍA

6.1 Estudios anteriores

Las condiciones hidrogeológicas de la mina Inmaculada han sido objeto de estudios por diferentes instituciones y empresas de consultoría, en los que ha elaborado su modelo hidrogeológico a nivel conceptual determinándose en este los parámetros hidrogeológicos correspondientes. Durante la explotación actual de la mina, se han realizado mediciones de sus parámetros más importantes, los cuales han servido para efectuar el análisis de estos en el corto plazo. Los estudios, informes, memorándum y datos recopilados para la redacción de este acápite son los siguientes:

- Results of Groundwater modeling for projecting groundwater inflow to proposed Inmaculada Mine, Inmaculada Project, Perú; Ausenco Perú SAC, Noviembre 2011
- Estudio hidrológico hidrogeológico para el proyecto Inmaculada, HGS Perú SA (mayo, 2014)
- Estudios hidrogeológicos regionales del Sur del Perú, planos hidrogeológicos (INGEMMET, 2015)
- Mediciones de piezómetros instalados en interior mina (Ares, 2018)

Toda la información de los mencionados documentos ha sido tomada para evaluar las condiciones hidrogeológicas que se presentarían en las nuevas vetas proyectadas para una explotación futura.

6.2 Contexto geológico

La mina Inmaculada se encuentra situada en el altiplano del sur del Perú, piso superior de la cordillera Occidental del sur del Perú, constituido por altas cumbres, valles, mesetas, colinas y depósitos morrénicos. El ambiente geomorfológico dominante es de superficie de ladera amplia y lomadas con valles de escorrentía temporal y permanente entre los 4000 a 4800 msnm. Estas superficies están modeladas en rocas volcánicas de la Formación Aniso compuesta principalmente por rocas lávicas de composición andesítica de gran potencia y extensión en el sitio; otras rocas también están presentes como las piroclásticas de grano fino que forman rocas volcánicas sedimentarias.

La mina se ubica en la parte alta de la cuenca del río Ocoña, subcuenca del río Marañón y en las que se han diferenciado 06 microcuencas como son: Patari, Quellopata, Huamancute, Cairllaca, Pascana y Cancalla; siendo la quebrada Huamancute la que tiene mayor influencia en el proyecto, por su longitud y carga hidráulica. Estas microcuencas abarcan las vetas en explotación como son Ángela y sus ramales, situadas al sur oeste del proyecto; y las vetas Bárbara y Sheyla, situadas al noreste.

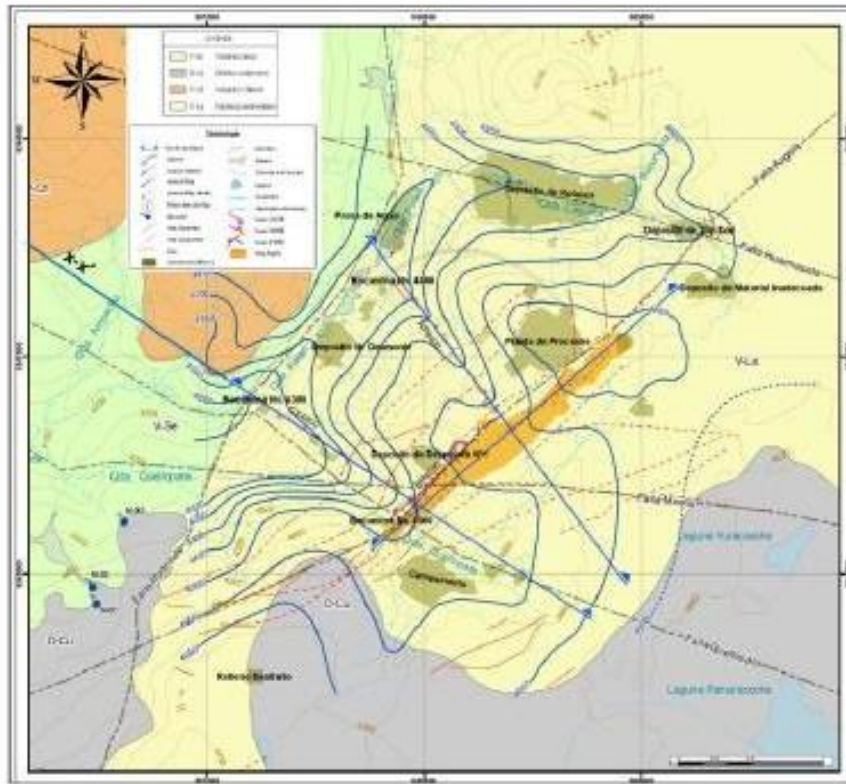


Figura 6-1: Mapa geológico de superficie y de hidro isohipsas de la mina Inmaculada
Fuente: HGS Perú SA (mayo, 2014)

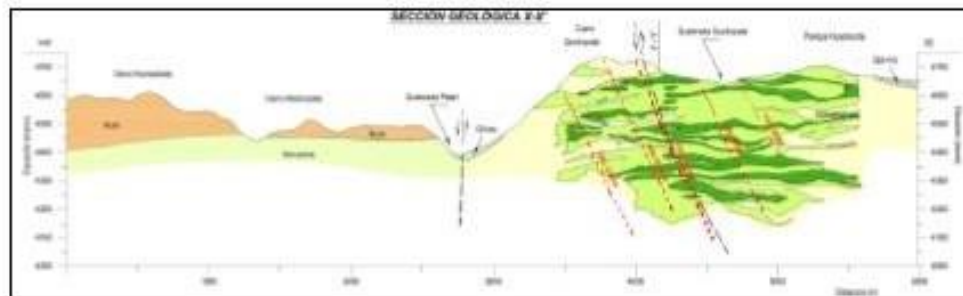


Figura 6-2: Sección geológica x-x' de la mina Inmaculada
Fuente: HGS Perú SA (mayo, 2014)

La mineralización que se tiene en la mina es de tipo epitermal tanto de baja sulfuración con presencia de vetas de cuarzo de relleno filoniano como de alta sulfuración que afloran y

naturalmente su condición es ácida. En el yacimiento se muestran estructuras mayores de mineralización, estas son 09 vetas de cuarzo con azimut NE-SW y buzamientos al SE, expuestas en la quebrada Quellopata. Este esquema estructural del yacimiento condiciona el aporte y el comportamiento del flujo de agua, el cual es mayor en estas pues poseen una mayor permeabilidad que la del macizo rocoso de su entorno.

6.3 Hidrogeología de la zona de estudio

Las condiciones hidrogeológicas del sitio fueron determinadas en la ejecución del estudio de HGS, en el cual se caracterizaron las unidades hidrogeológicas, que describimos a continuación:

6.3.1 Unidades hidrogeológicas

En los estudios regionales y locales se han reconocido cuatro unidades hidrogeológicas (HGS, 2014), las que se extienden ampliamente en el proyecto. La descripción de cada una de ellas se da a continuación:

- Unidad volcánico-lávica: consisten en formaciones volcánicas (Aniso) conformadas por riolitas, lavas andesíticas, brechas andesíticas y subvolcánicos, cuya matriz presenta muy baja permeabilidad y en las que el flujo y almacenamiento del agua se realiza a través de la red de fracturas (Lava andesítica).
- Unidad volcánico-sedimentaria: está conformado por las areniscas tobáceas y areniscas gravosas-conglomerádicas pseudo estratificadas de la Formación Aniso, consisten en materiales rocosos consolidados presentan baja permeabilidad en la matriz y donde el flujo y el almacenamiento de las aguas subterráneas se producen a través de los planos de estratificación y la red fracturas (Brecha andesítica).
- Unidad volcánico - Chibemi: conformado por lavas andesíticas, gris a gris oscuras, algo porfíricas con textura fluidal. El flujo y el almacenamiento se producen en las fracturas presentes ya que la matriz rocosa presenta muy baja permeabilidad
- Unidad detrítico-cuaternario: la conforman los depósitos recientes inconsolidados tales como los depósitos glaciales, glaciofluviales y coluviales, formado por materiales granulares que conforman acuíferos con flujo y almacenamiento en un medio poroso.

6.3.2 Manantiales y fuentes de agua

HGS (2014) realizó el inventario de fuentes de agua superficial, recolectando datos en 11 fuentes de agua en quebradas, en los que se realizaron aforos en las diferentes épocas de estiaje y de lluvia, entre los años 2011 y 2014. La Tabla 1, muestra los datos de caudales medidos en cada punto entre dicho periodo.

Los registros muestran que en febrero 2012 se registró el mayor caudal, siendo las quebradas que presentan mayor caudal Patari 1579.70 l/s y Quellopata 34.40 l/s, quebradas que se encuentran en la zona noreste de la concesión y que atraviesan perpendicularmente la veta Angela, respectivamente.

Tabla 6-1: Datos de aforos de las escorrentías superficiales medidos entre 2,011 -2,014

CÓDIGO DE INVENTARIO	CUERPO DE AGUA	NOMBRE	COORDENADAS (WGS-84)			CAUDAL (L/s)				
			ESTE	NORTE	ALTITUD	JUN 2011	AGO 2011	DIC 2011	FEB 2012	SEP 2014
			(m)	(m)	(msnm)					
INMA-1	Quebrada	SIN	692897	8347063	4673	-	-	-	-	0.12
INMA-2	Quebrada	Laguña	688990	8348254	4431	34.55	0.20	-	192.03	8.30
INMA-3	Quebrada	Patai	688542	8348296	4109	61.41	10.90	-	-	68.00
INMA-4	Quebrada	Patai	688630	8348196	4421	151.80	32.01	-	-	101.70
INMA-5	Quebrada	Laguña	687220	8346665	4290	178.10	68.06	112.40	845.10	85.90
INMA-6	Quebrada	Queicopala	688494	8345729	4540	0.50	0.12	0.10	34.40	0.04
INMA-7	Quebrada	Patai	688944	8346603	4290	194.20	68.10	141.00	1579.70	460.60
INMA-8	Quebrada	Sucunuma	690000	8348334	4540	-	-	-	-	-
INMA-9	Quebrada	Laguña	688703	8346640	4660	0.00	0.00	-	-	0.00
INMA-EI	Quebrada	Patai	687104	8346577	4240	-	-	-	-	498.90
INMA-ED	Quebrada	Laguña	688686	8345710	4390	-	-	-	-	0.00

Fuente: HGS Perú SA (mayo, 2014)

6.3.3 Parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica

Las unidades hidrogeológicas, tienen una permeabilidad de tipo secundaria, es decir que esta se realiza a través de las discontinuidades mayores y menores.

Durante el estudio ejecutado se realizaron varios ensayos de inyección de agua (tipo Lugeon y Lefranc) en los pozos de perforación con las que se pudo determinar la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas hallando el coeficiente de permeabilidad (k) de estas según su litología. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados en varios pozos de perforación se muestran en las Figuras 3 y 4, estos han sido agrupados por litología para determinar los rangos de las variaciones tal como se muestra en la

Tabla 6-2.

Tabla 6-2: Rangos de Conductividad hidráulica según tipo de litología

Litología	Permeabilidad (m/día)	
	Mínima	Máxima
Lava andesítica	1.00E-02	1.50E-01
Brecha andesítica	1.40E-03	1.10E+00
Veta y stock work	1.20E-02	1.50E+00
Coluvial	1.20E-02	1.00E+01

Fuente: HGS Perú SA (mayo, 2014)

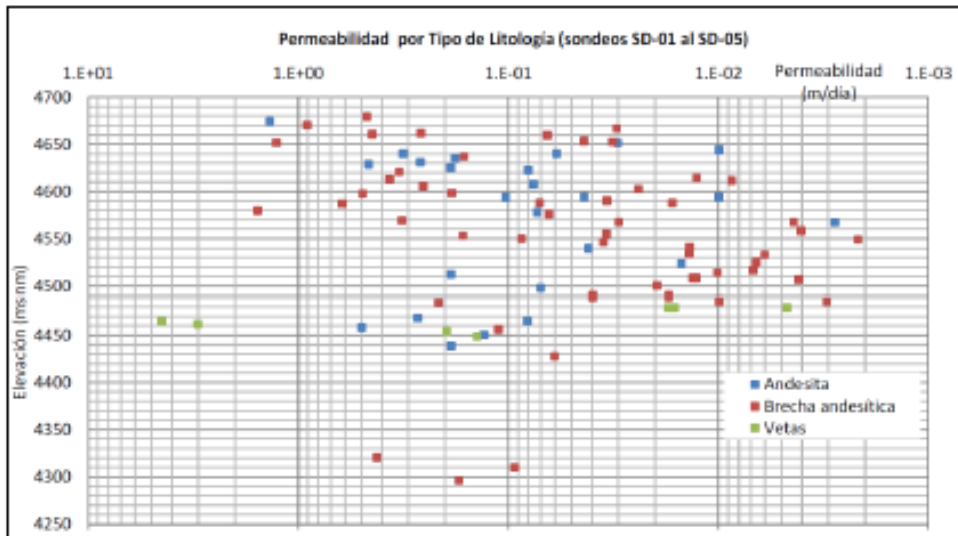


Figura 6-3: Distribución de la permeabilidad según la litología en pozos de perforación de código SD.

Fuente: HGS Perú SA (mayo, 2014)

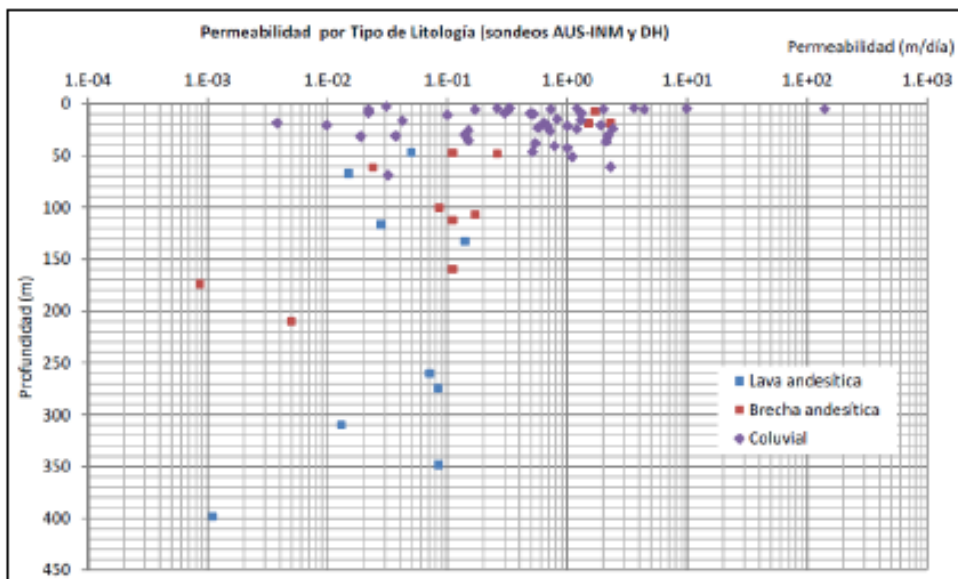


Figura 6-4: Distribución de la permeabilidad según litología en pozos de código AUS y DH.

Fuente: HGS Perú SA (mayo, 2014)

Los resultados muestran que las unidades hidrogeológicas son altamente permeables, siendo los valores de k que oscilan entre los 1 a 10E-2 m/día, así pues, podemos indicar que para la lava y brecha andesíticas su k varía entre 1 – 10-3 m/día, con profundidades que van entre los 200 a 400 m; asimismo el coluvial tiene un k de 10-2 m/día, cuya profundidad alcanza hasta 60 m.

6.3.4 Calidad del agua

Durante las diferentes épocas de lluvia se recopilaron datos en 11 puntos de monitorización superficiales representativas del proyecto, HGS (2014), tomándose los parámetros fisicoquímicos in-situ como: temperatura, SDT, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, cuyos resultados se muestran en la

Tabla 6-3. Los resultados determinaron que las quebradas Laguiña (INMA 2) y Patari (INMA 7) presentan condición acida natural y se neutralizan en la confluencia con la quebrada Quellopata (INMA 6). Asimismo, se tomaron muestras para ensayos de laboratorio cuyos resultados de los análisis hidroquímicos muestran que los contenidos en hierro y manganeso ocurren en forma natural en la zona de estudio.

Tabla 6-3: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en puntos de muestreo de agua superficial

ESTACIÓN	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS																		
	MAR/11					JUN/11					Feb/12					SE			
	pH	TuMP	TSD	CE	OD	pH	TuMP	TSD	CE	OD	pH	TuMP	TSD	CE	OD	pH	TuMP	TSD	CE
	-	°C	ppm	uS/cm	mg/L	-	°C	ppm	uS/cm	mg/L	-	°C	ppm	uS/cm	mg/L	-	°C	pp	uS/cm
INMA-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.96	5	95	136	-	6.84	14.8	-	86.5
INMA-2	-	-	-	-	-	3.28	6.5	302	321	-	6.34	5.1	119	284	-	3.95	12.1	-	89.1
INMA-3	5.21	7.3	78	226	-	6.08	10.1	99	81	-	7.58	5.4	22	78	-	5.81	14.6	-	36
INMA-4	-	-	-	-	-	4.37	11.3	197	180	-	7.6	5.4	84	126	-	5.06	14	-	158.3
INMA-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.4	10.8	-	148.4
INMA-6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.99	5.8	-	0.05
INMA-7	7.98	11.4	77	160	-	6.75	7.7	214	186	-	8.39	5.2	51	240	-	7.58	14.6	-	157
INMA-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INMA-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SEC
INMA-2I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INMA-2D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.45	14.9	-	180.3

Fuente: HGS, 2014

6.3.5 Nivel Freático y dirección de flujo

Las mediciones efectuadas en los piezómetros y registradas durante los estudios de HGS en el periodo 2011 – 2014, indican que en el área de la mina Inmaculada, la superficie piezométrica se situaba aproximadamente entre los 4700 msnm y los 4250 msnm, entre los 50 y 150 m de profundidad desde la superficie, las medidas más profundas se deben a la presencia de las labores subterráneas que cortan las vetas mineralizadas en donde ocurre la mayor filtración de agua pues estas labores actúan como drenes.

En el año 2018, en las labores de la veta Ángela nivel 4300, estaban instalados los piezómetros HP-INM-SUB-01 (4331.80 msnm) y HP-INM-SUB-02 (4320.64 msnm), véase Figura 6-5 , en ellos el 1/11/2018 se midió el nivel freático a 26 y 17 m respectivamente, aproximadamente a 200 m desde la superficie. El nivel freático en los pozos indicados va en descenso progresivo moderado desde el 02/06/2018.

El modelo simulado realizado por HGS (2014), pronosticaba un descenso del nivel piezométrico en la zona de explotación debido a la infiltración del agua, siendo la descarga de los flujos del agua en general hacia el río Patari y puntualmente hacia las hacia la bocamina Nv 4500 de la veta Ángela, rampas y quebradas, tal como se muestra en la Figura 6-6.



Figura 6-5: Ubicación de los piezómetros en el nivel 4300 de la Veta Ángela.

Fuente: Mina Inmaculada, 2018

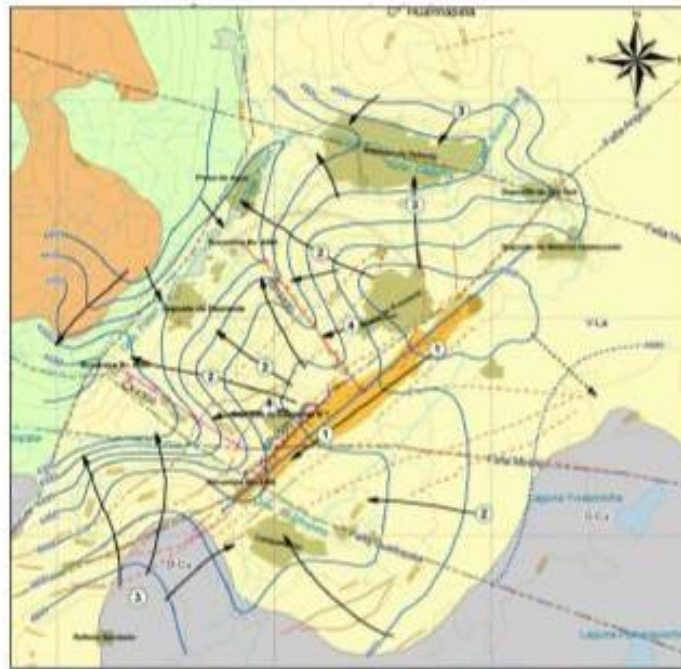


Figura 6-6: Hidroisohipsas y flujos subterráneos

Fuente: HGS, 2014

6.3.6 Acuífero

El acuífero es libre y tiene una extensión regional cuyos límites no fueron determinados con precisión, estando al oeste en la incisión del río Marañón y al este y sur con la incisión del río Cotahuasi, al norte el límite es más impreciso siendo probable que se encuentre próximo a la divisoria de agua del Atlántico y el Pacífico; este cubriría aproximadamente 19500 Km².

Zonas de recarga y descarga del acuífero

La recarga es por infiltración de precipitación líquida y sólida, recarga por crecida de cauce de quebradas y en menor medida a través de laguna.

La descarga del acuífero se produce a tres escalas diferentes:

- Descarga de flujos locales de poca profundidad: manantiales perennes o estacionales.
- Descarga de flujos intermedios: estos flujos alimentan a los manantiales, bofedales y cauces las quebradas que presentan caudal base son: Yurack Cucho, Jarka Jarka Cucho, Patari, Ampachu, Quellopata (parte baja), Chaguaya y Huamancute.
- Descarga de flujos de largo recorrido: se produce a través de un circuito de profunda vinculado a las grandes tectónicas.