



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución 4.0 Internacional

Esta licencia permite que otros distribuyan, mezclen, adapten y construyan sobre su trabajo, incluso comercialmente, siempre que le reconozcan la creación original. Esta es la licencia más complaciente que se ofrece. Recomendado para la máxima difusión y uso de materiales con licencia.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

N° 026-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:

**“INCREMENTO DE LA COBERTURA DE AIRE EN LA MEJORA
DE LA VENTILACION DE LABORES SUBTERRANEAS -
ALPAYANA 2024”**

Presentado por:

TRILLO REMICIO DAVID OMAR

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 18%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. En Ica 04 de julio 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



INCREMENTO DE LA COBERTURA DE AIRE EN LA
MEJORA DE LA VENTILACIÓN DE LABORES
SUBTERRÁNEAS – ALPAYANA 2024

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. DAVID OMAR TRILLO REMICIO

ICA, PERÚ

2025



Dedicatoria

*A mis padres, siempre dando aliento, fuerzas,
protección, consejos y todo el camino para
alcanzar mi más anhelado sueño.*



Agradecimiento

Gracias a Dios, es el principio y final de todo, mi fe a pesar de los momentos, nunca va a cambiar.

Gracias a mi alma máter, La FIMM de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica.

Gracias a la plana catedrática, a mi asesor.

Gracias a todos mis familiares por el apoyo.

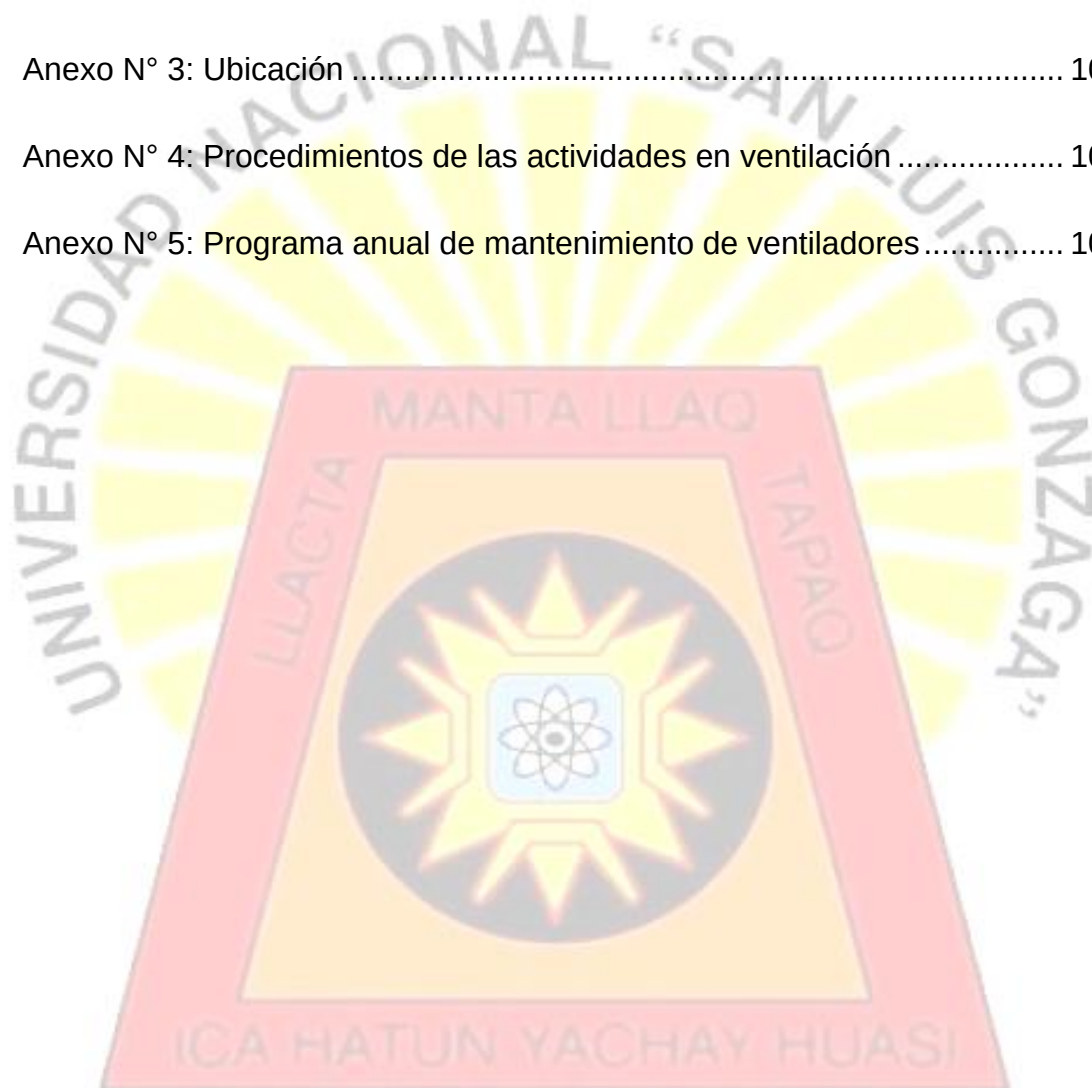
Índice de contenidos

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. Realidad problemática.....	12
1.2. Antecedentes.....	15
1.2.1. Internacionales	15
1.2.2. Nacionales	20
1.3. Ventilación de minas subterráneas.....	28
1.3.1. Importancia y objetivos.....	28
1.3.2. Evolución histórica y fundamentos teóricos	30
1.3.3. Fundamentos de la mecánica de fluidos en la ventilación.....	33
1.3.3.1. Principios termodinámicos	33
1.3.3.2. Leyes de la dinámica de fluidos.....	36
1.3.3.3. Ecuaciones de conservación y de movimiento.....	38
1.3.4. Composición y calidad de aire.....	41
1.3.4.1. Composición del aire y sus contaminantes.....	41

1.3.4.2.	<i>Factores que afectan la calidad del aire</i>	43
1.3.5.	<i>Tipos de ventilación</i>	46
1.3.5.1.	<i>Ventilación natural</i>	46
1.3.5.2.	<i>Ventilación mecánica</i>	49
1.3.5.3.	<i>Sistemas mixtos</i>	51
1.3.6.	<i>Ventiladores principales y sus características</i>	54
1.3.7.	<i>Metodologías para el diseño de ventilación</i>	56
1.3.8.	<i>Cálculo de aire según la normativa peruana</i>	58
1.3.8.1.	<i>Por el número de trabajadores</i>	59
1.3.8.2.	<i>Por el consumo de madera</i>	59
1.3.8.3.	<i>Por temperatura</i>	60
1.3.8.4.	<i>Por equipos diesel</i>	60
1.3.8.5.	<i>Por fugas</i>	61
1.3.8.6.	<i>Por consumo de explosivos</i>	61
1.4.	<i>Formulación de los problemas</i>	62
1.4.1.	<i>Problema general</i>	62
1.4.2.	<i>Problemas específicos</i>	62
1.5.	<i>Justificación</i>	62
1.6.	<i>Objetivos</i>	63
1.6.1.	<i>Objetivo general</i>	63
1.6.2.	<i>Objetivos específicos</i>	63
1.7.	<i>Hipótesis</i>	63

1.7.1.	<i>Hipótesis específica</i>	63
1.7.2.	<i>Hipótesis específica</i>	64
II.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA	65
2.1.	Lugar de estudio.....	65
2.2.	Tipo de investigación.....	65
2.3.	Nivel de investigación.....	66
2.4.	Diseño de investigación	66
2.5.	Población y muestra.....	66
2.5.1.	<i>Población</i>	66
2.5.2.	<i>Muestra</i>	67
2.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	67
2.7.	Técnicas de análisis e interpretación de datos	68
III.	RESULTADOS	69
3.1.	Actividades de mejoramiento de la ventilación	69
3.2.	Ejecución en la zona cuerpos	71
3.3.	Ejecución en la zona vetas	76
3.4.	Diseño del circuito general de ventilación en zona cuerpos.....	82
3.5.	Diseño del circuito general de ventilación en zona oroya.....	83
3.6.	Diseño del circuito general de ventilación en zona vetas	84
3.7.	Riesgos potenciales y control	85
IV.	DISCUSION	91
V.	CONCLUSIONES	93

VI. RECOMENDACIONES.....	94
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
VIII. ANEXOS	102
Anexo N°1: Operacionalización de variables.....	103
Anexo N° 2: Matriz de consistencia	104
Anexo N° 3: Ubicación	106
Anexo N° 4: Procedimientos de las actividades en ventilación	107
Anexo N° 5: Programa anual de mantenimiento de ventiladores.....	109



Índice de tablas

Tabla 1. <i>Riesgos potenciales y control en las actividades de ventilación</i>	85
---	----



Índice de figuras

Figura 1. RB 840 para incrementar la cobertura de aire de 80 a 100%.....	69
Figura 2. RB de salida de aire hacia la superficie	70
Figura 3. Cobertura de aire logrado después de ejecutar el RB 840.....	70
Figura 4. Raise Boring en la Zona Cuerpos	72
Figura 5. Cobertura de aire logrado en la zona cuerpos Casapalca.....	73
Figura 6. Circuito de ventilación en la zona cuerpos Casapalca.....	73
Figura 7. Circuito de ventilación en la zona cuerpo M.....	74
Figura 8. Cobertura de aire logrado en la zona cuerpo M.....	74
Figura 9. Circuito de ventilación en la zona cuerpo Esperanza	75
Figura 10. Cobertura de aire alcanzado en la zona cuerpo Esperanza.....	76
Figura 11. Circuito de ventilación en la zona veta Esperanza	77
Figura 12. Cobertura de aire logrado en la zona Veta Esperanza.....	78
Figura 13. Circuito de ventilación en la zona veta Alessa.....	79
Figura 14. Cobertura de aire logrado en la zona Veta Alessa	79
Figura 15. Circuito de ventilación en la zona veta C	80
Figura 16. Cobertura de aire logrado en la zona Veta C.....	81
Figura 17. Diseño de ventilación zona cuerpos.....	82
Figura 18. Diseño de ventilación zona oroya	83
Figura 19. Diseño de ventilación zona vetas	84

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo determinar que el incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024. Es de tipo aplicada, nivel descriptivo, diseño descriptivo comparativo, La población y muestra se conforma por las zonas Cuerpo Esperanza, Cuerpo M, Veta Alessa, Veta C, Veta Esperanza en operaciones de explotación minera en la Unidad Minera Alpayana, en el año 2024. La cobertura de incrementó de 80 a 100% en la unidad minera. En la zona cuerpos Casapalca, M y Esperanza, se logró mejorar la ventilación de minas, al elevar la cobertura de aire en 2 293, 10 613 y 24 852 CFM o 101, 106 y 121% respectivamente del mínimo requerido. Además, en la zona cuerpos Casapalca, M y Esperanza, se logró mejorar la ventilación de minas, al elevar la cobertura de aire en 21 635, 10 399 y 10 613 CFM o 113, 117 y 106% respectivamente del mínimo requerido. Finalmente, el riesgo potencial con mayor relevancia evaluado fue la intoxicación por gases tóxicos, el cual se elaboró sus controles que son implementación de equipos de medición de gases, bloqueo de labores paralizadas, aplicación de PETS, uso de autorrescatadores.

Palabras Claves: Cobertura de aire, ventilación de minas, ventilación en labores mineras.

Abstract

The objective of this study is to determine that the increase of air coverage improves the ventilation of subway workings - Alpayana 2024. It is an applied, descriptive level, comparative descriptive design. The population and sample consists of the following zones: Cuerpo Esperanza, Cuerpo M, Veta Alessa, Veta C, Veta Esperanza in mining operations in the Alpayana Mining Unit, in the year 2024. Coverage increased from 80 to 100% in the mining unit. In the Casapalca, M and Esperanza ore bodies area, mine ventilation was improved by increasing air coverage by 2,293, 10,613 and 24,852 CFM or 101, 106 and 121%, respectively, of the minimum required. In addition, in the Casapalca, M and Esperanza area, mine ventilation was improved by increasing air coverage by 21,635, 10,399 and 10,613 CFM or 113, 117 and 106%, respectively, of the minimum required. Finally, the most relevant potential risk evaluated was poisoning by toxic gases, which was controlled by implementing gas measurement equipment, blocking work stoppages, applying PETS, and using self-rescuers.

Keywords: *Air cover, mine ventilation, ventilation in mine workings.*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El sector minero ha constituido históricamente un componente esencial en el desarrollo económico de diversas naciones, destacándose en Perú por las considerables inversiones y el fortalecimiento de su infraestructura. En este marco, el incremento en la explotación de minas subterráneas demanda una constante actualización de los sistemas de ventilación, los cuales son fundamentales no solo para la productividad, sino también para garantizar condiciones ambientales seguras para el personal [1].

Se define la ventilación minera como el conjunto de procesos y mecanismos que posibilitan la renovación y distribución del aire en los espacios subterráneos, asegurando el cumplimiento de los requerimientos de aire limpio y manteniendo los niveles de contaminantes dentro de límites seguros. La evaluación de esta variable resulta crucial, ya que impacta directamente en indicadores clave como la cobertura de aire, la calidad del flujo y el cumplimiento de objetivos operativos, aspectos fundamentales para la seguridad y la prevención de incidentes por gaseamiento [2].

La problemática central se encuentra en la distribución desigual del flujo de aire en zonas críticas durante las labores subterráneas. Aunque se han implementado equipos modernos y se utilizan herramientas de modelado y simulación, como VentSim, se han detectado áreas donde el suministro de aire fresco es insuficiente, elevando el riesgo de acumulación de gases y comprometiendo la calidad ambiental. Esta situación se complica aún más cuando la infraestructura actual no se adapta adecuadamente a las variaciones

del proceso minero, lo que exige estrategias de optimización para lograr una distribución equilibrada del aire [3].

A nivel internacional, investigaciones en países como China, Australia y Estados Unidos han demostrado que la optimización de los sistemas de ventilación, a través de técnicas de modelado y simulaciones, puede mejorar significativamente la distribución del flujo de aire y reducir los riesgos asociados a la acumulación de gases nocivos. Estos estudios han establecido parámetros de diseño que sirven de referencia para mejorar la eficiencia y seguridad en explotaciones mineras a gran escala [4].

En el contexto nacional, diversas investigaciones y tesis desarrolladas en universidades peruanas han evidenciado deficiencias en la distribución del aire en minas subterráneas, a pesar de que los sistemas teóricamente cumplen con los requisitos mínimos. Esta situación incrementa el riesgo de incidentes por gaseamiento y resalta la necesidad de actualizar los criterios de diseño y operación conforme a las condiciones reales de explotación [5].

El presente estudio se motiva por la imperiosa necesidad de garantizar la seguridad y eficiencia en las operaciones mineras subterráneas. La protección de la salud de los trabajadores y la integridad de la infraestructura operativa dependen de contar con un sistema de ventilación óptimo, capaz de responder a las variaciones del entorno y a una creciente demanda de aire limpio. La revisión de casos nacionales, respaldada por evidencia experimental y simulaciones numéricas, subraya la urgencia de implementar soluciones que incrementen de manera sostenida y controlada la cobertura de aire [3].

La literatura indica que entre las estrategias mayormente propuestas se incluyen la optimización en el diseño de ductos y ventiladores, la incorporación de

sistemas de control y monitoreo en tiempo real, y la aplicación de simulaciones avanzadas para anticipar el comportamiento del flujo de aire en diversos escenarios operativos. La combinación de estas metodologías, junto al análisis de indicadores como la cobertura de aire y el requerimiento de aire limpio, promete mejorar significativamente la calidad del ambiente laboral y reducir los incidentes operativos [6], [7].

En resumen, la problemática general se centra en la necesidad de incrementar la cobertura de aire en las labores subterráneas a través de la optimización de los sistemas de ventilación. Esto implica una revisión integral de los parámetros operativos, el diseño de la infraestructura y la incorporación de tecnologías avanzadas que aseguren el cumplimiento de los objetivos en cuanto a la calidad del flujo de aire, el requerimiento de aire limpio y la minimización de riesgos por gaseamiento.

Minera Alpayana S.A. dispone de un sistema de ventilación mecanizada que facilita el ingreso de aire limpio proveniente de la superficie, impulsado por la depresión generada por los principales ventiladores extractores. Este sistema suministra un caudal de aire fresco de 899,481 CFM, lo que resulta insuficiente frente a la demanda proyectada de 1,123,144 CFM, logrando así únicamente una cobertura del 80 %. Las evaluaciones continuas han evidenciado deficiencias en las condiciones termoambientales de diversas áreas. En los sectores denominados Cuerpos, se observa un incremento de la temperatura hasta 30 °C y una velocidad del aire inferior a 25 m/min en los niveles que abarcan desde el Nv.19A hasta el Nv.23, junto con una recirculación de aire viciado en la Rampa Principal. En la zona “Oroya”, el recorrido del aire contaminado desde los niveles Nv.18, Nv.19, Nv.19A, Nv.19B, Nv.20, Nv.20A,

Nv.21A y Nv.23 afecta negativamente las áreas de Esperanza y cuerpos. Por su parte, en la zona Veta Esperanza se prevé el desarrollo de los niveles 18 al 23, lo que demanda la implementación de chimeneas que permitan la entrada de aire fresco y la evacuación de gases contaminantes.

Ante lo anterior, se hace necesario elaborar un plan de trabajo orientado a mantener la calidad y elevar la cobertura del aire dentro de los parámetros establecidos por la normativa vigente y necesidades de las labores mineras en la empresa, garantizando así la seguridad y bienestar de los trabajadores, en el marco del programa anual de exploración, desarrollo y preparación, con una producción total proyectada de 1,890,000 Tn

1.2. Antecedentes

1.2.1. Internacionales

- Canuza D. y Pérez J. [8], en Ecuador, en el año 2023, llevaron a cabo un estudio que tuvo como finalidad principal “Analizar el sistema de ventilación de la zona El Inca en la mina Grumintor 1 de la Empresa GRUMINTOR S.A.”. Fue un estudio de tipo analítico, método experimental, cuantitativo. Las conclusiones señalaron:
 - Las normas de ventilación de la zona El Inca indican que en el nivel 2 se encontraban 20 mineros, lo que hace necesario un caudal de aire de 60 m³/min para una adecuada ventilación. Simultáneamente, se estimó que el consumo de explosivo por turno requiere un caudal de 464,24 m³/min. Considerando un aumento del caudal del 30% para compensar las

fugas, se determinó que el caudal total necesario en el nivel 2 es de 681,51 m³/min.

- Se observa que, a pesar de que el caudal de aire cubre el 15% del área, el 32% de los puntos de medición registran velocidades superiores a los 15 m/min, lo que produce el estancamiento de aire viciado en las zonas que unen el área de producción con la línea de ventilación primaria. Para solucionar este problema, se recomienda la instalación de nuevos ventiladores para mejorar la remoción del aire contaminado. Además, se empleó el software Ventsim™ para simular el sistema de ventilación, incorporando parámetros geométricos (áreas y perímetros), resistencias de los ductos (factores de choque y fricción) y caudales de aire. El modelo tridimensional facilitó la obtención de un resumen numérico de la red, obteniendo una resistencia equivalente de 17,2619 Ns²/m⁸, lo que dio como resultado una caída de presión de 2227,64 Pa y la generación de la curva característica para la zona de El Inca.

- Ortega G. [9], en Ecuador, en el año 20223, llevó a cabo un estudio que tuvo como objetivo principal “Mejorar la circulación de aire mediante con la simulación del sistema de ventilación de la mina Grumintor 3 por medio del levantamiento de información con la

finalidad de representar el escenario en los que se ejecutan las labores mineras aplicando software de ventilación”. Fue un estudio de tipo experimental, transicional, cuantitativo, de campo. Las conclusiones señalaron:

- Se realizó una simulación del sistema de ventilación natural utilizando el software Ventsim, empleando los caudales de entrada y salida para ilustrar la dinámica de la corriente de aire e identificar las regiones donde las condiciones superan los umbrales permisibles. De manera similar, los datos recopilados en el campo se compararon con los resultados producidos por la simulación, lo que facilitó la identificación precisa de discrepancias y la validación del rendimiento del sistema en la mina Grumintor 3.
- El estudio indicó que el caudal de aire entrante natural de 379,35 m³/min (13 396,45 CFM) es inadecuado en relación con el caudal requerido de 1 395,04 m³/min (49 286,16 CFM). Es necesario un aumento del 72,8 % (1 016 m³/min o 35 880 CFM) para cumplir con los requisitos operativos. La aplicación de software Ventsim es una herramienta invaluable para la ventilación de minas subterráneas, ya que simula con precisión los flujos de aire y otros parámetros pertinentes, mostrando su eficacia y practicidad en el análisis y optimización de los sistemas de ventilación.

- Barrera P. y Pesántez P. [10], en Ecuador, en el año 2020, ejecutaron un estudio que tuvo como objetivo principal “Evaluar el sistema de ventilación actual de la Mina Goldins, mediante recolección de datos a lo largo del tramo norte-sur con equipos portátiles que miden el flujo de aire para determinar inconvenientes y mejorarlos”. Fue un estudio de tipo descriptivo, comparativo con método analítico, observacional y técnicas de campo. Las conclusiones señalaron:

- El sistema de ventilación de la sección norte-sur de la mina Goldmins, que actualmente abarca aproximadamente el 10% de la superficie, comprende una entrada de aire fresco y una salida de aire viciado, situadas aproximadamente a 200 metros de la entrada de la mina. Esta configuración hace necesario mecanizar el proceso de extracción de aire contaminado, lo que pone de manifiesto una limitación en la capacidad de los extractores secundarios. En sistemas con conexiones en paralelo, la capacidad total del ventilador extractor aumenta en proporción directa al número de ramales del circuito.

- Además, se ha determinado que la voladura genera el mayor volumen de aire contaminado, llegando a 36.000 CFM, y que la duración de la ventilación posterior a la voladura es de tres horas. Se

recomienda instalar una compuerta de ventilación para mejorar el rendimiento del sistema de ventilación asegurando un flujo de aire óptimo con un consumo de energía reducido. Además, es aconsejable disminuir las dimensiones de la sección minera y establecer un sistema de succión en la proximidad del área de producción para evitar la pérdida de presión y mejorar el flujo de aire. El objetivo de estas medidas es mejorar la cobertura del sistema de ventilación en el tramo norte-sur a aproximadamente el 88,4%.

- Valarezo M. [11], en Ecuador, en el año 2020, ejecutó un estudio que tuvo como objetivo principal “Determinar un adecuado sistema de ventilación, según las necesidades de la concesión minera Cebral, además de un eficiente sistema de desagüe para la concesión minera R-Nivel, ubicadas en el distrito minero Zaruma - Portovelo”. Fue un estudio de tipo descriptivo, método científico, observacional y técnicas de campo. Las conclusiones señalaron:
 - El sistema de ventilación ingenieril inicia con un flujo de aire de 400 CFM desde la tubería instalada en la mina, lo que permite la activación de la primera turbina a una velocidad de 764,01 rpm. El movimiento es potenciado por un sistema de poleas, siendo la polea primaria de 30 cm de diámetro y la polea secundaria de 50 cm, lo que permite que el ventilador alcance una velocidad de 2292,03 rpm. El ventilador

primario puede transportar una columna de aire a una distancia de 775,84 metros, lo que es esencial para las próximas operaciones de exploración y extracción minera.

- Las fallas en la recolección de agua subterránea del sistema de drenaje motivaron mejoras en las zanjas, incluida la instalación de una membrana filtrante de 0,5 m y un tanque de recolección de 12 m³. Se eligió una bomba centrífuga con base en el nuevo diseño, evaluando el caudal, la carga total con pérdidas, la potencia del motor y confirmando que el NPSHD superaba el valor recomendado por el fabricante. Para la concesión minera R-Level se seleccionó una bomba centrífuga (modelo 11/2x2-8), con un caudal de 12 m³/min, una altura de 83,69 metros y una tubería de 2 pulgadas de diámetro, demostrando su idoneidad para una extracción eficaz de agua subterránea.

1.2.2. Nacionales

- Coral D. [12], en Huancayo, en el año 2024, ejecutó un estudio que tuvo como objetivo esencial “Ampliar la capacidad del circuito de ventilación para incrementar la cobertura de aire subterráneo que permita la producción de 2000 t/día de mineral en mina Contonga de Tierra Group International Ltd”. Fue un estudio de tipo aplicada, nivel

descriptivo, diseño preexperimental, método científico. Las conclusiones señalaron:

- El sistema de ventilación de la mina Contonga fue mejorado y optimizado mediante la instalación de nuevas chimeneas y ventiladores más potentes, lo que resultó en una mayor eficiencia general. Se establecieron diversos segmentos del circuito de ventilación, incluidos RB 007 (que se extiende desde el nivel 100 hasta el 415 en la superficie), RB 008 (vinculado a RB 007 para mejorar el circuito de extracción en el nivel -310 durante la profundización), RB 009 XC Taully, RB 002 (que abarca desde el nivel 00 hasta el 360 en la superficie) y RB 001 (que mide 3,1 m x 3,1 m, desde el nivel 100 hasta el 415 en la superficie). La reconfiguración mejoró la cobertura de aire subterráneo al 101,09%, lo que facilitó una producción diaria de 2.000 toneladas de mineral, asegurando así condiciones óptimas de trabajo para el personal y el funcionamiento eficiente de los equipos diésel.
- Se especifican los caudales de aire durante las dos fases de implementación. Inicialmente se logró un caudal de 768 m³/min (27,118.08 CFM) para el personal, el cual se elevó posteriormente a 1,206 m³/min (42,589 CFM), superando significativamente

los requerimientos operacionales. Además, se lograron caudales de 11,896 m³/min (420,084 CFM) en la fase inicial y 14,953.44 m³/min (528,066 CFM) en la fase posterior para el sistema destinado a equipos diésel, garantizando con ello el respaldo necesario para la producción diaria de 2,000 toneladas de mineral. Los resultados ilustran la eficacia de las medidas implementadas para mejorar la ventilación en la mina Contonga, indicando un avance sustancial en la cobertura y capacidad operativa del sistema.

- Liberato C. [13], en Huancayo, en el año 2023, ejecutó un estudio que tuvo como alcance esencial “Determinar en qué medida mejora la ventilación mediante el adecuado balance de aire en la mina Yauricocha - Sociedad Minera Corona S.A.”. Fue un estudio de tipo aplicado, nivel correlacional, método científico, diseño experimental, técnica de la observación directa. Las conclusiones señalaron:
 - La cobertura actual del sistema de ventilación de la mina central de Yauricocha satisface la demanda en un 120,69%, un aumento respecto del 79,12% del 2021. Este resultado se deriva del balance de ventilación, que revela un caudal de entrada de aire fresco de 390.000 CFM, mientras que el requerimiento de aire es de 492.910 CFM. Las temperaturas de operación no superan los 21 °C,

categorizando a la mina como fría y negando la necesidad de cálculos especializados para condiciones de temperatura elevada. El gasto energético vinculado a la ventilación se establece en US\$4,91 por CFM, una consideración significativa para la gestión operativa y financiera del sistema.

- La mejora en la ventilación se ha logrado mediante un balance de aire preciso y el despliegue de ramales de ventilación (Rbs) ubicados estratégicamente, optimizando el sistema en la mina Yauricocha. Se han identificado desafíos en áreas específicas, donde la acumulación de estériles y el estacionamiento de equipos en zonas críticas (niveles 1120 y 1170) obstruyen el flujo de aire adecuado, creando resistencia adicional y facilitando la recirculación de gases. Este factor subraya la necesidad de abordar los impedimentos físicos para mantener la eficacia del sistema de ventilación y garantizar condiciones ambientales óptimas en la operación minera.

- Zavala L. [5], en Huancayo, en el año 2022, elaboró un estudio que tuvo como objetivo esencial “Determinar cómo la evaluación del sistema de ventilación influye en la mejora de la deficiencia de aire en la mina Antapite de Empresa Sierra Antapite S.A.C.”. Fue un estudio de tipo aplicada, nivel descriptivo, diseño descriptivo comparativo. Las conclusiones señalaron:

- Las mediciones del sistema de ventilación de la Unidad Minera Antapite revelan un caudal de entrada de aire fresco de 67.051,83 cfm y un caudal de salida de aire de 66.742,97 cfm, lo que da como resultado un diferencial de apenas 118 cfm. Sin embargo, considerando que la demanda de aire, que incluye los requerimientos de personal, las necesidades de equipos, el consumo de madera, las fugas y la dilución de gases, totaliza 172.111 cfm, la cobertura del sistema es de apenas el 39%. La situación hace necesario el rediseño del sistema de ventilación, incorporando seis ventiladores con una capacidad de 20.000 cfm cada uno, además de un ventilador de 30.000 cfm, para asegurar el cumplimiento normativo y el óptimo desempeño de los trabajadores.
- La temperatura promedio registrada en la mina es de 18,90°C, considerada adecuada para las operaciones. El sistema actual para evacuar el aire viciado requiere de 2 horas y 30 minutos, mientras que el sistema propuesto reduciría esta duración a 1 hora y 40 minutos, lo que representa una reducción del 33,33% o 50 minutos. Se evaluó la eficiencia de los ventiladores, que reveló un 56% para el ventilador de 10.000 cfm, un 70% para el ventilador de 20.000 cfm y un 68% para el ventilador de 30.000 cfm, lo que

subraya la importancia de las mejoras realizadas para alcanzar los caudales necesarios y optimizar la ventilación en la unidad minera.

- Quispe E. [3], en Huancayo, en el año 2021, elaboró un estudio que tuvo como objetivo esencial “Establecer de qué manera el modelamiento del sistema de ventilación influye en el mejoramiento de cobertura de aire fresco en la Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte”. Fue un estudio de tipo aplicada, nivel descriptivo explicativo y método deductivo analítico, diseño experimental preexperimental. Las conclusiones señalaron:
 - El sistema de ventilación de la Unidad Minera Parcoy requiere un caudal de 1.197.672 CFM; sin embargo, en marzo de 2021, la cobertura alcanzó solo el 49%, lo que indica un déficit de 611.997 CFM. El diseño propuesto para el circuito de ventilación apunta a un caudal de 1.361.696 CFM, con escenarios de cobertura modelados para alcanzar el 86% en el corto plazo, el 105% en el mediano plazo y el 120% en el largo plazo, particularmente cuando las temperaturas de operación se reducen por debajo de los 23°C. Se prevé que el costo anual de la energía aumente de US\$ 1.091.484 a US\$ 2.279.691, y se espera que el caudal de aire aumente de 585.674 CFM a 1.629.535 CFM, lo que indica un crecimiento del 178%.

– La inversión total proyectada para la modernización es de US\$ 19.147.509, monto que se sustenta en las ventajas operacionales y económicas esperadas. El análisis de costos arroja un precio unitario de ventilación de US\$ 1,86 por CFM, ubicándose como la segunda opción más rentable entre las evaluadas. Además, se estableció el posicionamiento ideal de los ejes de las chimeneas, concluyendo que la adopción de chimeneas de hormigón armado de 2,5 x 2,5 m es la opción más ventajosa, ya que ofrecen una mayor área equivalente y se consideran económicamente viables para el proyecto.

- Taipei J. [1], en Huancayo, en el año 2021, elaboró un estudio que tuvo como objetivo esencial “Mejorar el sistema de ventilación subterránea y cubrir la necesidad de aire actual y futura en Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C”. Fue un estudio de método científico, tipo aplicada, nivel descriptivo, diseño cuasiexperimental. Las conclusiones señalaron:

– La evaluación del sistema de ventilación de la mina revela un caudal medido de 209.691 cfm, superando el requerimiento de 206.251 cfm, lo que arroja una cobertura del 101,7%, lo que indica que el sistema satisface adecuadamente la demanda de aire. Esta evaluación se complementó con un modelo de simulación ejecutado con el software Ventsim Visual

Advanced, que reveló variaciones de 2,74% en la densidad de flujo compresible, 1,4% en la presión barométrica y 9% y 3% en los caudales de entrada y salida, respectivamente, con respecto a los datos de campo obtenidos.

- El circuito de extracción designado como 01, que utiliza un ventilador de 120.000 cfm, presenta discrepancias notables en las mediciones tomadas en dos elevaciones distintas: 129.507 cfm en el nivel 1700 y 91.113 cfm en el nivel 1750, lo que indica una pérdida total de 38.394 cfm y una fuga adicional de 10.731 cfm atribuible a un problema de sellado con la puerta de ventilación. El circuito 02, equipado con dos ventiladores de 30.000 cfm que funcionan en paralelo en el nivel 1600, experimenta con frecuencia la inactividad de un ventilador y presenta una zona propensa a la recirculación de aire entre las chimeneas de salida (Ch-984) y entrada (Ch-941). La ruta de aire viciado desde el vértice de la rampa 940 hasta la chimenea de extracción mide 510 metros, lo que potencialmente afecta la eficiencia general del sistema.

1.3. Ventilación de minas subterráneas

1.3.1. Importancia y objetivos

La ventilación en entornos mineros subterráneos constituye una necesidad imperiosa para asegurar condiciones ambientales que garanticen la integridad física de los trabajadores y el adecuado funcionamiento de las operaciones extractivas. Esta práctica, que ha evolucionado desde procedimientos empíricos hacia el desarrollo de métodos y criterios basados en la ingeniería moderna, es esencial para la entrada y circulación de aire fresco, la dilución de agentes nocivos y la evacuación de contaminantes presentes en el ambiente [14].

Históricamente, la ventilación en las minas se abordó de manera rudimentaria, pero con el tiempo se han establecido fundamentos científicos y técnicos que permiten optimizar estos sistemas. En este sentido, el desarrollo de estudios pioneros en el campo de la ingeniería de minas facilitó la comprensión de la importancia de la correcta circulación del aire, no solo como medio para garantizar el suministro de oxígeno indispensable para la respiración, sino también para mitigar los riesgos asociados a la acumulación de gases tóxicos y potencialmente explosivos, tales como el metano y el monóxido de carbono. Así, la ventilación se erige como una herramienta crítica en la prevención de accidentes y en la creación de ambientes de trabajo seguros [15].

Uno de los objetivos primordiales de estos sistemas consiste en proporcionar un caudal de aire suficiente que permita mantener niveles óptimos de oxígeno, a la vez que se diluyen los contaminantes generados durante la extracción y el funcionamiento de equipos, especialmente

aquellos que emplean combustibles fósiles. Este enfoque no solo tiene implicaciones directas en la salud de los mineros, pues una circulación inadecuada puede desencadenar intoxicaciones y enfermedades respiratorias, sino que también incide en la operatividad de la maquinaria, puesto que la presencia de calor excesivo y agentes contaminantes puede comprometer la eficiencia de los equipos y elevar los costos de mantenimiento [16].

Desde el punto de vista térmico, la ventilación desempeña un papel fundamental en la regulación de la temperatura en el interior de las minas. En contextos de gran profundidad, donde se pueden presentar condiciones de calor extremo debido a la fricción, el uso intensivo de equipos y la actividad humana, contar con un sistema de ventilación bien diseñado resulta vital para dispersar el calor y evitar el estrés térmico. De esta manera, se logra crear un microclima estable y homogéneo que contribuye a mantener condiciones laborales óptimas y protege tanto a los trabajadores como a la maquinaria involucrada en las labores mineras. Otro aspecto relevante es la gestión del polvo generado durante las operaciones mineras. La presencia de partículas en suspensión representa un riesgo doble: por un lado, puede afectar la salud respiratoria de los trabajadores, y por otro, aumentar la probabilidad de explosiones si se combina con gases inflamables presentes en el ambiente. Por ello, es indispensable que los sistemas de ventilación aseguren un flujo constante y adecuado, capaz de evacuar eficazmente el polvo y mantenerlo en concentraciones seguras [17].

Adicionalmente, la implementación de un sistema de ventilación óptimo conlleva beneficios económicos significativos. Aunque la inversión inicial en equipos especializados, su mantenimiento y el consumo energético implican un desembolso considerable, estos costos se justifican al evitar pérdidas económicas derivadas de paradas imprevistas en la producción y accidentes laborales. De esta forma, una adecuada ventilación no solo maximiza la seguridad y la eficiencia operativa, sino que también contribuye a mejorar la competitividad y la rentabilidad de la explotación minera. La aplicación de herramientas de simulación y cálculos precisos en el diseño de estos sistemas se torna, por tanto, una práctica indispensable para lograr soluciones tanto técnicas como económicamente viables [18].

En resumen, la ventilación en las minas subterráneas es un componente integral que asegura la seguridad, la salud y la productividad en el entorno minero. Los múltiples objetivos que persigue –desde el suministro de aire fresco y la dilución de contaminantes hasta el control térmico y la eliminación de polvo constituyen elementos fundamentales para la viabilidad y el éxito de cualquier operación extractiva en ambientes confinados. La evolución de las técnicas de ventilación, fundamentada en principios de la mecánica de fluidos y en métodos rigurosos de cálculo, es clave para afrontar los desafíos que presentan las condiciones cada vez más complejas y exigentes del medio subterráneo [19].

1.3.2. Evolución histórica y fundamentos teóricos

La transformación que ha experimentado la ventilación en las minas subterráneas refleja un cambio sustancial en el abordaje de los desafíos

ambientales y de seguridad presentes en la explotación minera. Desde los primeros métodos empíricos empleados en los inicios de la minería, hasta las técnicas actuales fundamentadas en sólidos principios de la mecánica de fluidos, el desarrollo de esta disciplina ha sido impulsado por una integración progresiva de avances teóricos y experimentales, dirigidos a mejorar tanto la eficiencia operativa como la protección del personal [20].

En los siglos XVIII y XIX, la ausencia de sistemas de ventilación adecuados en las minas europeas generaba condiciones de extrema peligrosidad, ocasionando pérdidas irreparables en vidas humanas. Durante este periodo, se empezaron a vislumbrar las primeras soluciones técnicas para contrarrestar los riesgos derivados de la acumulación de aire viciado y gases tóxicos. Un momento determinante en esta etapa fue la aportación de John Buddle, cuya implementación del uso de chimeneas para evacuar el aire contaminado marcó el inicio de un proceso de transición hacia métodos más estructurados y sistematizados [20].

Posteriormente, la contribución teórica de John Atkinson, plasmada en su obra presentada en diciembre de 1854 titulada “Sobre la teoría de ventilación de minas”, representó un pilar fundamental para el desarrollo de la disciplina. Atkinson subrayó la importancia de asegurar una circulación adecuada del aire y estableció las bases para un análisis riguroso que integraba la dinámica de fluidos y la termodinámica, desmarcándose de las prácticas empíricas que habían prevalecido hasta entonces. Su enfoque permitió sentar los cimientos para una comprensión más profunda de la ventilación como un proceso científico [20].

El avance en la comprensión y aplicación de los principios teóricos continuó consolidándose a lo largo del siglo XX. Un hito en esta evolución se presentó con el trabajo del profesor F. B. Hinsley en 1943, quien aplicó un análisis termodinámico para estudiar el comportamiento de los fluidos en los sistemas de ventilación. Este enfoque facilitó el establecimiento de modelos matemáticos capaces de describir de manera precisa la distribución de las corrientes de aire en las galerías mineras, abriendo paso al desarrollo de herramientas de simulación y cálculo que actualmente son esenciales para el diseño y optimización de estos sistemas [20].

Paralelamente, se ha documentado que la evolución de la ventilación minera ha sido propulsada por la incorporación paulatina de los principios de la mecánica de fluidos, lo que ha permitido el desarrollo de técnicas basadas en análisis cuantitativos. Este cambio paradigmático ha sido crucial para el diseño de sistemas de ventilación más precisos y confiables, alineando la necesidad de mejorar la seguridad y el confort en las minas con la búsqueda de una mayor eficiencia operativa y una reducción en los costos derivados de paradas y mantenimiento de equipos [20].

La integración de estos fundamentos teóricos ha permitido a los ingenieros de minas desarrollar sistemas de ventilación que cumplen con criterios de diseño basados en modelos matemáticos y simulaciones computarizadas. Gracias a estos avances, es posible optimizar la distribución del aire, calcular con precisión los caudales requeridos y evaluar de manera detallada las pérdidas de carga en los circuitos de

ventilación, elementos que son esenciales para garantizar una operación segura y eficiente de las minas subterráneas [20].

En definitiva, el recorrido histórico y el desarrollo teórico que han caracterizado la evolución de la ventilación en minas subterráneas constituyen la base sobre la cual se erigen los modernos sistemas de control ambiental en la minería. La transición desde prácticas empíricas hacia metodologías fundamentadas en principios científicos rigurosos evidencia un progreso sostenido, orientado a mejorar la seguridad, la productividad y la sostenibilidad de las explotaciones mineras, asegurando así que los desafíos inherentes a este tipo de ambientes se aborden de manera integral y eficaz [20].

1.3.3. Fundamentos de la mecánica de fluidos en la ventilación

1.3.3.1. Principios termodinámicos

La incorporación de los principios termodinámicos en la ventilación de minas subterráneas constituye una base esencial para comprender y anticipar el comportamiento de los flujos de aire cuando se enfrentan a variaciones en la presión y la temperatura. En este sentido, se emplean herramientas teóricas que describen cómo se transforma y distribuye la energía en estos sistemas, lo cual resulta crucial para el diseño y la mejora de la eficiencia de las instalaciones destinadas a mantener condiciones ambientales seguras [21].

Uno de los fundamentos básicos en este enfoque es la utilización de la ecuación de estado, que establece la relación entre la presión, el volumen y la temperatura del aire. Este concepto es indispensable para analizar el comportamiento de las propiedades del fluido en el interior de las galerías

mineras, donde las fluctuaciones térmicas y de presión pueden ser muy significativas debido a la gran profundidad y a las características operativas propias de la minería. De igual forma, la aplicación de la ecuación calorimétrica se destaca como una herramienta imprescindible para evaluar la energía interna del aire en movimiento, permitiendo cuantificar las variaciones en el calor transmitido conforme cambian las condiciones ambientales [21].

El análisis de los procesos termodinámicos se enriquece al distinguir los distintos tipos de transformaciones que puede experimentar el aire dentro de un sistema de ventilación. Entre estos procesos se encuentran el isométrico, donde el volumen permanece constante, y el isotérmico, en el cual la temperatura no varía. Aunque estos procesos son teóricos, su estudio permite establecer parámetros y condiciones límite para el funcionamiento óptimo de los sistemas de ventilación. Además, se consideran procesos como el adiabático, en el cual no se produce transferencia de calor con el entorno, y el politrópico, que admite variaciones controladas del calor, proporcionando modelos que facilitan la predicción de la respuesta del sistema ante cambios en la presión y temperatura del aire [21].

Este tipo de análisis se torna aún más relevante cuando se aplican a condiciones reales, como en los circuitos de ventilación de minas, donde los flujos de aire experimentan transformaciones drásticas a lo largo de galerías, rampas y transiciones verticales. Los estudios especializados han demostrado que la transformación de la energía del aire abarca no solo la modificación de sus propiedades termodinámicas, sino también la

consideración de las pérdidas de carga derivadas de la fricción y otros fenómenos relacionados con el movimiento de fluidos. Estas pérdidas deben ser evaluadas cuidadosamente para asegurar que cada tramo del circuito de ventilación cumpla con los requerimientos necesarios de caudal y presión [21].

El conocimiento detallado de estos principios permite a los ingenieros desarrollar modelos que simulan con precisión el comportamiento del aire en condiciones operativas reales. La aplicación práctica de la termodinámica en la ventilación de minas no solo es fundamental para el diseño teórico, sino que también se traduce en la capacidad para prever y mitigar problemas operativos, tales como la acumulación de calor en áreas de alta producción o la distribución desigual del flujo de aire en zonas críticas. Asimismo, el análisis termodinámico ofrece una base sólida para el uso de herramientas computacionales y software de simulación, los cuales facilitan la evaluación de diferentes escenarios y la optimización de la distribución del aire de acuerdo con los requerimientos específicos de cada explotación minera [21].

En conclusión, los principios termodinámicos representan el marco teórico sobre el que se sustenta el análisis del comportamiento del aire en los sistemas de ventilación de minas subterráneas. La integración de conceptos tales como la ecuación de estado, la ecuación calorimétrica y la descripción de procesos isométricos, isotérmicos, adiabáticos y politrópicos, permite el diseño de sistemas que se adaptan eficazmente a las condiciones dinámicas del ambiente minero. Este enfoque científico resulta indispensable para desarrollar sistemas de ventilación que no solo

aseguren la eficiencia operativa, sino también la seguridad y el confort del personal, constituyendo una herramienta esencial para la modernización y optimización en la industria minera.

1.3.3.2. Leyes de la dinámica de fluidos

La integración de las leyes de la dinámica de fluidos en el diseño y análisis de sistemas de ventilación en minas subterráneas constituye un elemento esencial para asegurar una distribución homogénea del aire, optimizar el uso energético y mantener condiciones ambientales seguras en el interior de las galerías. Este enfoque se fundamenta en principios teóricos que permiten modelar y predecir el comportamiento del flujo de aire ante variaciones en factores como la geometría de las vías, la rugosidad de las superficies y las pérdidas generadas por la fricción, aspectos críticos para dimensionar y adaptar los sistemas de ventilación a las demandas operativas de cada mina [21].

Uno de los conceptos básicos en este análisis es la ecuación de continuidad, la cual postula la conservación de la masa en un sistema en flujo estacionario. Según este principio, el producto de la sección transversal del conducto y la velocidad del aire se mantiene constante a lo largo del circuito. Esta propiedad resulta fundamental para determinar los caudales necesarios en distintos segmentos de la red de ventilación, ya que permite identificar aquellos puntos en donde las variaciones geométricas pueden inducir aceleraciones o desaceleraciones en el flujo, generando pérdidas de carga y afectando la eficiencia del sistema [21].

De igual modo, la conservación del momentum se erige como otro pilar teórico en el análisis de estos sistemas. A través de las ecuaciones de

movimiento, es posible evaluar cómo se distribuye la energía cinética del aire a lo largo del circuito, considerando los efectos disipativos derivados de la fricción y la turbulencia. En entornos reales, como los presentes en las galerías subterráneas, estos fenómenos son determinantes para garantizar que, a pesar de las condiciones adversas, el sistema mantenga un caudal adecuado para el correcto funcionamiento de la ventilación [21]. Además, la denominada “Ley Cuadrática de Ventilación” establece una relación funcional entre el caudal de aire y la diferencia de presión que impulsa el flujo. Según este principio, la pérdida de presión en un sistema de ventilación es proporcional al cuadrado del caudal. Este aspecto resulta especialmente útil para el dimensionamiento de ventiladores y la selección de equipos, ya que permite cuantificar con precisión el impacto que tienen las variaciones en el caudal sobre la presión disponible en el circuito. De esta manera, se pueden ajustar los parámetros de diseño para compensar las pérdidas de energía debidas a la fricción y a las configuraciones complejas que caracterizan a las redes subterráneas [21].

Complementariamente, se destaca la importancia de incorporar modelos que consideren la influencia del rozamiento y la turbulencia en la disipación de la energía en estos sistemas. Dichos modelos, que integran términos adicionales en las ecuaciones de la conservación del momentum, permiten predecir de forma más realista el comportamiento del flujo de aire en circuitos con condiciones de contorno y geometrías variables. Esta aproximación facilita la identificación de cuellos de botella

y determina las intervenciones necesarias para mejorar la eficiencia del sistema de ventilación [21].

En definitiva, la aplicación de la ecuación de continuidad, la conservación del momentum y la ley cuadrática de ventilación conforman la base teórica sobre la cual se sustenta el diseño y análisis de los sistemas de ventilación en minas subterráneas. La comprensión detallada de estos principios permite a los ingenieros anticipar y mitigar las pérdidas de carga, ajustar el dimensionamiento de los equipos y garantizar una distribución uniforme del flujo de aire, aspectos imprescindibles para asegurar la seguridad y la eficiencia operativa en las explotaciones mineras. La integración de estos conocimientos en el proceso de diseño resulta, por lo tanto, una herramienta esencial para optimizar la ventilación y mantener condiciones ambientales adecuadas en un entorno tan exigente como el de la minería subterránea [21].

1.3.3.3. Ecuaciones de conservación y de movimiento

El estudio y análisis de los sistemas de ventilación en minas subterráneas se fundamenta en la aplicación de un conjunto de ecuaciones que permiten describir de forma cuantitativa el comportamiento del aire en condiciones operativas reales. Estas ecuaciones, que abarcan tanto las leyes de conservación como las de movimiento, resultan esenciales para el diseño, dimensionamiento y optimización de los circuitos de ventilación, garantizando una distribución adecuada del flujo y la conservación de masa, energía y momentum en todo el sistema [21].

Entre las herramientas básicas para este análisis se encuentra la ecuación de continuidad, la cual expresa la conservación de la masa en un sistema en flujo estacionario mediante la relación

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Donde A representa el área de la sección transversal y V la velocidad del aire en cada tramo del circuito. La aplicación de esta ecuación permite identificar puntos críticos dentro de la red de ventilación, ya que las variaciones en la geometría de las galerías pueden provocar aceleraciones o desaceleraciones del flujo, afectando directamente la presión del aire.

Además, la ecuación de estado, que vincula la presión, el volumen y la temperatura del aire, resulta indispensable para comprender la compresibilidad del fluido. En su forma convencional se expresa como:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

O bien en términos de densidad mediante la fórmula:

$$P = \rho \cdot R_s \cdot T$$

donde P es la presión, V el volumen, n la cantidad de sustancia, R la constante universal de los gases, T la temperatura absoluta y R_s la constante específica del aire. Esta relación es crucial para evaluar las variaciones de las propiedades del aire a lo largo del sistema de ventilación, en respuesta a cambios térmicos y de presión, tal como se detalla en el mismo documento.

Por otro lado, la ecuación calorimétrica

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

permite cuantificar la variación de la energía interna del aire en función de la masa (m), la capacidad calorífica (c) y el cambio de temperatura (ΔT). La combinación de este enfoque termodinámico con la ecuación de estado resulta esencial para analizar la disipación de energía en los circuitos de ventilación, especialmente en aquellos tramos donde la fricción y otros efectos disipativos provocan variaciones significativas en la temperatura del aire.

La integración de estas ecuaciones de conservación se refuerza mediante modelos teóricos y simulaciones numéricas que permiten predecir las pérdidas de carga en circuitos reales. Este enfoque posibilita ajustar de manera óptima el dimensionamiento de los conductos y la selección de los equipos adecuados, evaluando distintos escenarios operativos y facilitando la identificación de cuellos de botella en la red de ventilación [21].

Por último, el análisis de la dinámica de movimiento del aire se completa incorporando la conservación del momentum, la cual se fundamenta en la segunda ley de Newton. Las ecuaciones de movimiento permiten determinar cómo se distribuye la energía cinética a lo largo del circuito, teniendo en cuenta los efectos de fricción, turbulencia y los cambios de dirección que pueden ocurrir en las galerías y transiciones entre secciones. Esto enfatiza la necesidad de incluir términos adicionales en estas ecuaciones para representar de forma realista las pérdidas por fricción y la disipación de energía asociada a la turbulencia, lo que resulta indispensable para lograr un análisis cuantitativo riguroso del comportamiento del flujo [21].

En resumen, la integración de la ecuación de continuidad, la ecuación de estado, la ecuación calorimétrica y las ecuaciones de movimiento conforma el marco teórico esencial para el análisis de los sistemas de ventilación en minas subterráneas. Estas herramientas permiten no solo describir la conservación de masa, energía y momentum, sino también identificar y cuantificar las pérdidas inherentes al funcionamiento en entornos complejos. La aplicación correcta de estos principios es crucial para diseñar circuitos de ventilación que aseguren una distribución uniforme del flujo, minimicen las pérdidas de carga y optimicen la eficiencia operativa de la mina, aspectos fundamentales para garantizar tanto la seguridad como el rendimiento en la explotación subterránea.

1.3.4. Composición y calidad de aire

1.3.4.1. Composición del aire y sus contaminantes

El control de la atmósfera en las minas subterráneas es un aspecto crucial que requiere una supervisión meticulosa para asegurar ambientes laborales seguros y saludables. La composición del aire en estos entornos se caracteriza por ser una mezcla compleja de gases y partículas, cuyas concentraciones varían en función de la actividad minera, el sistema de ventilación implementado y las condiciones geológicas inherentes al yacimiento. Conocer en detalle estos componentes es esencial para definir parámetros de seguridad y diseñar sistemas de ventilación capaces de mantener la calidad del aire en niveles aceptables [22].

La atmósfera minera se compone principalmente de oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2), que conforman la mayor parte del volumen de aire disponible. No obstante, se encuentran también otros gases, entre los que

destacan el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄). Cada uno de estos gases posee características específicas: por ejemplo, el monóxido de carbono es altamente tóxico y puede provocar intoxicaciones severas aun en concentraciones bajas, mientras que el metano, comúnmente referido como grisú en contextos mineros, es extremadamente inflamable y puede desencadenar explosiones si se acumula en niveles críticos [23].

La presencia de contaminantes afecta no solo la salud de los trabajadores, sino también la eficiencia de los sistemas de ventilación. La monitorización continua permite detectar rápidamente cualquier desviación en los niveles de gases peligrosos, de modo que se puedan implementar medidas correctivas de manera oportuna. Además, el control de las partículas en suspensión, generadas durante las operaciones mineras, resulta indispensable, ya que el polvo puede inducir problemas respiratorios y, en determinadas condiciones, actuar como agente explosivo al combinarse con ciertos gases [23].

Complementariamente se considera otros contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas, que pueden generarse tanto por procesos naturales como por la acción de equipos mecánicos y explosivos. La identificación precisa de estos elementos permite confeccionar un perfil ambiental detallado, fundamental para el diseño de sistemas de detección y control que aseguren que los niveles de exposición se mantengan dentro de los límites permisibles [23].

El conocimiento detallado de la composición atmosférica influye directamente en el diseño de los sistemas de ventilación. La presencia de altos niveles de contaminantes exige un incremento en el caudal de aire para lograr la dilución y evacuación adecuadas, lo que repercute en el dimensionamiento de las redes de ventilación. Por ello, los ingenieros deben diseñar sistemas capaces de responder eficazmente a estas demandas, integrando criterios de seguridad, eficiencia y ahorro energético. La monitorización constante de la atmósfera y la incorporación de esta información en el proceso de diseño y operación permiten ajustar en tiempo real los parámetros del sistema, garantizando que se mantengan las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo seguro de las actividades subterráneas [23].

En conclusión, la atmósfera en las minas subterráneas es una mezcla de componentes esenciales y contaminantes que debe ser rigurosamente controlada para preservar la salud de los trabajadores y asegurar el funcionamiento adecuado de los sistemas de ventilación. La identificación y cuantificación precisa de estos elementos, mediante métodos de muestreo y análisis especializados, forman la base para establecer protocolos de seguridad y diseñar circuitos de ventilación que respondan eficazmente a las exigencias ambientales de la explotación minera. Este conocimiento resulta fundamental para garantizar condiciones de trabajo seguras y optimizar la operatividad en entornos mineros.

1.3.4.2. Factores que afectan la calidad del aire

La calidad ambiental en las minas subterráneas se configura a partir de la interacción de diversos factores que inciden en la composición y el

comportamiento del aire. Entre estos, se destacan variables físicas y químicas tales como la humedad, la temperatura, la concentración de partículas en suspensión y la presencia de contaminantes generados tanto por procesos naturales como por actividades operativas. El adecuado entendimiento y control de estos elementos resulta imprescindible para garantizar condiciones de trabajo seguras y confortables, así como para orientar el diseño y ajuste de los sistemas de ventilación [24].

En primer lugar, la humedad y la temperatura son variables fundamentales que afectan directamente la calidad del aire en estos entornos. Una alta humedad puede favorecer la formación de aglomerados de polvo y propiciar la condensación de ciertos contaminantes, mientras que una temperatura que se encuentre fuera de los rangos óptimos puede dificultar la dilución y dispersión de sustancias nocivas, alterando tanto el confort térmico de los trabajadores como las propiedades físicas y químicas de otros componentes presentes en el aire [24].

Otro aspecto crucial es la concentración de partículas en suspensión, la cual se genera principalmente durante las actividades de voladura, el movimiento de maquinaria y las labores de extracción. La presencia de polvo en el ambiente minero representa un riesgo significativo para la salud respiratoria, puesto que estas partículas pueden interactuar con contaminantes gaseosos y actuar como núcleos de condensación, intensificando la formación de compuestos dañinos. Además, la elevada concentración de polvo puede afectar negativamente la eficiencia de los

sistemas de filtración y los dispositivos de detección, requiriendo ajustes periódicos en el diseño y operación de los circuitos de ventilación [25].

Por otro lado, la operación de la mina introduce una variedad de contaminantes adicionales. Los procesos naturales junto con el uso de equipos mecánicos y explosivos generan gases como el dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre, que pueden alcanzar niveles peligrosos si no se gestionan adecuadamente. La combinación de estos gases con partículas en suspensión crea ambientes que demandan sistemas de ventilación robustos para diluir y evacuar los componentes tóxicos, reduciendo así el riesgo de explosiones y la degradación de la salud de los trabajadores [25].

La geometría y el diseño de las vías subterráneas también desempeñan un papel importante. Las configuraciones irregulares de galerías y rampas pueden dar lugar a zonas de estancamiento o a variaciones en la velocidad del flujo de aire, lo que afecta la distribución uniforme de la humedad, la temperatura y los contaminantes. Este fenómeno, intrínsecamente ligado al diseño del sistema de ventilación, puede exacerbar o mitigar los efectos adversos de otros factores ambientales [25].

El monitoreo continuo y la evaluación periódica de estos parámetros resultan esenciales para mantener condiciones ambientales óptimas en la mina. La implementación de sistemas de medición que registren en tiempo real la humedad, la temperatura, la concentración de partículas y de gases permite detectar desviaciones y activar protocolos de

intervención, ajustando el caudal y la dirección del flujo de aire según sea necesario [24].

1.3.5. Tipos de ventilación

1.3.5.1. Ventilación natural

La ventilación natural se erige como una estrategia primordial en el diseño y la operación de sistemas de ventilación en entornos mineros subterráneos, fundamentándose en la capacidad de las diferencias de densidad del aire para impulsar su movimiento sin apoyo de equipos mecánicos. Estas diferencias surgen, fundamentalmente, de las variaciones térmicas y topográficas que se generan de manera inherente en el ambiente minero. En este enfoque, se aprovechan las fuerzas naturales resultantes de la divergencia en las temperaturas y en la distribución de la presión, lo que permite que el aire se movilice de forma espontánea, reduciendo de este modo el consumo energético y simplificando la operación del sistema [26].

Se establece un marco deductivo que explica las ecuaciones fundamentales que rigen el fenómeno de la ventilación natural. Este enfoque teórico identifica los mecanismos mediante los cuales el aire ingresa y se distribuye a lo largo de las galerías mineras. Según esta perspectiva, el flujo puede configurarse de diferentes maneras, siendo relevantes los modelos de flujo en bucle y flujo diagonal. En ambos casos, la ubicación de las entradas y salidas de aire puede variar, recibiendo la ventilación tanto desde el techo como desde el piso de los yacimientos, en función de la disposición geométrica y de los gradientes de presión que se establecen de forma natural en la mina [26].

La ventilación natural se basa en la existencia de diferencias de temperatura y presión entre el interior y el exterior de la mina. Dichos gradientes de densidad son los responsables de impulsar el movimiento del aire. Se distingue, en este contexto, entre dos modalidades: la ventilación impelente, en la que las corrientes de aire se dirigen activamente hacia las áreas de trabajo, y la ventilación aspirante, caracterizada por la capacidad del sistema para extraer el aire contaminado, aprovechando la atracción generada por los gradientes de presión. La efectividad del sistema natural para diluir y evacuar contaminantes depende directamente de la magnitud de estas diferencias, lo que obliga a realizar un diseño meticuloso basado en las condiciones ambientales y geográficas particulares de cada mina [26].

Desde el punto de vista teórico, los principios subyacentes de la ventilación natural están arraigados en los fundamentos de la mecánica de fluidos. Las variaciones térmicas inducen cambios en la densidad del aire, generando fuerzas de empuje y de atracción que impulsan el movimiento. Un ejemplo claro de este fenómeno es la "chimenea natural", en la que el aire caliente, al elevarse debido a su menor densidad, crea un vacío parcial que facilita la entrada de aire fresco. Esta dinámica es especialmente útil en minas con configuraciones verticales o aquellas ubicadas en terrenos con marcadas variaciones topográficas, donde el aprovechamiento de estas fuerzas naturales puede ser maximizado [26].

En términos prácticos, la implementación de sistemas de ventilación natural requiere la consideración de parámetros clave en el diseño de la infraestructura minera. Aspectos como la orientación y la configuración de

las entradas y salidas de aire, el diseño de túneles y galerías, y la identificación de zonas de acumulación de calor, resultan críticos para asegurar la eficacia del flujo natural. La correcta integración de estos elementos es determinante para mantener una ventilación adecuada sin la necesidad de soluciones mecánicas complementarias. Este enfoque es particularmente relevante en minas de mediana profundidad o en aquellas donde las restricciones económicas limitan la inversión en equipos mecánicos, permitiendo de esta manera una operación más sostenible y respetuosa con el entorno [26].

No obstante, el estudio de la ventilación natural también pone de manifiesto sus limitaciones. Una de las principales desventajas es la dependencia de condiciones ambientales externas, que pueden variar significativamente y, en consecuencia, afectar el rendimiento del sistema. Estas variaciones pueden provocar que, en determinadas circunstancias, la ventilación natural no logre cumplir con los requerimientos operativos o de seguridad establecidos. Por ello, algunos estudios han sugerido la integración de métodos híbridos que combinen la ventilación natural con mecanismos mecánicos, aunque en este análisis se centra exclusivamente en la modalidad natural, la cual sigue siendo una opción viable y económicamente atractiva en escenarios específicos [26].

En conclusión, la ventilación natural constituye un método fundamental en la gestión ambiental de las minas subterráneas, aprovechando las diferencias de densidad generadas por variaciones térmicas y topográficas para movilizar el aire sin apoyo mecánico. La aplicación de los principios teóricos, permite diseñar sistemas de ventilación que, al

integrarse adecuadamente en el entorno minero, aseguran condiciones ambientales seguras y eficientes. Este enfoque contribuye significativamente a la sostenibilidad y seguridad operativa de las explotaciones mineras, ofreciendo una solución de bajo costo energético y operativamente menos compleja en determinados contextos.

1.3.5.2. Ventilación mecánica

La ventilación mecánica en minas subterráneas se establece como una solución tecnológica crucial en aquellas situaciones en las que las condiciones ambientales o las características geométricas de la mina impiden que el flujo de aire se renueve de manera adecuada mediante métodos naturales. A diferencia de la ventilación natural, que se basa en la diferencia de densidades del aire generadas por variaciones térmicas y topográficas, la ventilación mecánica utiliza equipos especializados, como ventiladores centrífugos, helicoidales y axiales, para impulsar el flujo de aire de manera controlada y continua. Este método permite alcanzar caudales elevados y constantes, esenciales para la dilución y remoción de contaminantes en condiciones operativas exigentes, y resulta especialmente útil en minas de gran profundidad o en aquellas en las que la actividad minera demanda una renovación rápida del ambiente [2].

Se resaltan las características teóricas y prácticas de los diferentes tipos de ventiladores, y se destaca la importancia de parámetros como la curva de rendimiento, la potencia absorbida y la capacidad de adaptación a las condiciones particulares de túneles o galerías. Dichos aspectos permiten dimensionar el sistema de manera que se garantice un flujo de aire

uniforme en toda la red de ventilación, superando las limitaciones inherentes a la ventilación natural en contextos de alta extracción [2].

La implementación de sistemas mecánicos se torna indispensable cuando las condiciones ambientales no propician la generación de los gradientes de presión necesarios para un flujo natural efectivo. En este sentido, se discuten los criterios de selección de equipos, destacando que la efectividad de la ventilación mecánica depende de la capacidad de los ventiladores para generar presiones de trabajo adecuadas y de la optimización del diseño del sistema, lo que minimiza las pérdidas de carga y permite ajustar los caudales de aire de forma inmediata ante cambios en la actividad minera o en la concentración de contaminantes [2].

Asimismo, se enfatiza que, además de ser esencial en condiciones de alta demanda de aire, la ventilación mecánica puede integrarse de forma complementaria con la ventilación natural, dando lugar a sistemas híbridos que combinan lo mejor de ambos métodos. La instalación de dispositivos auxiliares que regulen el flujo, junto con sistemas de control y monitoreo que aseguren un desempeño constante de los ventiladores, resulta fundamental. Además, el diseño debe considerar la geometría de las galerías, la distribución de los puntos de extracción y la ubicación estratégica de los equipos, aspectos que reducen las pérdidas por fricción y aseguran una distribución homogénea del flujo [2].

En términos prácticos, la incorporación de la ventilación mecánica en el diseño de los sistemas de ventilación de minas subterráneas permite gestionar de forma proactiva las condiciones ambientales, independientemente de las limitaciones impuestas por factores externos

como la temperatura o la topografía. Esta capacidad para mantener una renovación adecuada del aire es vital para cumplir con los estándares de seguridad y salud ocupacional en la industria minera, ya que garantiza la dilución de contaminantes y la protección del personal. Además, la correcta selección y dimensionamiento de los equipos mecánicos se fundamentan en estudios que evalúan el comportamiento del flujo de aire en función de las características específicas de la mina, permitiendo optimizar el uso de recursos energéticos y reducir los costos operativos sin comprometer la seguridad [2].

En síntesis, la ventilación mecánica se presenta como una herramienta esencial en el diseño y operación de sistemas de ventilación en minas subterráneas, particularmente en escenarios en los que la ventilación natural resulta insuficiente. La aplicación de equipos como ventiladores, basados en criterios de selección rigurosos y en un diseño optimizado, posibilita alcanzar caudales que aseguran la dilución de contaminantes y la protección del personal. Además, la integración de la ventilación mecánica con la natural en sistemas híbridos refuerza la capacidad de respuesta ante los desafíos ambientales del ambiente minero, constituyendo un pilar fundamental para la modernización, seguridad y eficiencia operativa de la explotación minera [2].

1.3.5.3. Sistemas mixtos

La implementación de sistemas híbridos en la ventilación de minas subterráneas constituye un enfoque sofisticado que posibilita la sinergia entre las técnicas de ventilación natural y mecánica, optimizando la gestión del ambiente en el subsuelo. Esta estrategia se desarrolla en

respuesta a las limitaciones inherentes a cada método cuando se aplican de manera aislada, garantizando así una renovación del aire más eficaz y adaptada a las fluctuaciones de las condiciones operativas [20].

Por un lado, la ventilación natural se basa en principios termodinámicos, aprovechando las diferencias en la densidad del aire generadas por variaciones de temperatura y condiciones topográficas. Este método se fundamenta en un enfoque deductivo que permite establecer las ecuaciones que regulan el comportamiento del flujo de aire, determinando de forma precisa cómo ingresa y se distribuye el aire en la red de galerías mineras. La capacidad de utilizar los gradientes de presión de forma pasiva para impulsar el flujo representa una ventaja significativa, especialmente en escenarios donde las condiciones ambientales favorecen esta modalidad [20].

Sin embargo, existen situaciones en las que las condiciones ambientales o la geometría de la mina impiden que la ventilación natural funcione de manera óptima. En estos casos, la incorporación de sistemas mecánicos se torna indispensable. La ventilación mecánica, que se basa en la utilización de equipos como ventiladores centrífugos, helicoidales y axiales, es capaz de generar flujos de aire controlados y altos caudales que compensan las deficiencias de la ventilación pasiva. Se enfatiza que, en contextos de baja generación de gradientes de presión, la elección adecuada de equipos mecánicos es fundamental para alcanzar presiones de trabajo que se adapten a las variaciones de la actividad minera y la concentración de contaminantes [20].

La convergencia de ambos métodos en un sistema híbrido permite aprovechar las ventajas de cada uno. En este esquema, la ventilación natural actúa como componente pasivo, mientras que la ventilación mecánica cumple una función complementaria, interviniendo en momentos de alta demanda o cuando se detectan anomalías en la calidad del aire. Esta integración se refuerza con estudios donde se destaca la importancia de incorporar dispositivos auxiliares, sistemas de control y monitoreo, que facilitan la regulación dinámica del flujo de aire. Estos elementos permiten ajustar el caudal de forma inmediata, asegurando que el aire se distribuya de manera uniforme en toda la red y minimizando las pérdidas por fricción que podrían derivarse de variaciones en la configuración de las galerías [20].

Además, el uso de sistemas híbridos se orienta a mejorar la eficiencia energética y a reducir los costos operativos. Al combinar la capacidad pasiva de la ventilación natural con la respuesta activa de los equipos mecánicos, se logra disminuir la dependencia exclusiva de dispositivos de alta potencia, lo que se traduce en un ahorro significativo en el consumo energético. Este planteamiento es particularmente relevante en minas donde las limitaciones presupuestarias impiden la instalación de sistemas mecánicos de gran escala, permitiendo una operación sostenible que se ajuste a las características específicas del yacimiento [20].

La implementación exitosa de estrategias combinadas requiere de un diseño minucioso que contemple tanto la configuración interna de la mina como las condiciones ambientales externas. La ubicación estratégica de las entradas y salidas de aire, junto con la distribución óptima de los

puntos de extracción y la disposición adecuada de los equipos de ventilación, son aspectos críticos que deben ser evaluados en cada proyecto. Asimismo, la integración de sistemas de monitoreo en tiempo real es fundamental, ya que permite identificar desviaciones en la calidad del aire y ajustar de manera inmediata los caudales para mantener el ambiente subterráneo dentro de los parámetros de seguridad establecidos [20].

En síntesis, los sistemas híbridos que combinan la ventilación natural y mecánica ofrecen una solución robusta y adaptable para la ventilación en minas subterráneas. La interacción entre ambos métodos permite mitigar las limitaciones de la ventilación pasiva, mientras que la respuesta activa de los dispositivos mecánicos garantiza un control efectivo del flujo de aire. Este enfoque integrado, se configura como una solución esencial para lograr una gestión ambiental óptima, reforzando la seguridad operativa y la eficiencia en la explotación minera.

1.3.6. Ventiladores principales y sus características

El diseño de los sistemas de ventilación en minas subterráneas requiere, entre otros aspectos, una adecuada selección y aplicación de los ventiladores principales, ya que estos equipos son los encargados de desplazar grandes volúmenes de aire a lo largo de circuitos extensos y de contrarrestar las pérdidas de carga que se generan debido a la complejidad geométrica y a la fricción de las galerías. En este contexto, se han definido criterios técnicos precisos para clasificar y evaluar estos ventiladores, basándose en sus características teóricas y en su desempeño práctico, con el objetivo de optimizar la distribución del flujo

de aire y de garantizar que se mantengan niveles adecuados de seguridad y eficiencia en la operación minera [7].

En primer lugar, los ventiladores se dividen en diversas categorías, destacando específicamente los ventiladores centrífugos, helicoidales y axiales. Cada uno de estos tipos presenta características únicas que determinan su aplicabilidad en situaciones particulares. Por ejemplo, los ventiladores centrífugos se distinguen por su capacidad para generar altas presiones, lo cual resulta esencial en circuitos que demandan caudales intensos y en los que las pérdidas de carga son considerables. Por otro lado, los ventiladores helicoidales y axiales se valoran por su facilidad de instalación y por su eficiencia en el manejo de grandes volúmenes de aire, siendo especialmente útiles en aplicaciones en las que la uniformidad del flujo y la adaptabilidad al espacio son factores críticos [6].

Además, la evaluación del rendimiento de estos equipos se fundamenta en el análisis de sus curvas características, las cuales relacionan de manera cuantitativa el caudal de aire con la presión generada y la potencia absorbida. La comparación de estas curvas es fundamental para determinar la eficiencia operativa de cada ventilador, ya que permite identificar si un equipo es capaz de generar la presión requerida para mantener un flujo homogéneo a lo largo del sistema, minimizando las pérdidas por fricción y asegurando una distribución equilibrada del aire en todas las áreas de la mina [6].

Asimismo, la incorporación de estas tecnologías posibilita la supervisión en tiempo real del desempeño de los equipos, lo que facilita la detección

temprana de desviaciones operativas y permite la intervención inmediata para corregir cualquier anomalía en la distribución del flujo. Esta capacidad de operación estable y continua, incluso ante fluctuaciones en la demanda o cambios en las condiciones ambientales, es fundamental para sostener un sistema de ventilación robusto y adaptable [7].

En resumen, la selección y aplicación de los ventiladores principales son componentes esenciales en el diseño de sistemas de ventilación en minas subterráneas. La clasificación en tipos (centrífugos, helicoidales y axiales), el análisis de las curvas de rendimiento y la integración de dispositivos de control constituyen un marco metodológico sólido que permite maximizar la eficiencia operativa y garantizar la distribución homogénea del flujo de aire, es fundamental para enfrentar los desafíos del ambiente subterráneo, garantizando la seguridad, la eficiencia y la viabilidad económica de las operaciones mineras a largo plazo.

1.3.7. Metodologías para el diseño de ventilación

El diseño de circuitos de ventilación en minas subterráneas es un proceso intrincado que requiere la consideración de diversos parámetros y variables operativas para desarrollar un sistema que cumpla con los estándares de seguridad y eficiencia. Este proceso se fundamenta en la aplicación de principios derivados de la mecánica de fluidos, utilizando ecuaciones de conservación y técnicas numéricas iterativas que permiten ajustar tanto el dimensionamiento como la configuración del circuito a las condiciones específicas de cada mina [27].

En primer lugar, se destaca el uso de métodos elementales basados en las ecuaciones de flujo, como la ecuación de continuidad, que

proporcionan una base cuantitativa para determinar cómo se distribuyen los caudales de aire en la red de ventilación. Esta metodología implica un análisis detallado de la geometría de las galerías, identificando las secciones con variabilidad en su área transversal y, por tanto, los puntos donde se producen cambios críticos en el flujo. La aplicación de estos principios permite estructurar circuitos que optimizan la distribución del aire, reduciendo al mínimo las pérdidas de carga y asegurando que el aire fresco llegue a todas las áreas de trabajo de la mina [27].

Adicionalmente, se integra variables operativas como el número de trabajadores, la cantidad de equipos y la generación de contaminantes con variables ambientales, lo que posibilita el cálculo dinámico de los caudales necesarios para mantener un ambiente adecuado. Mediante la simulación de modelos matemáticos que reproducen el comportamiento del flujo en condiciones reales, se pueden identificar los cuellos de botella y evaluar diferentes escenarios operativos, lo cual es fundamental para ajustar el diseño del circuito conforme a las variaciones en la actividad minera y las condiciones ambientales [27].

Por otra parte, en el análisis de las redes de ventilación, hace énfasis especial énfasis en la asignación de caudales en función de las necesidades específicas de dilución de contaminantes y del suministro de aire respirable. En este enfoque, el diseño de los circuitos se apoya en metodologías que combinan cálculos teóricos con validaciones empíricas, obtenidas a través de mediciones en campo. La estructura del circuito se planifica considerando la interconexión de múltiples nodos y ramales, lo que permite una distribución homogénea del flujo y compensa las

pérdidas derivadas de la fricción y de los cambios de dirección en el flujo [27].

Finalmente, se combinan los fundamentos teóricos de la mecánica de fluidos con la configuración geométrica de las galerías. Se subraya que el diseño de circuitos de ventilación no solo debe asegurar el suministro adecuado de aire, sino también evaluar meticulosamente la pérdida de carga en cada tramo del sistema. Para ello, se aplican modelos de flujo que incorporan coeficientes empíricos para estimar las pérdidas por fricción, lo que resulta esencial para el dimensionamiento óptimo de los conductos. La utilización de simulaciones numéricas que prevean el comportamiento del sistema en condiciones operativas variables permite ajustar el diseño de la red y garantizar una distribución homogénea del flujo [27].

En conjunto, la integración de estos métodos que abarcan desde análisis teóricos y numéricos hasta evaluaciones empíricas constituye un marco metodológico robusto para el diseño de circuitos de ventilación en minas subterráneas. Este enfoque integral no solo satisface los requerimientos de seguridad y salud ocupacional, sino que también optimiza el uso de recursos energéticos y reduce los costos operativos asociados al mantenimiento y la operación de los sistemas de ventilación.

1.3.8. Cálculo de aire según la normativa peruana

La determinación del volumen de aire requerido en el interior de la mina se fundamenta en variables operacionales tales como la cantidad de trabajadores, la presencia de polvo en suspensión, el aumento de la temperatura ambiental y el uso de explosivos, así como en la comprensión

detallada del proceso de explotación. Para establecer el requerimiento total de aire, se han empleado diversos parámetros operacionales. Se efectuó un estudio de la normativa peruana vigente, en particular el “Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería D.S. 2016-EM y su modificatoria 023-2017-EM”, relacionado con la ventilación en minas subterráneas, complementado con el análisis de otras normativas internacionales. Con base en estos estándares, y considerando variables como el número de trabajadores, el consumo de madera, las condiciones térmicas durante las labores, la cantidad de equipos con motor petrolero y las fugas de aire, se procedió a calcular el caudal de aire primordial para lograr una ventilación adecuada en la mina [28].

1.3.8.1. Por el número de trabajadores

En los sitios de trabajo de las minas ubicadas hasta 1,500 metros sobre el nivel del mar, se establece que el caudal mínimo de aire necesario por trabajador es de 3 m³/min. Para altitudes superiores, se aplica la siguiente escala de incremento: entre 1,500 y 3,000 msnm se incrementa el caudal en un 40%, alcanzando 4 m³/min; entre 3,000 y 4,000 msnm el aumento es del 70%, situándose en 5 m³/min; y, para alturas mayores a 4,000 msnm, se duplica el caudal base, estableciéndose en 6 m³/min [23][28].

$$Q_{\text{por trabajadores}} = \text{caudal mínimo} \times N^{\circ} \text{ trabajadores (m}^3/\text{min)}$$

1.3.8.2. Por el consumo de madera

El empleo de madera en el interior de la mina, especialmente en tareas de sostenimiento, produce emisiones de CO₂ y CH₄, las cuales deben ser

consideradas al calcular el caudal de aire requerido. Este impacto se determina de manera proporcional a la producción minera, utilizando la siguiente escala [23][28]:

- Si el consumo de madera constituye entre el 20% y el 40% de la producción total, se asigna un factor de 0.60 m³/min.
- Si dicho consumo varía entre el 41% y el 70%, el factor aumenta a 1.00 m³/min.
- Cuando el consumo supera el 70%, el factor se establece en 1.25 m³/min.

$$Q \text{ por consumo de madera} = \text{Producción en Tn} \times \text{consumo (m}^3/\text{min)}$$

1.3.8.3. Por temperatura

Es calcula a razón de la fórmula siguiente [28]:

$$Q \text{ por } T^{\circ} = Vm \times A \times N \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Vm: Velocidad mínima

A= Área de labor promedio

N: Para mantener la temperatura de confort en el lugar de trabajo, se debe considerar en el cálculo del requerimiento de aire una velocidad mínima de 30 m/min, cuando la temperatura se encuentre en el rango de 24°C hasta 29°C como máximo.

1.3.8.4. Por equipos diesel

El caudal mínimo de aire para los equipos que funcionan con motores petroleros debe ser de al menos 3 m³/min, en función de la potencia efectiva (HPs), la disponibilidad mecánica y el uso operativo, según la evaluación realizada por el titular de la actividad minera. Dicha evaluación

también incorpora factores como la altitud, el incremento de calor de los motores, y las emisiones de gases y partículas en suspensión [28].

$$Q \text{ por equipos diesel} = 3 \times HP \times Dm \times F \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

HP = Capacidad efectiva de potencia (HPs)

Dm = Disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%)

F = Factor de utilización promedio de los equipos (%)

1.3.8.5. Por fugas

El cálculo correspondiente al caudal de aire por fugas, es como sigue [23]:

$$Q \text{ por fugas} = 15\% \times Q'' \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

Q'': Sumatoria de caudal de aire por trabajadores, temperatura, equipos diesel y consumo de madera.

1.3.8.6. Por consumo de explosivos

El cálculo por consiguiente al presente requerimiento, es [23]:

$$Q \text{ por consumo de explosivos} = 100 \times A \times a \times t/d \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

A = Cantidad de explosivo detonado, equivalente a dinamita 60% (Kg.)

a = Volumen de gases generados por cada Kg. de explosivo.

a = 0.04 (m³/Kg. de explosivo); valor tomado como norma general.

d = % de dilución de los gases en la atmósfera, deben ser diluidos a no menos de 0.008% y se aproxima a 0.01 %

t = tiempo de dilución de los gases (minutos); generalmente, este tiempo no es mayor de 30 minutos, cuando se trata de detonaciones corrientes.

1.4. Formulación de los problemas

1.4.1. Problema general

¿De qué manera el incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera el incremento de la cobertura de aire en Zona Cuerpos mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?
- ¿De qué manera el incremento de la cobertura de aire en Zona Vetas mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?
- ¿De qué manera el control de riesgos potenciales mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?

1.5. Justificación

Este proyecto se justifica por la necesidad imperiosa de mejorar la ventilación en las minas subterráneas, lo que afecta directamente a la seguridad y salud de los trabajadores, así como a la productividad y rentabilidad de las operaciones mineras. Mejorar la circulación del aire en las labores de preparación y avance disminuirá la concentración de gases y polvo peligrosos, garantizando así un lugar de trabajo más seguro y el cumplimiento de las normas ambientales y de seguridad existentes.

La investigación desde el punto de vista ambiental, se basa en que la optimización del flujo de aire disminuye las emisiones contaminantes y mejora la dispersión de sustancias tóxicas, mitigando así los efectos ambientales adversos y mejorando la calidad del aire en las regiones circundantes a las actividades mineras.

La investigación implica el desarrollo y la aplicación de tecnologías avanzadas, incluidos sensores de monitoreo en tiempo real y modelado computacional, para evaluar y mejorar la eficiencia del sistema de ventilación.

La justificación metodológica se basa en la implementación de un enfoque mixto que integra el análisis cuantitativo y cualitativo, facilitando la validación experimental y la modificación de los parámetros operativos en condiciones reales. Este estricto enfoque metodológico garantiza la precisión y pertinencia de los resultados, al tiempo que ofrece ventajas sustanciales en la toma de decisiones y la ejecución de soluciones innovadoras dentro del sector minero.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar que el incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar que el incremento de la cobertura de aire en Zona Cuerpos mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024.
- Determinar que el incremento de la cobertura de aire en Zona Vetas mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024.
- Determinar que el control de riesgos potenciales mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024.

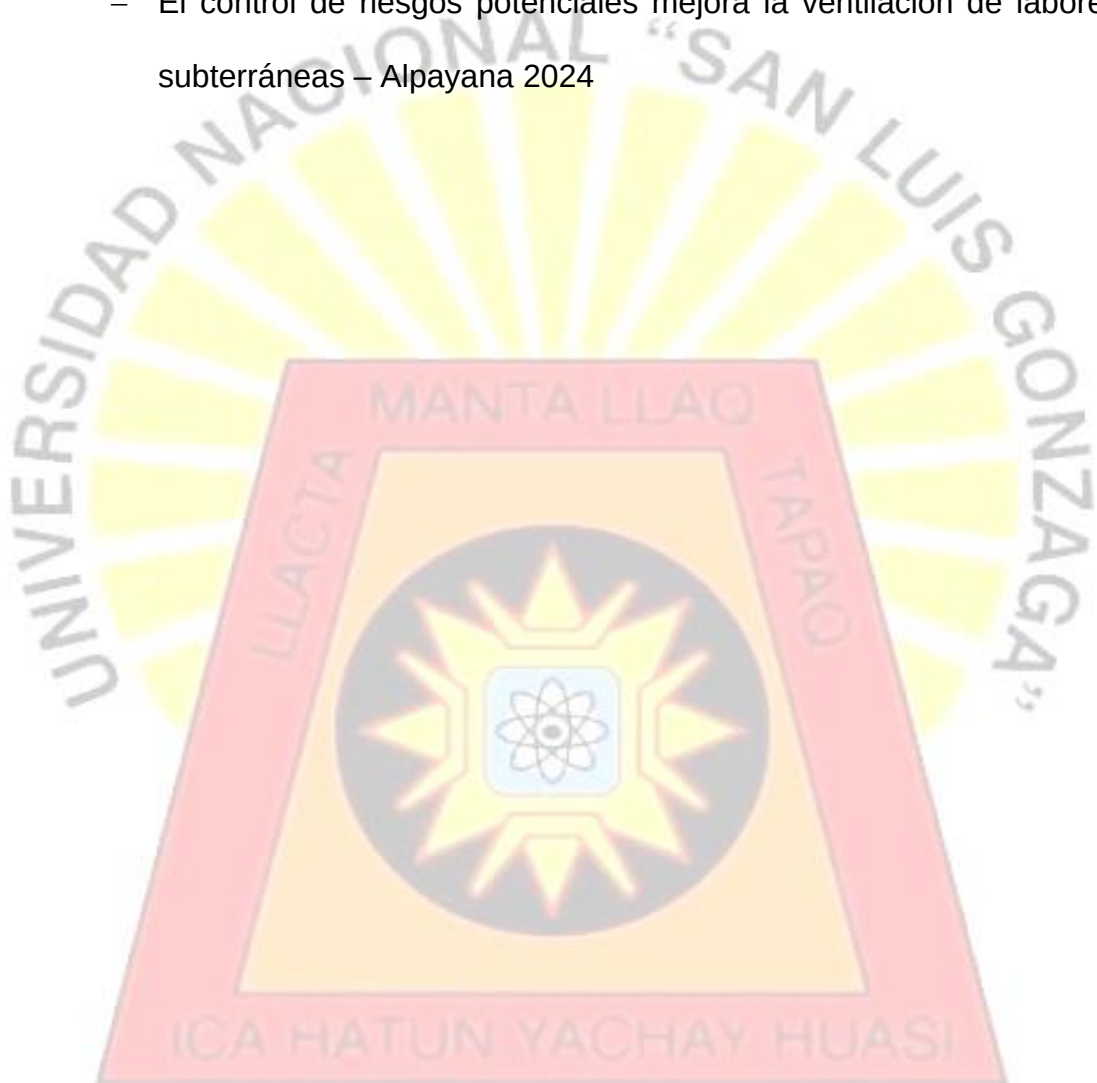
1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis específica

El incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024

1.7.2. Hipótesis específica

- El incremento de la cobertura de aire en Zona Cuerpos mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024
- El incremento de la cobertura de aire en Zona Vetas mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024
- El control de riesgos potenciales mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024



II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Lugar de estudio

La Unidad Minera Americana se localiza en el paraje Piedra Parada, en la zona de El Carmen Chicla, dentro del departamento de Lima. Geográficamente, se ubica en la región central y en el flanco occidental de la cordillera de los Andes, utilizando las coordenadas UTM 366761.70E; 8710455.60N para su precisión. En términos altimétricos, el campamento Alpayana se encuentra a 4350 m.s.n.m., la bocamina principal Alex a 4414 m.s.n.m. y la bocamina El Carmen a 4456 m.s.n.m. La conexión vial incluye una carretera asfaltada siguiendo la ruta Lima – Casapalca, que abarca aproximadamente 129 km en tres horas de viaje; otra carretera asfaltada que une Huancayo – La Oroya – Casapalca, con 100 km recorridos en el mismo lapso de tiempo; y, finalmente, una trocha carrozable de 3 km entre Casapalca y Piedra Parada, con un tiempo de desplazamiento estimado en 15 minutos.

2.2. Tipo de investigación

Será de tipo aplicada [29]. La investigación aplicada utiliza métodos teóricos y empíricos para resolver problemas específicos y crear innovaciones prácticas y efectivas. Este tipo de investigación adapta y aplica los hallazgos científicos a desafíos específicos en diversos contextos para optimizar procesos, mejorar productos y servicios e implementar estrategias que beneficien a la sociedad y la economía. La investigación aplicada con un enfoque pragmático promueve el conocimiento y ayuda a la toma de decisiones y la formulación de políticas basadas en evidencia.

2.3. Nivel de investigación

Será de nivel descriptivo [30]. La investigación descriptiva observa, registra y analiza fenómenos específicos o características, comportamientos y relaciones de grupos sin manipular variables ni establecer relaciones causales. Este enfoque proporciona una representación precisa y objetiva de la realidad para identificar patrones, tendencias y peculiaridades para futuros estudios o desarrollo de políticas y estrategias. El rigor metodológico y la claridad en la definición de los parámetros de estudio son necesarios para asegurar la validez y confiabilidad de los hallazgos y proporcionar una comprensión completa de los fenómenos investigados.

2.4. Diseño de investigación

Será de diseño descriptivo comparativo [31]. La investigación descriptiva comparativa examina dos o más fenómenos, grupos o contextos para encontrar similitudes y diferencias que ayuden a explicar sus características intrínsecas y dinámicas. Este método combina una descripción precisa con un análisis comparativo para encontrar patrones y variaciones que ayuden a formular hipótesis y orientar futuras investigaciones. Las definiciones claras de parámetros y los métodos cuantitativos y cualitativos garantizan la validez y la fiabilidad de los hallazgos, lo que permite una toma de decisiones informada y un conocimiento contextualizado.

2.5. Población y muestra

2.5.1. Población

La población de investigación, como universo de estudio, es el conjunto total de individuos, elementos u observaciones que comparten características específicas y cumplen criterios preestablecidos. Este concepto es crucial en la

metodología de proyectos porque la identificación y delimitación de la población asegura la representatividad y validez de los resultados. [32]; en ese sentido, la población de investigación estará conformada por todas las zonas en operaciones de explotación minera en la Unidad Minera Alpayana, en el año 2024.

2.5.2. Muestra

La muestra de investigación es un subconjunto representativo de la población seleccionado mediante métodos de muestreo sistemáticos y rigurosos para reflejar el universo estudiado. De este proceso de selección dependen la validez y confiabilidad de los hallazgos, lo que permite obtener conclusiones generalizables y un análisis estadístico y analítico robusto de los datos [33]; en ese sentido, la muestra de investigación estará conformada por la Zona Cuerpos Veta Alessa, Veta C, Veta Esperanza, Cuerpo M y Cuerpo Esperanza, en el año 2024.

2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación usará la técnica de la observación directa [34], es un método de recolección de datos en el que el investigador observa y registra acciones, eventos o circunstancias tal como ocurren en su entorno natural. Esto se hace sin interferir ni modificar el entorno de ninguna manera. También se utilizará la técnica del fichaje [35], técnica que permite recolectar datos necesarios mediante el uso de fichas de elaboración propia adheridos a las variables de estudio y sus indicadores.

En relación con los instrumentos, se usará las fichas de elaboración propia del autor e informes preparados para el sustento a la empresa basado en la variable de estudio a medir (incremento de la cobertura de aire) y sus indicadores

(incremento de cobertura de aire en zona cuerpos, zona vetas y control de riesgos potenciales en actividades de ventilación de minas).

2.7. Técnicas de análisis e interpretación de datos

Una vez recolectados los datos utilizando los instrumentos especificados, se procederá a clasificar la información obtenida. Luego, esta se organizará según los criterios establecidos por los indicadores y se analizará estadísticamente. Los resultados finales se presentarán en forma de tablas y gráficos, en correlación con los indicadores mencionados. Es importante señalar que el procesamiento de los datos se realizará empleando el software estadístico Microsoft Excel 2016 para efectuar el análisis descriptivo.



III. RESULTADOS

3.1. Actividades de mejoramiento de la ventilación

Para incrementar nuestro ingreso de aire fresco a mina y mejorar nuestra cobertura de aire fresco a 100%, se tiene la ejecución del proyecto de la construcción del RB 840 desde superficie al Nv 10, en donde se instalara un ventilador de 150,000 cfm en nivel 18; donde por la depresión ejercida por los ventiladores principales y secundarios se efectuara el ingreso de aire, cuya capacidad instalada nominal será de 1,000,000 cfm, generada por 6 ventiladores principales extractores, 02 ventiladores de 150,000 cfm en el RB 131(superficie), 01 ventilador de 150,000 cfm en el RB 593 (superficie), 02 ventiladores de 200,000 cfm en el RB 338 (superficie) y 01 ventiladores de 150,000 cfm en el Proyecto RB 840 Ximena - Oroya (en la columna del raise boring).

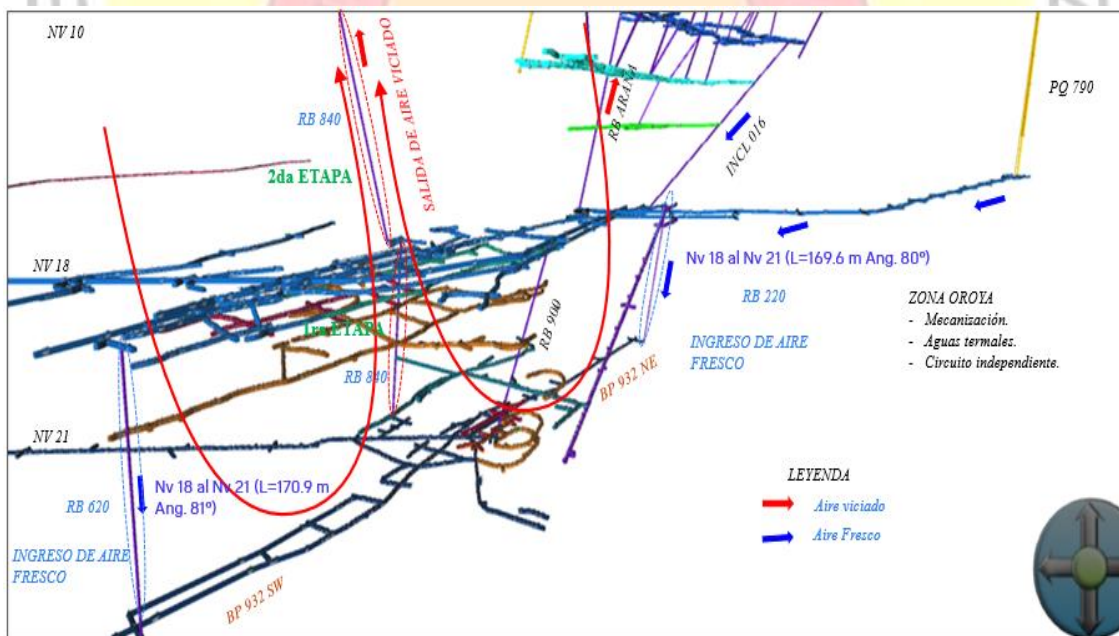


Figura 1. RB 840 para incrementar la cobertura de aire de 80 a 100%

RB 840 tiene como objetivo primordial garantizar la ventilación de toda la mina para proteger, cuidar y evitar el riesgo por gaseamiento de nuestros

colaboradores, mantener las condiciones termo-ambientales favorables y evitar multas por Osinergmin en ventilación.

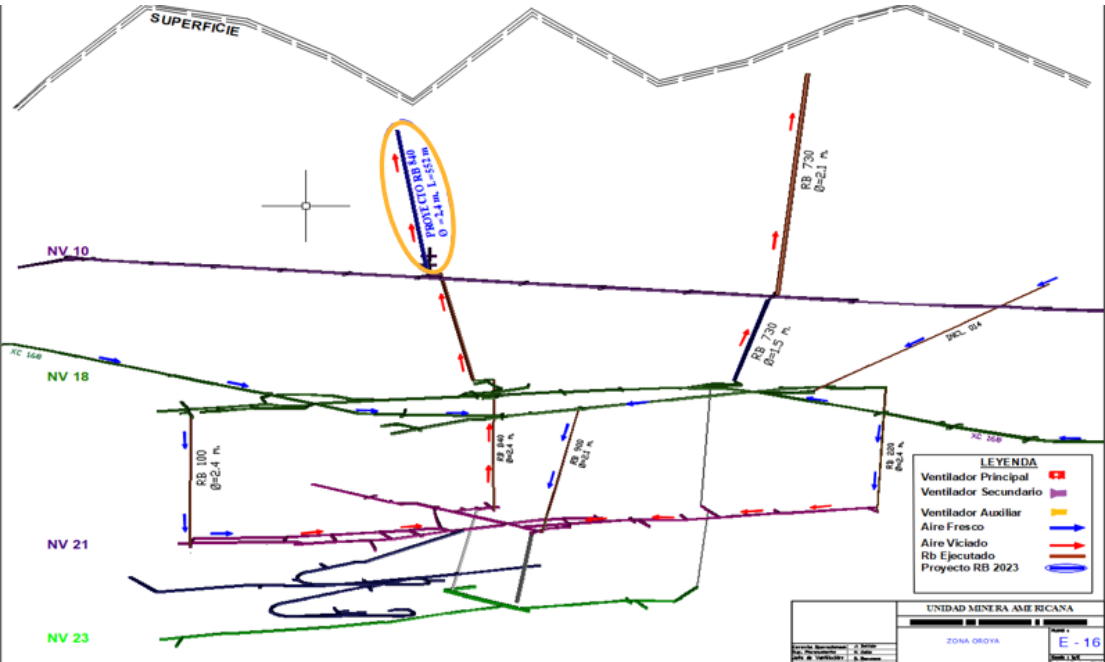


Figura 2. RB de salida de aire hacia la superficie

Parcialmente según terminaba la construcción de los Raise Boring se fue instalando el ventilador principal extractor, que ayudó a mejorar nuestra cobertura integral de aire hasta lograr nuestro objetivo de llegar al 100%.

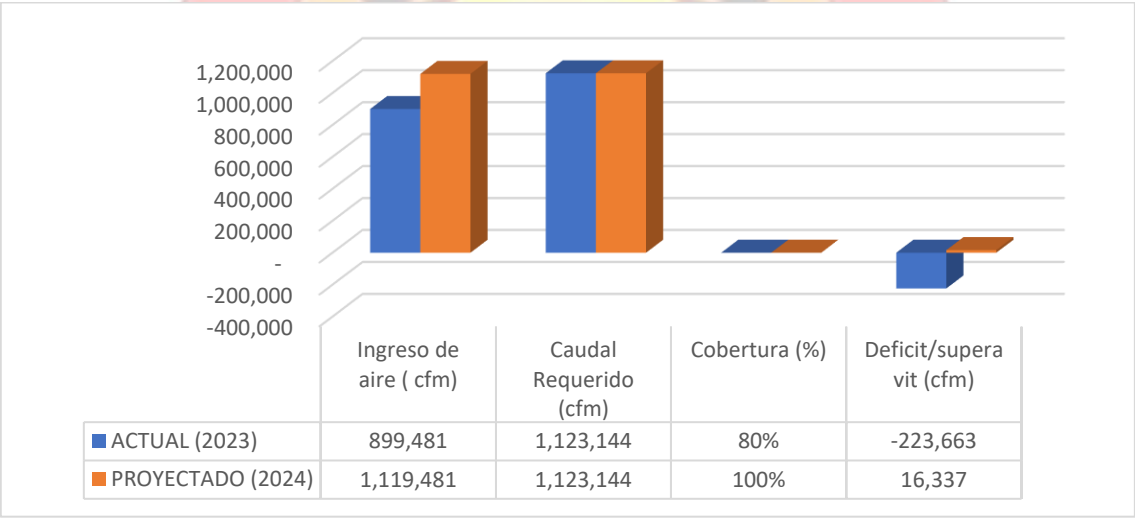


Figura 3. Cobertura de aire logrado después de ejecutar el RB 840

3.2. Ejecución en la zona cuerpos

Con el fin de asegurar una ventilación adecuada, se implementó el ingreso de aire fresco a través de las bocaminas existentes y chimeneas conectadas a la superficie, específicamente en Alex 1, Alex 2, Bocamina Potosí, Pique Circular, Bocamina 600, Bocamina 430 y RB 651. La evacuación del aire contaminado se llevaó a cabo mediante los conductos RB 131, RB 593 y RB 338, utilizando ventiladores extractores con una capacidad nominal combinada de 850,000 cfm. Para garantizar una correcta ventilación durante los trabajos de avances horizontales y verticales en frentes ciegos, se desarrollarán labores de infraestructura tales como SLOT, VCR y laboreos que conecten dichos frentes con los RB mencionados, dirigiendo el aire viciado hacia el circuito primario y secundario de la ventilación principal de manera integral.

En la primera fase se concluyó la construcción de un raise boring que conecte el nivel 10 con el nivel 18, con el propósito de mitigar la alta resistencia observada en el RB 338, cuyo diámetro es de 2.4 m, en contraste con la columna principal que presenta un diámetro de 3.6 m desde la superficie hasta dicho nivel.

Para la profundización en la zona de cuerpos, se construyó raise boring destinados tanto al ingreso de aire fresco como a la evacuación del aire viciado, con un diámetro de 2.4 m, además de raise boring locales de menor diámetro (1.5 m) que permitan aliviar de forma inmediata las condiciones de ventilación hasta el nivel 23, complementando las columnas ya realizadas hasta el nivel 21 en el año 2024.

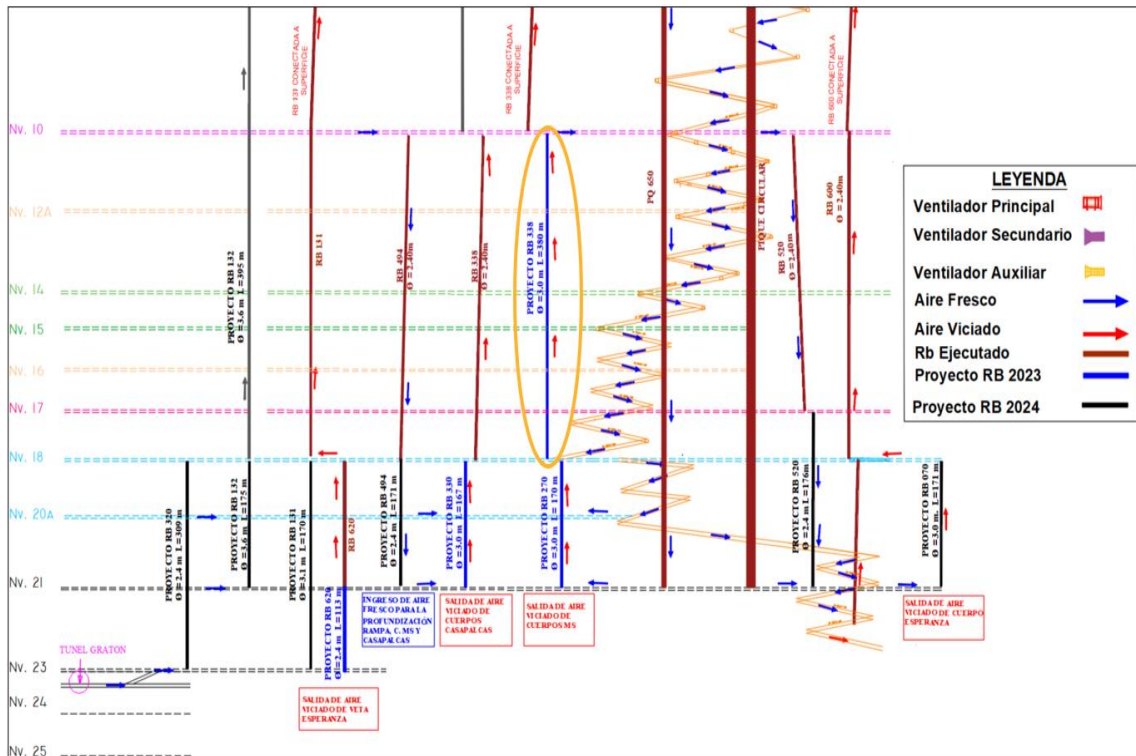


Figura 4. Raise Boring en la Zona Cuerpos

Circuito de ventilación del cuerpo Casapalca

Se construyó el raise boring 330 desde el Nv 21 hasta el Nv 23 con un diámetro de 2.4m, en la segunda etapa una vez construido el raise boring se va a instalar un ventilador extractor en el Nv 18 de 150,000 cfm que extraerá aire viciado de los niveles intermedios como Nv 19, Nv 20, Nv 20A, Nv 21, Nv 22 y Nv 23.

Una vez instalado el ventilador extractor se alcanzó una cobertura de aire de 101%. Alcanzando el porcentaje como para dar las condiciones a los trabajadores y a los equipos diésel.

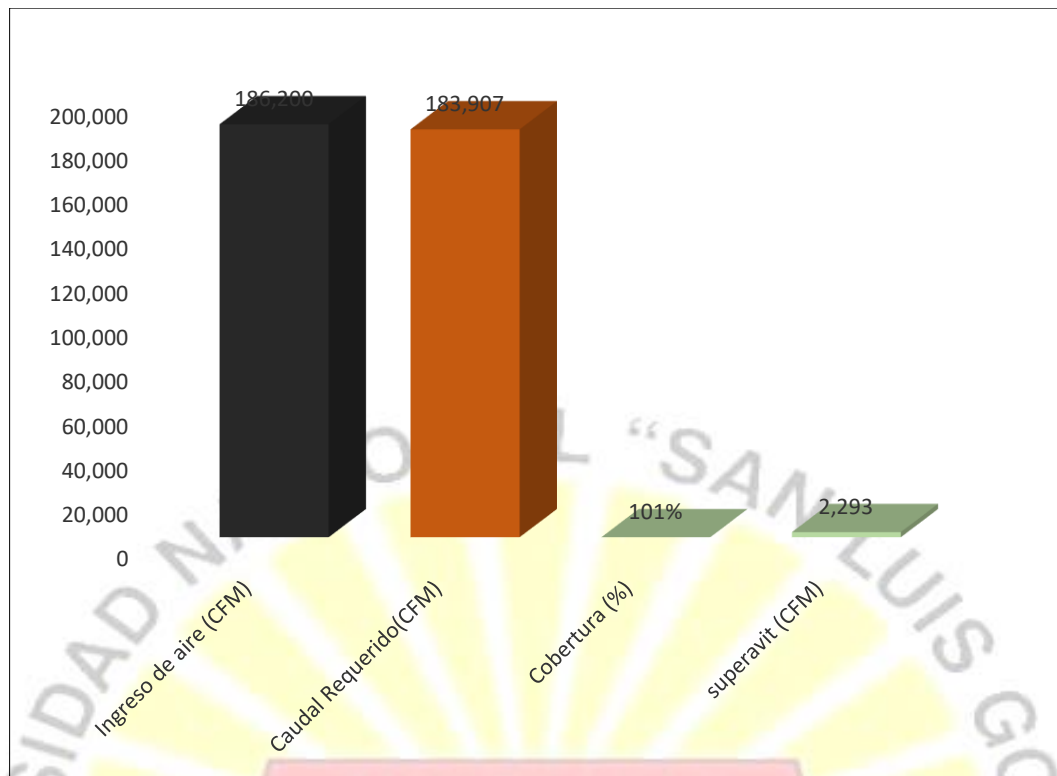


Figura 5. Cobertura de aire logrado en la zona cuerpos Casapalca

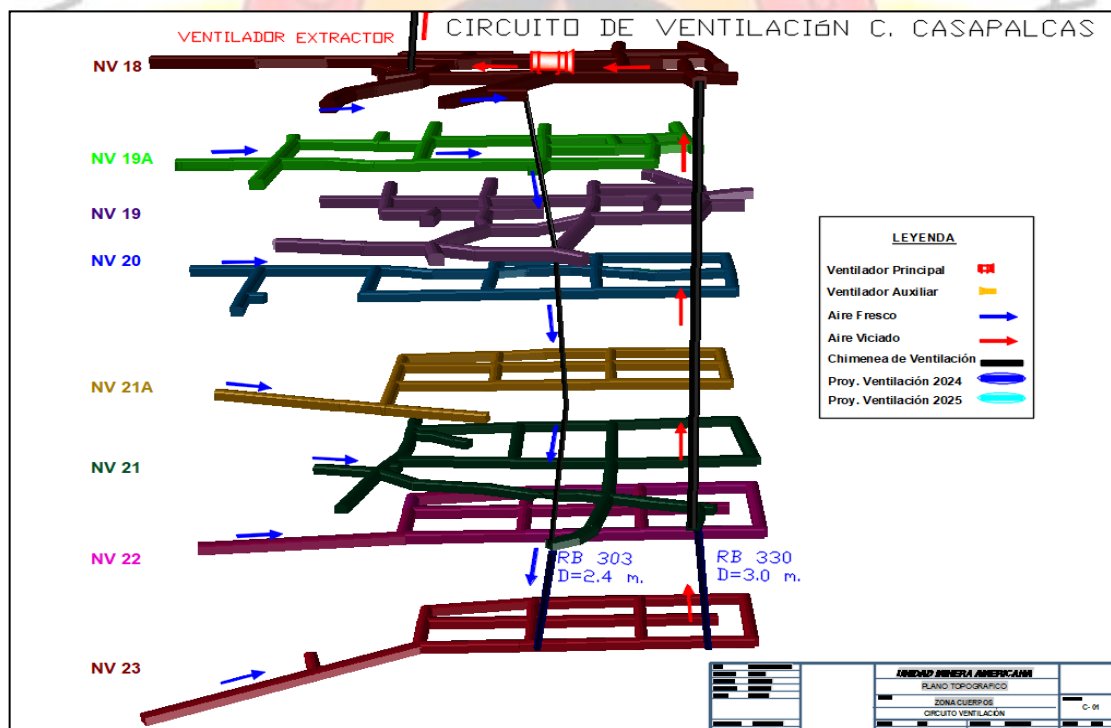


Figura 6. Circuito de ventilación en la zona cuerpos Casapalca

Circuito de ventilación en la zona cuerpo M

Se construyó el raise boring 270 desde el Nv 21 hasta el Nv 23 con un diámetro de 2.4 m, una vez construido el raise boring se va a instalar un ventilador extractor en el Nv 18 de 150,000 cfm que extraerá aire viciado de los niveles intermedios como Nv 19, Nv 20, Nv 20A, Nv 21, Nv 22 y Nv 23.

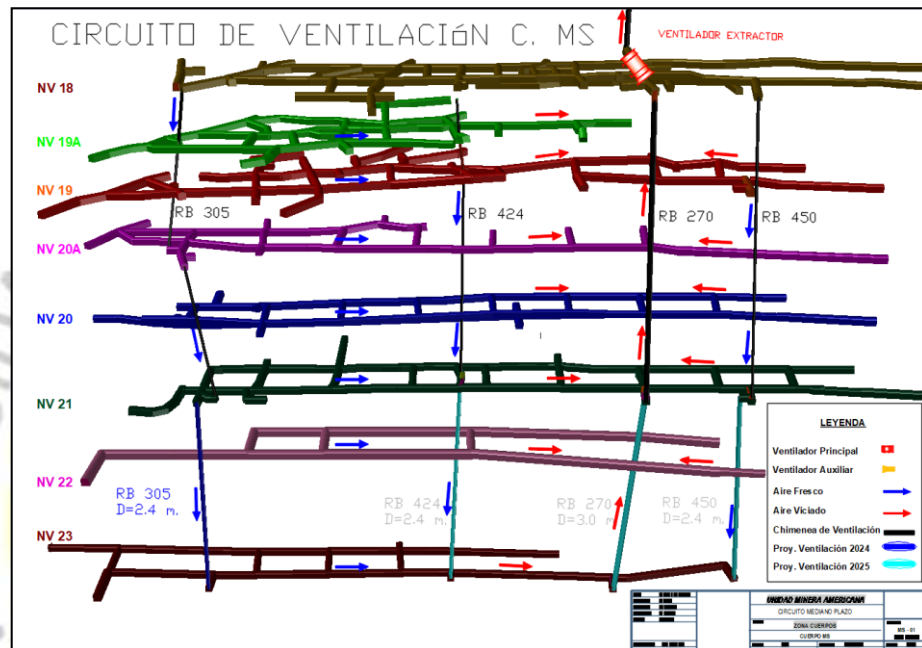


Figura 7. Circuito de ventilación en la zona cuerpo M

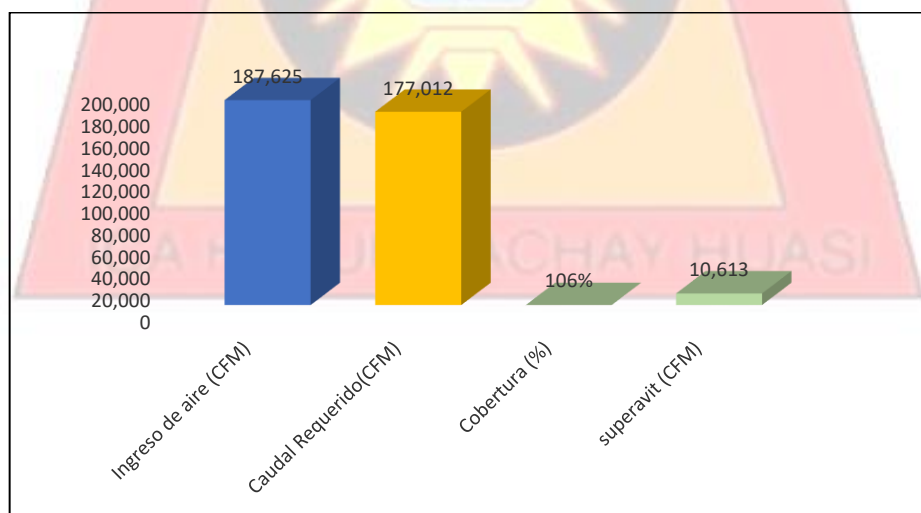


Figura 8. Cobertura de aire logrado en la zona cuerpo M

Una vez instalado el ventilador extractor se alcanzó una cobertura de aire de 106 %. Alcanzando el porcentaje como para dar las condiciones a los trabajadores y a los equipos diésel.

Circuito de ventilación en la zona cuerpo Esperanza

Se construyó el raise boring 070 desde el Nv 18 hasta el Nv 21 con un diámetro de 2.4 m, una vez construido el raise boring se va a instalar un ventilador extractor en el Nv 18 de 60,000 cfm que extraerá aire viciado de los niveles intermedios como Nv 19, Nv 20, Nv 20A y Nv 21.

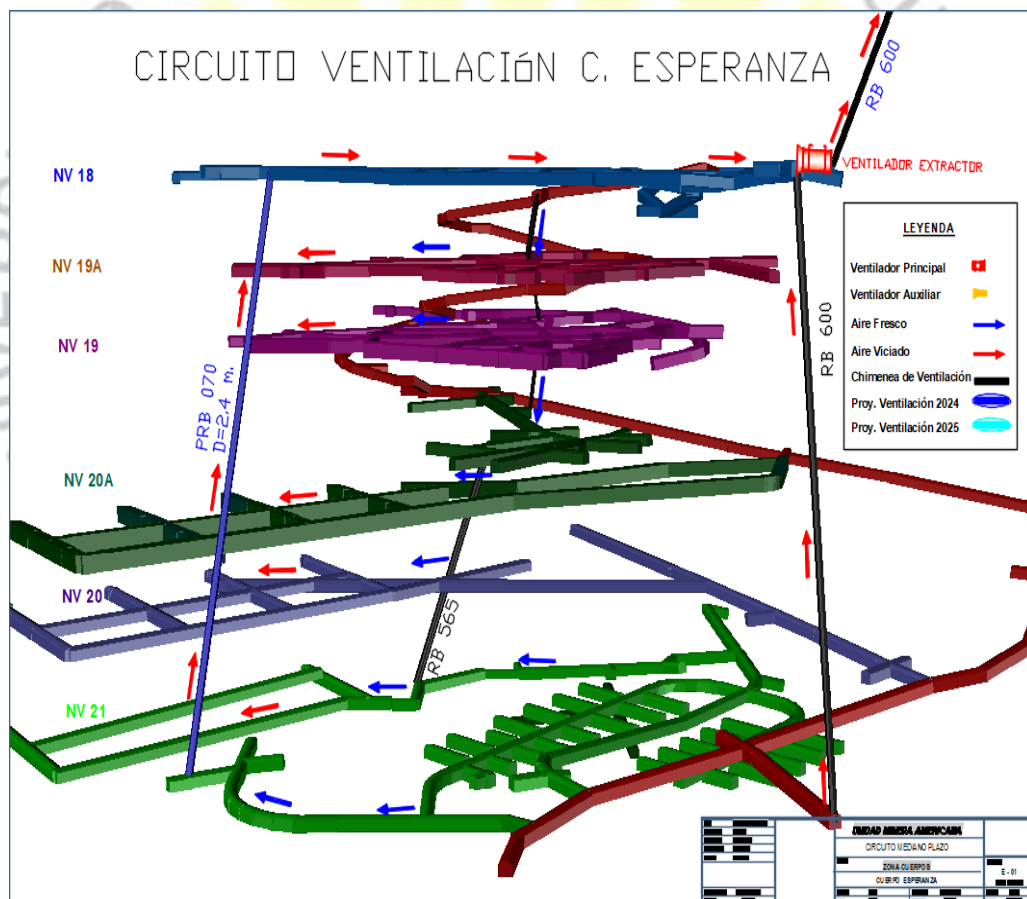


Figura 9. Circuito de ventilación en la zona cuerpo Esperanza

Una vez instalado el ventilador extractor se alcanzó una cobertura de aire de 121%. Alcanzando el porcentaje como para dar las condiciones a los trabajadores y a los equipos diésel (Figura 10)

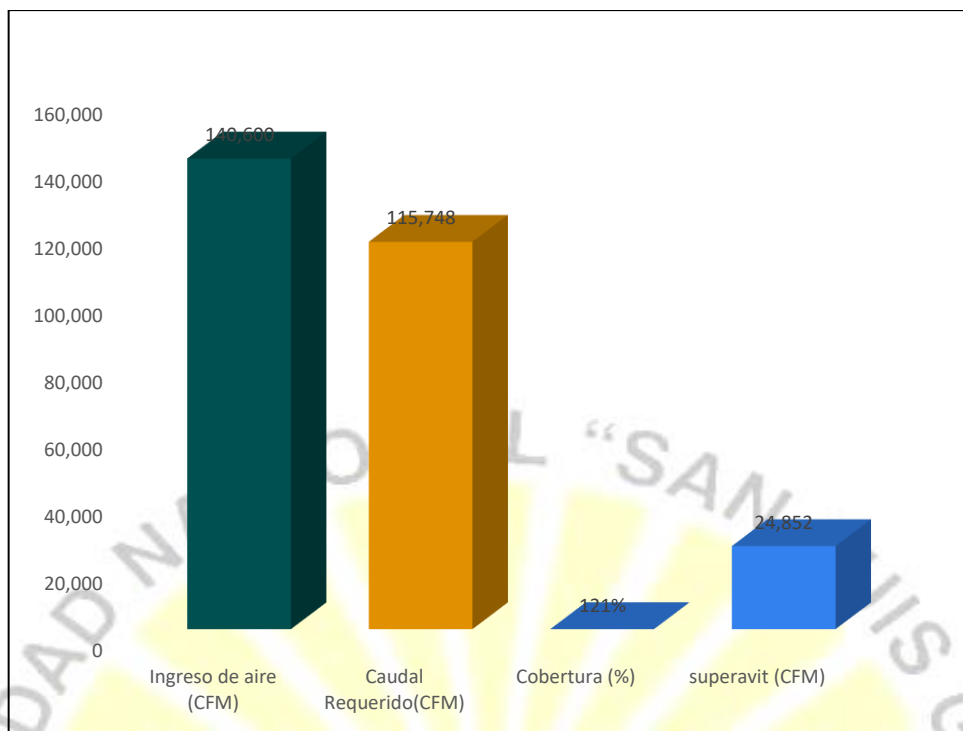


Figura 10. Cobertura de aire alcanzado en la zona cuerpo Esperanza

3.3. Ejecución en la zona vetas

Veta Esperanza

Se llevó a cabo la ejecución del Raise Boring 620 destinado a la ventilación entre los niveles 21 y 23. Posteriormente, se procederá a la instalación de un ventilador extractor con una capacidad de 60,000 cfm en la cabeza del Raise Boring ubicado en el nivel 18. La depresión generada por este dispositivo inducirá el ingreso de aire fresco a través del inclinado 2000 y los Raise Boring 060, 190 y 150, asegurando una cobertura total del 100 % en función de las necesidades operativas relacionadas con los colaboradores, equipos, madera, temperatura y control de fugas.

Además, se hizo énfasis en la necesidad de ubicar la chimenea (Raise Boring) de manera que se establezca un circuito de ventilación independiente, evitando la interferencia con otras áreas operativas y garantizando el mantenimiento de la

calidad del aire dentro de los parámetros del LMP, en lo referente a la concentración de gases y las condiciones termoambientales.

Por último, la implementación de la chimenea (Raise Boring) entre los niveles 21 y 23, junto con la instalación del ventilador extractor, facilitó el aumento de las velocidades del aire, lo que permitió reducir el tiempo necesario para alcanzar una ventilación adecuada.

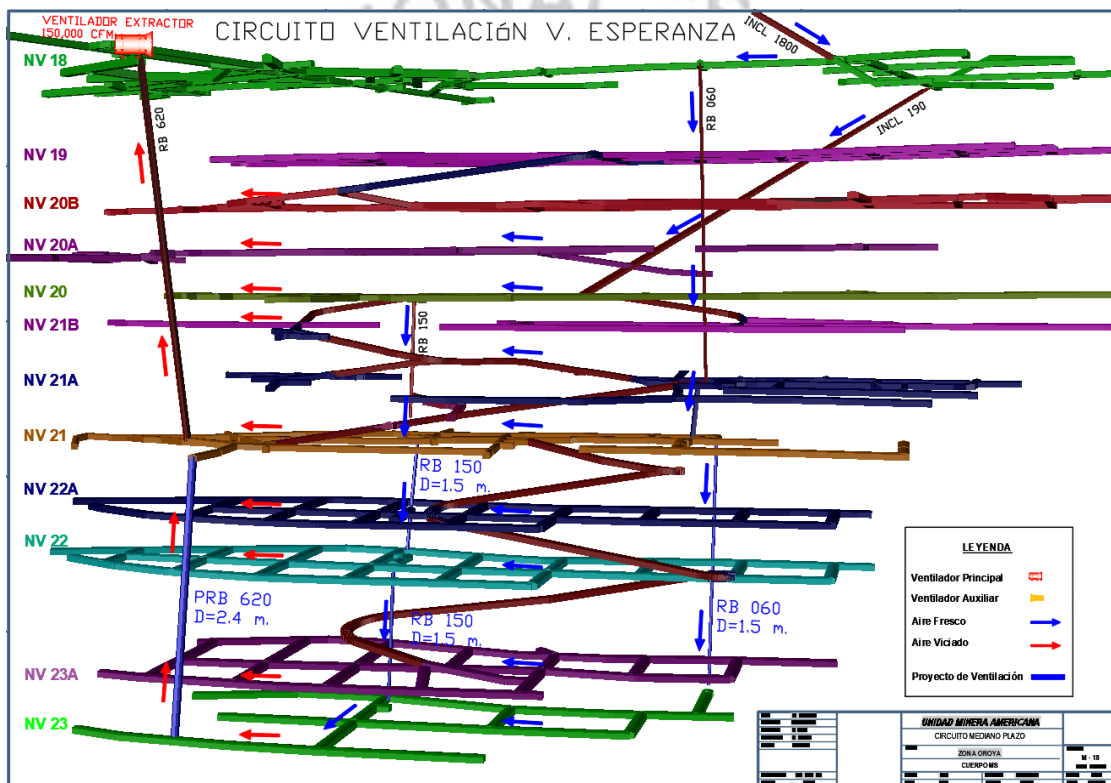


Figura 11. Circuito de ventilación en la zona veta Esperanza

Una vez instalado el ventilador extractor se alcanzó una cobertura de aire de 113%. Alcanzando el porcentaje como para dar las condiciones a los trabajadores y a los equipos diésel.

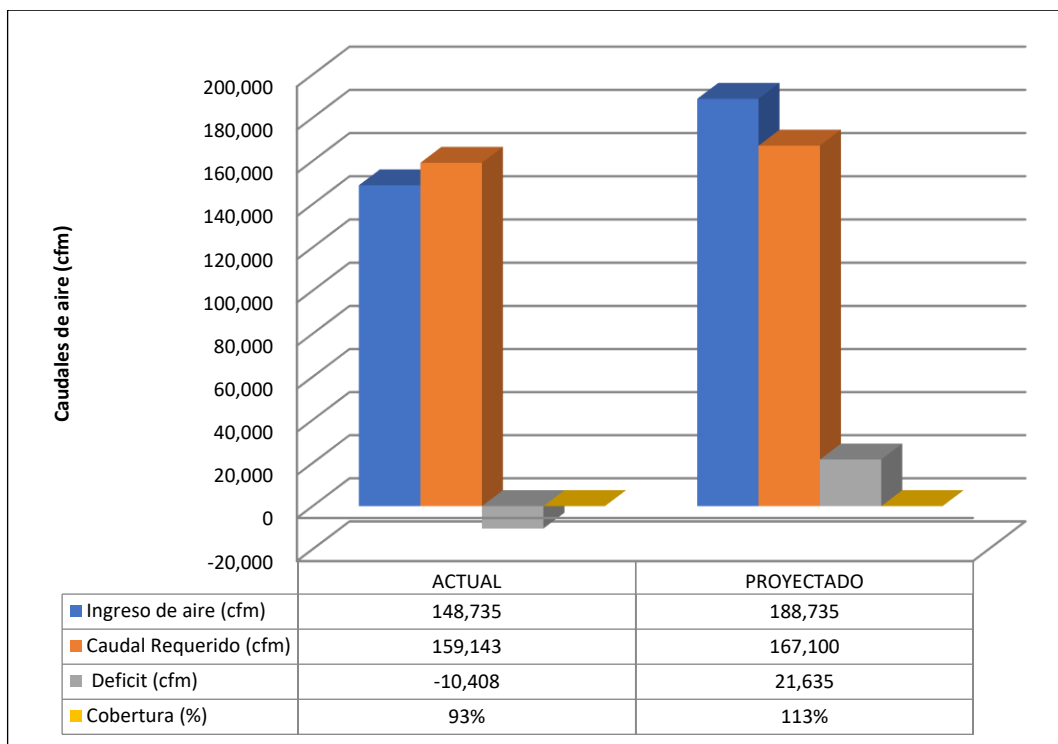


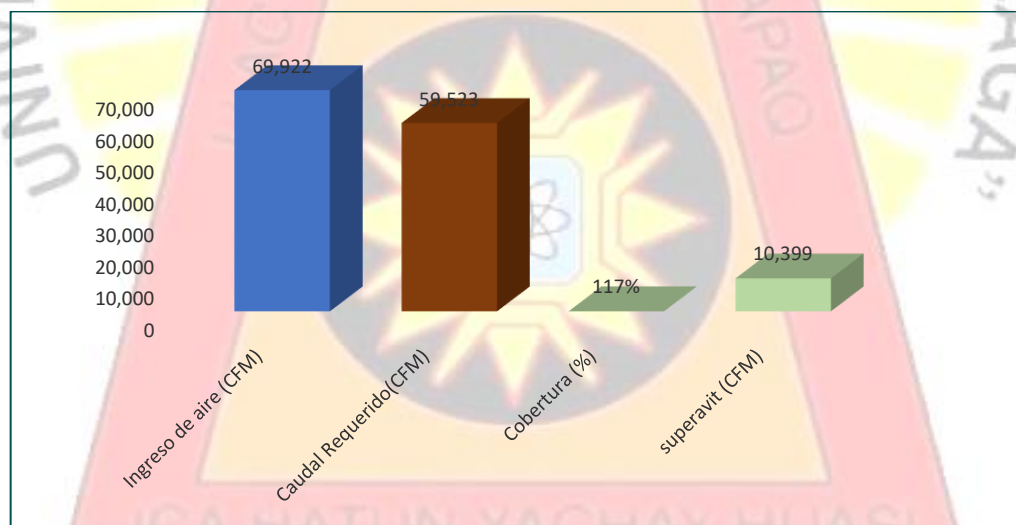
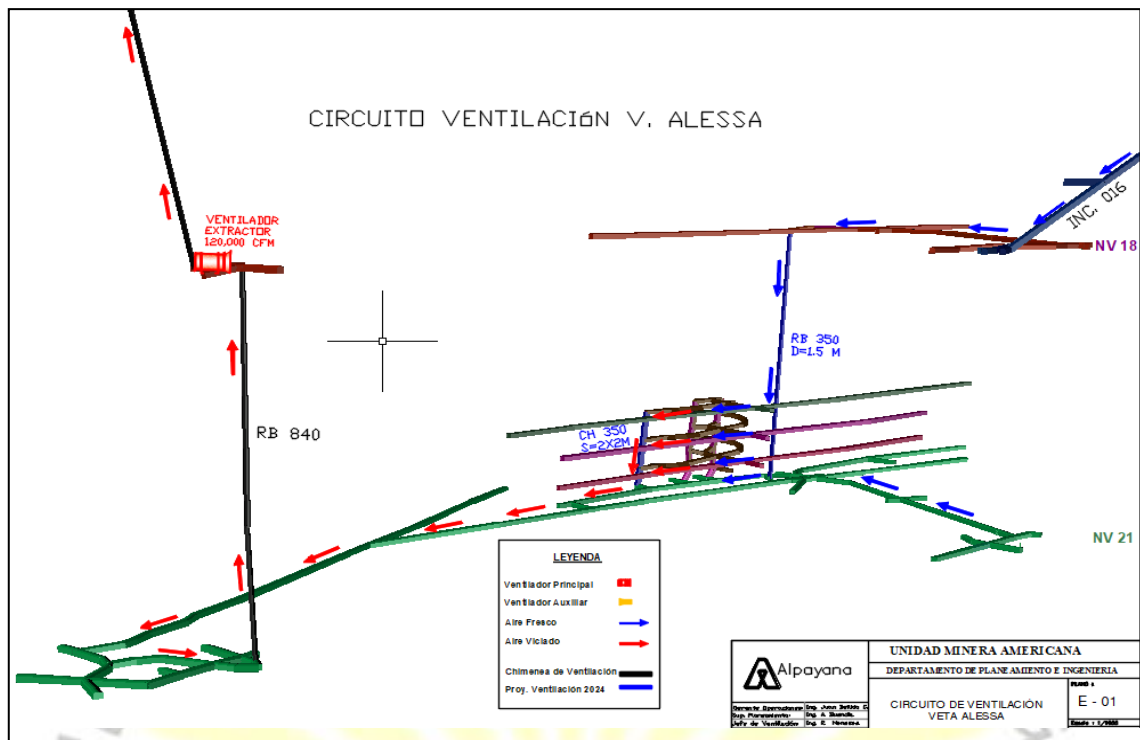
Figura 12. Cobertura de aire logrado en la zona Veta Esperanza

Veta Alessa – Zona Oroya

Se ejecutó el Raise Boring 350 de ventilación desde el Nv.18 al Nv.21 luego se instaló ventiladores inyectores de 90,000 cfm en pie del Raise Boring Nv 21 y en los niveles intermedios y por la depresión ejercida ingresará el aire fresco.

Se ubicó la chimenea (Raise Boring) para mantener el circuito de ventilación independiente de manera que no afecte las demás zonas de operación y mantener la calidad de aire dentro de los parámetros del LMP los Gases y las condiciones Termo – Ambiental.

Se aumentó las velocidades de aire en las labores con la ejecución de la chimenea (Raise Boring) del Nv.18 al Nv.21 que nos permitió reducir el tiempo de ventilación.



Una vez instalado el ventilador extractor se obtuvo una cobertura de aire de 117%. Alcanzando el porcentaje como para dar las condiciones a los trabajadores y a los equipos diésel.

Veta C

Se procedió a la ejecución del Raise Boring 400, que funcionó como conducto para evacuar el aire viciado desde el nivel 18 hasta el nivel 21. Posteriormente, se instaló ventiladores inyectores con una capacidad de 90,000 cfm en la columna del Raise Boring "Graton" del nivel 21 y en los niveles intermedios, de modo que la depresión generada facilite el ingreso de aire fresco al sistema.

Asimismo, se garantizó que la chimenea (Raise Boring) se ubique de manera que se establezca un circuito de ventilación independiente, evitando la interferencia con otras áreas operativas y manteniendo la calidad del aire dentro de los parámetros del LMP en cuanto a la concentración de gases y las condiciones termoambientales.

Por último, la ejecución del Raise Boring entre los niveles 18 y 21 permitió incrementar las velocidades del aire, lo cual reducirá el tiempo requerido para lograr una ventilación óptima.

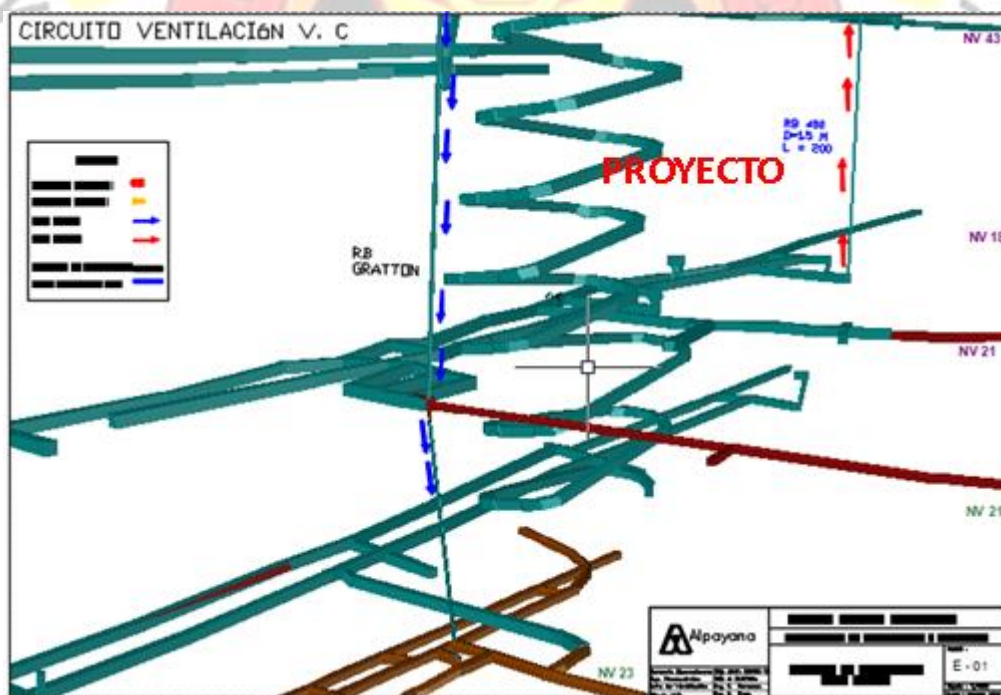


Figura 15. Circuito de ventilación en la zona veta C

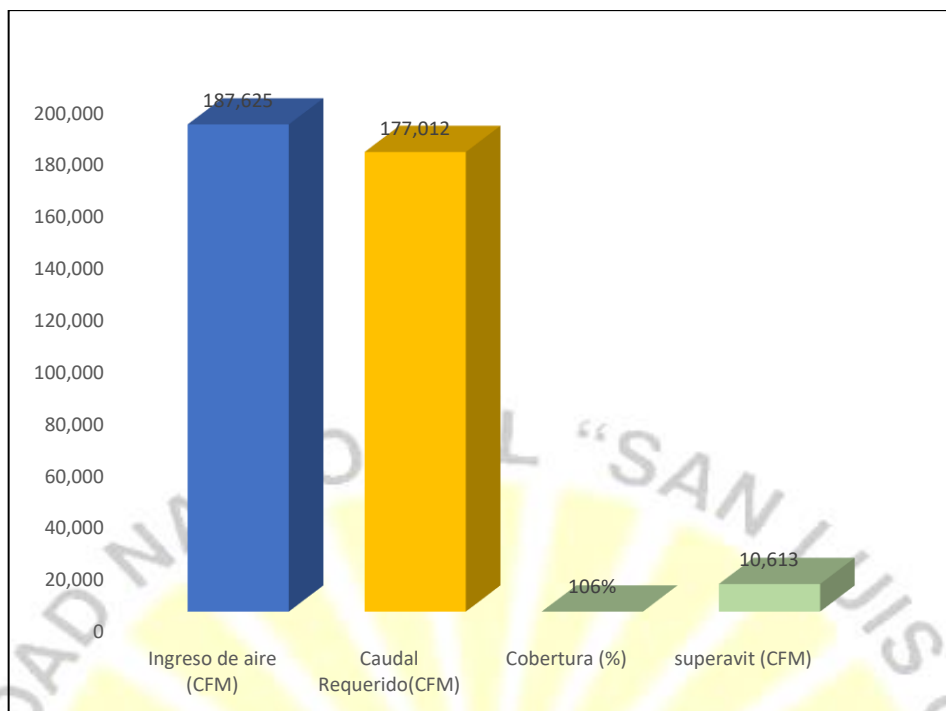
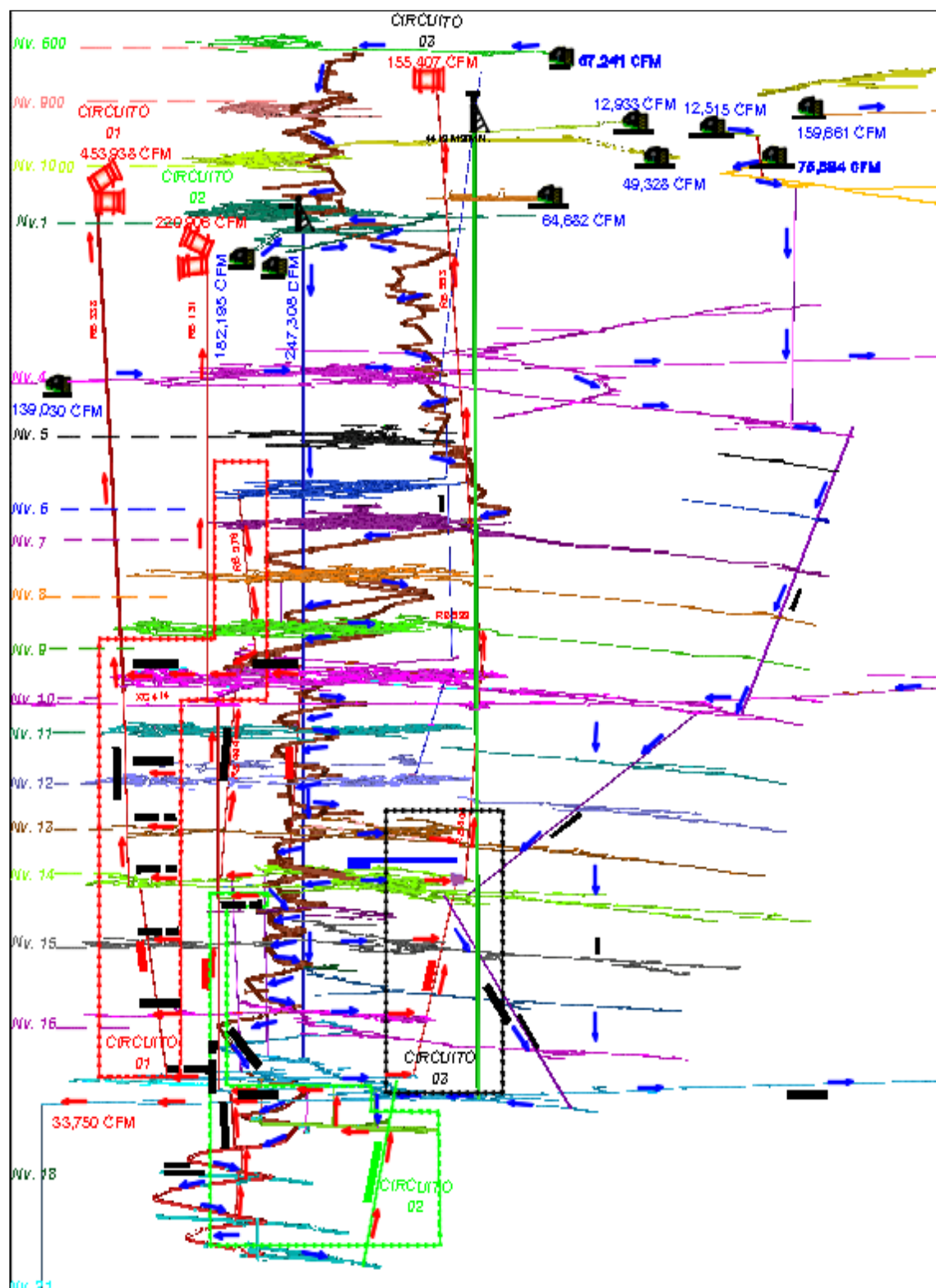


Figura 16. Cobertura de aire logrado en la zona Veta C

Una vez instalado el ventilador extractor se alcanzó una cobertura de aire de 106%. Alcanzando el porcentaje como para dar las condiciones a los trabajadores y a los equipos diésel (Figura 16)

3.4. Diseño del circuito general de ventilación en zona cuerpos



83

3.6. Diseño del circuito general de ventilación en zona vetas

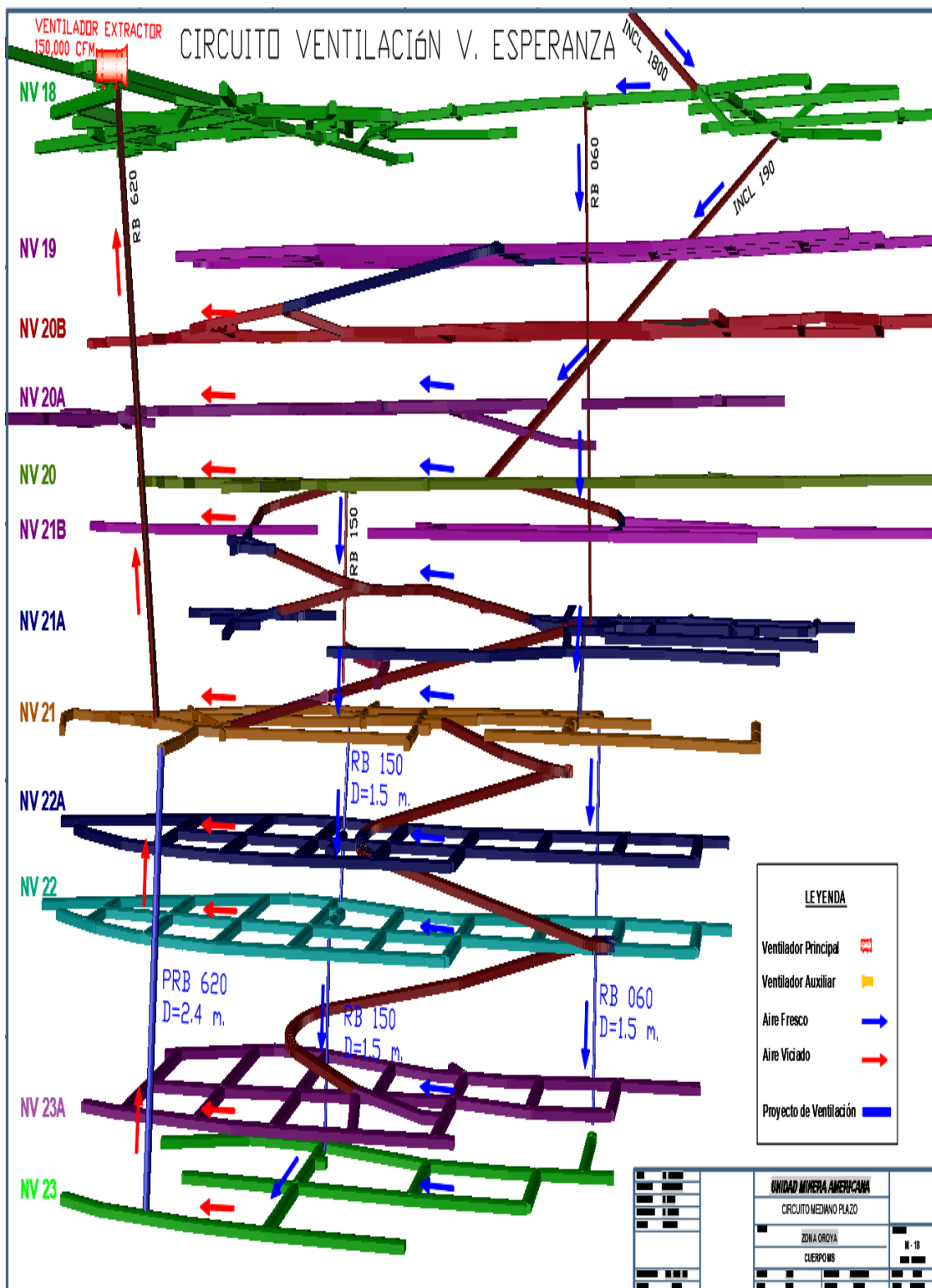


Figura 19. Diseño de ventilación zona vetas

3.7. Riesgos potenciales y control

Tabla 1.
Riesgos potenciales y control en las actividades de ventilación

N°	PELIGRO	RIESGO (CONSECUENCIAS DEL RIESGO)	CONTROLES
1	EQUIPOS Y VEHICULOS MÓVILES	COLISIÓN, CHOQUE, DESPISTE O VOLCADURA Mortalidad de una o más personas. Lesión incapacitante total permanente. Lesión incapacitante parcial permanente. lesión incapacitante parcial temporal. Lesión incapacitante total temporal. (Por pérdida de control de equipo/vehículo)	Matriz de bloqueo de equipos/vehículo, uso de tag out-log out. Reglamento interno de tránsito (RITRA). Procedimientos de operación de equipos y vehículos. Procedimientos y estándares (Transporte de personal, carga, acarreo, descarga e izaje). Guarda vías e instalación de ojos de gato. Señalización de las vías y refugios vehicular/peatonal. Licencia Interna de Conducir. Capacitación en RITRA.

2	ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO	DESPRENDIMIENTO DE ROCA Mortalidad de una o más personas. Lesión incapacitante total permanente. Lesión incapacitante parcial permanente. lesión incapacitante parcial temporal. Lesión incapacitante total temporal. (Por pérdida de estabilidad del macizo rocoso)	Desatado manual de rocas sueltas. Desatado mecanizado de rocas sueltas (secciones mayores de 4 metros). Campaña semanal de desatado de rocas sueltas. Sostenimiento con split set, pernos helicoidales, malla electrosoldada, shotcrete, cuadros o cimbras (según recomendación del área de geomecánica). Inspección de Barretillas. Aplicación de cartilla Geomecánica. Procedimientos y estándares de desatado de rocas sueltas. Capacitación en desatado de rocas Uso de EPPs
3	EXPLOSIVOS	EXPLOSIÓN Mortalidad de una o más personas. Lesión incapacitante total permanente. Lesión incapacitante parcial permanente.	Aplicación de protocolos de voladura. Procedimientos y estándares de almacenamientos de explosivos. Procedimientos y estándares de

		(Por liberación intempestiva de energía)	transporte de explosivos. Procedimientos de manipulación y uso de los explosivos. Inspección de polvorines.
4	SUSTANCIAS QUÍMICAS	EXPOSICIÓN A SUSTANCIAS ASFIXIANTES (GASES Y VAPORES) EN EL AMBIENTE Derrame de sustancias químicas Inhalación de sustancias asfixiantes Inhalación de gases tóxicos Contacto químico por vía: cutánea, respiratoria, digestiva y ocular (Por pérdida de contención/contacto de sustancias químicas)	Uso de equipos de medición de gases. Diseño del sistema de ventilación Delimitación de labores. Aplicación del PETAR
5	VENTILACIÓN	EXPOSICION A GASES TÓXICOS Intoxicación Mortalidad de una o más personas,	Uso de equipos de medición de gases. Bloqueo y señalización de labores paralizadas. Procedimientos y estándares de ventilación. Procedimientos y estándares de medición de gases en interior

			mina. Procedimientos y estándares de bloqueo de labores paralizadas. Uso de autorrescatadores y balón de oxígeno
6	ENERGÍA ELÉCTRICA	CONTACTO CON EQUIPOS E INSTALACIONES CON ENERGÍA ELÉCTRICA Mortalidad de una o más personas. Lesión incapacitante total permanente. Lesión incapacitante parcial permanente. lesión incapacitante parcial temporal. Lesión incapacitante total temporal. (Por inducción de energía eléctrica).	Inspección de subestaciones. Inspección de pozas a tierra. Estándares y PETS para instalaciones eléctricas. Bloqueo y señalización de equipos e instalaciones con energía. Inspección de EPPs. Uso de lock out / tag out.
7	TRABAJO EN ALTURA	CAÍDA A DISTINTO NIVEL Muerte por caída a distinto nivel lesión incapacitante total permanente, lesión incapacitante parcial permanente, lesión incapacitante total	Delimitación de labores. Uso de equipo anticaída. inspección de arnés, línea de vida y línea de anclaje Inspección de escaleras/andamios

		temporal (por caída a diferente nivel del equipo o personas)	Capacitación en trabajos en altura Aplicación del PETAR
8	ESPACIOS CONFINADOS	ATRAPAMIENTO, EXPOSICIÓN A GASES Mortalidad de una o más personas, lesión incapacitante total permanente, lesión incapacitante parcial permanente, lesión incapacitante total temporal (Por inhalación de gases tóxicos)	Uso de equipos de medición de gases. Diseño del sistema de ventilación Delimitación de labores. Aplicación del PETAR
RIESGO CRÍTICOS DE SALUD EN EL TRABAJO			
	PELIGRO	RIESGO (CONSECUENCIAS DEL RIESGO)	CONTROLES
9	POLVO (Producido por disparo, carguío de material, perforación, falta de regado)	EXPOSICIÓN A POLVO Neumoconiosis, Silicosis.	Regado de vías en interior mina y superficie. Monitoreo de polvo. Capacitación en prevención de protección respiratoria Control médico anual. EPP para protección respiratoria.

10	RUIDO (Proveniente del equipo de acarreo, ventiladores, maquinas perforadoras, chancadora, molinos y casa compresoras)	EXPOSICION A RUIDO Pérdida de la audición, hipoacusia	Monitoreo de ruido. Letreros de uso obligatorio de EPPs. Capacitación en prevención de conservación auditiva Control médico anual. EPP para protección Auditiva (orejeras/tapón, doble protección)
----	--	---	--



IV. DISCUSION

El presente estudio demostró un incremento positivo de la cobertura de aire limpio al conseguir el 100% de cobertura, pero es esencial considerar factores que permitan aportar a la mejora la ventilación de las labores subterráneas de varias maneras.

- Dilución de contaminantes: Un flujo de aire adecuado ayuda a diluir gases tóxicos y explosivos a niveles permisibles, así como a mantener la calidad del aire al reducir el nivel de partículas como polvo, humo y otros contaminantes [36].
- Suministro de oxígeno: Proporciona suficiente oxígeno para la respiración del personal y para la combustión de los equipos diésel [11].
- Control de la temperatura y la humedad: Ayuda a regular la temperatura en zonas calurosas y a mantener un ambiente de trabajo confortable. La ventilación también influye en el control de las condiciones térmicas y de humedad en la zona de trabajo [8].
- Mejora de la productividad y seguridad: Un buen sistema de ventilación contribuye a la seguridad en las operaciones mineras subterráneas y permite lograr el cumplimiento de la producción programada. La eficacia de la ventilación permite obtener mejores rendimientos y acortar los tiempos de espera para la evacuación de los gases de tronadura, mejorando la productividad [3], [10].
- Reducción de riesgos laborales: Disminuye los riesgos de catástrofes y accidentes bajo tierra, mejorando el rendimiento de las operaciones [26].
- Además, el incremento de la cobertura de aire puede estar relacionado con la implementación de sistemas de ventilación más eficientes, como la

ventilación mecánica o auxiliar, que permiten un mejor control de la calidad del aire en zonas específicas de la mina. También puede implicar mejoras en la infraestructura, como la construcción de chimeneas y reguladores, para optimizar los flujos de salida y reducir la recirculación de aire viciado [13].

Respecto a las estrategias para mitigar riesgos relacionadas con la ventilación es esencial contar con un sistema de ventilación que, además de ser diseñado adecuadamente, reciba un mantenimiento constante para asegurar un flujo de aire óptimo y una distribución homogénea en todas las áreas de la mina. Esto implica seleccionar los ventiladores correctos, instalar de manera eficiente los conductos y aplicar sistemas de control precisos [12]. Asimismo, un monitoreo permanente de las condiciones atmosféricas, incluyendo la concentración de gases, partículas en suspensión, temperatura y humedad, permite identificar de forma temprana cualquier deficiencia en la ventilación y tomar las medidas correctivas pertinentes [9]. Además, la formación adecuada de los trabajadores sobre los riesgos inherentes a la ventilación y la promoción de prácticas seguras son fundamentales para el mantenimiento de condiciones seguras [26]. También, la aplicación de software especializado para modelar el sistema de ventilación permite evaluar diferentes escenarios y perfeccionar el diseño del circuito, asegurando así una gestión más eficiente del flujo de aire [26].

En síntesis, un manejo integral de los riesgos en la ventilación constituye un pilar fundamental para garantizar condiciones seguras y óptimas en las operaciones subterráneas, repercutiendo positivamente en la seguridad, la salud de los trabajadores y la productividad de la mina.

V. CONCLUSIONES

- 1°. Se determinó que al incrementar la cobertura de aire de 80 a 100% mejora la ventilación de minas en labores por la instalación de un ventilador extractor de 150 000 CFM que aunado a ventiladores principales y secundarios tiene un ingreso de aire de 1 1231 44 CFM, con un superávit de 16 337 CFM.
- 2°. En la zona cuerpos Casapalca, M y Esperanza, se logró mejorar la ventilación de minas, al elevar la cobertura de aire en 2 293, 10 613 y 24 852 CFM o 101, 106 y 121% respectivamente del mínimo requerido.
- 3°. En la zona cuerpos Casapalca, M y Esperanza, se logró mejorar la ventilación de minas, al elevar la cobertura de aire en 21 635, 10 399 y 10 613 CFM o 113, 117 y 106% respectivamente del mínimo requerido.
- 4°. El riesgo potencial con mayor relevancia evaluado fue la intoxicación por gases tóxicos, el cual se elaboró sus controles que son implementación de equipos de medición de gases, bloqueo de labores paralizadas, aplicación de PETS, uso de autorrescatadores.

VI. RECOMENDACIONES

- 1º. Se recomienda la capacitación del personal responsable de la ventilación para asegurar un manejo adecuado de los sistemas y la supervisión continua de las condiciones ambientales y de ventilación en la mina. Dicho personal debe monitorear periódicamente, al menos mensualmente en áreas interiores y de forma diaria en zonas de alto riesgo, siguiendo lo estipulado en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional DS N° 024-2016-EM y su modificatoria D.S.023-2017-EM, lo que implica disponer de equipos de monitoreo en óptimas condiciones y calibrados.
- 2º. Además, se debe instruir al personal en la correcta instalación y operación de las mangas de ventilación, considerando que las mangas nuevas deben situarse próximas al ventilador, mientras que aquellas con mayor deterioro se deben ubicar hacia el extremo final de la línea, cercano al frente de disparo.
- 3º. Finalmente, se propone la implementación de ventiladores en estado de reserva, con caudales de 30,000 cfm, 20,000 cfm y 10,000 cfm, destinados a reemplazar aquellos programados para mantenimiento preventivo, asegurando así la continuidad operativa del sistema de ventilación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Taípe, “El Sistema de Ventilación Subterránea para cubrir los Requerimientos de aire en la Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2021. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9091>
- [2] Zitron, “Ventilación de minas”, 12/03/2010. [En línea]. Disponible en: <https://zitron.com/?lang=es>
- [3] E. Quispe, “Modelamiento del sistema de ventilación para mejoramiento de cobertura de aire fresco en Unidad Minera Parcoy – Consorcio Minero Horizonte (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2021. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7756>
- [4] J. Cheng, S. Li, F. Zhang, C. Zhao, S. Yang, y A. Ghosh, “CFD modelling of ventilation optimization for improving mine safety in longwall working faces”, *J Loss Prev Process Ind*, vol. 40, pp. 285–297, 2016, Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.01.004>
- [5] L. Zavala, “Evaluación del sistema de ventilación para mejorar deficiencia de aire en mina Antapite de Empresa Sierra Antapite S.A.C. 2022 (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2022. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8298>

- [6] W. Dziurzynski, A. Krach, y T. Palka, "Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling", *Energies (Basel)*, vol. 10, núm. 10, 2017, Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en10101451>
- [7] P. Chang, G. Xu, F. Zhou, B. Mullins, S. Abishek, y D. Chalmers, "Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 87, pp. 112–121, 2019, Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.014>
- [8] D. Canuza y J. Pérez, "Análisis de ventilación de mina aplicado en la empresa GRUMINTOR S.A. (Tesis de pregrado)", Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2023. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/19461>
- [9] G. Ortega, "Simulación del sistema de ventilación en la empresa GRUMINTOR S.A. (Tesis de pregrado)", Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2023. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/19469>
- [10] P. Barrera y P. Pesántez, "Diseño y optimización del circuito de ventilación en el tramo norte-sur de la mina "Goldmins", Zaruma – El Oro (Tesis de pregrado)", Universidad del Azuay, Cuenca, 2020. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9628>

- [11] M. Valarezo, "Diseño del sistema de ventilación en la concesión minera 'Cebal' 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 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10146>
- [12] D. Coral, "Ampliación de la capacidad del circuito de ventilación para incrementar la cobertura de aire subterráneo en la mina Contonga de Tierra Group International LTD (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional del Centro el Perú, Huancayo, 2024. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10624>
- [13] C. Liberato, "Mejoramiento de la Ventilación Mediante el Adecuado Balance de Aire en la Mina Yauricocha – Sociedad Minera Corona S.A. (Tesis de pregrado)", Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2023. Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9688>
- [14] J. Toraño Álvarez, *La ventilación y la energía en minería y obras subterráneas: ventilación, electrificación, iluminación, aire comprimido*. 2004.
- [15] 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)
- [16] E. Yanes Garin, *Ventilación de Minas*. 1993.

- [17] 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
- [18] 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=TpV5xhfLlnxQmizKCzJz2ZavppyaeR50m3zTcxbjGJCwxTpddhUCsjVFvucwxwjGk0Q4hxtOxbpTP3eLx~OjXsFBBVCpB
- [19] 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
- [20] 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>
- [21] E. Urrutia, “Diseño y metodología de cálculo para la optimización de sistemas de ventilación en minas subterráneas (Tesis de pregrado)”, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2010. Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:

<https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/605fb30a-640c-4a8b-9c5e-2a55c9b51812>

- [22] 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.
- [23] R. Vergaray, "Optimización del sistema de ventilación de la mina Charito, Compañía Minera Poderosa S.A. (Titulación en Ingeniero de Minas)", Universidad Nacional de Trujillo, 2017.
- [24] P. Lozano, "Incremento de capacidad de ventilación en zonas de cuerpos en Cia Minera Casapalca S.A. (Titulación en Ingeniero de Minas)", Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
- [25] D. Chacha, "Sistema de ventilación para labores subterráneas de la Empresa PRODUMIN S.A. (Titulación en Ingeniero en Geología y Minas)", Escuela Politécnica de Chimborazo, 2016.
- [26] 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
- [27] C. Porras-Amores, F. Mazarrón, I. Cañas, y P. Villoría, "Natural ventilation analysis in an underground construction: CFD simulation and experimental validation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 90, pp. 162–173, 2019, Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.023>

- [28] 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=1799>
- [29] C. Cruz, S. Olivares, y M. Gonzáles, *Metodología de la investigación*. México D.F: Patria, 2014.
- [30] G. Baena, *Metodología de la Investigación*, 3era ed. México D.F: Grupo Editorial Patria, 2017.
- [31] 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
- [32] M. Cortés Cortés y M. Iglesias León, *Generalidades sobre metodología de la investigación*. Campeche, México: Universidad Autónoma del Carmen, 2004. Consultado: el 16 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- [33] J. Hurtado, *Metodología de la Investigación Holística*, 3era ed. Caracas: Fundación Sypal, 2000.
- [34] 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](#)

- [35] S. Carrasco, *Metodología de la Investigación*, 2da Edició. Lima: Editorial San Marcos, 2008.
- [36] J. R. Duran Janampa, "Mejoramiento de la ventilación en la mina subterránea - Mina Colquijirca Cia. de Minas Buenaventura S.A.A. (Titulación en Ingeniero de Minas)", Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2018. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/512/1/T026_72490254_T.pdf





VIII. ANEXOS

Anexo N°1: Operacionalización de variables

VARIABLES	TIPO DE VARIABLE	INDICADORES	TÉCNICA/INSTRUMENTO
VARIABLE X: INCREMENTO DE LA COBERTURA DE AIRE	CUANTITATIVO	• Cobertura de aire en Zona Cuerpos • Cobertura de aire en Zona Vetas • Control de riesgos potenciales	Técnica de la observación directa y el fichaje
VARIABLE Y: VENTILACIÓN DE LABORES SUBTERRÁNEAS	CUALITATIVO	• Calidad en el flujo de aire • Cumplimiento de objetivos y metas operativas • Minimización de incidentes y accidentes por gaseamiento	Técnica de la observación directa

Anexo N° 2: Matriz de consistencia

INCREMENTO DE LA COBERTURA DE AIRE EN LA MEJORA DE LA VENTILACIÓN DE LABORES SUBTERRÁNEAS – ALPAYANA 2024

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general		- Cobertura de aire en Zona Cuerpos - Cobertura de aire en Zona Vetas - Control de riesgos potenciales	Tipo: Aplicativa Nivel: Descriptiva Diseño: Descriptiva comparativa Población: La población estará conformada por todas las zonas en operaciones de explotación minera en la Unidad Minera Alpayana, en el año 2024. Muestra: La investigación estará conformada por la
¿De qué manera el incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?	Determinar que el incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024.	El incremento de la cobertura de aire mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024	Variable X: INCREMENTO DE LA COBERTURA DE AIRE		
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		- Calidad en el flujo de aire - Cumplimiento de objetivos y metas operativas - Minimización de incidentes y	
¿De qué manera el incremento de la cobertura de aire en Zona Cuerpos mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?	Determinar que el incremento de la cobertura de aire en Zona Cuerpos mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024.	El incremento de la cobertura de aire en Zona Cuerpos mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024	Variable Y: VENTILACIÓN DE LABORES SUBTERRÁNEAS		
¿De qué manera el incremento de la cobertura de aire en Zona Vetas mejora la ventilación de labores	Determinar que el incremento de la cobertura de aire en Zona Vetas mejora la ventilación de labores	El incremento de la cobertura de aire en Zona Vetas mejora la ventilación de labores			

subterráneas – Alpayana 2024? ¿De qué manera el control de riesgos potenciales mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024?	subterráneas – Alpayana 2024. Determinar que el control de riesgos potenciales mejora la ventilación de labores subterráneas – Alpayana 2024	subterráneas – Alpayana 2024 El control de riesgos potenciales mejora la ventilación de labores – subterráneas – Alpayana 2024		accidentes por gaseamiento	Zona Cuerpos Veta Alessa, Veta C, Veta Esperanza, Cuerpo M y Cuerpo Esperanza, en el año 2024. Técnicas: La observación directa y el fichaje
--	---	---	--	-------------------------------	---

Anexo N° 3: Ubicación



Anexo N° 4: Procedimientos de las actividades en ventilación

En área de ventilación cuenta parcialmente 42 actividades, cada uno de ellos cuenta con sus respectivos procedimientos y estándares de trabajo.

ÍTEMS	ACTIVIDADES
1	Evaluación integral de ventilación
2	Evaluación local de labores en operación
3	Evaluación de ventilación para reinicio de labores
4	Monitoreo de gases en ambiente de trabajo
5	Monitoreos de emisiones de CO y NO2 en equipos diesel
6	Carga de materiales en camión (tablas y puntales)
7	Traslado de materiales en camión (tablas y puntales)
8	Descarga de materiales en camión (tablas y puntales)
9	Carga de materiales en plataforma (tablas y puntales)
10	Traslado de materiales en plataforma (tablas y puntales)
11	Descarga de materiales en plataforma (tablas y puntales)
12	Carga de ventilador en scooptrams
13	Traslado de ventilador en scooptrams
14	Descarga de ventilador del scooptrams
15	Carguio de ventilador en camión
16	Traslado de ventilador en camión
17	Descarga de ventilador del camión
18	Carguio de ventilador en plataforma en labores horizontales
19	Traslado de ventilador en plataforma en labores horizontales
20	Descarga de ventilador de la plataforma en labores horizontales
21	Carguio de ventilador en plataforma en labores inclinados
22	Traslado de ventilador en plataforma en labores inclinados
23	Descarga del ventilador de la plataforma en labores inclinados
24	Instalación de cáncamos
25	Construcción de plataforma
26	Instalar ventilador en plataforma con scooptrams
27	Retiro de ventiladores en plataforma con scooptrams
28	Instalar ventilador suspendido en labores horizontales
29	Retiro de ventilador suspendido en labores horizontales
30	Instalar ventilador suspendido en labores inclinados
31	Retiro de ventilador suspendido en labores inclinados
32	Instalación de mangas de ventilación en labores horizontales
33	Retiro de mangas de ventilación en labores horizontales
34	Instalación de mangas de ventilación en labores verticales
35	Retiro de mangas de ventilación en labores verticales
36	Instalación de mangas de ventilación en inclinados
37	Retiro de mangas de ventilación en inclinados
38	Construcción de puertas

39	Construcción de tapones con madera
40	Construcción de tapones con concreto
41	Construcciones de bloqueo temporal
42	Limpieza de cámaras de ventiladores principales



Anexo N° 5: Programa anual de mantenimiento de ventiladores

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DE VENTILADORES 2024																	
ITEM	VENTILADOR N°	TIPO DE VENTILADOR	CFM*	POTENCIA		2024											
				HP		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	110	PRINCIPAL	150,000	400	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
2	100	PRINCIPAL	150,000	400	PROG.		X						X				
					EJEC.												
3	109	PRINCIPAL	150,000	400	PROG.			X						X			
					EJEC.												
4	002	AUXILIAR	11,500	25	PROG.				X						X		
					EJEC.												
5	023	AUXILIAR	12,000	30	PROG.					X						X	
					EJEC.												
6	021	AUXILIAR	20,000	45	PROG.						X						X

					EJEC.												
7	026	AUXILIAR	10,000	30	PROG.					X						X	
					EJEC.												
8	060	AUXILIAR	7,500	25	PROG.				X						X		
					EJEC.												
9	064	AUXILIAR	20,000	45	PROG.			X						X			
					EJEC.												
10	030	AUXILIAR	30,000	75	PROG.		X						X				
					EJEC.												
11	069	AUXILIAR	20,000	50	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
12	080	AUXILIAR	30,000	75	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
13	013 a	AUXILIAR	10,000	30	PROG.		X						X				
					EJEC.												
14	093	AUXILIAR	20,000	50	PROG.			X						X			
					EJEC.												

15	066	AUXILIAR	20,000	50	PROG.				X						X		
					EJEC.												
16	040	AUXILIAR	20,000	30	PROG.					X						X	
					EJEC.												
17	113	AUXILIAR	30,000	75	PROG.						X						X
					EJEC.												
18	095	AUXILIAR	20,000	50	PROG.					X						X	
					EJEC.												
19	039	AUXILIAR	20,000	30	PROG.				X						X		
					EJEC.												
20	105	AUXILIAR	30,000	75	PROG.			X						X			
					EJEC.												
21	022	AUXILIAR	20,000	50	PROG.		X						X				
					EJEC.												
22	041	AUXILIAR	3,000	3	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
23	068	AUXILIAR	10,000	30	PROG.	X						X					

					EJEC.	X											
24	072	AUXILIAR	60,000	150	PROG.		X						X				
					EJEC.												
25	096	AUXILIAR	60,000	150	PROG.			X						X			
					EJEC.												
26	017	AUXILIAR	3,000	3.5	PROG.				X						X		
					EJEC.												
27	001	AUXILIAR	60,000	150	PROG.					X						X	
					EJEC.												
28	036	AUXILIAR	20,000	30	PROG.						X						X
					EJEC.												
29	061	AUXILIAR	60,000	150	PROG.					X						X	
					EJEC.												
30	077	AUXILIAR	30,000	75	PROG.				X						X		
					EJEC.												
31	101	AUXILIAR	60,000	150	PROG.			X						X			
					EJEC.												

32	003	AUXILIAR	5,000	7.5	PROG.		X						X				
					EJEC.												
33	053	AUXILIAR	10,000	30	PROG.	X							X				
					EJEC.	X											
34	081	AUXILIAR	10,000	30	PROG.	X							X				
					EJEC.	X											
35	099	AUXILIAR	40,000	100	PROG.		X						X				
					EJEC.												
36	042	AUXILIAR	30,000	100	PROG.			X						X			
					EJEC.												
37	104	AUXILIAR	30,000	75	PROG.				X						X		
					EJEC.												
38	035	AUXILIAR	20,000	45	PROG.					X						X	
					EJEC.												
39	078	AUXILIAR	30,000	75	PROG.						X						X
					EJEC.												
40	020	AUXILIAR	20,000	30	PROG.					X						X	

					EJEC.												
41	045	AUXILIAR	20,000	50	PROG.				X							X	
					EJEC.												
42	114	AUXILIAR	30,000	75	PROG.			X							X		
					EJEC.												
43	075	AUXILIAR	30,000	75	PROG.		X							X			
					EJEC.												
44	028	AUXILIAR	20,000	45	PROG.	X							X				
					EJEC.	X											
45	027	AUXILIAR	20,000	45	PROG.	X							X				
					EJEC.	X											
46	024	AUXILIAR	10,000	30	PROG.		X							X			
					EJEC.												
47	029 a	AUXILIAR	10,000	30	PROG.			X							X		
					EJEC.												
48	008	AUXILIAR	10,000	25	PROG.				X							X	
					EJEC.												

49	018	AUXILIAR	10,000	25	PROG.					X						X	
					EJEC.												
50	037	AUXILIAR	5,000	7.5	PROG.						X						X
					EJEC.												
51	006	AUXILIAR	7,500	10	PROG.					X						X	
					EJEC.												
52	076	AUXILIAR	10,000	30	PROG.				X							X	
					EJEC.												
53	102	AUXILIAR	15,000	35	PROG.			X						X			
					EJEC.												
54	011	AUXILIAR	5,000	7.5	PROG.		X						X				
					EJEC.												
55	111	AUXILIAR	30,000	75	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
56	112	AUXILIAR	30,000	75	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
57	063	AUXILIAR	30,000	75	PROG.		X						X				

					EJEC.												
58	071	AUXILIAR	30,000	75	PROG.			X						X			
					EJEC.												
59	085	AUXILIAR	5,000	15	PROG.				X						X		
					EJEC.												
60	092	AUXILIAR	10,000	30	PROG.					X						X	
					EJEC.												
61	015	AUXILIAR	11,500	25	PROG.						X						X
					EJEC.												
62	016	AUXILIAR	40,000	100	PROG.					X						X	
					EJEC.												
63	019	AUXILIAR	20,000	45	PROG.				X						X		
					EJEC.												
64	004	AUXILIAR	30,000	75	PROG.			X						X			
					EJEC.												
65	082	AUXILIAR	20,000	50	PROG.		X						X				
					EJEC.												

66	088	AUXILIAR	7,500	20	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
67	087	AUXILIAR	7,500	25	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
68	013	AUXILIAR	5,000	7.5	PROG.		X						X				
					EJEC.												
69	029	AUXILIAR	10,000	30	PROG.			X						X			
					EJEC.												
70	010	AUXILIAR	7,500	15	PROG.				X						X		
					EJEC.												
71	090	AUXILIAR	7,500	20	PROG.					X						X	
					EJEC.												
72	005	AUXILIAR	20,000	45	PROG.						X						X
					EJEC.												
73	086	AUXILIAR	5,000	15	PROG.					X						X	
					EJEC.												
74	056	AUXILIAR	5,000	15	PROG.				X						X		

					EJEC.												
75	067	AUXILIAR	20,000	50	PROG.			X						X			
					EJEC.												
76	073	AUXILIAR	40,000	100	PROG.		X						X				
					EJEC.												
77	084	AUXILIAR	5,000	15	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
78	055	AUXILIAR	5,000	15	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											
79	057	AUXILIAR	20,000	50	PROG.		X						X				
					EJEC.												
80	058	AUXILIAR	20,000	50	PROG.			X						X			
					EJEC.												
81	091	AUXILIAR	10,000	30	PROG.				X						X		
					EJEC.												
82	083	AUXILIAR	5,000	15	PROG.					X						X	
					EJEC.												

83	009	AUXILIAR	5,000	7.5	PROG.						X						X
					EJEC.												
84	033	AUXILIAR	60,000	150	PROG.					X							X
					EJEC.												
85	065	AUXILIAR	30,000	75	PROG.				X							X	
					EJEC.												
86	079	AUXILIAR	30,000	75	PROG.			X							X		
					EJEC.												
87	089	AUXILIAR	7,500	20	PROG.		X							X			
					EJEC.												
88	098	SECUNDARIO	40,000	100	PROG.	X							X				
					EJEC.	X											
89	043	SECUNDARIO	40,000	100	PROG.	X							X				
					EJEC.	X											
90	108	SECUNDARIO	40,000	100	PROG.		X							X			
					EJEC.												
91	054	SECUNDARIO	60,000	150	PROG.			X							X		

					EJEC.												
92	050	SECUNDARIO	60,000	150	PROG.				X						X		
					EJEC.												
93	052	SECUNDARIO	40,000	100	PROG.					X						X	
					EJEC.												
94	062	AUXILIAR	30,000	75	PROG.						X						X
					EJEC.												
95	074	AUXILIAR	30,000	75	PROG.					X						X	
					EJEC.												
96	059	AUXILIAR	10,000	30	PROG.				X						X		
					EJEC.												
97	014	AUXILIAR	5,000	7.5	PROG.			X							X		
					EJEC.												
98	044	AUXILIAR	10,000	30	PROG.		X						X				
					EJEC.												
99	120	PRINCIPAL	150,000	400	PROG.	X						X					
					EJEC.	X											

