



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Propuesta de distribución de la red de ventilación para mejorar las
condiciones ambientales y el confort térmico en una unidad minera,
Arequipa - 2025**

Tesis presentada por:

Flores Geldres, Harold Edgard

ORCID: 0009-0006-3319-646X

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesora:

Dra. Lopez Casaperalta De Diaz, Patricia Yaneth

ORCID: 0000-0001-5853-2833

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 03 de Julio del 2026

Dictamen: 013706-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 013706, presentado por:

2015600401 - FLORES GELDRES HAROLD EDGARD

Titulado:

**PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN DE LA RED DE VENTILACIÓN PARA MEJORAR LAS
CONDICIONES AMBIENTALES Y EL CONFORT TÉRMICO EN UNA UNIDAD MINERA, AREQUIPA -
2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN DE LA RED DE VENTILACIÓN PARA MEJORAR LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y EL CONFORT TÉRMICO EN UNA UNIDAD MINERA, AREQUIPA - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	15%	3%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	2%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.uncp.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
3	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.unsa.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	Submitted to Universidad Católica de Santa María	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	repositorio.uni.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.unamba.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	repositorio.unasam.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	alicia.concytec.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria	<1%
	Trabajo del estudiante	
12	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
13	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
14	repositorio.uap.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

dspace.uazuay.edu.ec

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, salud y perseverancia necesarias para culminar esta etapa importante de mi formación profesional. A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante, quienes han sido el pilar fundamental en cada desafío afrontado a lo largo de este proceso académico. Asimismo, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron a que este objetivo se haga realidad.



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María por la formación académica recibida y por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo del presente trabajo de investigación. De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis por su orientación, dedicación y valiosos aportes técnicos durante el desarrollo de la investigación. Asimismo, agradezco al personal de la unidad minera por facilitar la información y el acceso necesario para la realización del estudio. Finalmente, agradezco a mis docentes, compañeros y a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron con su apoyo y conocimiento al logro de este trabajo.

RESUMEN

La ventilación minera constituye un elemento fundamental para garantizar condiciones seguras de trabajo, controlar la dilución de contaminantes y mantener un adecuado confort térmico en las labores subterráneas. El presente estudio tiene como objetivo Proponer una distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento y planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim™ Design, con el fin de mejorar las condiciones ambientales y el confort térmico en unidad minera ubicada en Arequipa, a partir del análisis del sistema de ventilación existente. Para ello, se realizó un estudio integral que incluyó mediciones de campo de caudales, velocidades del aire y condiciones ambientales, así como la evaluación de pérdidas de carga y la eficiencia del sistema. Posteriormente, la red de ventilación fue modelada y simulada utilizando el software Ventsim Design, lo que permitió identificar deficiencias en la distribución del flujo de aire y evaluar escenarios de mejora. Los resultados obtenidos evidencian que la propuesta de redistribución de la red de ventilación permite una asignación más eficiente de los caudales de aire, una reducción de pérdidas energéticas y una mejora significativa en el control de contaminantes y el confort térmico en las labores críticas. Asimismo, se realizó una estimación de los costos de inversión y operación asociados a la propuesta, demostrando su viabilidad técnica y económica, y constituyendo una herramienta de apoyo para la toma de decisiones orientadas a una gestión eficiente y sostenible del sistema de ventilación minera.

Palabras clave: Condición ambiental, confort térmico, velocidad de aire.

ABSTRACT

Mine ventilation is a fundamental element for ensuring safe working conditions, controlling the dilution of contaminants, and maintaining adequate thermal comfort in underground operations. The objective of this study is to propose a ventilation network distribution based on a comprehensive analysis of the ventilation system, as well as medium- and long-term modeling and planning using Ventsim™ Design software, in order to improve environmental conditions and thermal comfort in a mining unit located in Arequipa, through the evaluation of the existing ventilation system. To this end, an integral study was conducted that included field measurements of airflow rates, air velocities, and environmental conditions, as well as the assessment of pressure losses and system efficiency. Subsequently, the ventilation network was modeled and simulated using Ventsim Design software, which made it possible to identify deficiencies in airflow distribution and to evaluate improvement scenarios. The results demonstrate that the proposed redistribution of the ventilation network allows for a more efficient allocation of airflow, a reduction in energy losses, and a significant improvement in contaminant control and thermal comfort in critical working areas. In addition, an estimation of the capital and operating costs associated with the proposal was carried out, demonstrating its technical and economic feasibility and providing a decision-support tool for efficient and sustainable management of the mine ventilation system.

Keywords: Environmental conditions, thermal comfort, air velocity.

ÍNDICE

DEDICATORIA

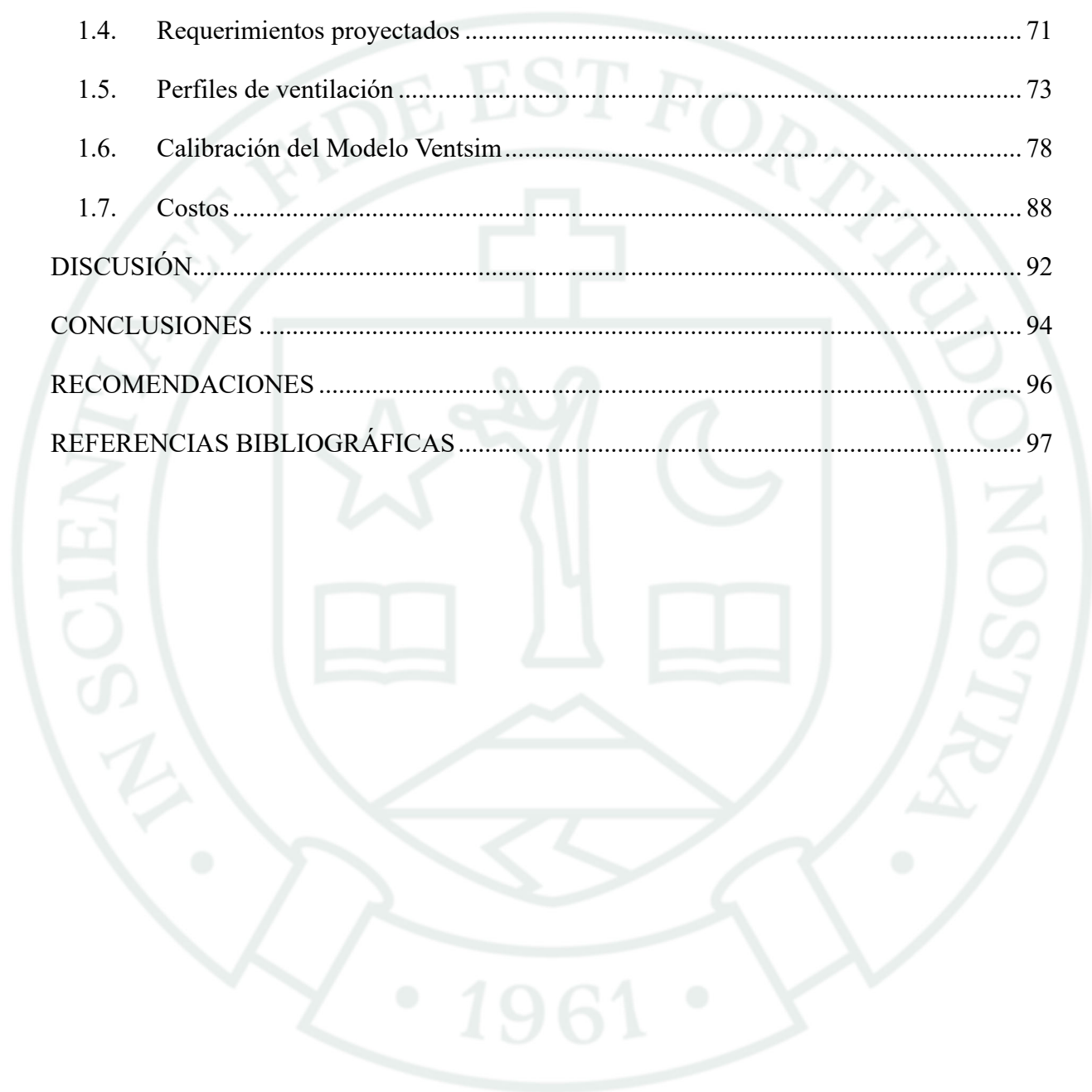
AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. Planteamiento del problema	3
1.1. Problemática de investigación.....	3
1.2. Formulación del problema	5
1.3. Justificación.....	6
1.4. Objetivos de la investigación	8
1.5. Hipótesis.....	9
CAPÍTULO II	10
1. Fundamento teórico.....	11
1.1. Antecedentes de la investigación	11
1.2. Estado de arte	21
1.3. Marco teórico	27
1.4. Marco legal.....	42
CAPÍTULO III	43
1. Metodología	44
1.1. Tipo y nivel de investigación	44
1.2. Diseño de investigación	45
1.3. Métodos de investigación.....	46
1.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	46
CAPÍTULO IV	47

1. Resultados	48
1.1. Medición del aforo	48
1.2. Requerimiento y cobertura actual de mina.....	54
1.3. Análisis de velocidad de aire.....	66
1.4. Requerimientos proyectados	71
1.5. Perfiles de ventilación	73
1.6. Calibración del Modelo Ventsim.....	78
1.7. Costos.....	88
DISCUSIÓN.....	92
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites máximos permisibles.....	30
Tabla 2 Ventajas y desventajas de ventilación natural.....	33
Tabla 3 Funciones y parámetros del aire de mina	37
Tabla 4 Gases presentes en mina.....	38
Tabla 5 Marco legal aplicable a la ventilación minera.....	42
Tabla 6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	46
Tabla 7 Ingresos de aire.....	49
Tabla 8 Salida de aire	51
Tabla 9 Requerimiento y cobertura actual de mina.....	54
Tabla 10 Balance de entrada y salida	56
Tabla 11 Balance total de aire	57
Tabla 12 Requerimiento por personal	58
Tabla 13 Requerimiento por explosivos.....	61
Tabla 14 Requerimiento por consumo de madera.....	63
Tabla 15 Requerimiento por fugas	64
Tabla 16 Análisis de velocidad de aire	66
Tabla 17 Requerimientos proyectados	71
Tabla 18 Perfiles de ventilación - Zona Esperanza	73
Tabla 19 Perfiles de ventilación - Zona Consuelo.....	75
Tabla 20 Calibración del modelo Ventsim	78
Tabla 21 Calibración del modelo Ventsim, total salida.....	80
Tabla 22 Calibraciones de estaciones secundarias	82
Tabla 23 Costos operativos	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ejemplo de ventilación de minas	27
Figura 2 Gráfico de ventilación de mina	28
Figura 3 Ventilación natural	32
Figura 4 Requerimiento de temperatura	60
Figura 5 Gráficos de estaciones secundarias de monitoreo	68
Figura 6 Histograma de velocidades	69
Figura 7 Plano realizado en la toma de data insitu en puntos estratégicos	70
Figura 8 Zona Esperanza	75
Figura 9 Zona Consuelo	77
Figura 10 Factor de fricción	86
Figura 11 Factor de fricción	86
Figura 12 Caracterización de los ventiladores	87
Figura 13 Toma de muestra insitu	87

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Matriz de operacionalización de variables	102
Anexo 2 Matriz de consistencia	103
Anexo 3 Proyectos	106



INTRODUCCIÓN

La ventilación en unidades mineras constituye un sistema crítico para garantizar condiciones ambientales adecuadas, seguridad operativa y confort térmico del personal que labora en espacios confinados y subterráneos. En zonas de explotación minera, especialmente en regiones como Arequipa, donde las condiciones geográficas, climáticas y operativas influyen directamente en el comportamiento térmico del ambiente, una red de ventilación mal distribuida puede generar acumulación de contaminantes, deficiencias en la renovación del aire y elevadas cargas térmicas que afectan el desempeño laboral y la salud ocupacional. (García, 2023)

En la unidad minera, se han identificado deficiencias en la distribución de la red de ventilación, tales como flujos de aire no homogéneos, zonas con ventilación insuficiente y una limitada eficiencia en la evacuación de calor y contaminantes. Estas condiciones repercuten negativamente en el confort térmico de los trabajadores y en el cumplimiento de los estándares normativos de seguridad y salud en minería, lo que hace necesaria una intervención técnica orientada a optimizar el sistema existente mediante criterios de ingeniería, eficiencia energética y normativas vigentes. (Chilon, 2022)

Asimismo, en este contexto, la presente investigación plantea una propuesta de distribución de la red de ventilación con el propósito de mejorar las condiciones ambientales internas y el confort térmico en una unidad minera ubicada en Arequipa. La propuesta se fundamenta en el análisis técnico de las condiciones actuales, el dimensionamiento adecuado de conductos y equipos, y la optimización de los flujos de aire, buscando no solo incrementar la eficiencia del sistema de ventilación, sino también contribuir a la seguridad, productividad y bienestar del personal, alineándose con los principios de sostenibilidad y gestión integral en la actividad minera. (Espinoza et al, 2021)



1. Planteamiento del problema

1.1. Problemática de investigación

A nivel mundial, la actividad minera enfrenta crecientes desafíos relacionados con la gestión de las condiciones ambientales internas en labores subterráneas y áreas confinadas. El incremento de la profundidad de explotación, la mecanización intensiva y el uso continuo de equipos diésel y eléctricos generan mayores cargas térmicas y concentraciones de contaminantes, lo que exige sistemas de ventilación cada vez más eficientes y correctamente distribuidos. Sin embargo, en muchas unidades mineras persisten redes de ventilación diseñadas sin criterios integrales de confort térmico, presentando deficiencias en la distribución del flujo de aire, zonas con estancamiento térmico y una limitada capacidad para controlar la temperatura, humedad y calidad del aire. Esta problemática impacta negativamente en la salud ocupacional, la seguridad y la productividad, constituyéndose en un riesgo recurrente para la sostenibilidad de la industria minera a nivel global. (Heniegal et al, 2025)

De igual manera, en Latinoamérica, la problemática de la ventilación minera se ve agravada por la coexistencia de operaciones modernas con infraestructuras antiguas que no han sido adecuadamente actualizadas. Muchas unidades mineras operan con redes de ventilación empíricamente adaptadas al crecimiento de las labores, lo que genera desequilibrios en la distribución del aire y una baja eficiencia en la evacuación de calor y contaminantes. Además, las limitaciones en inversión tecnológica y en la implementación de sistemas de control y monitoreo ambiental provocan que las condiciones térmicas y de calidad del aire no siempre cumplan con los estándares internacionales de seguridad y confort. Esta situación se traduce en ambientes laborales adversos, incremento de riesgos ocupacionales y disminución del rendimiento del personal en las operaciones mineras de la región. (Noda et al, 2025)

Aunado a ello, en el contexto peruano, país con una alta dependencia económica del sector minero, las unidades mineras enfrentan dificultades significativas para garantizar condiciones ambientales óptimas en sus labores. A pesar de la existencia de normativas de seguridad y salud en minería, como el Decreto Supremo N.º 024-2016-EM, se evidencian problemas relacionados con la inadecuada distribución de las redes de ventilación, deficiente renovación del aire y control insuficiente del confort térmico. Estas deficiencias se acentúan en operaciones subterráneas y en zonas con elevada generación de calor, afectando la salud de los trabajadores y el cumplimiento normativo. La falta de estudios técnicos específicos orientados a optimizar la distribución de la red de ventilación limita la eficacia de los sistemas existentes y reduce la eficiencia operativa de las unidades mineras. (Ministerio de Energía y Minas, 2026)

En tal sentido, en la región Arequipa, donde se desarrollan importantes actividades mineras en contextos geográficos y climáticos particulares, la problemática de la ventilación se manifiesta con mayor complejidad. Las variaciones de altitud, las bajas concentraciones de oxígeno y las condiciones térmicas propias de la región influyen directamente en el desempeño de los sistemas de ventilación. En diversas unidades mineras se identifican redes de ventilación con una distribución inadecuada del flujo de aire, generando zonas con temperaturas elevadas, deficiente disipación de calor y ventilación insuficiente en frentes de trabajo. Estas condiciones afectan el confort térmico del personal y elevan los riesgos asociados a la seguridad y salud ocupacional, evidenciando la necesidad de una propuesta técnica de redistribución de la red de ventilación que permita mejorar las condiciones ambientales internas y garantizar un entorno de trabajo seguro y eficiente. (Figuerola, 2024)

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera la distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento, planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim, puede mejorar las condiciones ambientales y el confort térmico en una unidad minera en Arequipa 2025?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuáles son las deficiencias técnicas del sistema actual de ventilación en la unidad minera en términos de distribución de caudales, pérdidas de carga, control de contaminantes y confort térmico, a partir de un estudio integral del sistema de ventilación?
2. ¿Cómo influye el modelamiento de la red de ventilación en el software Ventsim Design en la optimización de la distribución del flujo de aire y en la mejora de las condiciones ambientales internas de la unidad minera?
3. ¿De qué manera el planeamiento de la red de ventilación a mediano y largo plazo, considerando el crecimiento de labores y escenarios operativos futuros, permite validar técnicamente proyectos de ventilación en la unidad minera?
4. ¿Cómo la estimación de costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX) asociada a la propuesta de distribución de la red de ventilación contribuye a la toma de decisiones eficientes y sostenibles para la mejora del confort térmico y la gestión del sistema de ventilación en la unidad minera?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación ambiental

La presente investigación se justifica desde el punto de vista ambiental debido a la necesidad de optimizar la gestión del aire en ambientes mineros, reduciendo la acumulación de contaminantes, gases nocivos y calor excesivo generados por las operaciones mineras. Una adecuada distribución de la red de ventilación permite mejorar la renovación del aire, controlar la temperatura y la humedad, y minimizar la recirculación de aire contaminado, contribuyendo a un entorno laboral más saludable y con menor impacto ambiental interno. Asimismo, la optimización del sistema de ventilación favorece el uso eficiente de la energía, reduciendo el consumo innecesario de potencia eléctrica y, por ende, la huella ambiental asociada a la operación minera. (Lozano & Rivera, 2024)

1.3.2. Justificación social

Desde la perspectiva social, la investigación se orienta a mejorar las condiciones de trabajo del personal minero, priorizando la salud ocupacional, la seguridad y el confort térmico en los frentes de trabajo. Ambientes con temperaturas elevadas, deficiente ventilación y mala calidad del aire afectan directamente el bienestar físico y el desempeño de los trabajadores, incrementando el riesgo de enfermedades ocupacionales y accidentes laborales. La propuesta de distribución de la red de ventilación contribuye a generar espacios de trabajo más seguros y confortables, fortaleciendo la cultura de prevención y el compromiso de la empresa con la protección del recurso humano. (Espinoza et al, 2021)

1.3.3. Justificación económica

La justificación económica radica en que un sistema de ventilación adecuadamente distribuido y planificado permite optimizar los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) asociados a la ventilación minera. Mediante el modelamiento y planeamiento a mediano y largo plazo en el software Ventsim™ Design 5.2, es posible evaluar distintos escenarios operativos, evitando sobredimensionamientos, reduciendo pérdidas energéticas y prolongando la vida útil de los equipos. Esto se traduce en una gestión más eficiente de los recursos económicos de la unidad minera, mejorando la rentabilidad del proyecto y la sostenibilidad financiera de la operación. (Gaona, 2024)

1.3.4. Justificación tecnológica

La investigación se justifica tecnológicamente por la incorporación de herramientas especializadas de simulación y modelamiento, como el software Ventsim™ Design 5.2, que permiten analizar, validar y optimizar redes de ventilación minera con alto nivel de precisión. El uso de esta tecnología facilita la toma de decisiones basada en datos, la evaluación de escenarios futuros y la validación técnica de proyectos de ventilación a mediano y largo plazo. Además, contribuye al fortalecimiento de capacidades técnicas en el uso de tecnologías digitales aplicadas a la gestión de sistemas de ventilación en minería. (Gonzales, 2021)

1.3.5. Justificación político–institucional

Desde el enfoque político–institucional, la investigación se alinea con el cumplimiento de la normativa vigente en seguridad y salud ocupacional en minería, como el Decreto Supremo N.º 024-2016-EM y sus modificatorias, que establecen la obligación de garantizar condiciones ambientales seguras en las labores mineras. La propuesta de distribución de la red de ventilación aporta una base técnica para la toma de decisiones institucionales, la planificación estratégica del sistema de ventilación y la supervisión por parte de los entes reguladores. Asimismo, fortalece la gestión interna de la unidad minera, promoviendo prácticas responsables,

sostenibles y acordes con las políticas nacionales de seguridad y salud en el trabajo. (Ministerio de Energía y Minas, 2026)

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Proponer una distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento y planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim™ Design, con el fin de mejorar las condiciones ambientales y el confort térmico en unidad minera ubicada en Arequipa.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Analizar el sistema actual de ventilación de la unidad minera mediante un estudio integral, a fin de identificar las deficiencias técnicas relacionadas con la distribución de caudales, pérdidas de carga, control de contaminantes y confort térmico.
2. Modelar la red de ventilación de la unidad minera utilizando el software Ventsim Design, con el propósito de optimizar la distribución del flujo de aire y mejorar las condiciones ambientales internas.
3. Planificar la red de ventilación a mediano y largo plazo, considerando el crecimiento de las labores mineras y escenarios operativos futuros, para validar técnicamente los proyectos de ventilación propuestos.
4. Estimar los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) asociados a la propuesta de distribución de la red de ventilación, con la finalidad de apoyar la toma de decisiones eficientes y sostenibles en la gestión del sistema de ventilación y la mejora del confort térmico en la unidad minera.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

La adecuada distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento y planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim™ Design, mejora significativamente las condiciones ambientales y el confort térmico en una unidad minera año 2025.

1.5.2. Hipótesis específicas

1. El estudio integral del sistema de ventilación permite identificar las deficiencias técnicas del sistema actual, relacionadas con la distribución de caudales, pérdidas de carga, control de contaminantes y confort térmico, que afectan las condiciones ambientales en la unidad minera.
2. El modelamiento de la red de ventilación mediante el software Ventsim™ Design influye positivamente en la optimización de la distribución del flujo de aire, mejorando las condiciones ambientales internas de la unidad minera.
3. El planeamiento de la red de ventilación a mediano y largo plazo, considerando el crecimiento de labores y escenarios operativos futuros, permite validar técnicamente los proyectos de ventilación, asegurando la sostenibilidad y eficiencia del sistema en la unidad minera.
4. La estimación de los costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX) asociada a la propuesta de distribución de la red de ventilación contribuye a una toma de decisiones más eficiente y sostenible, mejorando el confort térmico y la gestión integral del sistema de ventilación en la unidad minera.



CAPÍTULO II

1. Fundamento teórico

1.1. Antecedentes de la investigación

1.1.1. Antecedentes internacionales

Haghirad et al (2024), en su artículo manifestaron que, las preferencias térmicas individuales no siempre conducen a un confort térmico óptimo, a pesar del alto consumo energético de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Los modelos de confort térmico suelen presentar dificultades para predecir con precisión la sensación térmica de los ocupantes, debido a su limitada capacidad para adaptarse a escenarios diversos. Esta investigación empleó técnicas de aprendizaje automático para desarrollar modelos personalizados de confort térmico basados en datos, utilizando una base de datos global de 17 814 muestras provenientes de la ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. Específicamente, el estudio implementa algoritmos de bosque aleatorio (random forest) y k-vecinos más cercanos (k-nearest neighbor) para analizar la influencia de factores ambientales (como la temperatura del aire, la temperatura exterior, la humedad relativa y la velocidad del aire) y factores personales (incluyendo el aislamiento de la vestimenta, el nivel de actividad y las diferencias individuales) en la percepción del confort térmico. El estudio compara de manera sistemática el desempeño predictivo de distintos tipos de salida (sensación térmica frente a voto de preferencia), parámetros de entrada (6 frente a 12) y métodos de aprendizaje automático. El modelo optimizado de bosque aleatorio con 12 variables de entrada demostró una precisión superior al 70 % en la predicción de los votos de preferencia térmica, significativamente mayor que la precisión del 34 % obtenida con el modelo PMV. Los resultados presentaron nuevos modelos optimizados basados en datos y aportan conocimientos sobre la influencia relativa de parámetros como el clima, las estrategias de enfriamiento del edificio y las características de los ocupantes, como la edad y el género. Esta investigación tiene como objetivo permitir

predicciones personalizadas de confort térmico para mejorar la satisfacción de los usuarios y la eficiencia energética en diversos tipos de edificaciones.

Alghassab, Mohammed (2025), en su artículo manifestó que, Este estudio presenta un marco integral basado en inteligencia artificial para evaluar el consumo energético y optimizar el desempeño de edificios de energía neta cero (NZEB) en climas contrastantes. El análisis se centra en Riad, Arabia Saudita, y Lhasa, China, donde se emplearon redes Long Short-Term Memory (LSTM) para predecir los patrones de consumo energético en edificios educativos y de oficinas. El modelo alcanzó un error porcentual absoluto medio (MAPE) de 0,81 % a 4,85 % en las predicciones de consumo energético y un rango de error de 0,65 % a 2,41 % en las predicciones de confort térmico. El análisis de sensibilidad reveló que una reducción del 10 % en la demanda de enfriamiento podría generar una disminución de hasta el 7,2 % en los costos operativos. Asimismo, el análisis económico indicó que la implementación de medidas de eficiencia energética basadas en datos podría conducir a una reducción del 12,5 % en las emisiones de gases de efecto invernadero. También se abordaron las implicancias en políticas públicas, mostrando que la integración de estos modelos en la planificación urbana puede mejorar la gestión de recursos en un 15 %, fomentando un crecimiento urbano sostenible. El análisis de sensibilidad evidenció que los parámetros climáticos y la ventilación mecánica tienen el mayor impacto en el consumo energético. Además, el modelo económico indicó que las inversiones iniciales en tecnologías de optimización energética generan un retorno sobre la inversión (ROI) significativo a lo largo de 10 años, con un ROI promedio del 185 %. Finalmente, el análisis de distribución probabilística mostró patrones diferenciados de consumo energético entre edificios educativos y de oficinas, lo que resalta la necesidad de estrategias de gestión energética diferenciadas y adaptadas al tipo de edificación.

Jayaraman et al (2025), en su artículo manifestaron que, la transferencia de calor geotérmico desde la roca circundante hacia el aire provoca un incremento considerable de la temperatura a medida que aumenta la profundidad, lo que representa un importante desafío térmico en las operaciones mineras subterráneas. La gestión de este calor exige actualmente extensas labores de mantenimiento y mitigación, lo que incrementa los costos operativos y contribuye a un mayor nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. Este estudio investiga el potencial de recubrimientos innovadores de aislamiento térmico, elaborados a partir de plásticos reciclados tratados con cemento, para mitigar la transferencia de calor y mejorar las condiciones térmicas subterráneas. El análisis de simulación térmica revela que la mezcla propuesta, denominada 9C_12HDPE, compuesta por suelo, 9 % de cemento (C) y 12 % de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado, reduce eficazmente la transferencia de calor, mejorando así el ambiente térmico en explotaciones mineras profundas. Además de los beneficios térmicos, la mezcla aislante 9C_12HDPE proporciona ventajas económicas y ambientales significativas. Ofrece una reducción de costos de hasta el 36 % en comparación con el shotcrete convencional, mientras que el análisis de sostenibilidad indica una disminución del potencial de calentamiento global (GWP) de hasta el 61 %. Estos resultados destacan el potencial de los recubrimientos 9C_12HDPE no solo para mejorar la seguridad y el confort de los trabajadores mineros, sino también para reducir el consumo energético y promover la sostenibilidad en las operaciones mineras subterráneas.

Cui et al (2026), en su artículo manifestaron que, la intensificación del cambio climático, junto con el incremento de la temperatura geotérmica y las cargas térmicas generadas por la actividad minera, afecta negativamente el ambiente térmico en las operaciones mineras, en particular en labores subterráneas profundas, representando riesgos significativos para la seguridad, la salud ocupacional y el desempeño del personal. Frente a esta problemática, el presente enfoque propone un modelo híbrido de predicción, desarrollado mediante la integración de redes neuronales informadas por la física (Physics-Informed Neural Networks, PINN), para predecir el entorno térmico en minas. El modelo integra las ecuaciones físicas que rigen el ambiente térmico minero, tales como la transferencia de calor no estacionaria entre la roca y el aire, así como la conservación de la energía en los flujos de ventilación, incorporándolas dentro de una red neuronal. Asimismo, se definen como condiciones de frontera del modelo PINN los factores térmicos clave en minería, tales como la temperatura de la roca, el caudal y la velocidad del aire de ventilación, la profundidad de las labores, la potencia térmica de los equipos y las condiciones de ventilación mecánica. Posteriormente, se emplean simulaciones numéricas y datos provenientes de mediciones de campo en labores mineras para analizar la distribución espacio-temporal del ambiente térmico subterráneo. Asimismo, la precisión predictiva del modelo PINN se compara con la de modelos tradicionales, como la regresión lineal multivariable (MLR), el perceptrón multicapa (MLP) y la red neuronal convolucional (CNN), evaluando su desempeño en distintos escenarios operativos. Adicionalmente, se analizan los efectos de la variación del tamaño de las muestras de datos sobre la precisión de predicción, considerando las limitaciones habituales de datos en entornos mineros. Los resultados evidencian que el modelo PINN alcanza una mayor precisión predictiva que los modelos tradicionales, según cuatro métricas clave: error relativo medio (MRE), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación (R^2). En comparación con los métodos convencionales, el modelo PINN logra una reducción

del error de predicción entre 64,82 % y 91,18 %, además de un incremento del R^2 entre 5,21 % y 92,28 %, lo que demuestra su mayor capacidad explicativa. Cabe resaltar que, incluso con un conjunto de datos reducido al 1 %, el modelo PINN mantiene una alta precisión ($MRE = 0,81$ %; $MAE = 0,30$ °C; $RMSE = 0,46$ °C; $R^2 = 0,871$), superando ampliamente a los modelos CNN, MLP y MLR, lo que evidencia una robustez y capacidad de generalización superiores en condiciones de información limitada. En conjunto, este enfoque integra principios físicos e inteligencia de datos para la predicción del ambiente térmico en minas, permitiendo la identificación temprana de riesgos por altas temperaturas, la optimización de los sistemas de ventilación y el soporte a una gestión minera segura, eficiente y sostenible.

Li et al (2026), en su artículo manifestaron que, la ventilación minera regula los ambientes térmicos subterráneos; sin embargo, las minas profundas enfrentan problemas de ineficiencia en la ventilación y elevadas demandas energéticas de enfriamiento. Este estudio introduce la ventilación controlada con recirculación (CRV) como una solución para la gestión térmica en minas profundas. La tecnología CRV desvía el aire caliente de retorno hacia galerías someras, donde se enfría mediante el intercambio térmico con la roca, para luego mezclar el aire enfriado con aire fresco y suministrarlo a las galerías profundas. Se desarrolló un modelo multifísico en COMSOL para evaluar el desempeño del sistema CRV bajo distintos parámetros operativos. Los resultados indican que el sistema CRV logra una reducción de temperatura de 1,02 °C en comparación con los sistemas de ventilación convencionales al día 25 de operación. El análisis de sensibilidad de los factores influyentes demostró que la profundidad de enterramiento de las vías de recirculación presenta una fuerte correlación negativa con la capacidad de enfriamiento, mientras que las diferencias de elevación vertical entre las zonas de enfriamiento y las zonas profundas reducen la eficiencia del transporte de energía fría. Asimismo, la relación de recirculación muestra una correlación positiva con el desempeño térmico del sistema. Además, el pre-ventilación de las galerías someras reduce la temperatura

de entrada en las galerías profundas en 2,51 °C en comparación con condiciones sin pre-ventilación. El análisis de componentes principales identifica la profundidad de enterramiento como el factor de control dominante. Con una capacidad de enfriamiento proporcionada de 16,096 kW, el sistema CRV se presenta como una metodología auxiliar de enfriamiento técnicamente viable y costo-efectiva para entornos de minería profunda.

1.1.2. Antecedentes nacionales

Quevedo, Juan (2023), en su proyecto titulado “Diseño del sistema de ventilación para mejorar las condiciones termo – ambientales en la mina San Andrés – Cía Minera Aurífera Retamas S.A. – La Libertad” tuvo como propósito optimizar las condiciones termoambientales de la mina San Andrés–MARSA mediante el diseño de un sistema de ventilación utilizando el software Ventsim 5. En las explotaciones mineras subterráneas, la ventilación constituye un elemento fundamental para conservar condiciones adecuadas de temperatura y calidad ambiental en las zonas de trabajo, debido a que contribuye al bienestar de los trabajadores y favorece el desarrollo seguro y eficiente de las actividades mineras. Durante la investigación se realizó una evaluación del sistema de ventilación existente, determinándose que el caudal de aire que ingresaba a la mina cubría únicamente el 57 % del requerimiento establecido. Asimismo, se identificó que en diez niveles de la explotación minera la temperatura ambiental superaba los valores permitidos por el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, normativa que establece una temperatura máxima de 29 °C para los ambientes de trabajo. A partir del modelamiento efectuado con el software Ventsim 5, se planteó una propuesta de mejora del sistema de ventilación de la mina San Andrés–MARSA. La alternativa diseñada permitió incrementar la cobertura del caudal de aire requerido de 57 % a 81 %, generando una mejora en las condiciones termoambientales de la operación. Como resultado, la temperatura promedio de la mina disminuyó en 1,6 °C respecto al sistema actual, logrando que ocho niveles registraran temperaturas inferiores a 29 °C y, por tanto, se encontraran dentro

del límite permisible. Finalmente, se determinó que, para alcanzar una cobertura del 100 % del caudal de aire requerido, resulta necesaria la ejecución de nuevas labores destinadas a la ventilación, tales como pozos, cruceros, rampas y otras obras complementarias que permitan optimizar la circulación y distribución del aire en el interior de la mina.

Pacheco, Joseff (2025), en su proyecto titulado “Optimización del sistema de ventilación mecanizado en la Unidad Minera Americana de Alpayana S.A. mediante la implementación de ventiladores impelentes y chimeneas Raise Boring - 2025” tuvo como objetivo principal optimizar el sistema de ventilación mecanizado en la Unidad Minera Americana de Alpayana S.A., mediante la implementación de ventiladores impelentes y chimeneas Raise Boring. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño cuasiexperimental, comparando condiciones previas (pretest) y posteriores (postest) a la intervención en tres sectores representativos de la mina. Se analizaron indicadores técnicos como caudal de aire, velocidad del flujo, temperatura ambiente, concentración de gases contaminantes (CO y NO₂) y percepción del personal operativo. Los resultados mostraron mejoras significativas en todos los indicadores: el caudal aumentó en 88.5%, la velocidad del aire se triplicó y la temperatura promedio se redujo en más de 5 °C. Además, se registró una reducción del 58% y 70% en las concentraciones de CO y NO₂, respectivamente. Las pruebas estadísticas (t de Student para muestras relacionadas) confirmaron que los cambios fueron significativos ($p < 0.05$). La percepción de los trabajadores también fue favorable, destacando una mejora en el confort térmico y la seguridad ambiental. Se concluye que la implementación del sistema propuesto optimiza de manera técnica, ambiental y operativa el sistema de ventilación subterráneo, recomendándose su replicación en zonas similares. La investigación contribuye al desarrollo de soluciones prácticas y sostenibles en la ingeniería de minas subterráneas peruanas.

Castillón, Mark (2025), en su proyecto titulado “Implementación del software VENTSIM Design 5.4 y su influencia en el sistema de ventilación en el C.M. SUNECS – 2024” tuvo como finalidad determinar la influencia del software Ventsim Design 5.4 en la optimización del sistema de ventilación del Consorcio Minero SUNECS S.A.C. En el momento de la evaluación, la unidad minera operaba mediante un sistema de ventilación natural, el cual alcanzaba una cobertura del 116 % frente a un requerimiento de aire fresco de 46 419 CFM, dentro de un esquema de explotación semimecanizada. Sin embargo, ante el incremento de la producción previsto para los siguientes tres años, se identificó la necesidad de implementar un sistema de ventilación mecanizada o forzada que permitiera garantizar condiciones adecuadas de seguridad, eficiencia y continuidad operacional. Para el desarrollo del estudio se recopiló información in situ correspondiente a los principales parámetros del sistema de ventilación, lo que permitió analizar y simular distintos escenarios de operación a corto, mediano y largo plazo. Posteriormente, los datos fueron procesados y evaluados mediante el software Ventsim Design 5.4. Como resultado, se propuso la instalación de un ventilador principal de 120 000 CFM en el nivel 3827, con una presión de 15 pulgadas de columna de agua y una potencia de 150 HP. Asimismo, para la profundización de la rampa MNG se planteó un sistema de inyección conformado por dos ventiladores instalados en serie, mientras que para la Zona Balcón se consideró la instalación de un ventilador de 20 000 CFM y 36,5 HP en el crucero 7722. Los resultados evidenciaron que la utilización del software permitió modelar el comportamiento del sistema de ventilación a partir de parámetros reales de la mina y ajustarlos de acuerdo con las condiciones operacionales y ambientales. De esta manera, la simulación de diferentes escenarios facilitó la identificación de alternativas orientadas a mantener condiciones seguras y eficientes de trabajo, reduciendo la posibilidad de riesgos y pérdidas durante las operaciones. Finalmente, se concluyó que la implementación de Ventsim Design 5.4 ejerce una influencia favorable en la mejora del sistema de ventilación del Consorcio Minero SUNECS S.A.C. A corto

plazo se estimó alcanzar una cobertura de ventilación del 179 %, con un CAPEX de US\$ 126 449 y un OPEX de US\$ 189 310; a mediano plazo, una cobertura del 159 %, con un CAPEX de US\$ 46 429 y un OPEX de US\$ 227 942; mientras que, a largo plazo, se proyectó una cobertura del 178 %, con un CAPEX de US\$ 83 883 y un OPEX de US\$ 260 886.

Janampa, Yampier (2025), en su artículo manifestó que, el propósito de valorar la aptitud del sistema de ventilación para gestionar las cargas de calor generadas en un entorno de explotación mecanizada. El análisis se desarrolla desde una perspectiva formativa propia del nivel de pregrado en Ingeniería de Minas, recurriendo a criterios simplificados de ventilación minera y balance térmico que permiten comprender los fenómenos esenciales sin abordar un diseño de ingeniería de detalle. Se reconocen como principales focos de generación térmica el uso intensivo de equipos diésel, el aporte de calor proveniente de la masa rocosa condicionado por la profundidad de explotación y, en menor medida, la contribución metabólica del personal. A partir de una evaluación simplificada, se estima la capacidad teórica de remoción de calor del sistema de ventilación, evidenciándose que, aunque los caudales globales satisfacen los requerimientos normativos, persisten restricciones operativas vinculadas a elevadas pérdidas de carga en chimeneas de antigua data y a circuitos de ventilación extensos. Finalmente, se plantean como alternativas de mejora la construcción de chimeneas de gran diámetro mediante raise boring y la implementación de un esquema de ventilación bajo demanda (VOD), concluyéndose que la aplicación conjunta de estas medidas permitiría optimizar el control térmico, mejorar la eficiencia energética y asegurar condiciones laborales seguras ante escenarios de mayor profundización de la mina.

Samaniego, Stephanie (2025), en su proyecto titulado “Simulación del diseño de ventilación de minas, método Hardy Cross versus el método conversión de triángulo en estrellas, Compañía Minera Poderosa S.A” tuvo por objetivo determinar las diferencias que existen en el cálculo de caudal de aire en la simulación del diseño de ventilación de minas, método Hardy Cross versus el método de conversión de triángulo en estrella, en la Compañía Minera Poderosa S.A. (2024). Con la finalidad de cumplir el objetivo planteado, se realiza una investigación empleando el método científico, de tipo preexperimental, nivel comparativo-analítico y diseño preexperimental comparativo. La población la constituyen los cálculos de caudal, presión y resistencia del aire en la simulación del diseño de ventilación de minas; la muestra, de tipo no probabilístico, la conforma un circuito de ventilación en diagonal con 9 ramales, donde se realizan 25 simulaciones. Los resultados muestran un caudal promedio del circuito de ventilación con el método iterativo de Hardy Cross de $1,9552 \text{ m}^3/\text{s}$; con el método de conversión de triángulo en estrella se obtuvo un promedio de $1,9427 \text{ m}^3/\text{s}$, mostrando una diferencia absoluta de $0,0201 \text{ m}^3/\text{s}$. A un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, la prueba de hipótesis de comparación de medias indica que no existen diferencias significativas en el cálculo de caudal de aire, en la presión y en la resistencia en la simulación del diseño de ventilación de minas entre el método Hardy Cross y el método de conversión de triángulo en estrella.

1.2. Estado de arte

La ventilación minera constituye uno de los sistemas más críticos y determinantes dentro de la operación de las unidades mineras subterráneas, debido a que cumple una función esencial en el mantenimiento de condiciones adecuadas para el desarrollo seguro de las actividades. Su importancia radica principalmente en que permite garantizar una adecuada calidad del aire en el interior de las labores, controlar las condiciones térmicas, favorecer la dilución y evacuación de contaminantes y contribuir directamente con la seguridad y bienestar del personal que desarrolla sus actividades en ambientes subterráneos. En los últimos años, esta necesidad se ha vuelto aún más relevante debido al incremento progresivo de la profundidad de explotación, la intensificación de los procesos de mecanización y el aumento de las exigencias relacionadas con la seguridad y salud ocupacional. Estas condiciones han puesto en evidencia algunas limitaciones de los sistemas tradicionales de ventilación, particularmente cuando la distribución del flujo de aire no responde adecuadamente a las necesidades reales de las labores. Asimismo, una distribución ineficiente puede estar asociada con un mayor consumo energético, especialmente cuando el sistema requiere mayores esfuerzos para controlar las condiciones térmicas y realizar el enfriamiento de las zonas de trabajo, lo que incrementa la complejidad técnica y operativa de la ventilación minera. (Atalaya, 2022)

De igual manera, diversos estudios desarrollados en el ámbito internacional coinciden en señalar que una deficiente distribución de la red de ventilación puede ocasionar diferentes problemas dentro de las labores subterráneas. Entre estos problemas se encuentra la presencia de zonas en las cuales la renovación del aire resulta insuficiente, así como áreas donde puede producirse acumulación de calor y contaminantes debido a una circulación inadecuada del flujo de aire. Esta situación también puede originar elevados gradientes térmicos entre diferentes sectores de la operación minera, generando condiciones ambientales poco favorables para el desarrollo de las actividades. Como consecuencia, el confort térmico del personal puede verse

afectado, repercutiendo también en su desempeño y productividad durante la jornada laboral. Frente a este panorama, los estudios realizados destacan que no resulta suficiente analizar únicamente la situación presente de la ventilación, sino que es necesario desarrollar un estudio integral de toda la red, considerando tanto las condiciones actuales de funcionamiento como las modificaciones que pueden producirse a medida que las labores mineras continúan creciendo. De esta manera, el análisis conjunto de la distribución del aire, las condiciones térmicas y la proyección futura de las labores permite establecer alternativas orientadas al diseño de redes de ventilación más eficientes, funcionales y sostenibles en el tiempo. (Castillón, 2025)

Asimismo, el modelamiento y la simulación de las redes de ventilación se han consolidado como herramientas fundamentales para comprender y evaluar el comportamiento de sistemas cada vez más complejos en minería subterránea. Estas herramientas permiten representar las condiciones de funcionamiento de la red y analizar de manera anticipada el comportamiento del flujo de aire frente a diferentes configuraciones operativas. En este contexto, el software Ventsim™ Design se posiciona como una de las plataformas empleadas para la simulación de sistemas de ventilación minera, debido a que permite analizar diferentes variables relacionadas con el comportamiento de la red. Mediante su utilización es posible realizar la simulación de los flujos de aire, analizar las pérdidas de carga que se generan en los distintos tramos, evaluar el comportamiento térmico de las labores y validar escenarios operativos antes de efectuar modificaciones directamente en la operación. De acuerdo con investigaciones recientes, el empleo de Ventsim™ Design 5.2 facilita la comparación entre diferentes alternativas de distribución de la red de ventilación, permitiendo determinar cómo responde el sistema ante determinados cambios. De igual forma, posibilita evaluar la incorporación de ventiladores auxiliares y principales, así como analizar alternativas orientadas a optimizar el consumo energético requerido para garantizar una ventilación adecuada en las labores subterráneas. (Castillón, 2025)

Aunado a ello, la literatura especializada resalta la importancia de desarrollar un adecuado planeamiento de la ventilación considerando horizontes de mediano y largo plazo. Esta planificación resulta necesaria debido a que las operaciones mineras no permanecen estáticas, sino que experimentan un crecimiento progresivo conforme avanzan las labores de explotación y se incorporan nuevas zonas al proceso productivo. Por esta razón, el sistema de ventilación debe ser analizado tomando en consideración el crecimiento futuro de las labores, la incorporación de nuevas áreas de explotación y las posibles variaciones en los requerimientos de caudal de aire. Bajo esta perspectiva, el análisis de escenarios futuros permite anticipar las necesidades que podría presentar la operación y establecer medidas antes de que aparezcan deficiencias significativas en la distribución del aire. Los estudios basados en este tipo de planificación evidencian que una evaluación anticipada puede disminuir la necesidad de efectuar modificaciones correctivas posteriores, las cuales pueden resultar más complejas desde el punto de vista operativo. Del mismo modo, contribuye a minimizar determinados riesgos vinculados con la operación y facilita una mejor orientación de las inversiones necesarias para la infraestructura de ventilación. En consecuencia, la planificación a mediano y largo plazo constituye un componente fundamental para alcanzar una gestión más eficiente y ordenada del sistema de ventilación minera. (Figuerola, 2024)

Del mismo modo, en lo referido a la validación de los proyectos de ventilación, diferentes autores señalan que el modelamiento dinámico y los procesos de simulación constituyen mecanismos importantes para verificar el desempeño de las alternativas planteadas antes de que estas sean implementadas físicamente en la operación. La posibilidad de evaluar previamente una propuesta permite identificar su comportamiento bajo diferentes condiciones y determinar si responde adecuadamente a las necesidades previstas. Para ello, pueden analizarse indicadores vinculados con la temperatura presente en las labores, la velocidad del aire en los diferentes sectores de la red, la concentración de contaminantes y el balance

energético asociado con el funcionamiento del sistema. La evaluación conjunta de estos elementos contribuye a determinar de manera más precisa el desempeño esperado de una propuesta de ventilación y facilita la identificación de posibles limitaciones antes de realizar inversiones o modificaciones en campo. De esta manera, la simulación reduce la incertidumbre técnica asociada con las decisiones de diseño y proporciona mayores elementos para seleccionar alternativas que respondan adecuadamente a las condiciones de operación. Este enfoque adquiere especial importancia cuando se trata de proyectos de rehabilitación de sistemas existentes o de ampliación de redes de ventilación como consecuencia del crecimiento de las labores mineras. (Marrero et al, 2023)

En tal sentido, desde una perspectiva económica, la evaluación de los costos de inversión, denominados CAPEX, y los costos operativos, conocidos como OPEX, constituye actualmente un componente relevante dentro de los estudios relacionados con la ventilación minera. La evaluación de estos elementos permite complementar el análisis técnico con una valoración económica de las alternativas propuestas, evitando que la decisión se sustente exclusivamente en criterios de funcionamiento. La literatura señala que las herramientas de simulación facilitan este proceso debido a que permiten comparar diferentes configuraciones de diseño antes de decidir cuál será implementada. A partir de estas comparaciones, es posible analizar alternativas que busquen mantener un equilibrio entre la eficiencia térmica del sistema, las condiciones de seguridad requeridas y la viabilidad económica de la propuesta. Este tipo de análisis adquiere mayor relevancia debido a que el funcionamiento de la ventilación implica un consumo energético constante durante la operación. En consecuencia, las investigaciones recientes muestran que la optimización de la distribución del aire y del funcionamiento general del sistema de ventilación puede contribuir a reducir significativamente el consumo energético, considerando que este constituye uno de los componentes principales de los costos operativos en las explotaciones mineras subterráneas. (Vargas, 2025)

Adicionalmente, los estudios más recientes vienen incorporando diferentes tecnologías avanzadas como complemento de los sistemas tradicionales de ventilación minera. Entre estas alternativas se encuentran los modelos predictivos basados en inteligencia artificial, el análisis multifísico y las soluciones híbridas de enfriamiento, cuya incorporación responde a la necesidad de analizar el ambiente térmico desde una perspectiva más integral. Estas propuestas no sustituyen necesariamente los sistemas convencionales de ventilación, sino que buscan complementarlos mediante herramientas que permitan mejorar el análisis, la predicción y el control de las condiciones presentes en las labores subterráneas. En ese sentido, el avance tecnológico refleja una tendencia orientada a gestionar de manera conjunta los diferentes factores que influyen en el comportamiento térmico y ambiental de una mina. El propósito de estos enfoques se encuentra relacionado con la mejora del confort térmico del personal, la disminución de los impactos asociados con el funcionamiento de los sistemas y la búsqueda de una mayor sostenibilidad de las operaciones. De este modo, las nuevas tecnologías amplían las posibilidades de optimización de los sistemas de ventilación y fortalecen la tendencia hacia una gestión más integral del ambiente subterráneo. (Vargas, 2025)

En síntesis, el estado del arte evidencia una evolución progresiva desde sistemas de ventilación analizados principalmente desde una perspectiva operativa hacia enfoques más integrales, técnicos y prospectivos. Actualmente, el diseño y la gestión de estos sistemas comprenden el estudio detallado de las condiciones existentes, el modelamiento y simulación de la red, la planificación del crecimiento de las labores a mediano y largo plazo, la validación previa de las propuestas y la evaluación de los costos vinculados con su implementación y funcionamiento. La integración de estos componentes permite desarrollar alternativas de ventilación que respondan no solamente a las necesidades actuales de una operación minera, sino también a los requerimientos que puedan generarse conforme avance la explotación. Sin embargo, a pesar del desarrollo alcanzado en este campo, persiste la necesidad de ejecutar

estudios aplicados en contextos locales, especialmente en unidades mineras ubicadas en la región Arequipa, donde resulta necesario evaluar las condiciones particulares de cada operación. En este marco, la aplicación de Ventsim™ Design 5.2 representa una herramienta que permite estudiar el comportamiento del sistema y plantear una distribución optimizada de la red de ventilación. Dicha propuesta debe orientarse hacia la mejora de las condiciones ambientales existentes en las labores y el fortalecimiento del confort térmico del personal, considerando simultáneamente las necesidades presentes y futuras de la operación minera. Por ello, el desarrollo de una investigación centrada en estos aspectos encuentra sustento en los antecedentes revisados y en la necesidad de contar con propuestas técnicamente evaluadas para optimizar la ventilación en el ámbito de estudio. (Castillón, 2025)

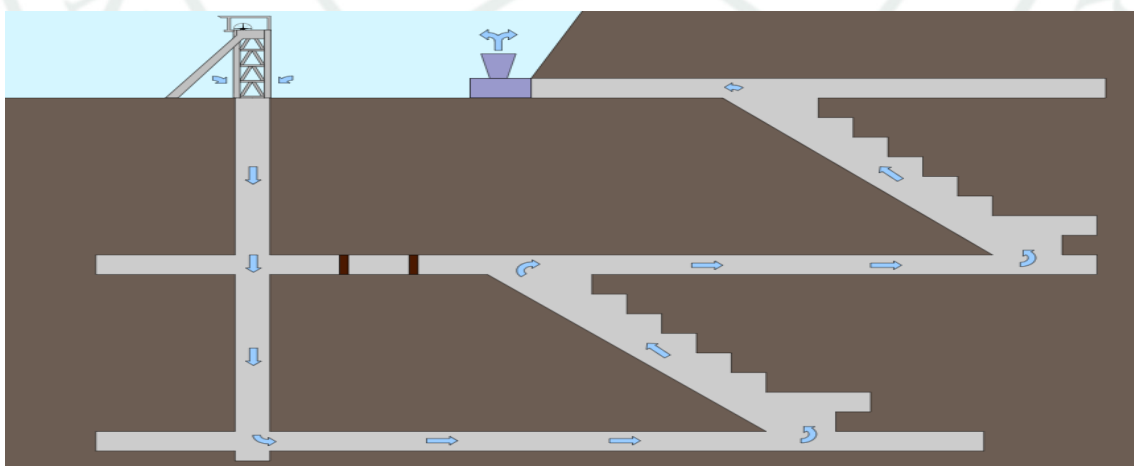
1.3. Marco teórico

1.3.1. Ventilación de minas

La ventilación minera puede definirse como el conjunto de acciones destinadas a acondicionar y renovar el aire que circula por las labores subterráneas, con la finalidad de diluir y reducir los contaminantes hasta niveles que no representen un riesgo para la salud de los trabajadores. Su propósito principal es mantener condiciones ambientales adecuadas, seguras y saludables dentro de la unidad minera. Para alcanzar este objetivo, resulta indispensable asegurar el suministro continuo de aire limpio y fresco hacia las labores de avance, como cruceros, galerías, bypass, chimeneas e inclinados, así como hacia las zonas de producción, entre ellas subniveles y tajos. Asimismo, la ventilación permite controlar y disminuir la temperatura y la humedad presentes en el interior de la mina, aprovechando inicialmente la ventilación natural y, cuando las condiciones operativas lo requieran, incorporando sistemas auxiliares en puntos estratégicos para mejorar la circulación y distribución del aire. (Organización Internacional del Trabajo, 2009)

Figura 1

Ejemplo de ventilación de minas

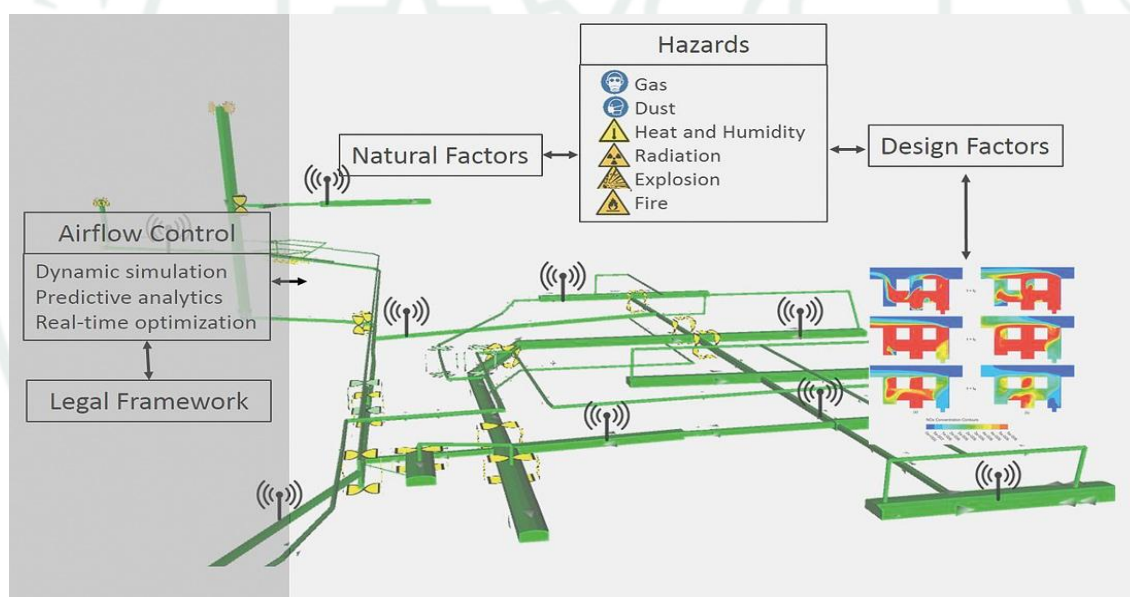


Nota. En la figura se aprecia un ejemplo gráfico representativo de cómo es el proceso de ventilación de minas y como es su manejo y funcionalidad. Imagen tomada de Auccapuma, (2025).

Para garantizar una adecuada dispersión de contaminantes y la renovación del aire en las zonas de trabajo, se diseñan circuitos de ventilación destinados a conducir el aire acumulado o contaminado desde las labores mineras hacia el exterior. Asimismo, al inicio de cada jornada y antes del ingreso del personal a las áreas de trabajo, especialmente en labores ciegas previamente programadas, es indispensable realizar la evaluación de las condiciones atmosféricas mediante la medición de gases como nitrógeno, oxígeno y otros que puedan estar presentes, considerando las características del yacimiento y el empleo de explosivos. Los resultados obtenidos durante estas verificaciones deben ser registrados oportunamente y comunicados a los trabajadores antes de su ingreso a dichas labores. (Auccapuma, 2025)

Figura 2

Gráfico de ventilación de mina



Nota. En la figura se aprecia un gráfico representativo de ventilación de mina y el mecanismo que se aplica para lograr los procesos de ventilación. Datos tomados de Chilon, (2022).

Asimismo, la ventilación en minería subterránea comprende el proceso de circulación y renovación continua del aire dentro de las labores, con la finalidad de mantener una atmósfera adecuada, respirable y segura para la ejecución de las actividades mineras. Para lograr una distribución eficiente del flujo de aire, se establece un circuito de ventilación que permita su desplazamiento a través de las diferentes zonas que conforman la mina. Para el funcionamiento adecuado de este sistema, resulta fundamental disponer de al menos dos accesos independientes, los cuales pueden estar constituidos por dos pozos, dos socavones o la combinación de un pozo y un socavón. Sin embargo, en aquellas labores que cuentan con un único acceso, como ocurre en las galerías en proceso de avance, es necesario recurrir a sistemas auxiliares mediante tuberías o ductos que conduzcan el aire desde el ingreso hasta el frente de trabajo. Este tipo de ventilación se denomina ventilación secundaria o auxiliar, diferenciándose de la ventilación principal, cuya función es distribuir el aire a través del conjunto de las labores subterráneas. En ambos sistemas, los ventiladores constituyen los equipos encargados de generar el movimiento y mantener la circulación del aire. Por lo general, los ventiladores principales son instalados en la superficie, próximos a los accesos de la mina, desde donde permiten impulsar o extraer el aire requerido para mantener condiciones ambientales apropiadas en el interior. (Chilon, 2022)

Todo sistema de ventilación implementado en las actividades mineras debe garantizar condiciones adecuadas de calidad del aire, asegurando que las concentraciones de agentes químicos presentes en el ambiente laboral se mantengan dentro de los límites de exposición ocupacional establecidos en el Decreto Supremo N.º 015-2005-SA. (Ministerio de Salud, 2005)

Tabla 1*Límites máximos permisibles*

Polvo inhalable	10 mg/m3 (*)
Polvo respirable	3 mg/m3 (*)
Oxígeno (O2)	Mínimo 19.5% y máximo 22.5%
Monóxido de carbono (CO)	Máximo 29 mg/m3 o 25 ppm
Dióxido de carbono (CO2)	Máximo 9000 mg/m3 o 5000 ppm. 3000 no superior de 15 min
Matano (CH4)	Máximo 29 mg/m3 o 25 ppm
Hidrógeno sulfurado (H2S)	Máximo 14 mg/m3 o 10 ppm
Gases nitrosos (Nox)	Máximo 0.7 mg/m3 o 5 ppm
Anhidrido sulfuroso (SO2)	2 ppm mínimo a 5 ppm máximo
Aldehídos	Máximo 5 ppm
Hidrógeno (H)	Máximo 5000 ppm
Ozono	Máximo 0.1 ppm

Nota. En la tabla 1 presenta los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes y condiciones ambientales en labores mineras subterráneas, con el objetivo de garantizar la seguridad, salud ocupacional y confort térmico de los trabajadores, datos tomados de D.S. N° 024-2016-EM. (Ministerio de Energía y Minas, 2026)

1.3.1.1. Tipos de ventilación. “Esta puede catalogarse en dos grupos los cuáles son la ventilación natural y la ventilación mecánica, estos pueden juntarse puesto que es fundamental que los frentes de trabajo estén ventilados” (Ccanque , 2023).

Asimismo, para que se tenga una ventilación eficiente en los frentes de trabajo se debe tener en cuenta los siguientes factores según el Anexo 38 del D.S. 023-2017 EM.

- Caudal requerido por el número de trabajadores (QTr)
- Caudal requerido por el consumo de madera (QMa)
- Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (QTe). (Ministerio de Energía y Minas, 2017)

1.3.1.1.1. Ventilación natural. Es el mecanismo que generalmente no necesita un ventilador, maquina o un sistema de ventilación para poder dispersar la concentración de aire ya que la ventilación natural consiste en que el aire natural y fresco circule con total libertad sin la necesidad de impulsarlo por un ventilador, esto da entender que el aire entra a la mina de forma natural, en caso que en el área de trabajo el aire sea insuficiente va a ocasionar que el ambiente de trabajo esté concentrado generando factores contaminantes, temperatura elevada y concentración de gases.

Para que la ventilación natural se desarrolle de manera adecuada, es necesario que exista una diferencia de elevación entre las bocaminas destinadas al ingreso y a la salida del aire. Su funcionamiento se sustenta principalmente en el intercambio termodinámico generado entre el ambiente interior de la mina y la superficie. En este proceso, la energía térmica incorporada al sistema ocasiona variaciones de presión que favorecen la circulación del aire, debido a que las masas de aire caliente, de menor densidad, son desplazadas por el ingreso de aire frío, permitiendo así la generación de un flujo natural dentro de las labores mineras. (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2008)

Figura 3

Ventilación natural



Nota. En la figura se aprecia un gráfico representativo de la ventilación natural y el efecto chimenea con la descripción con cada uno de los funcionamientos y etapas que fluyen en el proceso. Imagen tomada de Herrera, (2025).

La ventilación natural en las labores mineras se origina principalmente por la diferencia existente entre los pesos específicos del aire que ingresa y del aire que sale de la mina. Esta variación se encuentra determinada, en mayor medida, por las diferencias de temperatura y, en menor proporción, por los cambios de presión. Asimismo, intervienen otros factores, como el contenido de humedad y la composición química del aire. Este tipo de ventilación presenta un comportamiento variable a lo largo del día, por lo que su funcionamiento no resulta completamente estable ni confiable. Generalmente, se utiliza en explotaciones de poca profundidad, de hasta aproximadamente 600 m, así como en operaciones de minería artesanal. Su desempeño también puede verse afectado por la acción de los vientos externos, cuya intensidad y dirección cambian durante el día y según las estaciones del año. Debido a esta variabilidad, es recomendable evaluar el caudal de aire directamente en las bocaminas, realizando mediciones en distintos horarios y días, en lugar de depender únicamente de estimaciones teóricas. (Vargas, 2025)

Tabla 2*Ventajas y desventajas de ventilación natural*

Aspecto	Ventajas	Desventajas
Consumo energético	No requiere energía eléctrica ni equipos mecánicos	No permite control del flujo de aire
Costo	Costos de operación prácticamente nulos	No garantiza condiciones adecuadas en minas profundas
Simplicidad del sistema	Diseño simple y fácil implementación en minas poco profundas	Difícil de regular y adaptar a cambios operativos
Confiabilidad	Puede complementar la ventilación mecánica en condiciones favorables	Dependiente del clima exterior y de gradientes térmicos
Control ambiental	Puede reducir parcialmente temperatura y contaminantes en escenarios limitados	Insuficiente para controlar gases, polvo y calor de forma continua
Aplicabilidad	Útil en minas con múltiples bocaminas a diferentes cotas	No cumple estándares de seguridad y salud ocupacional por sí sola
Planeamiento a largo plazo	Puede ser considerada como condición inicial de diseño	No es sostenible ni confiable para planeamiento a mediano y largo plazo
Uso en modelamiento	Permite evaluar condiciones base del sistema	Requiere ventilación mecánica para validación técnica del diseño

Nota. En la tabla 2 se presenta un análisis comparativo de la ventilación natural en minería subterránea, destacando sus principales ventajas y desventajas en distintos aspectos operativos, técnicos y de seguridad. Datos tomados de Vargas, (2025).

1.3.1.1.2. Ventilación mecánica. El objetivo fundamental es expulsar la concentración de aire contaminado con la ayuda uno o más ventiladores. Para este tipo de ventilación es necesario que el caudal del aire sea constante ya que de esta forma evitaremos posibles interferencias ya sean naturales o de alguna interferencia en el proceso de ventilación. (Quispe, 2022)

De manera similar, la ventilación mecánica se produce mediante la presión generada por un ventilador sobre un determinado volumen de aire. Según las características del equipo y las necesidades de la operación, este sistema puede impulsar aire fresco hacia el interior de las labores mineras o extraer el aire contaminado. Su principal ventaja radica en la posibilidad de

mantener condiciones relativamente constantes de presión y caudal, debido a que los ventiladores son accionados mediante motores eléctricos y seleccionados de acuerdo con los requerimientos establecidos en el diseño del sistema de ventilación. Esto permite garantizar la continuidad de las operaciones y el adecuado desarrollo de los ciclos de trabajo. Sin embargo, su implementación implica mayores costos debido al consumo de energía eléctrica. Por ello, su utilización busca lograr una adecuada dilución y evacuación de los contaminantes, además de proporcionar condiciones ambientales favorables para el personal, procurando mantener el menor costo operativo posible. (García, 2023)

1.3.1.1.3. Diseño de un sistema de ventilación de minas. El diseño puede entenderse en dos partes:

- Planeamiento en cuanto a las necesidades de aire en las labores subterráneas.
- Planeamiento de la distribución del flujo de aire, esto con la finalidad de satisfacer las necesidades requeridas.
- La segunda comprende:
 - Ubicación, dimensionamiento y disposición de las propiedades aerodinámicas de los canales del aire.
 - Ubicación de las puertas de ventilación.
 - Evaluación y análisis sobre el papel fundamental de la ventilación natural.
 - Diseño de planos de ventilación mediante modelamiento con el software Ventsim, los cuales contemplan contingencias tales como falta de ventiladores, incendios y otras emergencias.

Asimismo, la distribución del flujo de aire puede ser lograda de diferentes maneras, pero debe ser la solución más técnica y económica, un buen diseño de ventilación exige una cantidad de trabajo considerable si se requiere tener un resultado óptimo.

Aunado a ello, el sistema de ventilación consiste en:

- Entradas y salidas principales
- Cruceros, Galerías y chimeneas de distribución del flujo de aire
- Ventiladores primarios
- Ventiladores auxiliares, reguladores, puertas, muros, etc
- Conceptos para el diseño de un sistema de ventilación

Para un buen diseño de un circuito de ventilación se deben manejar los siguientes conceptos:

- Aire de mina
- Gases presentes en la mina
- Polvo en la mina
- Condiciones termo-ambientales
- Psicrometría. (Marrero et al, 2023)

1.3.2. Aire de mina

Se denomina aire de mina a la combinación de gases y vapores presentes en el interior de las labores subterráneas, los cuales generalmente se encuentran acompañados por partículas de polvo suspendidas en el ambiente. Esta mezcla ocupa los diferentes espacios existentes dentro de la mina y se origina principalmente a partir del aire atmosférico que ingresa desde la superficie. Sin embargo, conforme este aire circula por las distintas labores subterráneas, puede experimentar modificaciones en su composición original debido a las condiciones propias del ambiente minero. Cuando dichas alteraciones son mínimas y el aire conserva características adecuadas, puede ser considerado como aire fresco; por el contrario, cuando las modificaciones en su composición son mayores y se incrementa la presencia de elementos que deterioran su calidad, pasa a ser denominado aire viciado. (Serrano, 2023)

Aunado a ello, durante su recorrido por el interior de la mina, el aire continúa experimentando cambios debido a la acumulación progresiva de gases, calor y polvo presentes en las diferentes labores. Estos componentes pueden incorporarse al ambiente mientras el aire se desplaza por galerías y otros espacios subterráneos, modificando gradualmente las condiciones con las que inicialmente ingresó desde el exterior. Asimismo, como consecuencia del desarrollo de las labores mineras, así como de la presencia de personas y materiales dentro de la mina, el aire que circula por estos espacios pierde una parte de su contenido de oxígeno. De esta manera, conforme aumenta su permanencia y recorrido dentro de las labores subterráneas, su composición puede verse cada vez más alterada respecto al aire atmosférico que ingresó inicialmente. (Barros, 2021)

Tabla 3*Funciones y parámetros del aire de mina*

Categoría	Elemento	Descripción / Función	Unidad / Referencia
Funciones	Dilución de contaminantes	Reduce concentraciones de gases nocivos (CO, NO ₂ , SO ₂ , CH ₄)	ppm
	Evacuación de polvo	Controla material particulado generado por perforación y transporte	mg/m ³
	Control térmico	Disipa calor del macizo rocoso, equipos y personas	°C
	Regulación de humedad	Mantiene condiciones aceptables de trabajo	% HR
	Seguridad operativa	Previene atmósferas explosivas o tóxicas	Normativa minera
	Confort térmico	Mejora el desempeño y salud del personal	Índices térmicos
Parámetros	Caudal de aire	Volumen de aire que circula por unidad de tiempo	m ³ /s
	Velocidad del aire	Rapidez del flujo en labores mineras	m/s
	Temperatura del aire	Nivel térmico del ambiente subterráneo	°C
	Humedad relativa	Contenido de vapor de agua en el aire	%
	Pérdida de carga	Resistencia al flujo de aire en la red	Pa
	Presión	Diferencia de presión entre entradas y salidas	Pa
	Concentración de gases	Nivel de gases contaminantes	ppm
	Carga térmica	Calor total generado en la mina	kW
	Factor de recirculación	Porcentaje de aire reutilizado	%
	Eficiencia del sistema	Relación entre aire útil y energía consumida	%

Nota. En la tabla 3 se aprecia como organiza de manera sistemática los principales componentes de la ventilación en minería subterránea, agrupándolos en dos grandes categorías: funciones y parámetros, cada una con sus respectivas descripciones y unidades de medición. Datos tomados de Barros, (2021).

1.3.3. Gases presentes en la mina

Los gases contaminantes se encuentran presentes de manera constante en las labores mineras, tanto durante el desarrollo normal de las operaciones como ante determinadas condiciones anormales que pueden presentarse en el interior de la mina. Su presencia está relacionada con las diferentes actividades que se ejecutan durante el proceso de explotación minera, las cuales pueden modificar las condiciones del aire existente en las labores subterráneas. Un ejemplo de ello es el dióxido de carbono (CO₂), gas que puede generarse como consecuencia de los disparos efectuados en las labores mineras. Luego de estas actividades, dicho gas puede incorporarse al ambiente subterráneo y formar parte de los contaminantes presentes en el aire de la mina, por lo que constituye uno de los gases que deben considerarse dentro de las condiciones ambientales existentes durante el desarrollo de las operaciones. (Atalaya, 2022)

A continuación, se detallan gases presentes en las minas (ver tabla 4).

Tabla 4
Gases presentes en mina

Sustancia	Fórmula	Origen en la mina	Efectos principales	Control mediante ventilación
Nitrógeno	N ₂	Componente natural del aire	Asfixiante por desplazamiento de O ₂	Renovación continua de aire
Oxígeno	O ₂	Aire fresco de ingreso	Esencial para la vida y combustión	Mantener ≥ 19.5 %
Dióxido de carbono	CO ₂	Respiración, combustión, voladuras	Asfixiante, aumenta fatiga	Dilución y evacuación
Monóxido de carbono	CO	Motores diésel, explosiones	Altamente tóxico	Extracción rápida y monitoreo
Óxidos de nitrógeno	NO _x	Voladuras y motores	Irritación pulmonar, edema	Ventilación forzada
Anhídrido sulfuroso	SO ₂	Oxidación de sulfuros	Irritante, corrosivo	Dilución y control de fuentes
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	Descomposición de sulfuros	Muy tóxico, inflamable	Ventilación y detección continua

Metano	CH ₄	Liberación natural del macizo	Explosivo en 5–15 %	Ventilación y control de gases
Polvo en la mina	—	Perforación, carguío, transporte	Enfermedades respiratorias	Ventilación y supresión de polvo

Nota. En la tabla 4 presenta una clasificación de las principales sustancias presentes en ambientes mineros subterráneos, indicando su fórmula química, origen, efectos sobre la salud y medidas de control mediante ventilación. Esta información es fundamental para el diseño de sistemas de ventilación que garanticen condiciones seguras de trabajo. Datos tomados de Atalaya, (2022).

Aunado a ello, el polvo que se da dentro de las minas es un material muy fino que dependiendo del tamaño, composición y concentración constituye un peligro para los trabajadores y además para el tema de la seguridad en cuanto a las operaciones por el tema de la visibilidad (Atalaya, 2022)

En las operaciones es fundamental que la concentración de polvo no esté en el aire, debe mantenerse lo más baja posible, procurando que esta no entre en suspensión para que los trabajadores no inhalen el polvo o en todo caso minimizar el tiempo de exposición del trabajador al aire contaminado (Jiménez, 2022)

1.3.4. Condiciones termo-ambientales

La presencia de calor en el ambiente subterráneo de una mina se encuentra estrechamente asociada con las características térmicas que presenta el macizo rocoso que rodea las diferentes labores mineras. Estas condiciones pueden influir directamente en la temperatura que se registra en el interior de la explotación subterránea, debido a que el aire que circula por las labores se encuentra en contacto permanente con las superficies rocosas. A ello se suman diversos factores externos y operacionales que también pueden contribuir al incremento de la carga térmica dentro de la mina. Entre estos factores se encuentra la temperatura existente en la superficie, la cual influye en las condiciones iniciales del aire que ingresa hacia las labores

subterráneas. De igual manera, la compresión del aire durante su desplazamiento por el interior de la mina puede contribuir al aumento de la temperatura. Asimismo, las actividades de voladura desarrolladas como parte de las operaciones mineras representan otra fuente de generación de calor, junto con otros elementos propios de la actividad minera capaces de incrementar progresivamente la carga térmica presente en el ambiente subterráneo. (Atalaya, 2022)

Asimismo, dentro de la evaluación de las condiciones ambientales existentes en las explotaciones mineras subterráneas, la temperatura constituye uno de los parámetros de mayor relevancia, debido a que permite conocer las condiciones térmicas a las que se encuentran expuestos los trabajadores durante el desarrollo de sus actividades. En este sentido, el comportamiento de la temperatura dentro de las labores debe ser considerado como parte de la evaluación del ambiente de trabajo, especialmente cuando los valores registrados alcanzan o superan los límites máximos establecidos por las normas y los estándares relacionados con el confort térmico. Cuando estas condiciones térmicas sobrepasan los valores permitidos, aumenta la posibilidad de que los trabajadores se encuentren expuestos a situaciones de estrés térmico durante la ejecución de sus labores. Esta exposición puede repercutir sobre su bienestar mientras permanecen en el ambiente subterráneo y también afectar su desempeño durante el cumplimiento de las diferentes actividades laborales propias de la operación minera. (Jiménez, 2022)

1.3.5. Psicrometría

Durante el proceso de ventilación minera, el aire que proviene del exterior ingresa a las diferentes labores subterráneas bajo determinadas condiciones atmosféricas iniciales. Sin embargo, a medida que este aire avanza y circula por el interior de la mina, dichas condiciones comienzan a modificarse debido a la influencia del ambiente subterráneo. Entre los principales factores que generan estas variaciones se encuentran la incorporación de calor y humedad durante el recorrido del aire por las distintas labores, lo que produce cambios progresivos en algunas de sus propiedades físicas. En consecuencia, aspectos como la densidad, el contenido de humedad y la presión del aire no permanecen constantes, sino que experimentan variaciones continuas conforme este se desplaza dentro de la mina. Estas modificaciones deben ser tomadas en consideración durante la realización de los cálculos relacionados con el diseño, análisis y evaluación de un sistema de ventilación minera, debido a que las condiciones del aire pueden variar a lo largo de su recorrido por las labores subterráneas. Por esta razón, resulta necesario considerar de manera conjunta la temperatura, la humedad y la presión, ya que estos parámetros permiten comprender los cambios que experimenta el aire desde su ingreso hasta su circulación por el interior de la explotación minera. El estudio y análisis de estas variaciones, considerando principalmente la relación existente entre la temperatura, la humedad y la presión del aire, recibe el nombre de psicrometría, la cual permite evaluar el comportamiento de estas propiedades durante el proceso de ventilación de la mina. (Vidal, 2021)

1.4. Marco legal

Tabla 5

Marco legal aplicable a la ventilación minera

Norma / Dispositivo Legal	Ámbito	Aspectos relevantes relacionados con la ventilación minera	Relación con la investigación
Constitución Política del Perú	Nacional	Reconoce el derecho a un ambiente sano y equilibrado (Art. 2, inc. 22), base para la protección de la salud de los trabajadores.	Sustenta legalmente la necesidad de mejorar las condiciones ambientales y térmicas en la unidad minera.
Ley N° 29783 – Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo	Nacional	Obliga al empleador a identificar, evaluar y controlar riesgos físicos y químicos, incluyendo gases, polvo y estrés térmico.	Justifica la evaluación y optimización del sistema de ventilación como medida preventiva.
D.S. N° 024-2016-EM – Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería	Nacional – Minero	Exige sistemas de ventilación eficientes en labores subterráneas para garantizar aire fresco, control de contaminantes y temperatura adecuada.	Base normativa directa para el estudio integral, modelamiento y rediseño de la red de ventilación.
D.S. N° 023-2017-EM (modificatoria del D.S. 024-2016-EM)	Nacional – Minero	Refuerza el monitoreo continuo de la calidad del aire y la responsabilidad del titular minero en la gestión ambiental interna.	Respalda la validación técnica de proyectos de ventilación a mediano y largo plazo.
Ley N° 28611 – Ley General del Ambiente	Nacional	Promueve la prevención de la contaminación y el uso eficiente de la energía en actividades productivas.	Relaciona la optimización de la ventilación con la reducción de consumo energético (CAPEX/OPEX).
Normas y Recomendaciones de la OIT	Internacional	Establecen criterios de seguridad, salud ocupacional y control de atmósferas peligrosas en minería subterránea.	Complementan la normativa nacional con buenas prácticas internacionales.
ASHRAE – Estándares de confort térmico	Internacional	Define rangos aceptables de temperatura, humedad y velocidad del aire para el confort térmico.	Apoya la evaluación del confort térmico como variable técnica del sistema de ventilación.
SME – Guías de Ventilación Minera	Internacional	Proporciona lineamientos técnicos para diseño, simulación y evaluación de redes de ventilación.	Fundamenta el uso del software VENTSIM™ Design 5.2 para el modelamiento y planeamiento.

Nota. En la tabla 5 se presenta un compendio de normas y dispositivos legales de alcance nacional e internacional que sustentan la gestión de la ventilación en minería subterránea. Se detallan su ámbito de aplicación, aspectos relevantes y la relación directa con la investigación, evidenciando el respaldo legal y técnico del estudio.



CAPÍTULO III

1. Metodología

1.1. Tipo y nivel de investigación

1.1.1. Tipo de investigación

Según Hernández et al (2014), se considera que este tipo de investigación aplicada incluye "situaciones controladas en las que la manipulación deliberada de una o más variables independientes (causas) para analizar los resultados de manipular una o más variables dependientes (efectos).

La investigación es de tipo aplicada porque se orienta a la solución práctica de un problema real y específico identificado en una unidad minera ubicada en Arequipa, relacionado con deficiencias en la distribución de la red de ventilación que afectan las condiciones ambientales internas y el confort térmico de los trabajadores. El estudio no se limita a la generación de conocimiento teórico, sino que emplea principios de ingeniería de ventilación minera, normativa vigente y criterios técnicos para diseñar y proponer una distribución optimizada de la red de ventilación, con el fin de mejorar la calidad del aire, controlar contaminantes y regular la temperatura en los frentes de trabajo. Asimismo, los resultados obtenidos son directamente aplicables y operativos, ya que permiten su implementación inmediata en la unidad minera, contribuyendo a la mejora de la seguridad, la salud ocupacional y la eficiencia del sistema de ventilación, características propias de una investigación aplicada.

1.1.2. Nivel de investigación

Según Hernández et al (2014), se considera que el nivel de investigación explicativo incluye se orienta a determinar las causas de los fenómenos y las condiciones en que estos ocurren, estableciendo relaciones de causa-efecto entre las variables, con el propósito de explicar por qué se presenta un determinado fenómeno.

La investigación es de nivel explicativo porque busca identificar y analizar la relación causa–efecto entre la distribución de la red de ventilación (causa) y las condiciones ambientales internas y el confort térmico en la unidad minera (efecto). El estudio no solo describe la situación actual del sistema de ventilación, sino que explica cómo y por qué una distribución inadecuada genera deficiencias en la calidad del aire, acumulación de contaminantes y variaciones térmicas, afectando el desempeño y bienestar de los trabajadores. Asimismo, mediante la propuesta técnica de redistribución de la red de ventilación, se demuestra cómo la aplicación de criterios de diseño y cálculo ventilatorio permite mejorar las condiciones ambientales y térmicas, sustentando así el carácter explicativo del nivel de investigación.

1.2. Diseño de investigación

Según Hernández et al (2014), considera que el diseño de investigación transeccional o transversal se caracteriza por la recolección de información en un único momento y dentro de un periodo determinado, sin realizar un seguimiento posterior de las unidades de estudio. Este diseño permite describir el comportamiento de las variables analizadas y examinar su incidencia o la posible interrelación existente entre ellas en un momento específico.

- Es No **Transeccional**; ya que, el investigador se caracteriza por recolectar datos en un solo momento del tiempo, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia o interrelación en un contexto determinado.
- El diseño de investigación que se utilizará en este estudio se basa en un análisis Transeccional.

1.3. Métodos de investigación

- **Método científico:** Se emplea porque el estudio sigue un proceso sistemático y ordenado que comprende la identificación del problema, formulación de objetivos, análisis de variables, recolección de datos, evaluación técnica y propuesta de solución, permitiendo obtener resultados verificables y confiables.
- **Método analítico:** Se utiliza para descomponer el sistema de ventilación minera en sus componentes (caudales de aire, velocidad, temperatura, contaminantes, conductos, equipos de ventilación), analizando cada uno de ellos de manera individual para identificar deficiencias y oportunidades de mejora.

1.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 6

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnica de recolección de datos	Instrumento	Finalidad
Observación directa	Ficha de observación	Identificar la disposición, estado y funcionamiento de los conductos, ventiladores y elementos del sistema de ventilación.
Medición en campo	Anemómetro	Medir la velocidad y caudal del aire en galerías, frentes de trabajo y retornos.
Medición en campo	Termómetro / Termohigrómetro	Evaluar las condiciones térmicas del ambiente laboral en la unidad minera.
Medición en campo	Detector de gases y polvo	Determinar la concentración de contaminantes presentes en el aire de la mina.
Análisis documental	Guía de revisión documental	Analizar planos, memorias de cálculo, normativas técnicas y registros históricos del sistema de ventilación.
Registro técnico	Formatos de registro de datos	Sistematizar y organizar la información obtenida durante las mediciones y evaluaciones de campo.

Nota. En la tabla 6 se presentan las principales técnicas de recolección de datos utilizadas en la investigación sobre ventilación minera, junto con sus respectivos instrumentos y finalidad, evidenciando un enfoque metodológico integral que combina observación, medición, análisis documental y registro técnico.



CAPÍTULO IV

1. Resultados

1.1. Medición del aforo

La medición del aforo se realizó con el propósito de determinar el caudal de aire que circula por las galerías, frentes de trabajo y retornos de la unidad minera, constituyendo un parámetro fundamental para la evaluación del desempeño del sistema de ventilación. Para ello, se empleó un anemómetro, instrumento que permite medir la velocidad del aire en diferentes secciones del conducto o labor minera. Las mediciones se efectuaron en puntos estratégicos previamente definidos, considerando secciones representativas y evitando zonas con turbulencias excesivas. El caudal de aire se calculó mediante la relación entre la velocidad promedio del aire y el área transversal de la labor, expresada por la ecuación $Q = V \times A$, donde Q es el caudal de aire (m^3/s), V la velocidad promedio del aire (m/s) y A el área de la sección (m^2). Los valores obtenidos permitieron identificar deficiencias en la distribución del aire, sirviendo como base técnica para la propuesta de redistribución de la red de ventilación orientada a mejorar las condiciones ambientales y el confort térmico en la unidad minera.

Tabla 7*Ingresos de aire*

Estación	Nivel	Labor	Detalles	a (m)	h (m)	Sección	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Velocidad (m/min)	Caudal (m ³ /min)	Caudal (cfm)	Dist. (%)
EVPI-01	2050	CH 727	Esperanza I	1.10	1.00	Cuadrado	1.10	0.74	44	49	1,725	3%
EVPI-02	2050	CH 727-2	Esperanza I	1.20	1.20	Baúl	1.35	1.22	73	99	3,491	6%
EVPI-03	2050	CX-953	Esperanza I	1.78	2.06	Baúl	3.44	1.31	79	270	9,536	16%
EVPI-04	1790	CX-500	Cerro Rico	2.30	2.20	Baúl	4.75	1.39	83	395	13,960	23%
EVPI-05	1980	CX-715	Esperanza II	1.38	1.85	Trapecio	2.55	1.21	72	185	6,520	11%
EVPI-06	2170	CX-346	Gertrudiz	1.63	2.07	Baúl	3.16	0.79	47	150	5,298	9%
EVPI-07	2170	CX- 346-2	Gertrudiz	1.93	1.80	Trapecio	2.98	1.46	88	261	9,216	15%
EVPI-11	2170	CH-337	Obstrucción madera	0.72	0.55	Cuadrado	0.40	0.58	35	14	485	1%
TOTAL, INGRESO										1,722	60,801	100%

Nota. En la tabla 7 se presentan la caracterización de las estaciones de ventilación de ingreso (EVPI) en una unidad minera, detallando parámetros geométricos, condiciones de flujo de aire y distribución del caudal en diferentes labores y niveles.

La tabla de medición de aforo evidencia una distribución desigual del caudal de aire en las diferentes estaciones de ventilación evaluadas, alcanzando un caudal total de ingreso de 1 722 m³/min (60 801 cfm), el cual se reparte de manera no homogénea entre los niveles y labores analizadas. Esta condición refleja un sistema de ventilación que, si bien suministra un volumen total significativo de aire, presenta desbalances en su distribución, lo que puede afectar la eficiencia del sistema y el confort térmico en determinadas zonas de trabajo.

Las estaciones EVPi-04 (CX-500 – Cerro Rico) y EVPi-03 (CX-953 – Esperanza I) concentran los mayores aportes de aire, con 395 m³/min (23%) y 270 m³/min (16%), respectivamente. Estas estaciones presentan secciones amplias y velocidades relativamente elevadas, lo que favorece un mayor caudal; sin embargo, esta concentración sugiere una posible sobre ventilación local, que podría estar generando pérdidas de energía y disminuyendo la disponibilidad de aire en otras labores con mayores requerimientos operativos.

En contraste, estaciones como EVPi-01 (CH-727) y EVPi-11 (CH-337) registran caudales, con 49 m³/min (3%) y 14 m³/min (1%), respectivamente. En el caso de EVPi-11, la presencia de una obstrucción de madera, sumada a una sección reducida y baja velocidad del aire, limita considerablemente el flujo, configurando una condición crítica que puede comprometer la calidad del aire, el control de contaminantes y el confort térmico de los trabajadores en esa labor.

Tabla 8*Salida de aire*

ESTACIÓN	UBICACIÓN		DETALLE	SECCIÓN			ÁREA m2	VELOCIDAD		CAUDAL		DIST. %
	NIVEL	LABOR		a (m)	h (m)	Ø		m/s	m/min	m3/min	cfm	
EVPs-01	2365	CX-802N	LA CRUZ B, LABOR INFORMAL	1.45	1.65	BAÚL	2.24	0.28	17	37	1,319	2%
EVPs-02	2293	CX-014	LABOR NAVINTA	0.85	1.33	BAÚL	1.06	0.74	45	47	1,669	3%
EVPs-03	2380	CX-226	ZONA PECHUGÓN	2.16	2.26	BAÚL	4.58	0.9	54	246	8,702	14%
EVPs-04	2465	CX-381	BOCAMINA TIENE CARGA 3er CUADRO 30% RAMBO	1.2	1.68	TRAPEZIO	2.02	1.38	83	167	5,889	10%
EVPs-05	2600	CH-476	PIQUE CHALCO	0.8	1	CUADRADO	0.8	3.07	184	147	5,196	9%
EVPs-06	2455	CX-804E	SAN JOSE, LABOREO INFORMAL, OBSTRUCCIÓN DE	1.75	2.14	BAÚL	3.51	0.02	1	5	182	0%
EVPs-07	2484	CX-804E-2	SAN JOSE, LABOREO INFORMAL	1.48	1.8	BAÚL	2.5	0.14	8	21	736	1%
EVPs-08	2387	GA-606NE	CONSUELO II, ULTIMO CUADRO	1.12	1.7	TRAPEZIO	1.9	1.04	62	119	4,199	7%
EVPs-09	2170	GA-422	GERTRUDIZ VENTILADOR EXTRACTOR PRINCIPAL			0.61 CÍRCULO	0.29	22.26	1,335	390	13,782	23%
EVPs-10	2327	CX-742	LA CRUZ A, LABOR LORO, LABOREO INFORMAL	1.5	1.8	BAÚL	2.53	0.61	36	92	3,256	5%
EVPs-11	2360	CX-746N	LA CRUZ C, LABOREO INFORMAL PERICO	1.45	1.8	BAÚL	2.45	0.44	26	65	2,282	4%
EVPs-12	2314	CX-505	LA CRUZ D, LABOREO INFORMAL	1.3	1.73	BAÚL	2.11	0.13	8	16	573	1%
EVPs-13	2289	CX 679	TERESA D, LABOREO INFORMAL_LOLO SIVINCHA	1.25	1.64	BAÚL	1.92	0.39	23	45	1,574	3%
EVPs-14	2286	CX 666N	TERESA C, LABOREO INFORMAL	1.14	1.8	TRAPEZIO	2.05	0.77	46	94	3,332	5%

EVPs-15-16	2247	CH-694	COMUN DE TAJO_DEBAJO DE CONSUELO II	0.84	1	CUADRADO	0.84	0.44	26	22	2,357	4%
EVPs-17	2360	CH-694	COMUN DE TAJO_DEBAJO DE CONSUELO II	1.1	0.95	CUADRADO	1.05	0.71	43	45	1,764	3%
EVPs-18	2296	CH-510	FREDY DIAS. LABOREO INFORMAL	0.9	1.45	BAÚL	1.22	0.68	41	50	623	1%
EVPs-19	2340	CX-334	CONSUELO I_TIENE OBSTRUCCION DE MADERA	0.82	0.59	CUADRADO	0.48	0.61	36	18	1,087	2%
EVPs-20	2296	CX-572	ESTUVO TAPADO POR EL HUAICO	1	1.55	BAÚL	1.45	0.35	21	31	308	1%
EVPs-21	2170	CH-237	CONSUELO I, INGRESA TUBERIA	1.04	1.43	BAÚL	1.39	0.1	6	9	367	1%
EVPs-22	2170	CH-237	ESTÁ CON CARGA 90% APROX A 10m. ZONA	1.1	1.15	CUADRADO	1.24	0.14	8	10	1,371	2%
EVPs-23	2292	CX270NW	PUNTO TOPOGRÁFICO K2_GERTRUDIZ	0.71	2.1	CUADRADO	0.82	0.79	48	39	515	1%
										1,715	61,081	100%

Nota. En la tabla 8 se presentan la caracterización de 23 estaciones de ventilación de salida (EVPs) en una unidad minera subterránea, detallando su ubicación, geometría de las labores, condiciones del flujo de aire y distribución del caudal extraído del sistema.

La tabla de medición de aforo correspondiente a las salidas de aire evidencia un caudal total evacuado de 1 715 m³/min (61 081 cfm), el cual se distribuye de manera heterogénea entre las diferentes estaciones evaluadas. Esta condición pone de manifiesto un sistema de ventilación con concentración de flujo en puntos específicos, mientras que otras labores presentan caudales notablemente reducidos, lo que puede comprometer la eficiencia global del sistema y las condiciones ambientales internas.

Se identifica que la estación EVPs-09 (GA-422 – Gertrudiz, ventilador extractor principal) concentra el mayor aporte de caudal, con 390 m³/min (23%), asociado a una alta velocidad del aire (22.26 m/s) en una sección circular, lo que confirma su rol predominante en la extracción del aire viciado del sistema. De manera complementaria, estaciones como EVPs-03 (Zona Pechugón) y EVPs-04 (Bocamina con carga) presentan caudales significativos de 246 m³/min (14%) y 167 m³/min (10%), respectivamente, debido a secciones amplias y velocidades relativamente elevadas, contribuyendo de forma importante al proceso de evacuación.

En contraste, varias estaciones vinculadas a laboreos informales o afectadas por obstrucciones físicas muestran caudales bajos o críticos. Destaca la estación EVPs-06 (San José – obstrucción), con apenas 5 m³/min (<1%), así como EVPs-07, EVPs-12, EVPs-21 y EVPs-20, cuyos caudales no superan el 1% del total, evidenciando restricciones severas al flujo de aire, asociadas a reducciones de sección efectiva, baja velocidad del aire o interferencias estructurales como madera, carga minera o sedimentos por eventos naturales (huaico).

Asimismo, estaciones como EVPs-05 (Pique Chalco) y EVPs-08 (Consuelo II) presentan velocidades elevadas y caudales moderados, lo que indica una extracción localizada eficiente, aunque sin un impacto dominante en el balance general del sistema. La coexistencia de secciones de tipo baúl, trapecio, cuadrado y circular, con áreas y velocidades muy variables, refleja una falta de uniformidad geométrica en la red, lo que incrementa las pérdidas de carga y dificulta una evacuación equilibrada del aire.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que el sistema de ventilación presenta un desbalance en la distribución de las salidas de aire, concentrando gran parte del caudal en el ventilador extractor principal y en pocas estaciones, mientras que otras labores permanecen subventiladas. Esta situación justifica técnicamente la necesidad de redistribuir la red de ventilación, eliminar obstrucciones, optimizar las secciones de salida y mejorar el control del flujo, con el fin de garantizar condiciones ambientales adecuadas, eficiencia energética y un mayor confort térmico en toda la unidad minera.

1.2. Requerimiento y cobertura actual de mina

Tabla 9

Requerimiento y cobertura actual de mina

Distribución Requerimientos	m ³ /min	cfm
QTr: Personas (290 trabajadores)	1,160	40,964
QMa: Consumo de Madera (<20-40>)	28	981
QTe: Temperatura en Labores (>24 Ec)	318	11,213
QEq: Equipos Diesel (0 equipos: 0HP)	0	0
QEq: Explosivos	0	0
QFu: Caudal requerido por fugas	226	7,974
Caudal Requerido QT1= QTr+Qma+Qte+Qeq	1,731	61,132

Nota. En la tabla 9 presenta el cálculo del caudal de aire requerido para una unidad minera, considerando diferentes fuentes de demanda de ventilación. Estos requerimientos se expresan en m³/min y cfm, y permiten determinar el caudal total necesario para garantizar condiciones seguras y confortables en las labores subterráneas.

La tabla de distribución de requerimientos muestra que el caudal total de aire requerido (QT1) para la operación minera asciende a 1 731 m³/min (61 132 cfm), valor obtenido a partir de la suma de los principales factores que condicionan la ventilación: número de trabajadores, consumo de madera, control térmico y pérdidas por fugas. Este caudal constituye el mínimo necesario para garantizar condiciones adecuadas de seguridad, salubridad y confort térmico en las labores subterráneas.

El componente predominante del requerimiento corresponde a QTr – Personas, con 1 160 m³/min (40 964 cfm), lo que representa el 67% del caudal total requerido. Este resultado evidencia que la ventilación está principalmente condicionada por la presencia de 290 trabajadores, confirmando que el diseño del sistema debe priorizar la renovación continua del aire para la dilución de contaminantes y el suministro de oxígeno suficiente en las áreas de trabajo.

En segundo lugar, el requerimiento asociado a QTe – control de temperatura en labores con temperaturas superiores a 24 °C efectivos, alcanza 318 m³/min (11 213 cfm), equivalente aproximadamente al 18% del total. Este valor pone de manifiesto la influencia del factor térmico en el dimensionamiento del sistema de ventilación, especialmente en zonas profundas o con baja disipación de calor, donde el confort térmico y el desempeño del personal pueden verse comprometidos.

El caudal correspondiente a QFu – fugas del sistema es de 226 m³/min (7 974 cfm), representando cerca del 13% del caudal total requerido, lo cual refleja la existencia de pérdidas significativas de aire a lo largo de la red de ventilación. Esta condición sugiere deficiencias en la estanqueidad del sistema, tales como uniones inadecuadas, ductos deteriorados u obstrucciones, incrementando innecesariamente la demanda de aire fresco.

Por otro lado, los requerimientos asociados al consumo de madera (QMa) son relativamente bajos, con 28 m³/min (981 cfm), mientras que los caudales por equipos diésel y explosivos son nulos, debido a la ausencia de estos factores en la operación evaluada. Esto indica que, en la situación actual, el dimensionamiento del sistema de ventilación no está condicionado por fuentes móviles de combustión ni por gases de voladura.

En términos generales, el análisis evidencia que el caudal requerido (1 731 m³/min) es ligeramente superior al caudal total medido de ingresos y salidas ($\approx$ 1 720 m³/min), lo que sugiere una condición de déficit marginal de ventilación, especialmente crítica en labores con obstrucciones o baja velocidad del aire. Esta diferencia refuerza la necesidad de optimizar la distribución de la red de ventilación, reducir fugas y mejorar la eficiencia del sistema, a fin de cumplir plenamente con los requerimientos operativos y normativos de la ventilación minera.

Tabla 10*Balance de entrada y salida*

Resumen	cfm	%
Total, ingreso	60,801	100%
Total, salida	61,081	100%
Desbalance final (+/-)	280	0.5%

Nota. En la tabla 10 presenta un resumen del balance de ventilación en la unidad minera, comparando el caudal total de aire de ingreso y salida, así como el desbalance final del sistema.

El resumen del balance de ventilación muestra que el caudal total de aire de ingreso al sistema es de 60 801 cfm, mientras que el caudal total de salida alcanza 61 081 cfm, ambos valores equivalentes al 100% de sus respectivos totales. La diferencia entre ambos flujos genera un desbalance final de 280 cfm, lo que representa apenas el 0.5% del caudal total, indicando un alto grado de equilibrio en el sistema de ventilación de la unidad minera.

Este desbalance positivo, donde el caudal de salida es ligeramente superior al de ingreso, puede atribuirse a pérdidas por fugas, infiltraciones no controladas o variaciones temporales en las mediciones de velocidad del aire, propias de las condiciones operativas subterráneas. No obstante, al encontrarse dentro de un rango menor al 5%, el desbalance se considera técnicamente aceptable y no compromete de manera significativa la eficiencia global del sistema ni la seguridad de las labores.

Desde el punto de vista operativo, el balance cercano a la neutralidad evidencia que el sistema de ventilación mantiene un control adecuado del flujo de aire, garantizando la evacuación del aire viciado y la renovación continua del ambiente laboral. Sin embargo, la ligera diferencia registrada sugiere la conveniencia de mejorar el control de fugas y la estanqueidad de la red, con el fin de optimizar el aprovechamiento del caudal disponible y reducir pérdidas energéticas.

Tabla 11*Balance total de aire*

BALANCE TOTAL DE AIRE		
Caudal de Aire	m ³ /min	cfm
Total, de aire requerido	1,731	61,132
Ingreso de aire a mina	3,066	60,801
Salida de aire	1,852	61,081
Cobertura (%)		99%
Déficit (cfm)		331

Nota. En la tabla 11 se presenta el balance global del sistema de ventilación, comparando el caudal de aire requerido con los caudales reales de ingreso y salida, además de indicadores clave como la cobertura y el déficit de ventilación.

El balance total de aire muestra que el caudal de aire requerido para garantizar condiciones adecuadas de seguridad, salubridad y confort térmico en la unidad minera asciende a 1 731 m³/min (61 132 cfm). Este valor representa el volumen mínimo necesario para cubrir las demandas asociadas a la presencia de personal, control térmico, fugas del sistema y demás factores operativos.

El ingreso de aire a la mina registra un caudal de 3 066 m³/min (60 801 cfm), mientras que la salida de aire alcanza 1 852 m³/min (61 081 cfm). Al comparar estos valores con el caudal requerido, se obtiene una cobertura del 99%, lo que indica que el sistema de ventilación se encuentra cercano al cumplimiento del requerimiento total, aunque aún presenta una brecha operativa.

El déficit de 331 cfm evidencia que, si bien el sistema en su conjunto funciona de manera casi equilibrada, no se satisface completamente la demanda de ventilación requerida, especialmente en labores con obstrucciones, secciones reducidas o baja velocidad del aire. Este déficit puede estar asociado a pérdidas por fugas, desbalance en la distribución del flujo o

ineficiencias locales en la red de ventilación, más que a una insuficiencia del caudal global disponible.

Desde el punto de vista técnico, una cobertura del 99% se considera aceptable de manera temporal, pero no óptima para una operación minera sostenida, ya que pequeñas variaciones en las condiciones de trabajo, incremento de personal o cambios térmicos podrían agravar el déficit existente. Por ello, resulta necesario optimizar la distribución del aire, mejorar el control de fugas y eliminar obstrucciones, con el fin de alcanzar una cobertura del 100% o superior y asegurar condiciones ambientales adecuadas en todas las labores.

En conclusión, el balance total de aire confirma que el sistema de ventilación cuenta con un potencial suficiente de caudal, pero requiere ajustes técnicos en su distribución y control para eliminar el déficit identificado y garantizar el cumplimiento integral de los requerimientos de ventilación en la unidad minera.

1.2.1. Requerimiento por personal

Tabla 12

Requerimiento por personal

EMPRESAS	TOTAL/ gdia	m3/min (*)	CFM	DISTRIBUCIÓN (%)
ADGEMINCO	154	616.00	21.753	53%
MYSAC	29	116.00	4,096	10%
SACOMN	14	56.00	1,978	5%
ACY	17	68.00	2,401	6%
SERMIGOLD	76	304.00	10,735	26
290	1,160.00	40,964	100%	

Nota. En la tabla 12 se presenta la distribución del consumo de aire de ventilación según las empresas que operan en la unidad minera, considerando el número de trabajadores (jornales por día), el caudal requerido en m³/min y CFM, y su participación porcentual en la demanda total.

La tabla muestra la distribución del requerimiento de caudal de aire asociado al personal que labora en la unidad minera, considerando un total de 290 trabajadores, lo que genera una demanda global de 1 160 m³/min (40 964 cfm) para asegurar condiciones adecuadas de ventilación y salubridad. Este caudal representa uno de los componentes más significativos dentro del balance total de ventilación de la mina.

La empresa ADGEMINCO concentra la mayor cantidad de personal, con 154 trabajadores, lo que equivale al 53% del total, requiriendo un caudal de 616 m³/min (21 753 cfm). Esta elevada participación evidencia que las áreas operadas por dicha empresa demandan una mayor provisión de aire fresco, debiendo ser priorizadas dentro del diseño y redistribución de la red de ventilación para evitar condiciones de subventilación.

En segundo lugar, SERMIGOLD registra 76 trabajadores, representando el 26% del personal total, con un requerimiento de 304 m³/min (10 735 cfm). Este valor confirma la importancia de garantizar una adecuada ventilación en las labores asignadas a esta empresa, especialmente si se desarrollan en zonas profundas o con limitaciones geométricas.

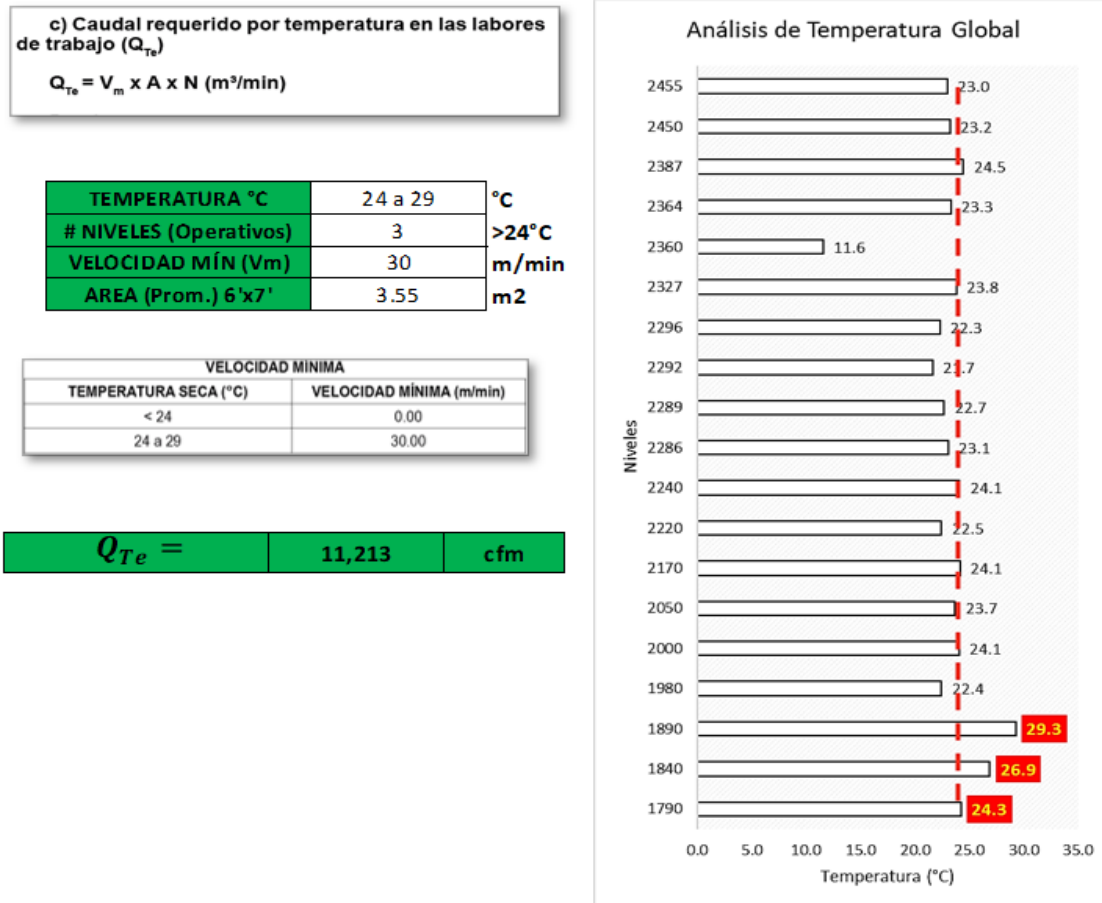
Las empresas MYSAC, ACY y SACOMN presentan una menor participación, con 29, 17 y 14 trabajadores, respectivamente, lo que se traduce en requerimientos de caudal de 116 m³/min (10%), 68 m³/min (6%) y 56 m³/min (5%). Aunque sus demandas individuales son menores, estas no deben ser subestimadas, ya que una distribución inadecuada del aire podría generar focos localizados de deficiencia ventilatoria.

En términos generales, la tabla evidencia que la demanda de aire está directamente relacionada con la distribución del personal por empresa, lo que refuerza la necesidad de un diseño de ventilación flexible y balanceado, capaz de adaptarse a variaciones en la cantidad de trabajadores y en la ubicación de las labores. Esta información resulta clave para sustentar técnicamente la propuesta de redistribución de la red de ventilación, asegurando que el caudal disponible cubra equitativamente las necesidades reales de cada frente de trabajo.

1.2.2. Requerimiento por temperatura

Figura 4

Requerimiento de temperatura



Nota. En la figura se aprecia el requerimiento en cuanto al caudal permitido de acuerdo con la temperatura y su análisis global.

1.2.3. *Requerimiento por explosivos*

Tabla 13

Requerimiento por explosivos

MES	EXPLOSIVO TOTAL (Kg)
ENE 22	16,997
FEB 22	17,635
MAR 22	22,837
ABR 22	25,411
MAY 22	24,319
JUN 22	18,696
PROMEDIO	23,081 KG/ MES
Área Prom 6'x 7'	3.78 m2
Velocidad Min	25 m/min
Niveles (Operativos)	7
Tiempo Dilución	60 min
Explosivo	385 kg/Gd

Nota. En la tabla 13 se presenta información sobre el consumo mensual de explosivos en la operación minera durante el primer semestre del año 2022, junto con parámetros técnicos utilizados para el diseño y evaluación del sistema de ventilación

La tabla de consumo de explosivos muestra que, durante el periodo evaluado (enero–junio 2022), el uso mensual de explosivos presenta una tendencia variable, con valores que oscilan entre 16 997 kg/mes (enero) y 25 411 kg/mes (abril). El promedio mensual de consumo se establece en 23 081 kg/mes, lo que evidencia una actividad sostenida de voladura a lo largo del periodo analizado. Este comportamiento refleja una intensidad operativa significativa, la cual genera emisiones periódicas de gases de voladura que deben ser controladas mediante un sistema de ventilación eficiente.

El incremento progresivo del consumo entre enero y abril indica una mayor frecuencia o magnitud de las voladuras, lo que incrementa la carga contaminante en el ambiente subterráneo y exige un adecuado dimensionamiento del caudal de aire para la dilución y evacuación de gases nocivos. Aunque en junio se observa una reducción del consumo, el valor

promedio mensual confirma que el explosivo constituye un factor relevante en el diseño de la ventilación, especialmente en labores activas y niveles operativos.

En relación con los parámetros de ventilación, se considera un área promedio de labor de 3.78 m² (6' × 7') y una velocidad mínima del aire de 25 m/min, valores que permiten garantizar el transporte efectivo de aire fresco hacia los frentes de trabajo. La operación en siete niveles activos incrementa la complejidad del sistema de ventilación, ya que requiere una distribución equilibrada del flujo para evitar acumulaciones localizadas de gases de voladura.

El tiempo de dilución de 60 minutos, asociado a una carga promedio de explosivo de 385 kg por guardia, establece el criterio operativo para la evacuación segura de los gases generados después de cada voladura. Este tiempo resulta coherente con el consumo registrado y con las condiciones geométricas de las labores, siempre que el caudal de aire disponible sea suficiente y correctamente distribuido.

En conjunto, el análisis evidencia que el consumo promedio de explosivos, combinado con las características geométricas de las labores y los parámetros de operación, justifica plenamente la exigencia de un sistema de ventilación bien dimensionado y balanceado. La información analizada sustenta la necesidad de optimizar la distribución de la red de ventilación, a fin de asegurar una dilución efectiva de los gases de voladura, mantener velocidades adecuadas del aire y garantizar condiciones ambientales seguras para los trabajadores en todos los niveles operativos.

1.2.4. Requerimiento por consumo de madera

Tabla 14

Requerimiento por consumo de madera

MES	PRODUCCIÓN (TMH)	PRODUCCIÓN (m ³)	MES	CONSUMO MADERA
ENERO	2,332	752	ENERO	249
FEBRERO	2,455	792	FEBRERO	230
MARZO	2,753	888	MARZO	249
ABRIL	3,088	996	ABRIL	278
MAYO	3,258	1,051	MAYO	251
TOTAL	2,277	896	TOTAL (m ³ / mes)	251

Nota. En la tabla 14 se presenta información mensual comparativa entre la producción minera (en TMH y m³) y el consumo de madera durante el periodo de enero a mayo, incluyendo además valores promedio.

La tabla muestra la evolución mensual de la producción minera, expresada en toneladas métricas húmedas (TMH) y en volumen (m³), así como el consumo mensual de madera, evidenciando una relación directa entre la intensidad productiva y la demanda de sostenimiento. Durante el periodo evaluado (enero–mayo), la producción registra un incremento progresivo, pasando de 2 332 TMH (752 m³) en enero a 3 258 TMH (1 051 m³) en mayo, lo que refleja una mayor actividad operativa y ampliación de frentes de trabajo.

En correspondencia con este incremento productivo, el consumo de madera mantiene valores relativamente constantes, con ligeras variaciones mensuales que oscilan entre 230 m³ y 278 m³, alcanzando un promedio mensual aproximado de 251 m³. El mayor consumo se registra en el mes de abril, coincidiendo con un aumento significativo de la producción, lo que evidencia que la madera continúa siendo un elemento clave para el sostenimiento de labores, especialmente en etapas de mayor avance y desarrollo.

La estabilidad del consumo promedio de madera frente al incremento sostenido de la producción sugiere una optimización progresiva en el uso del sostenimiento, ya sea por mejoras en el diseño de las labores, mayor eficiencia en la colocación de elementos de soporte o cambios en las características geomecánicas del macizo rocoso. No obstante, la presencia constante de madera en las labores implica una demanda adicional de ventilación, debido a la posible generación de gases, polvo y humedad, aspectos que deben ser considerados en el balance ventilatorio.

En términos generales, el análisis conjunto de la producción y el consumo de madera permite concluir que el crecimiento de la actividad minera incrementa las exigencias sobre el sistema de ventilación, no solo por el aumento de personal y equipos, sino también por el uso continuo de materiales de sostenimiento. Esta información sustenta técnicamente la necesidad de dimensionar y redistribuir adecuadamente la red de ventilación, a fin de garantizar condiciones ambientales seguras y eficientes conforme se incrementa la producción en la unidad minera.

1.2.5. Requerimiento por fugas

Tabla 15

Requerimiento por fugas

Q_{Tr}	40,964	cfm
Q_{Ma}	981	cfm
Q_{Ta}	11,213	cfm
Q_{EQ}		cfm
Q_{Fu}	7,974	cfm

Nota. En la tabla 15 se presenta los principales componentes del caudal de aire requerido (en cfm) para garantizar condiciones seguras en la mina, considerando distintos factores operativos y ambientales.

La tabla de requerimientos parciales de caudal de aire muestra los componentes que determinan la demanda total de ventilación en la unidad minera, expresados en pies cúbicos por

minuto (cfm). El requerimiento predominante corresponde a QTr – personal, con un valor de 40 964 cfm, lo que confirma que la presencia de trabajadores constituye el principal factor de dimensionamiento del sistema de ventilación, al estar directamente asociada a la necesidad de suministro de oxígeno y dilución de contaminantes generados en las labores.

El segundo componente más relevante es QTa – control térmico, con 11 213 cfm, evidenciando la influencia significativa de las condiciones de temperatura ambiental en el requerimiento total de aire. Este valor refleja la necesidad de mantener temperaturas efectivas dentro de rangos aceptables, especialmente en labores profundas o con limitada disipación de calor, donde el confort térmico y la productividad del personal pueden verse comprometidos.

Por su parte, el requerimiento asociado al consumo de madera (QMa) alcanza 981 cfm, representando una fracción menor del caudal total, aunque relevante desde el punto de vista operativo. La presencia de madera en las labores puede contribuir a la generación de polvo, humedad y gases, lo que justifica su consideración dentro del balance ventilatorio.

El componente QFu – fugas del sistema, con 7 974 cfm, pone en evidencia la existencia de pérdidas de aire considerables dentro de la red de ventilación. Este valor refleja ineficiencias asociadas a ductos deteriorados, uniones deficientes, obstrucciones o geometrías irregulares, incrementando la demanda de aire fresco sin aportar directamente a la mejora de las condiciones ambientales en los frentes de trabajo.

Finalmente, el requerimiento por equipos diésel (QEQ) es nulo, lo que indica que en la situación evaluada no existen equipos de combustión interna que generen gases adicionales, simplificando parcialmente el diseño del sistema de ventilación. En conjunto, el análisis evidencia que la demanda de ventilación está principalmente condicionada por el número de trabajadores y el control térmico, seguida por las pérdidas por fugas, lo que refuerza la necesidad de optimizar la distribución del aire y mejorar la estanqueidad del sistema, con el fin de reducir requerimientos innecesarios y asegurar condiciones ambientales seguras y eficientes en la unidad minera.

1.3. Análisis de velocidad de aire

Se realizó un análisis de velocidades donde se puede observar niveles donde la cantidad de puntos rojos están por debajo del estándar 25 m/min, cabe recalcar que estos puntos de monitoreo son en lugares donde no existe tránsito de personal, solo tránsito de los gases viciados de las operaciones, en total 244 puntos.

Tabla 16

Análisis de velocidad de aire

Zona / Nivel	Cota (msnm)	Veloc. < 25	Veloc. ≥ 25 y < 250
Cerro Rico	1790	3	20
	1840	9	6
	1890	5	0
	1980	6	9
Esperanza II	2000	1	6
	2050	32	24
Esperanza I	2170	11	17
Gertrudis	2220	2	10
La 70	2240	7	11
La U	2286	5	8
	2289	3	0
	2292	3	0
Consuelo I	2296	5	9
	2327	3	5
	2360	0	1
	2364	3	0
Consuelo II	2387	5	13
	2450	1	0
	2455	1	0
Total	—	105	139
Total, general	—	244	

Nota. En la tabla 16 se muestra la evaluación de la ventilación en diferentes zonas y niveles de la mina, clasificando las mediciones de velocidad del aire en dos rangos: Velocidades menores a 25 m/min (deficientes), Velocidades entre 25 y 250 m/min (aceptables según normativa).

La tabla muestra la distribución de puntos de medición de velocidad del aire clasificados en dos rangos: velocidades menores a 25 m/min, consideradas insuficientes para una ventilación efectiva, y velocidades entre 25 y 250 m/min, que corresponden al rango operativo aceptable según criterios técnicos de ventilación minera.

Del total de 244 puntos evaluados, se observa que 105 puntos (43.0%) presentan velocidades menores a 25 m/min, lo que evidencia una deficiencia significativa en la circulación de aire en una parte importante de las labores. Por otro lado, 139 puntos (57.0%) se encuentran dentro del rango adecuado, indicando que poco más de la mitad de la red de ventilación cumple con las condiciones mínimas esperadas.

A nivel de zonas, la mayor concentración de puntos con velocidades insuficientes se presenta en Esperanza II, particularmente en la cota 2050 msnm, donde se registran 32 puntos con velocidad menor a 25 m/min, lo que sugiere problemas de distribución del flujo, posibles obstrucciones o falta de regulación mediante controles de ventilación. De manera similar, zonas como Esperanza I (2170 msnm) y Cerro Rico muestran una proporción relevante de puntos con baja velocidad, evidenciando una ventilación irregular a lo largo de los niveles.

En contraste, zonas como Gertrudiz, La 70 y La U presentan una mayor proporción de puntos dentro del rango aceptable, lo que indica una mejor eficiencia del sistema de ventilación en dichas áreas. Sin embargo, incluso en estas zonas persisten puntos aislados con velocidades inferiores al mínimo recomendado, lo que revela la necesidad de ajustes localizados.

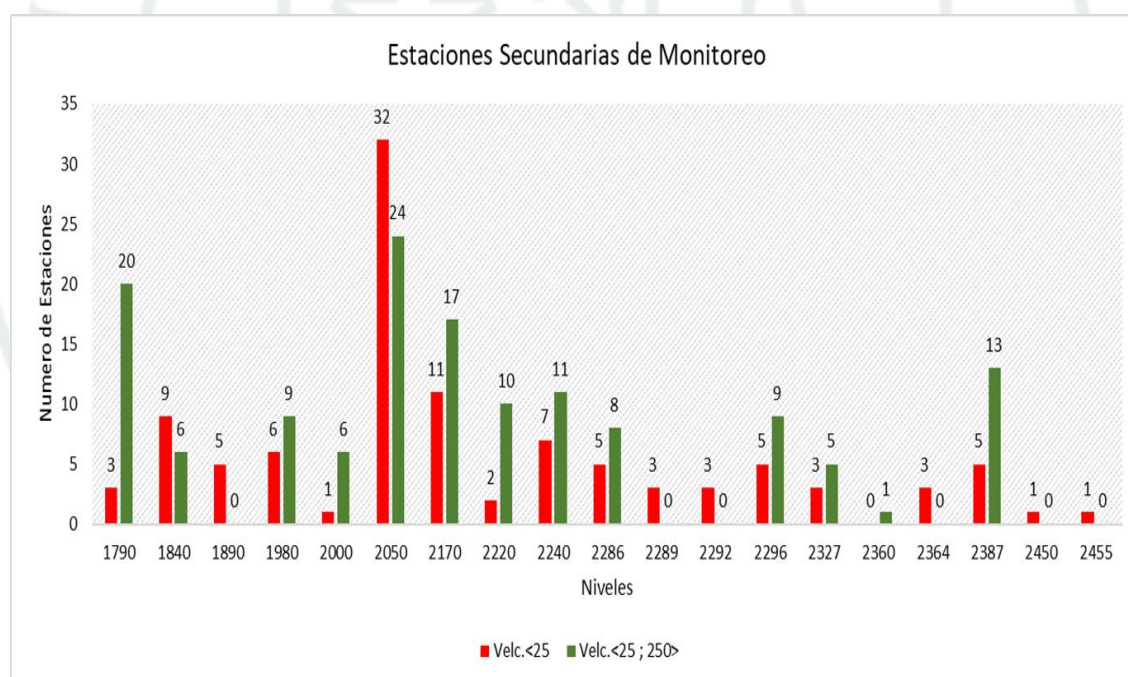
En las zonas Teresa y Consuelo I, se identifican niveles donde la totalidad o gran parte de los puntos presentan velocidades bajas, especialmente en las cotas 2289, 2292 y 2364 msnm, lo cual puede estar asociado a labores en condición de avance, presencia de obstrucciones, secciones inadecuadas o ventilación auxiliar deficiente.

Finalmente, en Consuelo II, si bien la mayoría de puntos se ubican dentro del rango aceptable, aún se registran puntos con velocidades menores a 25 m/min, lo que confirma que la red de ventilación no mantiene un comportamiento homogéneo en todos los niveles operativos.

En tal sentido, los resultados evidencian que el sistema de ventilación presenta un desempeño parcialmente eficiente, con una proporción considerable de labores que no alcanzan la velocidad mínima recomendada para garantizar una adecuada dilución de contaminantes y confort térmico. Esta situación justifica técnicamente la necesidad de una propuesta de redistribución de la red de ventilación, orientada a optimizar el balance de caudales, reducir pérdidas y asegurar condiciones ambientales seguras en todas las zonas de operación.

Figura 5

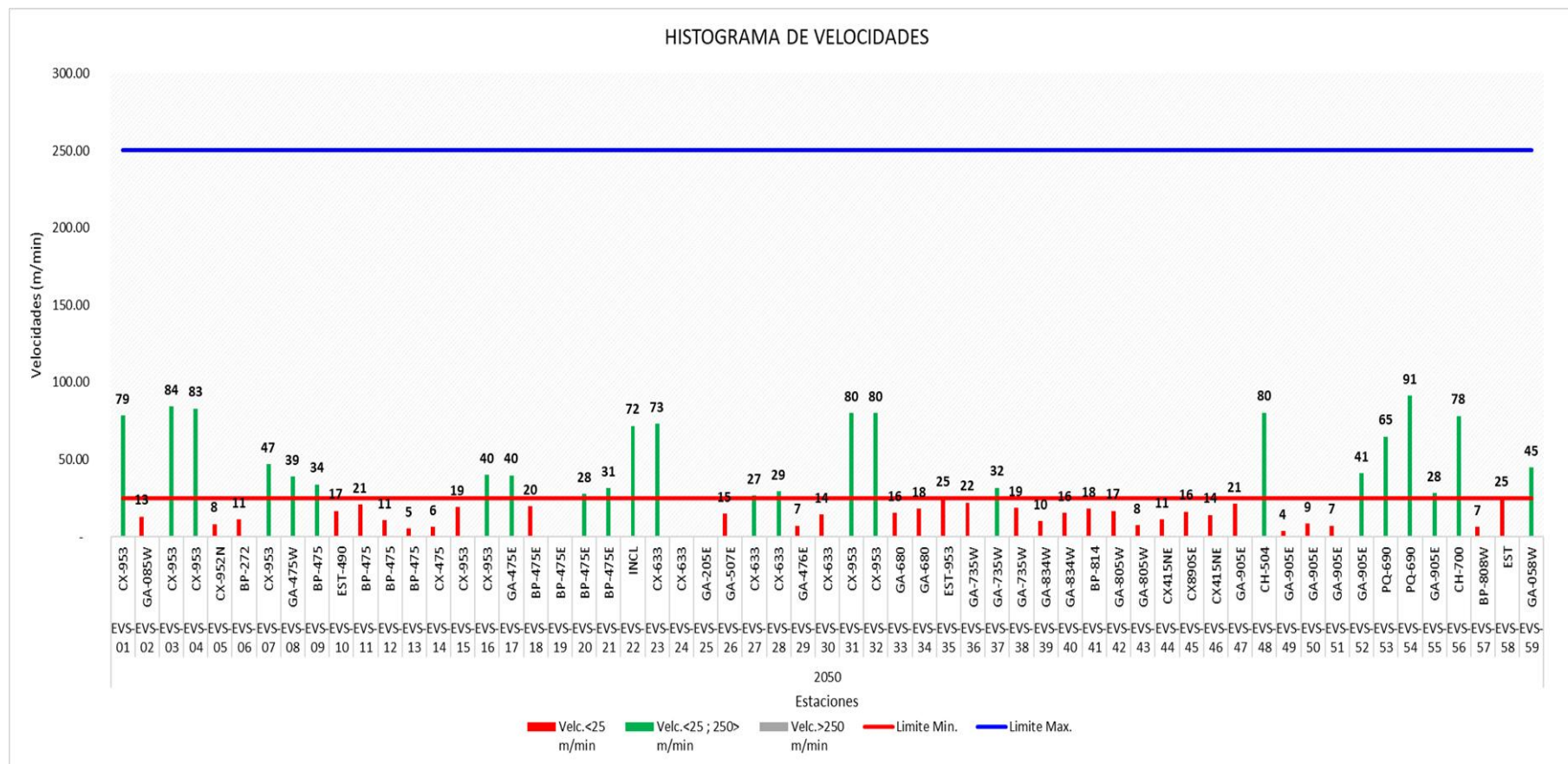
Gráficos de estaciones secundarias de monitoreo



Nota. En la figura se aprecia el gráfico de estaciones secundarias de monitoreo de acuerdo al número de estaciones y los niveles que representan con las respectivas velocidades.

Figura 6

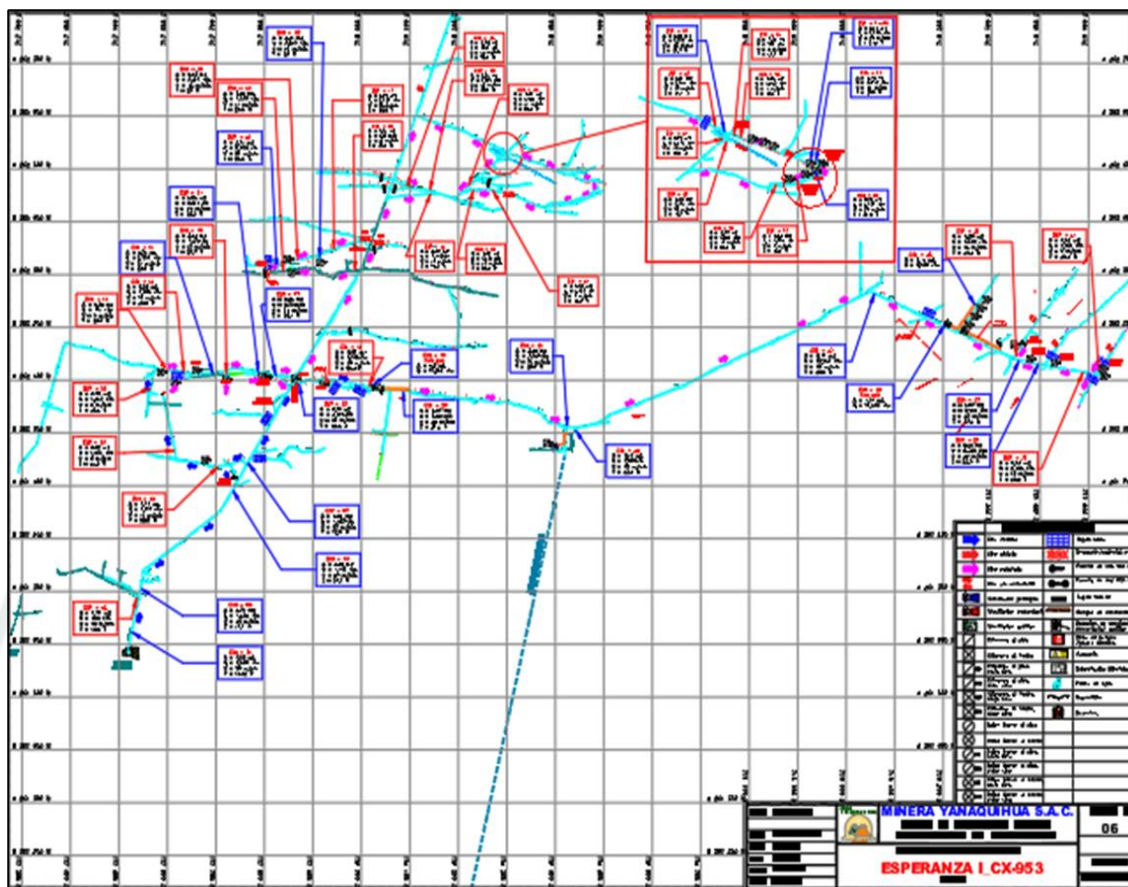
Histograma de velocidades



Nota. En la figura se aprecia el gráfico de histograma de velocidades del aire correspondientes a las estaciones

Figura 7

Plano realizado en la toma de data insitu en puntos estratégicos



Nota. En la figura corresponde a un plano general de la red de ventilación subterránea de la unidad minera, donde se representan las labores, circuitos de aire y puntos de control distribuidos en diferentes niveles.

1.4. Requerimientos proyectados

Tabla 17

Requerimientos proyectados

Distribución de Requerimientos	Actual (cfm)	1 año (cfm)	3–5 Años (cfm)
QTr: Personas (trabajadores)	40,964	43,012	45,163
QMa: Consumo de Madera (<20–40%)	981	981	981
QTe: Temperatura en Labores (>24 °C)	11,213	11,213	11,213
QEq: Equipos Diésel (0 equipos; 0 HP)	0	0	0
QEq: Explosivos	0	0	0
QFu: Caudal requerido por fugas	7,974	8,281	8,604
Caudal Requerido QT1 = QTr + QMa + QTe + QEq	61,132	63,488	65,961

Nota. En la tabla 17 se presenta la distribución del caudal de aire requerido (cfm) en tres escenarios: condición actual, proyección a 1 año y proyección a 3–5 años, considerando los principales factores que influyen en la ventilación minera.

La tabla presenta la distribución del caudal de aire requerido (cfm) para la ventilación de la unidad minera, considerando el escenario actual, una proyección a 1 año y otra a 3–5 años, en función de los principales factores que influyen en la demanda de aire.

En primer lugar, el requerimiento por personas (QTr) constituye el componente dominante del sistema de ventilación, representando más del 65 % del caudal total en todos los escenarios. Su incremento progresivo (de 40,964 cfm a 45,163 cfm) refleja el crecimiento esperado de la dotación de trabajadores, lo cual impacta directamente en la demanda de aire fresco para garantizar condiciones seguras y saludables.

El consumo de madera (QMa) mantiene un valor constante de 981 cfm, lo que indica que no se prevén cambios significativos en el ritmo de sostenimiento con madera, ni en su influencia sobre la ventilación durante el horizonte de análisis. De manera similar, el requerimiento por temperatura en labores (QTe) permanece constante en 11,213 cfm,

evidenciando que las condiciones térmicas actuales y la profundidad de explotación no presentan variaciones relevantes en el corto y mediano plazo.

Por otro lado, los equipos diésel y explosivos (QEq) no generan demanda adicional de aire, debido a la ausencia de equipos diésel operativos y a que la ventilación requerida por explosivos no es determinante en el balance global considerado.

El caudal requerido por fugas (QFu) muestra un incremento moderado con el tiempo, pasando de 7,974 cfm a 8,604 cfm, lo cual refleja una previsión conservadora del aumento de pérdidas de aire asociadas a la ampliación de labores, mayores longitudes de galerías y envejecimiento de la infraestructura ventilatoria.

Finalmente, el caudal total requerido (QT1) se incrementa de 61,132 cfm en la condición actual a 65,961 cfm en el escenario de 3–5 años, lo que representa un aumento aproximado del 8 %. Este resultado evidencia que el sistema de ventilación debe ser dimensionado con criterios de crecimiento futuro, priorizando la atención del requerimiento por personal y el control de fugas, para asegurar condiciones adecuadas de seguridad, confort térmico y calidad del aire en la operación minera.

1.5. Perfiles de ventilación

Muestra de los planos realizados en la toma de data insitu en puntos estratégicos con el fin de alimentar al software.

Tabla 18

Perfiles de ventilación - Zona Esperanza

Distribución Requerimientos	Actual	1 año	3 – 5 años
	cfm	cfm	cfm
QTr: Personas (trabajadores)	38,563	40,491	42,516
QMa: Consumo de Madera (<20–40%)	981	981	981
QTe: Temperatura en Labores (>24 °C)	11,213	11,213	11,213
QEq: Equipos Diésel (0 equipos; 0 HP)	-	-	-
QEq: Explosivos	-	-	-
QFu: Caudal requerido por fugas	7,614	7,903	8,206
Caudal Requerido QT1 = QTr + QMa + QTe + QEq	58,371	60,588	62,916

Nota. En la tabla 18 se presenta la estimación del caudal de aire requerido (cfm) en tres escenarios: actual, a 1 año y a 3–5 años, considerando los principales factores operativos de la ventilación minera

La tabla muestra la evolución del caudal de aire requerido (cfm) para la ventilación de la unidad minera en el escenario actual, a 1 año y en un horizonte de 3 a 5 años, considerando los principales factores que condicionan la demanda de aire.

El requerimiento por personas (QTr) es el componente más influyente del sistema, representando aproximadamente entre 66 % y 68 % del caudal total. Su incremento progresivo de 38,563 cfm a 42,516 cfm responde al crecimiento proyectado del número de trabajadores, lo que exige mayor suministro de aire fresco para garantizar condiciones adecuadas de seguridad y salud ocupacional.

El consumo de madera (QMa) se mantiene constante en 981 cfm en todos los escenarios, lo que indica estabilidad en el sistema de sostenimiento y en su impacto sobre la ventilación. De manera similar, el requerimiento por temperatura en labores (QTe) permanece invariable en 11,213 cfm, evidenciando que las condiciones térmicas actuales no presentan variaciones significativas en el horizonte de análisis.

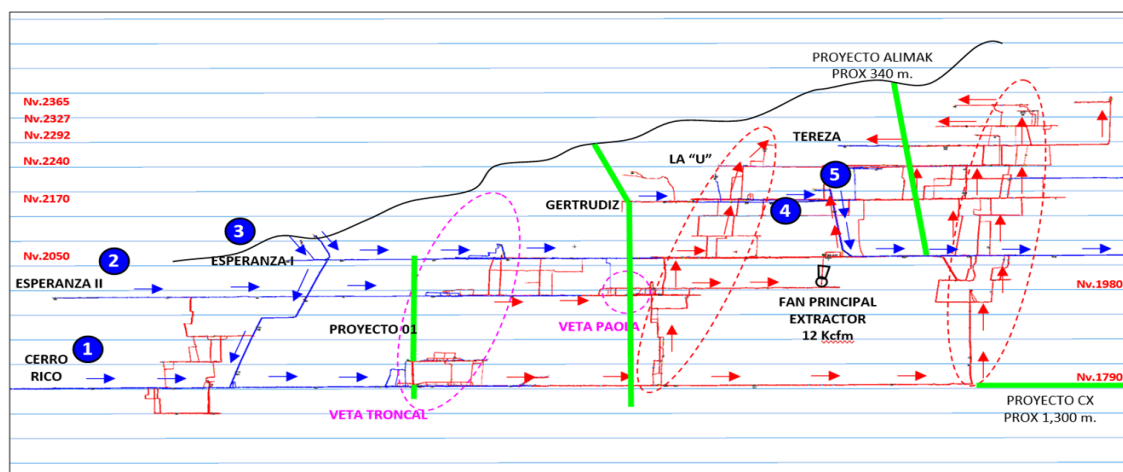
Respecto a los equipos diésel y explosivos (QEq), no se registra demanda adicional de aire, lo cual se explica por la ausencia de equipos diésel operativos y por un esquema de voladura que no condiciona de forma permanente el caudal requerido del sistema.

El caudal requerido por fugas (QFu) presenta un incremento moderado, pasando de 7,614 cfm a 8,206 cfm, reflejando el aumento esperado de pérdidas de aire debido a la ampliación de labores, mayores longitudes de galerías y la progresiva degradación de los cerramientos y controles de ventilación.

Finalmente, el caudal total requerido (QT1) aumenta de 58,371 cfm en la condición actual a 62,916 cfm en el escenario de 3–5 años, lo que representa un incremento aproximado del 7.8 %. Este comportamiento evidencia la necesidad de planificar y dimensionar el sistema de ventilación con criterio prospectivo, priorizando el control de fugas y el suministro adecuado de aire por trabajador, para asegurar condiciones seguras, confort térmico y cumplimiento normativo en el mediano plazo.

Figura 8

Zona Esperanza



Nota. En la figura se aprecia los puntos estratégicos en cuanto a la zona Esperanza.

Tabla 19

Perfiles de ventilación - Zona Consuelo

Distribución Requerimientos	Actual	1 año	3 – 5 años
	cfm	cfm	cfm
QTr: Personas (trabajadores)	2,401	2,521	2,647
QMa: Consumo de Madera (<20–40%)	0	0	0
QTe: Temperatura en Labores (>24 °C)	0	0	0
QEq: Equipos Diésel (0 equipos; 0 HP)	0	0	0
QEq: Explosivos	0	0	0
QFu: Caudal requerido por fugas	360	378	397
Caudal Requerido QT1 = QTr + QMa + QTe + QEq	2,762	2,900	3,045

Nota. En la tabla 19 se presenta la distribución del caudal de aire requerido (cfm) en tres: condición actual, a 1 año y a 3–5 años, considerando un escenario con baja complejidad operativa.

La tabla presenta la distribución del caudal de aire requerido (cfm) para un sector o circuito específico de la unidad minera, evaluado en el escenario actual, a 1 año y en un horizonte de 3 a 5 años, considerando los principales factores que influyen en la demanda de ventilación.

El requerimiento por personas (QTr) constituye prácticamente la totalidad del caudal base, con valores de 2,401 cfm en la condición actual, 2,521 cfm a 1 año y 2,647 cfm a 3–5 años. Este incremento progresivo refleja un crecimiento moderado del personal en la zona evaluada, lo que incrementa directamente la necesidad de aire fresco para asegurar condiciones adecuadas de respirabilidad y seguridad ocupacional.

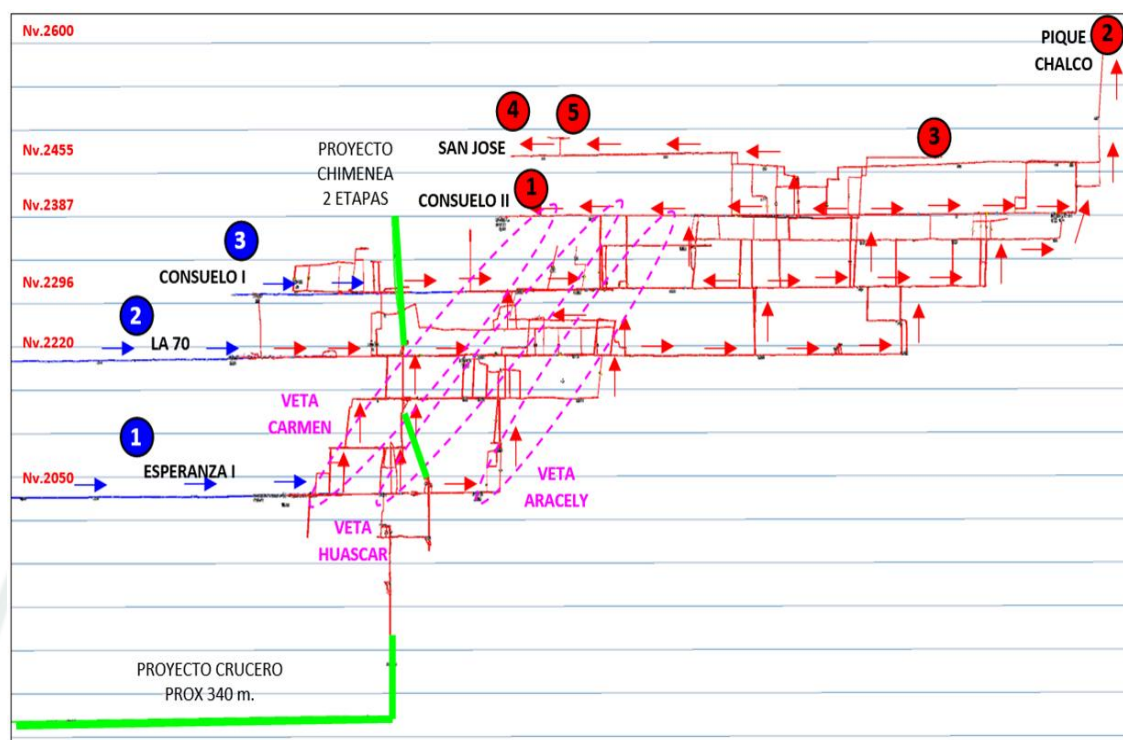
Los requerimientos asociados al consumo de madera (QMa), temperatura en labores (QTe), equipos diésel y explosivos son nulos, indicando que en este sector no existen factores adicionales que incrementen la demanda de ventilación más allá del personal, ya sea por profundidad, generación térmica o emisiones contaminantes por equipos mecanizados.

El caudal requerido por fugas (QFu) representa un complemento necesario para compensar pérdidas de aire en el sistema, con valores que aumentan de 360 cfm a 397 cfm en el horizonte de análisis. Aunque este caudal es relativamente bajo, su crecimiento evidencia la necesidad de considerar pérdidas por filtraciones, deficiencias en el sellado de labores y envejecimiento de las instalaciones de ventilación.

Finalmente, el caudal total requerido (QT1) se incrementa de 2,762 cfm en la situación actual a 3,045 cfm en el escenario de 3–5 años, lo que representa un aumento aproximado del 10 %. Este resultado indica que, si bien el sistema de ventilación del sector es actualmente suficiente, debe ser dimensionado con un margen de crecimiento, priorizando el control de fugas y el suministro adecuado de aire por trabajador para mantener condiciones seguras y operativas en el mediano plazo.

Figura 9

Zona Consuelo



Nota. En la figura se aprecia los puntos estratégicos en cuanto a la zona Consuelo

1.6. Calibración del Modelo Ventsim

Tabla 20

Calibración del modelo Ventsim

ESTACIÓN	NIVEL	LABOR	VELOCIDAD (m/min)	CAUDAL (cfm)	DISTRIB. (%)	VENTSIM (m³/min)	VENTSIM (cfm)	Variación (cfm)	Error (%)
EVPI-01	2050	CH 727	44	1,725	3%	50	1,770	-45	-3%
EVPI-02	2050	CH 727-2	73	3,491	6%	89	3,311	360	10%
EVPI-03	2050	CX-953	79	9,536	16%	265	9,364	171	2%
EVPI-04	1790	CX-500	83	13,960	23%	366	12,920	1,041	7.5%
EVPI-05	1980	CX-715	72	6,520	11%	176	6,218	302	5%
EVPI-06	2170	CX-346	47	5,298	9%	140	4,944	354	7%
EVPI-07	2170	CX-346-2	88	9,216	15%	266	9,379	-164	-2%
EVPI-08	2220	CX 530	55	6,373	10%	160	5,646	727	11%
EVPI-09	2240	CX-575	9	1,075	2%	28	984	91	8%
EVPI-10	2296	CX-626NE	36	3,122	5%	81	2,848	274	9%
EVPI-11	2170	CH-337	35	485	1%	13	444	41	8%
TOTAL, INGRESOS				60,801	100 %	1,632	57,649	3,152	5%

Nota. En la tabla 20 se presenta una comparación entre los valores reales medidos en campo y los resultados obtenidos mediante simulación (VENTSIM) para las estaciones de ingreso de aire (EVPI) en la mina. Incluye parámetros como velocidad, caudal, distribución porcentual y el nivel de error.

- El modelo VENTSIM representa adecuadamente la ventilación real del sistema.
- El error global del 5% es aceptable para diseño y operación.
- Existen puntos específicos (EVPi-02, 06, 08, 10, 11) que pueden ajustarse para mejorar la calibración.
- EVPi-08 es el punto más crítico a revisar

Un error total del 5% es aceptable y técnicamente sólido para estudios de ventilación minera. El modelo subestima ligeramente el caudal real ($\text{VENTSIM} < \text{medición}$).

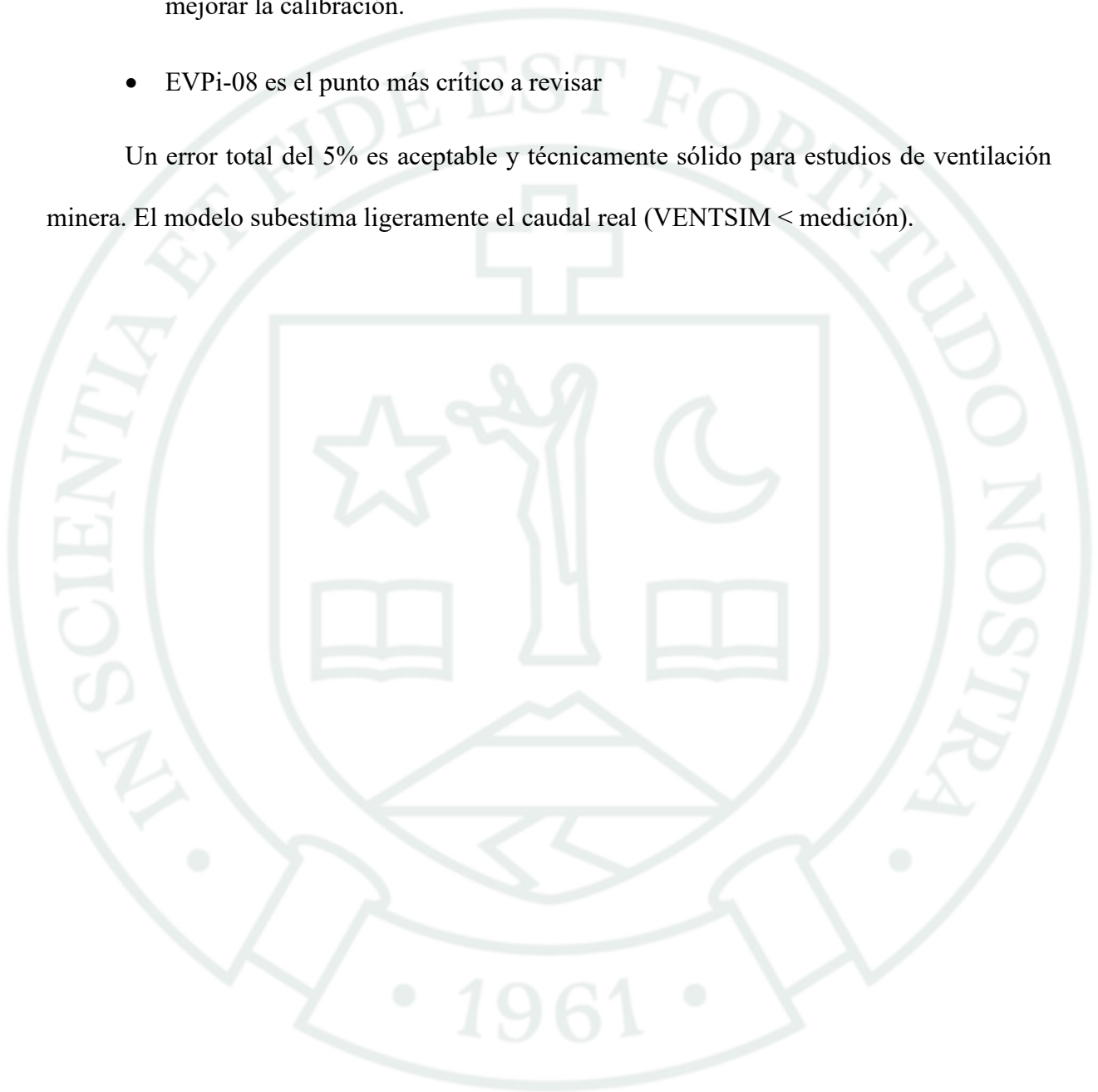


Tabla 21*Calibración del modelo Ventsim, total salida*

ESTACIÓN	NIVEL	LABOR	SECCIÓN	ÁREA (m²)	VELOCIDAD (m/min)	CAUDAL (cfm)	DIST. (%)	VENTSIM (m³/min)	VENTSIM (cfm)	Variación (cfm)	Error (%)
EVPs-01	2365	CX-802N	BAUL	2.24	17	1,319	2%	34	1,198	122	9%
EVPs-02	2293	CX-014	BAUL	1.06	45	1,669	3%	49	1,733	-64	-4%
EVPs-03	2380	CX-226	BAUL	4.58	54	8,702	14%	242	8,551	152	2%
EVPs-04	2465	CX-381	TRAPEZIO	2.02	83	5,889	10%	168	5,937	-47	-1%
EVPs-05	2600	CH-476	CUADRADO	0.80	184	5,196	9%	138	4,879	317	6%
EVPs-06	2455	CX-804E	BAUL	3.51	1	182	0%	5	183	-1	-1%
EVPs-07	2484	CX-804E-2	BAUL	2.50	8	736	1%	23	801	-65	-9%
EVPs-08	2387	GA-606NE	TRAPEZIO	1.90	62	4,199	7%	109	3,835	364	9%
EVPs-09	2170	GA-422	CIRCULO	0.29	1,335	13,782	23%	387	13,684	98	1%
EVPs-10	2327	CX-742	BAUL	2.53	36	3,256	5%	93	3,272	-16	-1%
EVPs-11	2360	CX-746N	BAUL	2.45	26	2,282	4%	59	2,096	187	8%
EVPs-12	2314	CX-505	BAUL	2.11	8	573	1%	15	521	52	9%
EVPs-13	2289	CX 679	BAUL	1.92	23	1,574	3%	40	1,422	151	10%
EVPs-14	2286	CX 666N	TRAPEZIO	2.05	46	3,332	5%	91	3,197	136	4%
EVPs 15-16	2247	CH-694	CUADRADO	0.84	26	2,357	4%	68	2,418	-61	-3%
EVPs-17	2360	CH-694	CUADRADO	1.05	43	3,604	6%	48	1,709	55	3%
EVPs-18	2296	CX-510	CUADRADO	0.48	36	623	1%	18	629	-6	-1%
EVPs-19	2340	CX-334	BAUL	1.45	21	1,087	2%	30	1,061	26	2%
EVPs-20	2296	CX-572	BAUL	1.39	6	308	1%	9	311	-3	-1%
EVPs-21	2170	CH-237	CUADRADO	1.24	8	367	1%	9	335	31	9%
EVPs-22	2170	CH-237	CUADRADO	0.82	48	1,371	2%	37	1,313	58	4%
EVPi-23	2292	CX270NW	BAUL	2.62	6	515	1%	15	540	-25	-5%
TOTAL, SALIDAS						61,081	100%	1,688	59,622	1,459	2%

Nota. En la tabla 21 se presenta la evaluación del sistema de ventilación en las estaciones de salida de aire (EVPs), comparando los datos medidos en campo con los resultados obtenidos mediante simulación en VENTSIM, incluyendo además parámetros geométricos y de flujo.

La tabla de SALIDAS de ventilación muestra que el modelo VENTSIM reproduce con alta fidelidad el comportamiento real del sistema, ya que el caudal total medido es de 61,081 cfm frente a 59,622 cfm simulados, con una diferencia de solo 1,459 cfm y un error global del 2%, valor considerado excelente para estudios de ventilación minera; la mayor parte del flujo se concentra en pocas estaciones clave, principalmente EVPs-09 (23%), EVPs-03 (14%) y EVPs-04 (10%), las cuales presentan errores muy bajos, lo que valida la correcta calibración del modelo en los puntos más influyentes del sistema, mientras que las desviaciones individuales observadas en estaciones como EVPs-01, EVPs-05, EVPs-11, EVPs-12 y EVPs-13 se mantienen dentro de rangos aceptables y pueden atribuirse a variaciones locales de sección efectiva, rugosidad o condiciones reales de flujo, sin comprometer el balance general, concluyéndose que el sistema de ventilación está bien equilibrado, correctamente representado en la simulación y solo requiere ajustes locales menores para optimizar aún más la correspondencia entre mediciones y modelo.

1.6.1. Calibraciones de estaciones secundarias

Tabla 22

Calibraciones de estaciones secundarias

EST.	LAB OR	DETALLE	HO RA	T° C	HR %	wb °C	°C Td	a (m)	h (m)	Ø (r 1)	SECCIÓ N	ÁR EA (m²)	VELOCI DAD (m/s)	VELOCI DAD (m/min)	CAUD AL (m³/mi n)	CAUD AL (cfm)	DIS T. (%)	VENTS IM (m³/mi n)	VENTS IM (cfm)	Variac ión (cfm)	Erro r (%)
EVS-01	CX-346N	BOCAMIN A	9:30 a.m.	22.63	20.48	10.97	-1.06	1.63	2.06	—	BAUL	3.15	1.05	63	199	7,015	10%	188	6,634	381	5%
EVS-02	GA-341W	PASANDO CX-346	9:34 a.m.	20.43	34.31	11.75	4.19	1.40	1.97	—	TRAPEZ IO	2.76	0.19	11	31	1,087	2%	30	1,068	19	2%
EVS-03	GA-341W	VENTILADOR #22	9:43 a.m.	20.84	34.68	12.12	4.71	—	—	0.29	CIRCULO	0.26	5.41	138	4,872	7%	142	5,013	-141	-3%	
EVS-04	EST-451	ANTES DE LA CH-237	9:58 a.m.	22.90	57.63	17.24	14.12	1.84	1.90	—	BAUL	3.28	0.22	13	43	1,529	2%	46	1,621	-92	-6%
EVS-05	BP-445W	PASANDO EST-451, DESCONTAR MANGA 28"	10:13 a.m.	23.21	76.16	20.15	18.77	1.97	2.20	—	TRAPEZ IO	3.94	0.08	5	19	658	1%	18	647	11	2%
EVS-06	GA-431W	ANTES DE LA CH-189, DESCONTAR MANGA 28"	10:16 a.m.	22.69	63.79	17.96	15.49	1.58	2.20	—	TRAPEZ IO	3.09	0.25	15	46	1,615	2%	47	1,660	-45	-3%

EVS-08	CX-346N	PASANDO GL-527EW	10:29 a.m.	21.28	65.33	16.92	14.52	1.80	2.10	—	BAUL	3.55	0.68	41	144	5,092	7%	156	5,510	-418	-8%
EVS-09	GA-637W	INTERSECCION CX-446N	10:33 a.m.	22.08	83.26	20.03	19.11	0.80	1.85	—	CUADRO	1.48	0.83	50	74	2,607	4%	69	2,439	167	6%
EVS-11	GA-682W	INTERSECCION CX-446N	10:40 a.m.	23.45	92.44	22.51	22.16	2.24	2.20	—	BAUL	4.62	0.72	43	199	7,041	10%	182	6,413	628	9%
EVS-13	CX-686N	ANTES DE LA EST-335E	10:56 a.m.	24.37	89.99	23.10	22.61	1.62	1.92	—	TRAPEZIO	3.11	0.22	13	42	1,480	2%	45	1,591	-111	-7%
EVS-14	CH-183	OBSTRUCCION TABLAS	11:12 a.m.	23.63	91.08	22.50	22.08	0.25	1.00	—	CUADRO	0.25	0.65	39	10	354	1%	16	573	-39	-7%
EVS-15	CH-183	CAMINO	11:13 a.m.	23.86	89.51	22.54	22.03	0.72	0.72	—	CUADRO	0.52	0.17	10	5	190	0%	6	251	-61	-24%
EVS-16	EST-683	VENTILADOR #33, FAN SECUNDA RIO	11:19 a.m.	24.23	90.37	23.03	22.55	—	—	0.29	CIRCULO	0.26	12.95	777	198	7,002	10%	196	6,920	82	1%
EVS-17	CX-706	PASANDO GL-718	11:30 a.m.	23.43	92.63	22.52	22.17	2.02	2.16	—	BAUL	4.09	0.24	14	59	2,094	3%	63	2,211	-117	-6%
EVS-18	CX-346N	PASANDO GL-725	11:41 a.m.	22.74	93.52	21.95	21.65	1.39	1.80	—	BAUL	2.35	0.70	42	98	3,475	5%	94	3,323	152	4%
EVS-19	GA-773E	ENTRE LA CH-438 / CH-420	11:47 a.m.	22.90	93.78	22.11	21.86	1.65	1.95	—	BAUL	3.02	0.18	11	33	1,163	2%	31	1,087	76	7%

EVS-20	GA-773E	ANTES DEL CX-766	11:59 a.m.	24.94	98.84	24.84	24.74	1.20	1.80	—	BAUL	2.03	0.24	15	29	1,039	1%	28	980	59	6%
EVS-21	CH-665	TAPADO CON MALLA, AL PISO	12:04 p.m.	25.90	98.77	25.77	25.70	0.80	0.80	—	CUADRADO	0.64	1.73	104	67	3,009	4%	83	2,918	91	3%
EVS-31	CH-665	OBSTRUCION CON TABLAS	12:42 p.m.	26.18	98.24	25.97	25.88	0.35	0.68	—	CUADRADO	0.24	1.31	78	19	679	1%	15	588	91	13%
EVS-23	GA-900W	ANTES DE LA CH-605 TECHO	12:14 p.m.	25.75	97.16	25.36	25.25	1.30	1.64	—	TRAPEZIO	2.13	0.93	56	119	4,197	6%	117	4,118	79	2%
EVS-24	GA-900W	ANTES DE LA CH-592 TECHO	12:16 p.m.	25.87	97.09	25.47	25.37	1.26	1.88	—	TRAPEZIO	2.37	0.96	58	137	4,839	7%	124	4,371	468	10%
EVS-25	GA-900W	ANTES DE LA CH-568 TECHO	12:19 p.m.	25.93	97.03	25.43	25.33	1.24	1.74	—	TRAPEZIO	2.16	0.78	47	102	3,585	5%	103	3,645	-60	-2%
EVS-26	GA-900W	ANTES DE LA CH-548 TECHO	12:22 p.m.	25.94	97.13	25.55	25.44	1.08	1.93	—	TRAPEZIO	2.08	0.90	54	113	3,983	6%	103	3,645	338	8%
EVS-27	GA-900E	ANTES DE LA CH-631 TECHO	12:27 p.m.	26.62	97.53	26.32	26.22	1.48	1.47	—	TRAPEZIO	2.18	0.44	26	57	2,026	3%	61	2,141	-115	-6%
EVS-28	GA-900E	ANTES DE LA CH-576, COLAPSO	12:33 p.m.	26.30	97.63	26.00	25.90	1.50	2.10	—	BAUL	2.95	0.37	22	65	2,295	3%	68	2,388	-93	-4%
EVS-29	GA-816E	PASANDO LA CH-727 TECHO,	12:38 p.m.	26.13	97.79	25.82	25.74	1.25	2.05	—	BAUL	2.40	0.89	53	128	4,536	6%	125	4,413	123	3%

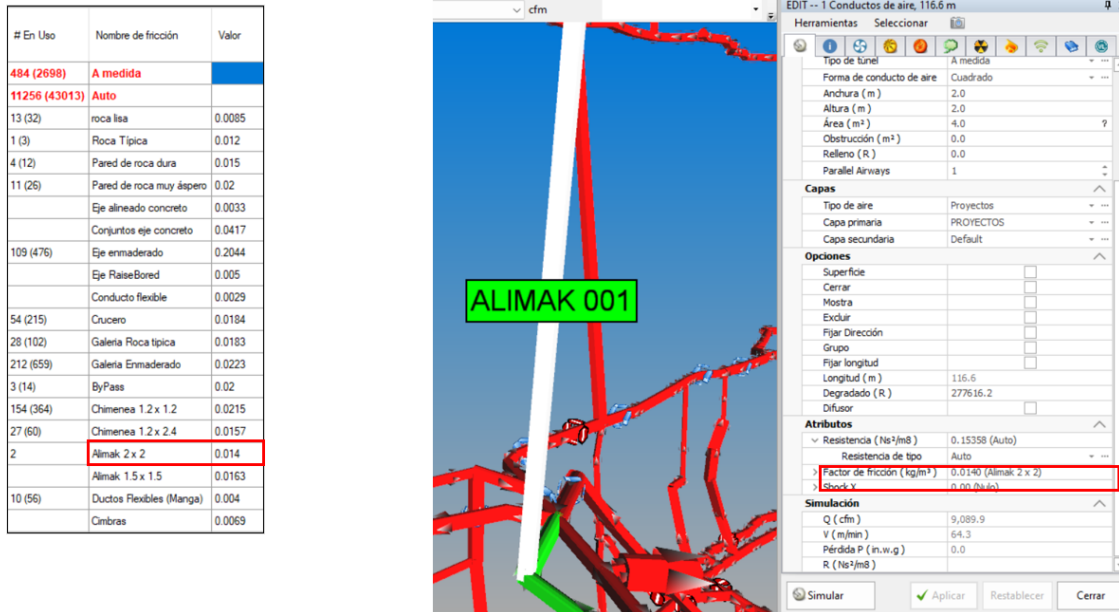
CH-PISO SUBE AIRE																					
EVS-30	GA-816E	PASANDO LA CH-697 TECHO	12:40 p.m.	25.90	97.41	25.60	25.47	1.40	2.06	—	BAUL	2.71	0.32	19	53	1,860	3%	50	1,751	109	6%
EVS-32	GA-816W	PASANDO LA CH-595	12:47 p.m.	26.05	93.75	25.25	24.97	0.90	1.78	—	TRAPEZIO	1.60	1.31	79	126	4,445	6%	125	4,399	46	1%
TOTAL															2,612	71,204	100%	1,969	69,546	1,658	2%

Nota. En la tabla 22 se presenta un levantamiento detallado de mediciones de ventilación en interior mina, donde se evalúan condiciones ambientales, geométricas y de flujo de aire en distintos puntos de control (estaciones EVS).

La tabla de mediciones EVS evidencia que el sistema de ventilación está bien calibrado y operativamente equilibrado, ya que el caudal total medido alcanza 71,204 cfm frente a 69,546 cfm simulados en VENTSIM, con una diferencia de 1,658 cfm y un error global del 2%, valor que confirma una excelente concordancia entre el modelo y las condiciones reales; la mayor contribución al flujo proviene de pocas estaciones clave como EVS-01, EVS-11, EVS-16 y EVS-29, las cuales concentran porcentajes relevantes del caudal total y presentan errores bajos o moderados, validando su correcta representación en la simulación, mientras que las desviaciones puntuales observadas en sectores con obstrucciones, mangas, colapsos o geometrías irregulares (por ejemplo EVS-14, EVS-15, EVS-31 y EVS-24) se mantienen dentro de rangos explicables por condiciones locales reales y no comprometen el balance general del sistema, concluyéndose que el modelo VENTSIM describe adecuadamente el comportamiento de las salidas y flujos principales, requiriendo únicamente ajustes locales menores en zonas con restricciones físicas o cambios operacionales para mejorar aún más la precisión.

Figura 10

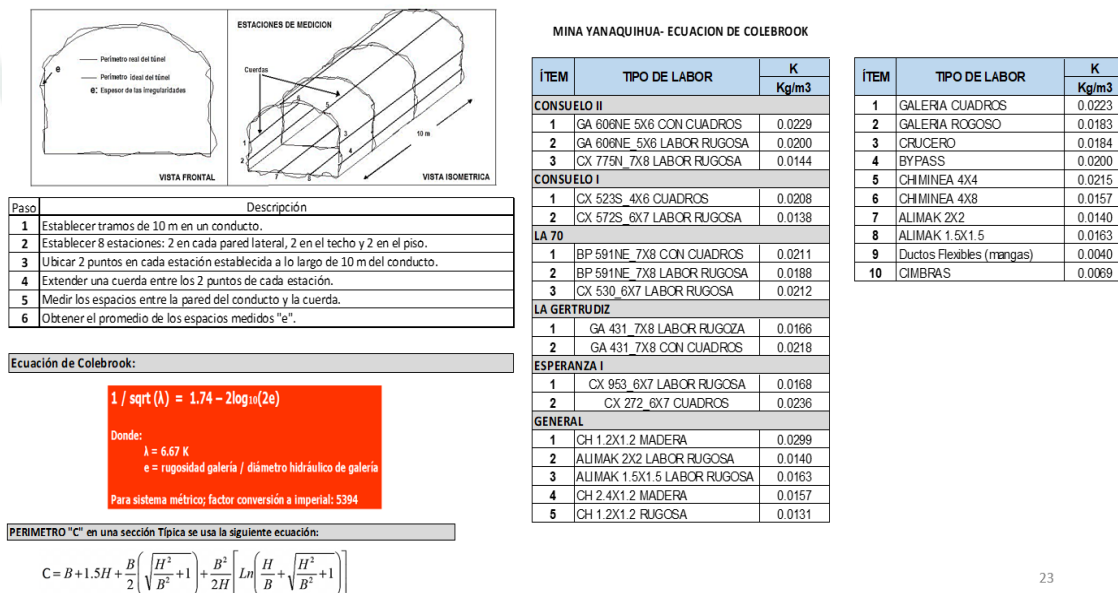
Factor de fricción



Nota. En la figura se aprecia la colocación del factor de fricción, datos obtenidos del software VENTSIM.

Figura 11

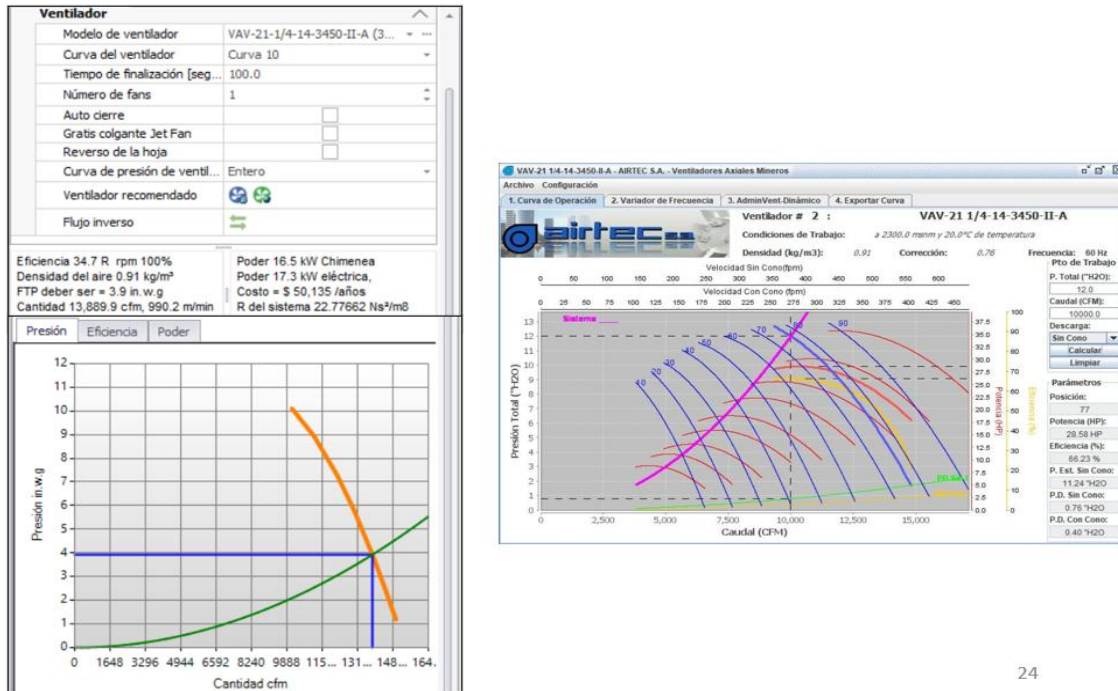
Factor de fricción



Nota. En la figura se aprecia la colocación del factor de fricción, datos obtenidos del software VENTSIM.

Figura 12

Caracterización de los ventiladores



Nota. En la figura se aprecia la caracterización de los ventiladores suministrados en el software, imagen tomada del software VENTSIM.

Figura 13

Toma de muestra insitu



Nota. En la figura se aprecia la toma de muestra insitu de caudal de ventilador CX 378, Nv. 1790.

1.7. Costos

Tabla 23

Costos operativos

Ítem	Descripción	Detalles	Tramo	Cant.	Nivel	Zona	Veta	Tipo	Sección (m)	Forma	Ratio / Avance	U/M	Long.	Incl.	Área (m²)	P.U (USD/u. m)	Total (USD)	Tiempo (mes)
1.1	Plan de Avances																	
		CH 002-II, En el Nv.2170 conectará a Superficie	II	1	2170	ESPERANZA	PAOLA	Extracción	2.4 x 1.2	Cuadrado	1.00	m	78.2	75	2.88	350.0	27,370	1.3
		Ventana 002, Pie de CH 002-II			2170	ESPERANZA	PAOLA	Extracción	2.1 x 2.4	Baúl	1.50	m	11.2	0	5.04	350.0	3,920	0.1
1.1.1	CH 002-II	CH 002-III, En el Nv.1980 conectará a Nv.2050	III	1	2170	ESPERANZA	PAOLA	Extracción	2.4 x 1.2	Cuadrado	1.00	m	65.1	88	2.88	350.0	22,785	1.1
		Ventana 003, Pie de CH 002-III			2170	ESPERANZA	PAOLA	Extracción	2.1 x 2.4	Baúl	1.50	m	20.2	0	5.04	350.0	7,070	0.2
		CH 002-IV, En el Nv.2000 conectará a Nv.2050	IV	1	2170	ESPERANZA	PAOLA	Extracción	2.4 x 1.2	Cuadrado	1.00	m	96.5	88	2.88	350.0	33,775	1.6

				Ventana 004, Pie de CH 002-IV			217 0	ESPERANZ A	PAOLA	Extracci ón	2.1 x 2.4	Baúl	1.50	m	14.5	0	5.04	350.0	5,075	0.2
				CH 002-V, En el Nv.1840 conectará a Nv.1940	V	1	217 0	ESPERANZ A	PAOLA	Extracci ón	2.4 x 1.2	Cuadrad o	1.00	m	44.8	88	2.88	350.0	15,680	0.7
				Ventana 005, Pie de CH 002-V			217 0	ESPERANZ A	PAOLA	Extracci ón	2.1 x 2.4	Baúl	1.50	m	14.5	0	5.04	350.0	5,075	0.2
				CH 002-VI, En el Nv.1790 conectará a Nv.1840	VI	1	217 0	ESPERANZ A	PAOLA	Extracci ón	2.4 x 1.2	Cuadrad o	1.00	m	35	88	2.88	350.0	12,250	0.6
				Ventana 006, Pie de CH 002-VI			217 0	ESPERANZ A	PAOLA	Extracci ón	2.1 x 2.4	Baúl	1.50	m	14.5	0	5.04	350.0	5,075	0.2
1.1.2 ALIMK 01				Ventana 01, en Pie de ALIMK 01	I	1	205 0	ESPERANZ A	DESPRECIADA	Extracci ón	3.0 x 3.0	Baúl	1.50	m	20	0	9.00	350.0	7,000	0.2
				Ventana 02, en Pie de ALIMK 01			205 0	ESPERANZ A	DESPRECIADA	Extracci ón	2.4 x 2.4	Baúl	1.50	m	17	0	5.76	350.0	5,950	0.2
				Conectará el Nv.2050 con Superficie			205 0	ESPERANZ A	DESPRECIADA	Extracci ón	2.0 x 2.0	Cuadrad o	1.76	m	332	90	4.00	1237.7	410,901	3.1
1.1.3 CH 650-I				Continuación del PQ 650 en CH, hacia el Nv.2120	I	1	205 0	CONSUEL O	HUASCAR	Extracci ón	2.4 x 1.2	Cuadrad o	1.00	m	39.2	75	2.88	350.0	13,720	0.7
				Ventana 01, Intersección			212 0	CONSUEL O	HUASCAR	Extracci ón	1.8 x 2.1	Baúl	1.50	m	17.9	0	3.78	350.0	6,265	0.2

1.1.4 CH 605	CH 605, Para dar Cabeza																	
	Continuación del PQ 650, hacia el pie CH 605 Nv.2220																	
	II	1	212 0	CONSUEL O	HUASCAR	Extracci ón	2.4 x 1.2	Cuadrad o	1.00	m	43.9	75	2.88	350.0	15,365	0.7		
1.1.4 CH 605	CH 605 - Nv.2296 hacia Superficie																	
		1	229 6	CONSUEL O	HUASCAR/RIVE RA	Extracci ón	2.4 x 1.2	Cuadrad o	1.00	m	64	85	2.88	350.0	22,400	1.1		
	Sub Total USD Infraestructu ra de Ventilación																	
															625,97 6	12.7		

Nota. En la tabla 23 corresponde al Plan de Avances de Infraestructura de Ventilación en mina, donde se detallan las labores proyectadas (chimeneas, ventanas y conexiones) con sus características técnicas, metrados, costos y tiempos de ejecución.

La tabla del Plan de Avances e Infraestructura de Ventilación muestra un programa estructurado de desarrollos, conexiones verticales y obras auxiliares orientadas a asegurar la continuidad y eficiencia del sistema de ventilación, concentrando la mayor inversión y plazo en los chutes principales CH-002, ALIMK-01, CH-650 y CH-605, que conectan distintos niveles hasta superficie y representan la columna vertebral del sistema; el costo total de la infraestructura alcanza aproximadamente USD 625,976, con un plazo acumulado de 12.7 meses, donde destaca el proyecto ALIMK-01 por su alto impacto técnico y económico debido a su gran longitud, sección mayor y fuerte pendiente, mientras que las ventanas, reguladores y obras menores tienen costos y tiempos reducidos pero cumplen un rol clave en la distribución y control de los flujos de aire; en

conjunto, la tabla evidencia una planificación coherente, priorizando desarrollos de mayor sección y continuidad vertical para garantizar capacidad de ventilación futura, complementados con infraestructura de control que optimiza el desempeño del sistema sin incrementar significativamente los costos ni el cronograma global.



DISCUSIÓN

1. El análisis del sistema actual de ventilación evidenció que, a nivel global, la red presenta un funcionamiento aceptable; sin embargo, se identificaron deficiencias técnicas localizadas que afectan la eficiencia del sistema, principalmente relacionadas con una distribución desigual de caudales, pérdidas de carga elevadas en sectores con obstrucciones, cambios geométricos no actualizados y un control limitado mediante reguladores. Estas condiciones generan desviaciones puntuales entre los caudales medidos en campo y los valores simulados, aunque el error global se mantiene dentro de rangos aceptables (aproximadamente entre 2% y 5%). Asimismo, se observó que en labores profundas y zonas de alta actividad se presentan condiciones ambientales menos favorables, con incrementos de temperatura y humedad, lo que impacta negativamente en el confort térmico y en la capacidad de dilución de contaminantes, evidenciando la necesidad de optimizar la gestión del flujo de aire en la red.
2. La modelación de la red de ventilación mediante el software Ventsim Design permitió representar de manera confiable el comportamiento real del sistema, validando el modelo a partir de datos de campo de velocidad, caudal y sección en puntos estratégicos de la red. El proceso de calibración permitió ajustar resistencias, longitudes equivalentes y características geométricas, logrando una adecuada concordancia entre los resultados simulados y medidos. A partir del modelo validado, se evaluaron distintos escenarios de operación y redistribución de caudales, evidenciándose mejoras significativas en la eficiencia del sistema y en la capacidad de control del flujo de aire hacia las labores críticas. En este sentido, Ventsim Design se consolidó como una herramienta clave para el análisis, diagnóstico y optimización del sistema de ventilación de la unidad minera.
3. La planificación de la red de ventilación considerando el crecimiento futuro de las labores mineras permitió evaluar la capacidad del sistema para adaptarse a nuevos

escenarios operativos, tales como la profundización de niveles, apertura de nuevas labores y aumento de la demanda de aire fresco. Los resultados indican que, bajo las condiciones actuales, el sistema requerirá ajustes progresivos en la infraestructura de ventilación, especialmente en desarrollos principales y conexiones hacia superficie, para evitar incrementos excesivos de pérdidas de carga y caídas de presión. La simulación de escenarios futuros permitió validar técnicamente los proyectos de ventilación propuestos, asegurando que las secciones, pendientes y configuraciones planificadas mantengan condiciones ambientales seguras y adecuadas, contribuyendo a la sostenibilidad operativa y a la seguridad de los trabajadores en el largo plazo.

4. La estimación de los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) asociados a la propuesta de redistribución de la red de ventilación mostró que la mayor proporción del CAPEX se concentra en las obras de infraestructura principal, tales como desarrollos de ventilación, conexiones verticales, instalación de reguladores y adecuación de secciones. No obstante, estos costos iniciales se ven compensados por una reducción progresiva de los costos operativos, debido a una disminución de pérdidas de carga, una mejor eficiencia en el uso de ventiladores y una menor necesidad de intervenciones correctivas. En conjunto, los resultados económicos respaldan que la propuesta es técnicamente viable y económicamente sostenible, constituyéndose en una herramienta sólida para la toma de decisiones orientadas a mejorar el desempeño del sistema de ventilación y el confort térmico en la unidad minera.

CONCLUSIONES

PRIMERA: El análisis integral del sistema de ventilación permitió identificar que, si bien el caudal total de aire de ingreso (60 801 cfm) y salida (61 081 cfm) presenta un balance adecuado con un desbalance mínimo de 0.5%, existen deficiencias técnicas significativas en la distribución del flujo de aire. Se evidenció una distribución desigual de caudales, donde estaciones como EVPi-04 y EVPi-03 concentran hasta el 39% del aire, mientras que otras presentan valores críticos ($<3\%$), afectando la eficiencia del sistema. Asimismo, la presencia de obstrucciones físicas, pérdidas por fugas ($\approx 13\%$ del requerimiento) y variabilidad en las secciones generan pérdidas de carga y restricciones del flujo. En términos de confort térmico y control de contaminantes, el sistema presenta limitaciones, reflejadas en que el 43% de los puntos evaluados no cumplen con la velocidad mínima de 25 m/min, lo que compromete la adecuada dilución de gases y condiciones ambientales en varias labores.

SEGUNDA: El modelamiento de la red de ventilación mediante el software Ventsim Design permitió representar de manera confiable el comportamiento del sistema real, obteniéndose un error global de calibración del 5%, valor considerado técnicamente aceptable en estudios de ventilación minera. El modelo evidenció coherencia con los datos de campo, validando su uso como herramienta de análisis y optimización. Además, permitió identificar puntos críticos específicos (EVPi-02, EVPi-06, EVPi-08, EVPi-10 y EVPi-11) donde se requiere ajuste para mejorar la precisión del sistema. En general, el modelamiento confirmó que el problema principal no radica en la cantidad de aire disponible, sino en su deficiente distribución y control dentro de la red, lo que limita el desempeño global del sistema.

TERCERA: La proyección del sistema de ventilación demuestra que el caudal requerido se incrementará de 61 132 cfm a 65 961 cfm en un horizonte de 3 a 5 años ($\approx 8\%$ de aumento), principalmente debido al crecimiento del personal y al incremento de fugas. Este comportamiento evidencia la necesidad de una planificación estratégica de la red de ventilación,

orientada a garantizar la sostenibilidad del sistema frente al crecimiento de las labores mineras. Asimismo, se determinó que el sistema actual presenta una cobertura del 99% con un déficit de 331 cfm, lo cual, aunque aceptable en el corto plazo, podría volverse crítico ante escenarios futuros si no se implementan mejoras. Por tanto, la planificación debe contemplar la optimización de circuitos, reducción de fugas, eliminación de obstrucciones y redimensionamiento de labores, asegurando una distribución eficiente del aire en todos los niveles operativos.

CUARTA: El análisis técnico-económico evidencia que la optimización del sistema de ventilación requiere inversiones tanto en CAPEX (infraestructura, mejoras en labores, instalación de controles de ventilación y eliminación de obstrucciones) como en OPEX (operación de ventiladores, mantenimiento y control del sistema). Los resultados muestran que, pese a contar con un caudal global cercano al requerido, las ineficiencias por fugas, mala distribución y sobre ventilación localizada generan costos operativos innecesarios, especialmente en consumo energético. En este sentido, la redistribución eficiente del aire permitirá reducir pérdidas, optimizar el uso de energía y mejorar el confort térmico, contribuyendo a una gestión más sostenible del sistema. Por lo tanto, la inversión en mejoras de ventilación se justifica plenamente, ya que permitirá maximizar la eficiencia operativa, reducir costos a largo plazo y garantizar condiciones seguras para los trabajadores.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Implementar de manera progresiva las mejoras propuestas en la red de ventilación, priorizando aquellas zonas que presentan mayores desviaciones de caudal, pérdidas de carga elevadas o condiciones ambientales desfavorables, con el fin de optimizar el uso del aire disponible.

SEGUNDA: Actualizar periódicamente el modelo de ventilación en Ventsim Design incorporando nuevas labores, cambios geométricos y resultados de mediciones de campo, de modo que el modelo se mantenga como una herramienta dinámica de gestión y planificación del sistema de ventilación.

TERCERA: Fortalecer el control operativo del sistema mediante la instalación y mantenimiento adecuado de reguladores, puertas y dispositivos de control, asegurando que la distribución del flujo de aire responda a las necesidades reales de cada frente de trabajo.

CUARTA: Realizar monitoreos sistemáticos de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, velocidad del aire y concentración de contaminantes), especialmente en labores profundas y de alta actividad, con el fin de garantizar el confort térmico y el cumplimiento de la normativa de seguridad y salud ocupacional.

QUINTA: Considerar criterios de eficiencia energética en la selección y operación de ventiladores principales y auxiliares, evaluando alternativas que permitan reducir el consumo eléctrico y los costos operativos sin comprometer la seguridad del sistema.

SEXTA: Integrar la planificación de la ventilación con el planeamiento minero a mediano y largo plazo, asegurando que los proyectos de desarrollo y expansión cuenten con validación técnica previa desde el punto de vista ventilatorio y económico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alghassab, M. (2025). Data-driven framework for energy optimizing net-zero energy buildings (NZEB): A functional assessment of energy efficiency and thermal comfort. *Energy*, 330, 136834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136834>
- Atalaya, J. (2022). Diseño de un sistema de ventilación para reducir gases tóxicos en la mina subterránea Nazareno ADY S.R.L, Cajamarca, 2022. Cajamarca, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Auccapuma, C. (2025). Propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S. A. C. Andahuaylas - 2024. Abancay, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. Obtenido de <https://repositorio.unamba.edu.pe/items/a91e5c3b-ffc5-4783-9357-00828d453957>
- Barros, A. (2021). Estudio y optimización del sistema de ventilación del complejo minero Farallón Negro. Catamarca, Argentina: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Castillón, M. (2025). Implementación del software VENTSIM Designe 5.4 y su influencia en el sistema de ventilación en el C.M. SUNEK - 2024. Huancayo, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Ccanque , J. (2023). Optimización del sistema de ventilación a corto plazo mediante la construcción de Raise Boring - CIA Minera Alpayana S.A. - Lima. Cusco, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNS_40be00905d0203a0a7e045e14c827099/Details
- Chilon, F. (2022). Evaluación del circuito de ventilación para la evaluación de humo, gases y polvo en labores de una mina subterránea artesanal en Cajamarca, 2022. Cajamarca, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Cui et al. (2026). Application of physics-informed neural networks-based hybrid prediction models in campus thermal environment prediction. *Building and Environment*, 287, 113880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113880>
- Espinoza et al. (2021). La seguridad, salud ocupacional y su relación con el desempeño laboral de los obreros de la Compañía Minera Condestable S.A. Lima. *Ingeniería investiga*, 3(2),

<https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/534/535>

- Figuroa, R. (2024). Programa de Cooperación Técnica entre Colorado School of Mines y la Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa, Perú: Universidad Nacional San Agustín.
- Gaona, A. (2024). Mejora en la eficiencia del sistema de ventilación en proyectos de minas subterránea mediante el uso del programa Ventsim. Lima, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- García, Á. (2023). Planta de digestión anaérobica y generación de biometano cercana a la vega del río esla (León). Valladolid, Espana: Universidad de Valladolid.
- Gonzales, O. (2021). Evaluación y modelamiento del sistema de ventilación de la U.M. San Vicente – Bolivia con el software Ventsim Design, año 2020. Huancayo, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/0f9db954-39b8-4db7-a450-5cbc7122ee46>
- Haghirad et al. (2024). Advancing personal thermal comfort prediction: A data-driven framework integrating environmental and occupant dynamics using machine learning. *Building and Environment*, 262, 111799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111799>
- Heniegal et al. (2025). A new composite sustainable brick for hot-buildings using phase change materials and recycled plastics for improving energy saving and thermal comfort: Experimental and simulation study. *Journal of Building Engineering*, 114, 114318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114318>
- Hernández et al. (2014). Metodología de la Investigación. Ciudad de México, México: McGraw Hill.
- Herrera, J. (2025). Sistemas de ventilación principal en minería subterránea. Madrid, Espana: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Janampa, Y. (2025). Balance térmico y propuesta de mejora de la ventilación en la mina Huarón. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11865.58723>

- Jayaraman et al. (2025). Application of Thermal Insulation Wall Surface Coatings in Underground Mines. *Journal of Industrial Safety*, 3(1), 1-8.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinse.2025.06.001>
- Jiménez, R. (2022). *Polvo en suspensión, más peligroso de lo que parece*. Galicia, España: Gobierno de España.
- Li et al. (2026). Deep mine underground thermal environment regulation and energy-saving technology based on controlled recirculating ventilation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 170, 109974.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109974>
- Lozano, J., & Rivera, J. (2024). Optimización y mejora del circuito de ventilación para reducir la concentración de gases tóxicos y polución en el NV. 4100 zona-norte mina-Yauliyacu-2024. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Marrero et al. (2023). Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión. *Revista Tecnología en Marcha*, 36(4), 19-30. Obtenido de https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6295
- Ministerio de Energía y Minas. (2017). Decreto Supremo N° 023-2017-EM.
- Ministerio de Energía y Minas. (2026). Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Ed. 2024. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5631689-reglamento-de-seguridad-y-salud-ocupacional-en-mineria-ed-2024>
- Ministerio de Salud. (2005). Decreto Supremo N.° 015-2005-SA.
- Noda et al. (2025). Working from home in a tropical environment: Investigating occupant behavior and thermal and lighting comfort. *Energy and Buildings*, 346, 116183.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116183>
- Organización Internacional del Trabajo. (2009). *Salud y seguridad en trabajos de minería*. Buenos Aires, Argentina: Aulas y andamos.
- Pacheco, J. (2025). Optimización del sistema de ventilación mecanizado en la Unidad Minera Americana de Alpayana S.A. mediante la implementación de ventiladores impelentes y chimeneas Raise Boring - 2025. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/4905ffd1-985d-42d7-a6df-0191a1d21a47>

- Quevedo, J. (2023). Diseño del sistema de ventilación para mejorar las condiciones termo – ambientales en la mina San Andrés – Cía Minera Aurifera Retamas S.A. – La Libertad. Piura, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP_1eaf2ec87f90d494527ab72361ee018c/Details
- Quispe, E. (2022). Diseño del circuito de ventilación mediante el software VENTSIM en compañía minera Kolpa S.A - Unidad Minera Huachocolpa Uno. Huancayo, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Samaniego, S. (2025). Simulación del diseño de ventilación de minas, método Hardy Cross versus el método conversión de triángulo en estrellas, Compañía Minera Poderosa S.A. 2024. Huancayo, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas]. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/6ce734c7-dcd3-473a-aad6-0a3701ad7216>
- Serrano, C. (2023). Ventilación de mina. Huancayo, Perú: [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2008). Guía metodológica de seguridad para ventilación de minas.
- Vargas, L. (2025). Diseño del sistema de ventilación en el Nivel 8 de la mina Chito, cantón Chinchipe, provincia de Zamora Chinchipe. [Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Minas con mención en Planeamiento Minero].
- Vidal, H. (2021). Diseño del sistema de ventilación de la compañía minera San Valentín S.A. U.P Satanás. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas].



Anexo 1

Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Instrumentos / Técnicas	Escala
Variable Independiente: Distribución de la red de ventilación	La distribución de la red de ventilación es la forma en que se organizan, conectan y controlan los distintos componentes del sistema de ventilación minera (labores, chimeneas, niveles, ventiladores y reguladores), con el fin de asegurar el suministro adecuado de aire fresco y la evacuación eficiente de aire contaminado en las labores subterráneas.	Se evalúa mediante el análisis del diseño de la red, la medición y simulación de caudales de aire, pérdidas de carga y control del flujo, utilizando datos de campo y el modelamiento de la red de ventilación en el software Ventsim™ Design, considerando escenarios operativos actuales y futuros.	Diseño de la red	Configuración de circuitos	Modelamiento en Ventsim™ Design	Nominal
			Distribución de caudales	Caudal de aire (cfm, m³/min)	Anemómetro, Ventsim™ Design	Razón
			Pérdidas de carga	Caída de presión (Pa)	Ventsim™ Design	Razón
			Control del flujo	Reguladores y ventanas	Inspección de campo, Ventsim™ Design	Nominal
			Planeamiento futuro	Escenarios operativos	Simulación en Ventsim™ Design	Ordinal
Variable Dependiente: Condiciones ambientales y confort térmico	Las condiciones ambientales en minería subterránea se refieren al conjunto de factores físicos y químicos del ambiente laboral, tales como la calidad del aire, la velocidad de circulación, la temperatura y la presencia de contaminantes, que influyen directamente en la salud, seguridad y desempeño de los trabajadores.	Se determinan a partir de mediciones de velocidad del aire, temperatura y concentración de contaminantes en las labores mineras, comparando los valores obtenidos antes y después de la propuesta de redistribución de la red de ventilación mediante simulaciones en Ventsim™ Design y monitoreos de campo.	Calidad del aire	Concentración de contaminantes	Equipos de monitoreo ambiental	Razón
			Velocidad del aire	Velocidad (m/s o m/min)	Anemómetro	Razón
			Temperatura	Temperatura del aire (°C)	Termómetro digital	Intervalo
			Confort térmico	Índice de confort	Cálculo técnico / Ventsim™ Design	Ordinal
			Seguridad y habitabilidad	Cumplimiento normativo	Análisis normativo	Nominal

Anexo 2

Matriz de consistencia

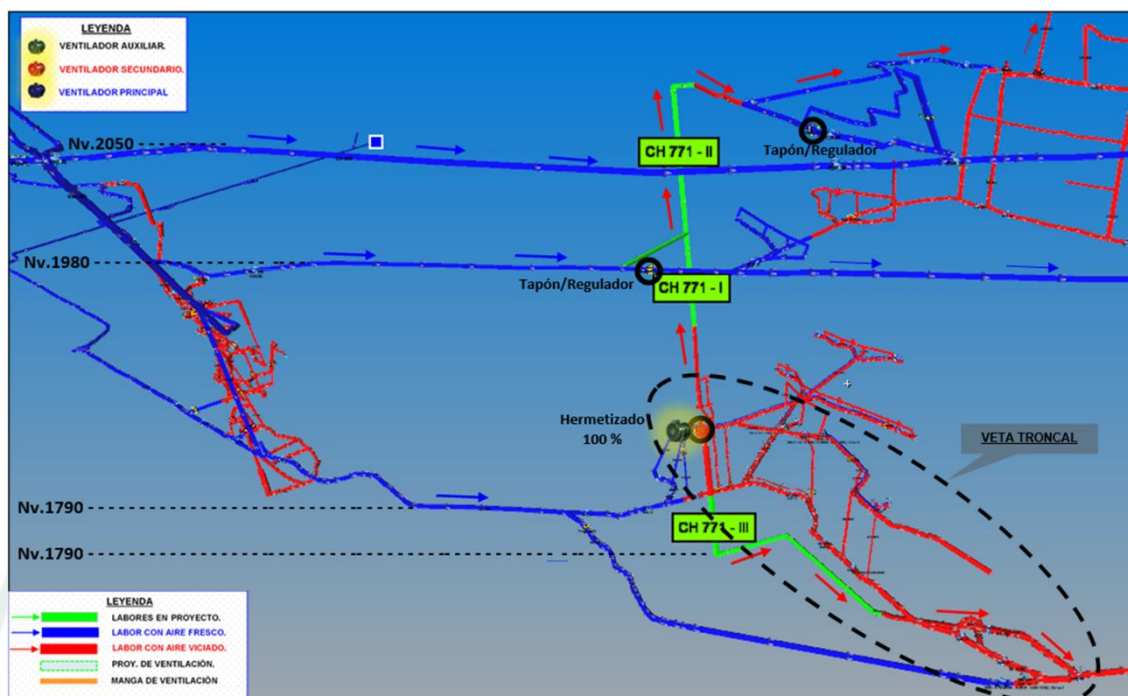
PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN DE LA RED DE VENTILACIÓN PARA MEJORAR LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y EL CONFORT TÉRMICO EN UNA UNIDAD MINERA, AREQUIPA– 2025						
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Dimensión	Indicadores	Instrumentos / Técnicas
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente: Distribución de la red de ventilación	Diseño de la red	Configuración de circuitos	Modelamiento en Ventsim™ Design
¿De qué manera la distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento, planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim, puede mejorar las condiciones ambientales y el confort térmico en una unidad minera en Arequipa 2025?	Proponer una distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento y planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim™ Design, con el fin de mejorar las condiciones ambientales y el confort térmico en unidad minera ubicada en Arequipa.	La adecuada distribución de la red de ventilación, basada en el estudio integral del sistema de ventilación, el modelamiento y planeamiento a mediano y largo plazo mediante el software Ventsim™ Design, mejora significativamente las condiciones ambientales y el confort térmico en una unidad minera año 2025.		Distribución de caudales	Caudal de aire (cfm, m³/min)	Anemómetro, Ventsim™ Design
				Pérdidas de carga	Caída de presión (Pa)	Ventsim™ Design
				Control del flujo	Reguladores y ventanas	Inspección de campo, Ventsim™ Design
Problemas Especificos	Objetivos Especificos	Hipótesis Especificos		Planeamiento futuro	Escenarios operativos	Simulación en Ventsim™ Design
1. ¿Cuáles son las deficiencias técnicas del sistema actual de	1. Analizar el sistema actual de ventilación de la unidad minera	1. El estudio integral del sistema de ventilación permite				

ventilación en la unidad minera en términos de distribución de caudales, pérdidas de carga, control de contaminantes y confort térmico, a partir de un estudio integral del sistema de ventilación?	mediante un estudio integral, a fin de identificar las deficiencias técnicas relacionadas con la distribución de caudales, pérdidas de carga, control de contaminantes y confort térmico.	identificar las deficiencias técnicas del sistema actual, relacionadas con la distribución de caudales, pérdidas de carga, control de contaminantes y confort térmico, que afectan las condiciones ambientales en la unidad minera.		Calidad del aire	Concentración de contaminantes	Equipos de monitoreo ambiental
2. ¿Cómo influye el modelamiento de la red de ventilación en el software Ventsim Design en la optimización de la distribución del flujo de aire y en la mejora de las condiciones ambientales internas de la unidad minera?	2. Modelar la red de ventilación de la unidad minera utilizando el software Ventsim Design, con el propósito de optimizar la distribución del flujo de aire y mejorar las condiciones ambientales internas.	2. El modelamiento de la red de ventilación mediante el software Ventsim™ Design influye positivamente en la optimización de la distribución del flujo de aire, mejorando las condiciones ambientales internas de la unidad minera.	Variable Dependiente: Condiciones ambientales y confort térmico	Velocidad del aire	Velocidad (m/s o m/min)	Anemómetro
3. ¿De qué manera el planeamiento de la red de ventilación a mediano y largo plazo, considerando el crecimiento de labores y escenarios operativos futuros, permite validar técnicamente proyectos de ventilación en la unidad minera?	3. Planificar la red de ventilación a mediano y largo plazo, considerando el crecimiento de las labores mineras y escenarios operativos futuros, para validar técnicamente los proyectos de ventilación propuestos	3. El planeamiento de la red de ventilación a mediano y largo plazo, considerando el crecimiento de labores y escenarios operativos futuros, permite validar técnicamente los proyectos de ventilación, asegurando la sostenibilidad y eficiencia del sistema en la unidad minera.		Temperatura	Temperatura del aire (°C)	Termómetro digital
				Confort térmico	Índice de confort	Cálculo técnico / Ventsim™ Design

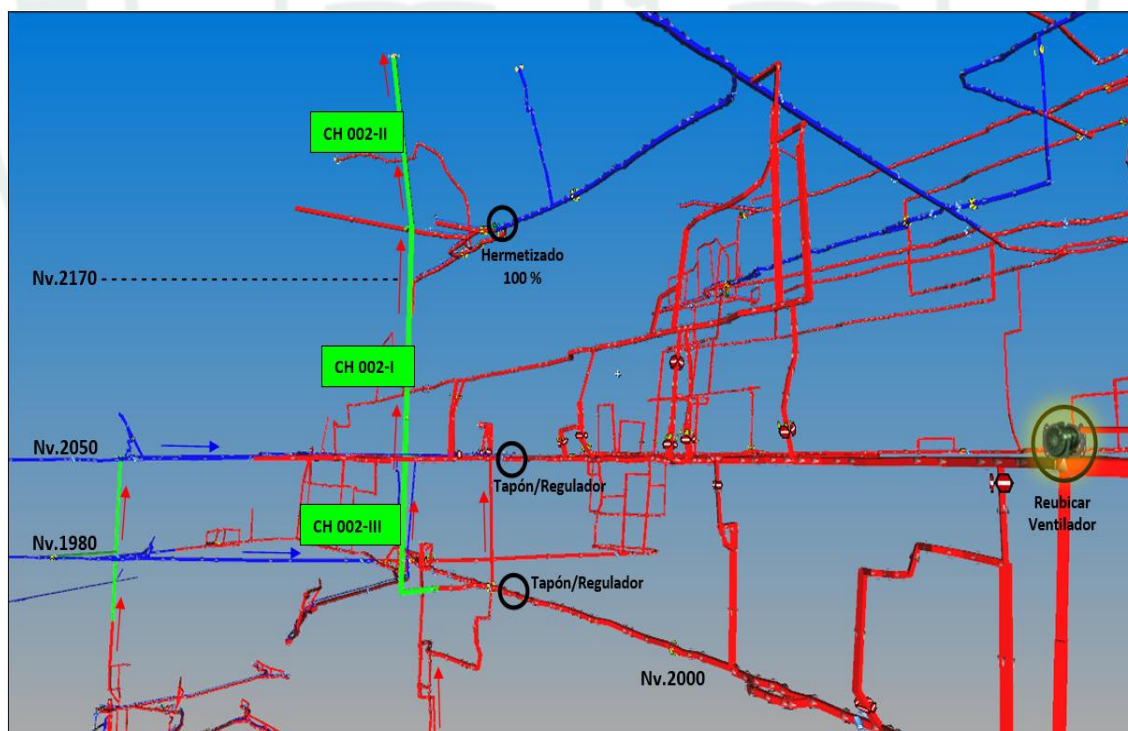
4. ¿Cómo la estimación de costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX) asociada a la propuesta de distribución de la red de ventilación contribuye a la toma de decisiones eficientes y sostenibles para la mejora del confort térmico y la gestión del sistema de ventilación en la unidad minera?	4. Estimar los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) asociados a la propuesta de distribución de la red de ventilación, con la finalidad de apoyar la toma de decisiones eficientes y sostenibles en la gestión del sistema de ventilación y la mejora del confort térmico en la unidad minera.	4. La estimación de los costos de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX) asociada a la propuesta de distribución de la red de ventilación contribuye a una toma de decisiones más eficiente y sostenible, mejorando el confort térmico y la gestión integral del sistema de ventilación en la unidad minera.		Seguridad y habitabilidad	Cumplimiento normativo	Análisis normativo
---	--	--	--	---------------------------	------------------------	--------------------

Anexo 3

Proyectos

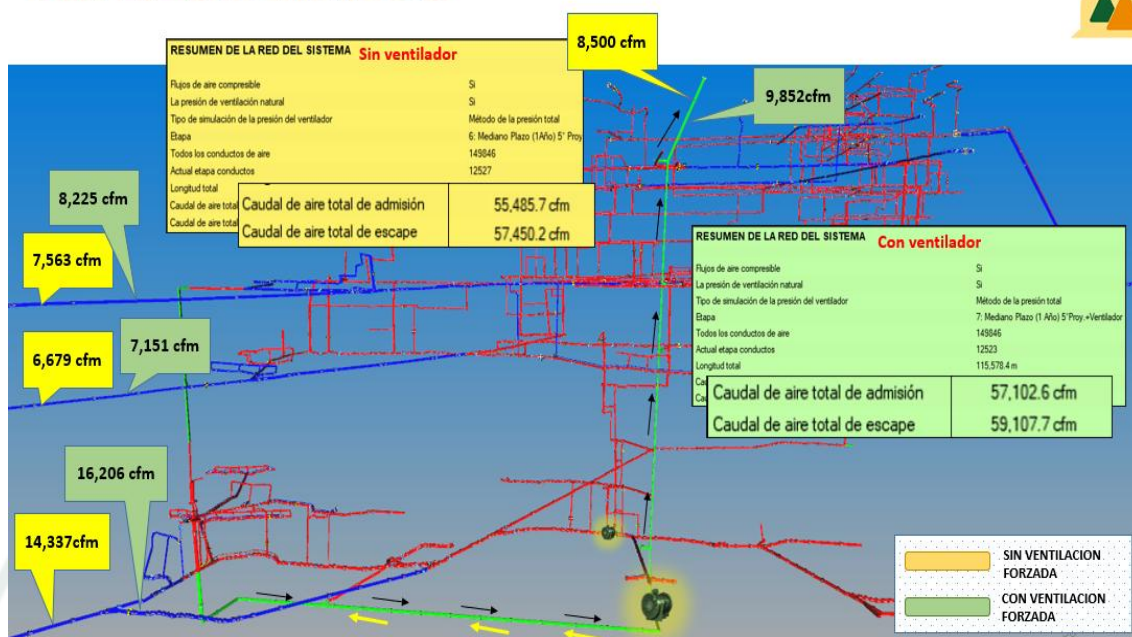


Proyecto a mediano plazo – 1er proyecto



Proyecto a mediano plazo – 2do proyecto

VII. RESULTADOS



VIII. RESULTADOS CAPEX

SIN VENTILACION MECANICA

Item	Descripción	U/M	Actual	MYSAC
				Mediano Plazo
				HASTA DIC23
				1
1	Producción de Mineral (Referencial)	t/Año	43,200	44,400
2	Caudal de aire de admisión	cfm	57,655	55,486
3	Caudal de aire de escape	cfm	59,628	57,450
4	Caudal Requerido	cfm	61,132	63,488
5	Cobertura	cfm	94%	87%
6	Costo Capital por año	US\$	-	178,829
7	Costo Unitario / Caudal	US\$/cfm	1.42	3.22
8	Costo Unitario CAPEX	US\$/t		4.03

CON VENTILACION MECANICA

Item	Descripción	U/M	Actual	MYSAC
				Mediano Plazo
				HASTA DIC23
				1
1	Producción de Mineral (Referencial)	t/Año	43,200	44,400
2	Caudal de aire de admisión	cfm	57,655	57,103
3	Caudal de aire de escape	cfm	59,628	59,108
4	Caudal Requerido	cfm	61,132	63,488
5	Cobertura	cfm	94%	90%
6	Costo Capital por año	US\$	-	182,329
7	Costo Unitario / Caudal	US\$/cfm	-	3.19
8	Costo Unitario CAPEX	US\$/t		4.11

VIII. RESULTADOS OPEX



SIN VENTILACION MECANICA

Item	Descripción	U/M	Actual	MYSAC
				Mediano Plazo
				HASTA DIC23
				1
1	Producción de Mineral (Referencial)	t/Año	43,200	44,400
2	Total de Ventiladores Principales		1	
3	Total de Ventiladores Secundarios		1	
4	Caudal de aire de admisión	cfm	50,231	55,525
5	Caudal de aire de escape	cfm	51,279	57,849
6	Potencia eléctrica de entrada	Kw	195,129	
7	Consumo de Energía	US\$	16,446	
8	Mano de Obra - 10 Personas (3%)	US\$	493	-
9	Mantenimiento/Repuestos (10%)	US\$	1,645	-
10	Costo de Operación por año	US\$	18,584	-
11	Costo Unitario Caudal	US\$/cfm	0.37	-
12	Costo Unitario OPEX	US\$/t	0.4	-

CON VENTILACION MECANICA

Item	Descripción	U/M	Actual	MYSAC
				Mediano Plazo
				HASTA DIC23
				1
1	Producción de Mineral (Referencial)	t/Año	43,200	44,400
2	Total de Ventiladores Principales		1	1
3	Total de Ventiladores Secundarios		1	
4	Caudal de aire de admisión	cfm	50,231	57,103
5	Caudal de aire de escape	cfm	51,279	63,593
6	Potencia eléctrica de entrada	Kw	195,129	38,694
7	Consumo de Energía	US\$	16,446	3,261
8	Mano de Obra - 10 Personas (3%)	US\$	493	98
9	Mantenimiento/Repuestos (10%)	US\$	1,645	326
10	Costo de Operación por año	US\$	18,584	3,685
11	Costo Unitario Caudal	US\$/cfm	0.37	0.06
12	Costo Unitario OPEX	US\$/t	0.4	0.1

VIII. RESULTADOS CAPEX - OPEX

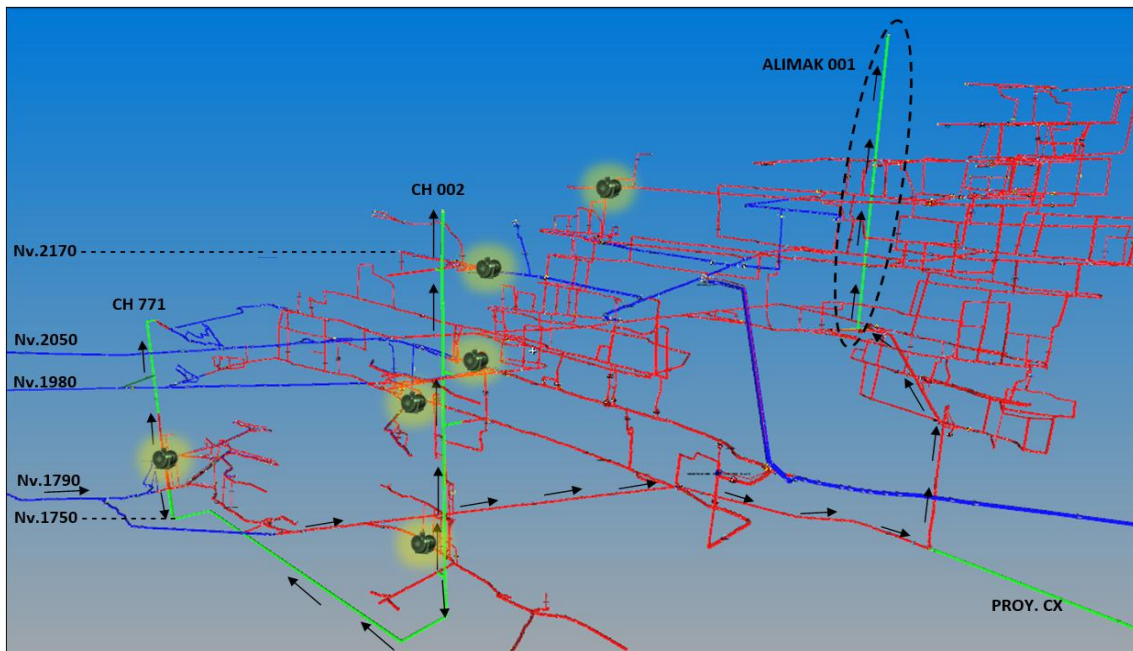


SIN VENTILACION MECANICA

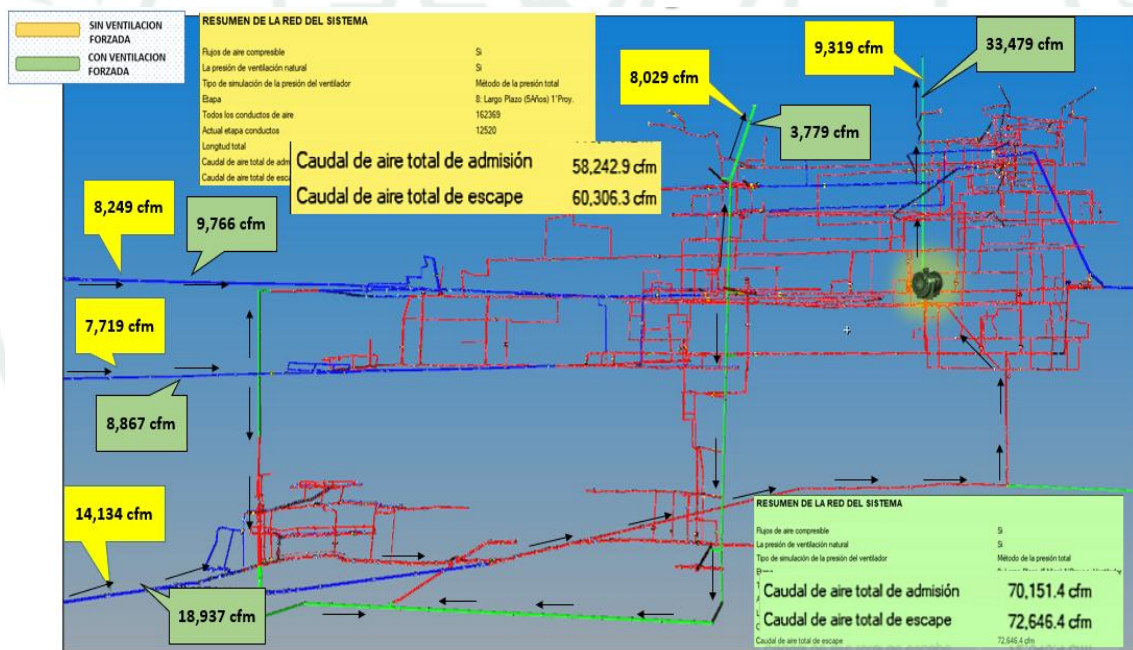
Item	Descripción	U/M	Actual	MYSAC
				Mediano Plazo
				2023-DIC
				1
1	Producción de Mineral	t/año	43,200	44,400
2	Costo Capital - CAPEX	US\$/Año	-	178,829
3	Costo Unitario CAPEX	US\$/t	-	4.03
4	Costo Capital - OPEX	US\$/Año	-	0
5	Costo Unitario OPEX	US\$/t	-	0.00
6	Total (CAPEX + OPEX)	US\$/Año	-	178,829
7	COSTO DE VENTILACION	US\$/t		4.03

CON VENTILACION MECANICA

Item	Descripción	U/M	Actual	MYSAC
				Mediano Plazo
				2023-DIC
				1
1	Producción de Mineral	t/año	43,200	44,400
2	Costo Capital - CAPEX	US\$/Año	-	182,329
3	Costo Unitario CAPEX	US\$/t	-	4.11
4	Costo Capital - OPEX	US\$/Año	-	18,584
5	Costo Unitario OPEX	US\$/t	-	0.42
6	Total (CAPEX + OPEX)	US\$/Año	-	200,914
7	COSTO DE VENTILACION	US\$/t		4.53



Proyecto a largo plazo – 3er proyecto



Proyecto a largo plazo – 3er proyecto