

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**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**

Jimmy Herberth Lozano Iparraguirre  
Jorge Jamber Rivera Cristobal

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2024

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**A** : Decano de la Facultad de Ingeniería  
**DE** : Yovana Torres Gonzales  
Asesor de trabajo de investigación  
**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
**FECHA** : 19 de diciembre de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

**Título:**

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

**Autores:**

1. Jimmy Herberth Lozano Iparraguirre – EAP. Ingeniería de Minas
2. Jorge Jamber Rivera Cristobal – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI  NO   
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 01
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

**ASESOR**

Mag. Yovana Torres Gonzales

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, quien nos ha bendecido con una familia increíble. Su apoyo constante y su comprensión a lo largo de todos estos años de estudio han sido fundamentales. Gracias a ellos, hoy podemos dar un paso más en nuestro camino personal y profesional.

A la Universidad Continental, por habernos recibido en sus aulas durante todo el tiempo que duró nuestra formación en la carrera de Ingeniería de Minas. A los docentes y a las autoridades de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas por compartir sus conocimientos y enseñanzas, que han sido una base sólida en nuestro crecimiento académico.

A la empresa Yauliyacu, en particular al Ing. Pablo de la Cruz Pelayo, Gerente General de la unidad, y a todo el equipo de profesionales del área de ventilación. Su dedicación y excelente trabajo han sido claves para el éxito de las operaciones, y estamos enormemente agradecidos por la oportunidad de aprender y crecer en este entorno profesional.

## DEDICATORIA

A mi compañera de vida y a mi hija, quienes, con su amor incondicional, paciencia y buenos sentimientos, han sabido acompañarme durante todo mi proceso de estudio. Su apoyo constante y amoroso me ha dado la fuerza necesaria para seguir adelante en los momentos más difíciles.

Gracias por estar siempre a mi lado. Con todo mi amor.

*Jimmy*

A todos los mineros de la empresa Yauliyacu, que con su esfuerzo y sacrificio enfrentan los peligros de las profundidades de la tierra para extraer los metales preciosos y llevar el sustento a sus hogares.

En especial, dedico estas palabras, a mi padre, Teodosio Rivera Sánchez, quien siempre mantuvo la esperanza de que un día yo llegaría a ser un profesional en ingeniería de minas.

Gracias por tu fe inquebrantable y por ser mi inspiración.

Con cariño

*Jorge*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Asesor .....	iv
Agradecimiento.....	v
Dedicatoria .....	vi
Índice de contenidos .....	vii
Lista de figuras .....	x
Lista de tablas .....	xii
Resumen .....	xiii
Introducción.....	xv
<b>Capítulo I.....</b>	<b>xvi</b>
<b>Planteamiento del estudio .....</b>	<b>xvi</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	xvi
1.2. Formulación del problema .....	xvii
1.2.1. Problema general .....	xvii
1.2.2. Problemas específicos.....	xvii
1.3. Objetivos de la investigación. ....	xvii
1.3.1. Objetivo general.....	xvii
1.3.2. Objetivos específicos .....	xviii
1.4. Justificación e importancia de la investigación .....	xviii
1.4.1. Justificación de la investigación.....	xviii
1.4.2. Importancia de la investigación.....	xviii
1.5. Delimitaciones del proyecto.....	xix
1.5.1. Delimitación espacial.....	xix
1.5.2. Delimitación temporal .....	xix
1.5.3. Delimitación temática: .....	xix
1.5.4. Delimitación técnica: .....	xix
1.6. Hipótesis de investigación.....	xix
1.6.1. Hipótesis general.....	xix
1.6.2. Hipótesis específicas.....	xix
1.7. Variables de investigación .....	xx
1.7.1. Variable dependiente .....	xx
1.7.2. Variable independiente .....	xx
1.8. Operacionalización de variables de investigación .....	xx
<b>Capítulo II.....</b>	<b>22</b>
<b>Marco teórico .....</b>	<b>22</b>
2.1. Antecedentes 22	

2.1.1	Antecedentes internacionales .....	22
2.1.2	Antecedentes nacionales .....	24
2.2.	Bases teóricas.....	26
2.2.1	Aire óptimo para minería .....	26
2.2.2	Contaminación del aire .....	31
2.2.3	Descripción de los principales gases en una mina subterránea.....	33
2.2.4	Medidas preventivas para la medición de gases .....	35
2.2.5	Sistema de emergencia en mina por presencia de gases tóxicos por incendio .....	37
2.2.6	Polvo de minas.....	41
2.2.7	Propiedades físicas del aire .....	42
2.2.8	Desplazamiento laminar y turbulento del aire:.....	44
2.2.9	Resistencia al movimiento de aire.....	46
2.2.10	Sistemas de ventilación .....	47
2.2.11	Determinación de caudal de aire requerido en minería subterránea.....	51
2.2.12	Demanda de aire total.....	52
2.2.13	Cálculo de cobertura de aire .....	52
2.2.14	Ventiladores .....	52
2.2.15	Tipos de ventiladores.....	53
2.2.16	Mantenimiento predictivo de ventiladores.....	53
2.2.17	Elementos de control de ventilación.....	53
2.2.18	Buenas prácticas en instalación de ventiladores .....	53
2.2.19	Mantenimiento de circuito de ventilación.....	54
2.2.20	Software especializado para optimización de sistema de ventilación .....	55
2.2.21	Legislación minera sobre la calidad del aire en las minas.....	56
2.3.	Definición de términos .....	57
	<b>Capítulo III .....</b>	<b>60</b>
	<b>Metodología de la investigación.....</b>	<b>60</b>
3.1.	Método de la investigación .....	60
3.2.	Tipo de investigación .....	60
3.3.	Diseño de investigación .....	61
3.4.	Nivel de investigación.....	61
3.5.	Población y muestra .....	62
3.5.1.	Población	62
3.5.2.	Muestra	62
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	62
3.7.	Técnica de procesamiento de datos .....	62
	<b>Capítulo IV.....</b>	<b>63</b>

<b>Resultados y discusión</b> .....	<b>63</b>
4.1. Generalidades.....	63
4.1.1. Ubicación y acceso .....	63
4.2. Diagnóstico de la situación .....	64
4.2.1. Exposición a los gases de mina .....	64
4.1.2. Monitoreo de gases en labores al interior de la mina .....	68
4.1.3. Caudal requerido por el número de trabajadores QTr .....	69
4.1.4. Caudal requerido por el consumo de madera QMa .....	69
4.1.5. Cálculo requerido por temperatura en las labores de trabajo QTe.....	70
4.1.6. Caudal requerido por equipo con motor petrolero.....	70
4.1.7. Requerimiento y cobertura de aire zona norte.....	71
4.1.8. Descripción del sistema de ventilación de la mina .....	72
<b>Conclusiones</b> .....	<b>88</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>89</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>90</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de ventilación natural .....	27
Figura 2. Ventilación impelente.....	28
Figura 3. Zonas del sistema de ventilación impelente.....	29
Figura 4. Sistema de ventilación aspirante.....	29
Figura 5. Sistema de ventilación mixta .....	30
Figura 6. Sistema aspirante con apoyo impelente .....	30
Figura 7. Medición de gases según su densidad relativa .....	36
Figura 8. Equipos de medición de gases .....	37
Figura 9. Primera Ley de Kirchhoff.....	48
Figura 10. Segunda Ley de Kirchhoff.....	48
Figura 11. Circuitos complejos .....	49
Figura 12. Esquema de flujo del proceso para el diseño de un sistema de ventilación.....	50
Figura 13. Demanda de aire para las maquinarias.....	52
Figura 14. Estándar de instalación de ventilador secundario .....	54
Figura 15. Ubicación y acceso.....	64
Figura 16. Porcentaje de O <sub>2</sub> en labores subterráneas.....	65
Figura 17. Porcentaje de CO en labores subterráneas .....	66
Figura 18. Manga y flujo de aire.....	68
Figura 19. Cálculo de requerimiento de aire .....	69
Figura 20. Porcentaje de oxígeno en las labores del nivel 4100.....	74
Figura 21. Velocidad de aire por labores del nivel 4100.....	74
Figura 22. Vista de frente y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación de la unidad minera .....	75
Figura 23. Vista de frente y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación de la unidad minera .....	76
Figura 24. Sistema de ventilación actual.....	77
Figura 25. Ejecución de crucero para optimizar la ventilación .....	78
Figura 26. Vista de planta y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte).....	79
Figura 27. Modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte). 80	
Figura 28. Vista de planta del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte) .....	81
Figura 29. Vista de frente y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte).....	82
Figura 30. Ventilación principal .....	83
Figura 31. Ventilación secundaria .....	83

Figura 32. Ventilación auxiliar .....	84
Figura 33. Modelado geológico del yacimiento .....	97
Figura 34. Vista de isométricas, reservas Budget.....	98
Figura 35. Vista de reservas sección VII .....	99
Figura 36. Flujo de producción de la mina.....	100
Figura 37. Modelado geológico .....	101
Figura 38. Sistema de ventilación.....	102

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables .....	21
Tabla 2. Estándares para garantizar un ambiente seguro en las operaciones mineras peruanas .....	27
Tabla 3. Inhalación de oxígeno y aire en la respiración humana.....	31
Tabla 4. Efectos en el cuerpo humano de la deficiencia de oxígeno .....	34
Tabla 5. Densidad relativa de los gases en el interior de la mina .....	35
Tabla 6. Requerimiento de aire .....	52
Tabla 7. Nivel de riesgo a la exposición de gases tóxicos.....	65
Tabla 8. Los promedios de exposición a los gases de mina .....	65
Tabla 9. Balance general de ingreso de aire.....	66
Tabla 10. Balance general de salida de aire .....	67
Tabla 11. El consumo de energía mensual es el siguiente.....	67
Tabla 12. Según Leo TWA para agentes químicos permisibles .....	68
Tabla 13. Factor de producción según el uso de madera.....	70
Tabla 14. Velocidad mínima.....	70
Tabla 15. Requerimiento total de aire en la unidad minera Yauliyacu.....	72
Tabla 16. Requerimiento de Aire Zona Alta - unidad minera Yauliyacu .....	72
Tabla 17. Ventiladores principales.....	72
Tabla 18. Ventiladores secundarios .....	73
Tabla 19. Promedio de oxígeno O <sub>2</sub> de la zona 4100 .....	73

## RESUMEN

Es fundamental tener en cuenta que la prevención desempeña un papel clave para proteger a los empleados de la exposición a gases perjudiciales. Es esencial cumplir con las normas de seguridad laboral y suministrar el equipo de protección personal adecuado. Si hay sospechas de exposición a gases tóxicos, resulta crucial buscar atención médica y comunicarse con los superiores o empleadores para tomar las acciones necesarias. Además, se llevó a cabo un estudio en la mina de Yauliyacu en 2024 para optimizar y mejorar la ventilación y reducir la concentración de gases tóxicos y contaminantes. Este estudio incluyó mediciones de parámetros de ventilación, así como, la concentración de gases, temperatura y polvo en diferentes niveles de la mina. Se determinó la cantidad de aire necesaria para satisfacer las necesidades de ventilación según el número de trabajadores y equipos presentes. También se construyeron túneles de entrada de aire fresco y túneles de evacuación de aire contaminado, además de seleccionar los ventiladores adecuados para establecer una red de ventilación conectada al sistema general de la mina, cuyos resultados demostraron que se optimizó la cantidad de oxígeno necesario para la respiración de los trabajadores, lo que evitó casos graves o fatales por inhalación de gases venenosos. También se proporcionó el aire adecuado para la combustión de los equipos y se eliminó el polvo generado por las actividades mineras. Además, se evacuaron los gases y humos resultantes de las explosiones, como el CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Todo esto contribuyó a crear un ambiente confortable en términos de temperatura y mejoró las condiciones ambientales en los niveles y tajos de la mina. Teniendo como resumen, se tomaron medidas para garantizar la seguridad de los trabajadores, cumplir con las normas legales y mejorar las condiciones de ventilación y ambiente en la mina de Yauliyacu, específicamente en el nivel 4100 norte. Se implementaron cambios, como la instalación de una puerta de control de flujo de aire cerca de la unidad Americana, para lograr una ventilación óptima. Asimismo, se avanzó en la construcción de una chimenea de ingreso de aire y se garantizó una ventilación adecuada desde la base del nivel 4100.

**Palabras claves:** control de flujo, enfermedades profesionales, gases tóxicos, ventilación óptima

## ABSTRACT

It is essential to keep in mind that prevention plays a key role in protecting employees from exposure to harmful gases. It is essential to comply with occupational safety regulations and provide appropriate personal protective equipment. If there is suspicion of exposure to toxic gases, it is crucial to seek medical attention and communicate with superiors or employers to take the necessary actions. In addition, a study was conducted at the Yauliyacu mine in 2024 to optimize and improve the ventilation system and reduce the concentration of toxic gases and contaminants. This study included measurements of ventilation parameters, as well as the concentration of gases, temperature, and dust at different levels of mine. The amount of air required to meet ventilation needs was determined based on the number of workers and equipment present. Fresh air intake tunnels and contaminated air evacuation tunnels were also built, in addition to selecting the appropriate fans to establish a ventilation network connected to the mine's general system. The results of the study showed that the amount of oxygen necessary for workers' breathing was optimized, which prevented serious or fatal cases due to inhalation of poisonous gases. Adequate air was also provided for equipment combustion and dust generated by mining activities was eliminated. In addition, gases and fumes resulting from the explosions, such as CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>, were evacuated. All this contributed to creating a comfortable environment in terms of temperature and improved the environmental conditions in mine levels and pits. In summary, measures were taken to ensure worker safety, comply with legal regulations and improve ventilation and environmental conditions at the Yauliyacu mine, specifically on the 4100-north level. Changes were implemented, such as the installation of an air flow control door near the American Unit, to achieve optimal ventilation. Also, progress was made in the construction of an air intake stack and adequate ventilation was ensured from the base of the 4100 level.

**Keywords:** flow control, occupational diseases, optimal ventilation, toxic gases

## INTRODUCCIÓN

La recuperación de minerales es crucial para la viabilidad y eficiencia de la actividad minera subterránea. Sin embargo, a medida que se profundizan las labores, también aumenta la concentración de gases tóxicos debido a la disminución del flujo de ventilación. Por ello, es indispensable instalar ventiladores que aseguren un aire adecuado para el desarrollo de las actividades y que, al mismo tiempo, preserven la integridad del personal, de la maquinaria y del medio ambiente en el que se opera.

La seguridad y salud de los trabajadores en entornos subterráneos, son aspectos fundamentales que impactan no solo sus vidas, sino también el bienestar de sus familias y comunidades. En este sentido, la mina Yauliyacu enfrenta retos significativos, ya que sus operarios están expuestos constantemente a gases peligrosos como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y metano ( $\text{CH}_4$ ). Esta investigación se centra en identificar los parámetros críticos que afectan el sistema de ventilación en el nivel 4100 de la mina, con el propósito de optimizar la calidad del aire y, por ende, mejorar las condiciones laborales para quienes trabajan en este entorno desafiante.

Mediante un análisis detallado del sistema de ventilación, se ha descubierto ineficiencias en la distribución del aire. Aunque el caudal de aire fresco parece adecuado, ciertas áreas han mostrado acumulaciones de gases tóxicos, lo que pone en riesgo la salud de los trabajadores. Conscientes de la importancia de un ambiente seguro, se han desarrollado propuestas de mejora que incluyen la instalación de ventiladores adicionales y la optimización de los conductos de aire. También es esencial implementar un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire, que garantice la detección temprana de cualquier problema.

Para abordar estos desafíos de manera efectiva, se han utilizado simulaciones computarizadas con el *software* VentSim. Este enfoque ha permitido modelar diferentes escenarios y prever soluciones sin necesidad de realizar intervenciones disruptivas en la mina. La experiencia ha subrayado la importancia de un sistema de ventilación bien diseñado y la necesidad de un mantenimiento continuo, así como, de inspecciones periódicas, para asegurar un ambiente de trabajo saludable y seguro.

Esta investigación no solo busca mejorar la eficiencia del sistema de ventilación en la mina Yauliyacu, sino que también tiene como objetivo primordial proteger la salud y seguridad de los trabajadores. Al proporcionar un marco para la implementación de medidas correctivas y preventivas en la gestión de la calidad del aire subterráneo, se busca garantizar que cada trabajador pueda realizar su labor en condiciones óptimas, protegiendo no solo su integridad, sino también la de sus compañeros y el entorno.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

La atmósfera en minas subterráneas donde existe la mezcla de gases tóxicos en las diferentes labores genera enfermedades en los trabajadores por la exposición a dichos gases, por lo que el control del aire de la atmósfera en una mina subterránea es importante en las operaciones, ya que la salud del personal influye en la productividad de la mina y mejora cuando las condiciones atmosféricas son más confortables para realizar los distintos trabajos (1).

La minería, una actividad principal en la economía global, lleva a cabo la explotación de sus metales mediante la minería subterránea, que está estrechamente relacionada con la ventilación. La falta de una ventilación adecuada puede generar la acumulación de gases y polvo, así como, la generación de incendios y explosiones que pueden causar grandes pérdidas humanas y materiales en labores mineras en diferentes partes del mundo. La ventilación insuficiente también puede generar áreas de trabajo inadecuadas, lo que provoca el cansancio prematuro del personal, dificultades respiratorias, fatiga, enfermedades pulmonares e incremento considerable de la temperatura (1).

En el Perú, muchos de los depósitos de minerales se encuentran situados debajo de la superficie, lo que hace necesaria la realización de la minería subterránea mediante la construcción de diferentes tipos de túneles y galerías para la extracción. Sin embargo, el uso de maquinaria impulsada por combustibles fósiles puede generar concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire. Según el Ministerio de Energía y Minas, algunas minas tienen profundidades superiores a los 1500 metros, lo que hace indispensable el control y la implementación de un sistema de ventilación eficaz. Además, el reglamento de seguridad y salud ocupacional, Decreto Supremo N.º 024-2016-EM y su modificación, el D. S. 023-2017-EM, establece en el capítulo VIII y el artículo 246.º que «el titular de la actividad

minera debe asegurar aire limpio en zonas de trabajo, adaptado a las necesidades de los trabajadores, equipos y la evacuación de contaminantes, para preservar la salud y mantener condiciones térmicas y ambientales adecuadas» (2).

En las operaciones de productividad en la zona norte del nivel 4100, se utilizan maquinarias Diesel que generan altas concentraciones de agentes químicos (CO<sub>2</sub>) que afectan la salud de los trabajadores, debido a la falta de proyectos de implementación de chimeneas para mejorar la calidad y cantidad de aire necesarios en las diferentes labores subterráneas. La investigación titulada «Optimización y mejora del circuito de ventilación para reducir la concentración de gases tóxicos y polución en el nivel 4100 zona norte mina – Yauliyacu – 2024», tiene como objetivo optimizar el sistema de ventilación para mejorar la calidad del aire y el desempeño óptimo tanto de los colaboradores como de las maquinarias (3).

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿De qué manera se puede optimizar y mejorar el circuito de ventilación para reducir la concentración de gases tóxicos y polución en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cuáles son los parámetros críticos del sistema de ventilación necesarios para diluir y evacuar los gases contaminantes en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024?
- b. ¿Qué acciones y mejoras se pueden implementar para mantener las concentraciones de gases tóxicos, polución y otros contaminantes dentro del límite máximo permisible en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024?
- c. ¿Cómo pueden las simulaciones con *software* especializado ayudar a determinar la mejor opción para garantizar una ventilación adecuada para el personal, equipos y procesos en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024?

## **1.3. Objetivos de la investigación.**

### **1.3.1. Objetivo general**

Optimizar y mejorar el circuito de ventilación para reducir la concentración de gases tóxicos y polución en el nivel 4100 zona norte, mina Yauliyacu, 2024.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a. Identificar los parámetros críticos del sistema de ventilación necesarios para diluir y evacuar los gases contaminantes en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.
- b. Proponer acciones y mejoras para mantener las concentraciones de gases tóxicos, polución y otros contaminantes dentro del límite máximo permisible en el nivel 4100 zona norte, mina Yauliyacu, 2024.
- c. Evaluar mediante simulaciones con *software* especializado la mejor opción para garantizar una ventilación adecuada para el personal, equipos y procesos en el nivel 4100, zona norte, mina Yauliyacu, 2024.

## **1.4. Justificación e importancia de la investigación**

### **1.4.1. Justificación de la investigación**

El presente proyecto se justifica en la necesidad de asegurar y mantener una calidad de aire adecuada en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, con el fin de cubrir las exigencias de ventilación en las labores operativas. La optimización del circuito de ventilación permitirá reducir la concentración de gases tóxicos y polución, lo cual es fundamental para proteger la salud de los trabajadores y garantizar un ambiente de trabajo seguro.

Mediante el desarrollo de mapas de ventilación, se podrán identificar puntos críticos en el sistema, facilitando ajustes precisos para satisfacer las necesidades específicas de ventilación en cada área. Esta investigación, por tanto, no solo busca cumplir con los estándares de seguridad, sino también optimizar los recursos energéticos y mejorar la eficiencia operativa de la mina.

### **1.4.2 Importancia de la investigación**

En las últimas décadas, la industria minera ha experimentado fluctuaciones en los precios de los metales, lo que ha llevado a las empresas a evaluar sus operaciones y buscar formas de realizar trabajos de profundización utilizando tecnologías innovadoras a un costo reducido (4).

La minería es una actividad económica fundamental en muchos países de la región, y por lo tanto es importante realizar estudios para mejorar la selección de las operaciones de producción. En este sentido, se debe considerar las condiciones óptimas para el trabajo y la ventilación de las diferentes labores. Es esencial que la calidad y cantidad de aire suministrado cumpla con los requerimientos necesarios para garantizar la satisfacción del personal y la conservación de los equipos y maquinarias utilizados en el proceso (4).

## **1.5. Delimitaciones del proyecto**

### **1.5.1. Delimitación espacial**

Este proyecto se llevó a cabo exclusivamente en el nivel 4100, en la zona norte de la mina Yauliyacu. Enfocados en evaluar y mejorar las condiciones del sistema de ventilación en esta área específica para asegurar que el aire cumpla con los requisitos necesarios para la salud y seguridad de quienes trabajan en la zona.

### **1.5.2. Delimitación temporal**

El análisis y optimización del sistema de ventilación se realizó a lo largo del primer semestre del 2024. Este periodo de tiempo permitió recopilar y analizar datos de manera cuidadosa, así como, implementar mejoras prácticas y sostenibles.

### **1.5.3. Delimitación temática:**

La investigación estuvo enfocada en la ventilación subterránea, especialmente en cómo mejorar los parámetros claves que ayudan a diluir y evacuar los gases tóxicos y la polución en el aire. No se incluirán otros sistemas o áreas de la mina fuera del circuito de ventilación en el nivel 4100, zona norte, para mantener el proyecto en un alcance manejable.

### **1.5.4. Delimitación técnica:**

Para realizar este análisis, se utilizaron herramientas y *software* especializados en simulación de ventilación minera. Estas herramientas permitieron modelar el flujo de aire y la dispersión de contaminantes con precisión, utilizando la tecnología disponible en la mina Yauliyacu para lograr los mejores resultados posibles.

## **1.6. Hipótesis de investigación**

### **1.6.1. Hipótesis general**

La optimización y mejora del circuito de ventilación redujo significativamente la concentración de gases tóxicos y polución, asegurando un ambiente de trabajo más seguro y saludable para el personal en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.

### **1.6.2. Hipótesis específicas**

#### **Hipótesis específica 1**

La identificación y ajuste de los parámetros críticos del sistema de ventilación permitió una dilución y evacuación efectiva de los gases contaminantes, logrando una calidad de aire óptima en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.

### **Hipótesis específica 2**

La implementación de acciones y mejoras específicas en el sistema de ventilación mantuvo las concentraciones de gases tóxicos y polución dentro del límite máximo permisible en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.

### **Hipótesis específica 2**

Las simulaciones realizadas con *software* especializado permitieron seleccionar la mejor opción de ventilación para garantizar que el sistema proporcione condiciones adecuadas para el personal, equipos y procesos en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.

## **1.7. Variables de investigación**

### **1.7.1. Variable dependiente**

X: Sistema de circuito de ventilación

### **1.7.2. Variable independiente**

Y: Concentración de gases tóxicos y polución

## **1.8. Operacionalización de variables de investigación**

Siguiente página

**Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables**

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
Círculo de ventilación	Es el círculo de por donde recorre aire libre de agentes contaminantes	Es la calidad y cantidad de aire	Ecuación de resistencia de mina	(N.s <sup>2</sup> /m <sup>8</sup> )
			Leyes de Kirchoff	Global
Concentración de gases tóxicos y polución	Adición de gases que son dañinos para los colaboradores, los equipos y el ambiente que pueden ser tóxicos, asfixiantes o explosivos(5)	* Reducción de la contaminación ambiental  * Minimizar los riesgos por concentración de gases tóxicos  * Reducción de costos por ventilación forzada	Círculo en mina	Cfm
			Monóxido de carbono (CO)	ppm
			Gas Carbónico (CO <sub>2</sub> )	ppm
			Óxido de nitrógeno (NO+NO <sub>2</sub> )	ppm
			Ácido Sulhídrico (H <sub>2</sub> S)	ppm
			Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	ppm
			Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	ppm
			METANO (CH <sub>4</sub> )	ppm
Aldehídos (C <sub>n</sub> H <sub>2m</sub> O)	ppm			
Radon	ppm			

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales

Ramírez y Fuentes (5), en su tesis «Modelamiento del sistema de ventilación y control de metano con el simulador Ventsim™ en la mina subterránea de carbón Fezmine, Polonia», el objetivo fue desarrollar y analizar un sistema de ventilación que mantenga las emisiones de metano dentro de los límites legales en la mina, especialmente, al profundizarla hasta el nuevo nivel 1290, asegurando su viabilidad hasta el 2070. Utilizando información disponible y el *software* de simulación VentSim™, se creó un modelo de flujo de aire ajustado con reguladores y ventiladores auxiliares, cumpliendo los caudales y velocidades exigidos. Se incorporaron las emisiones de metano de seis paneles de explotación, permitiendo observar cómo el flujo de aire diluye el metano en distintas áreas. Para los casos en que la dilución no fue suficiente, se propuso la desgasificación como técnica complementaria. Finalmente, se evaluaron cuatro escenarios de emisión de metano para determinar el nivel mínimo de desgasificación necesario en los paneles críticos y cumplir con la normativa.

Barrera y Pesántez (6), en su tesis «Diseño y optimización del circuito de ventilación en el tramo norte-sur de la mina Goldmins, Zaruma – El Oro», establecieron como objetivo principal garantizar la seguridad del personal en las labores mineras, asegurando un flujo adecuado de aire rico en oxígeno para alimentar los procesos de combustión. Para ello, utilizaron una metodología de campo durante tres meses, en la que calcularon flujos piroclásticos dacítico-riolíticos y flujos lávicos basalto-andesíticos para obtener estimaciones precisas. Además, mediante el uso de equipos de medición y el modelado en el *software* VentSim™, analizaron las condiciones de la red de ventilación, identificando problemas y factores que afectaban la circulación de aire fresco y viciado en el circuito principal. Tras

evaluar la situación actual, se propuso una solución adaptada a las necesidades específicas de la empresa. Como conclusión, se determinó que, durante el oligoceno superior, ocurrió una fase explosiva que generó flujos de ceniza riolítica y el emplazamiento de granitoides.

Barros (7), en su tesis «Estudio y optimización del sistema de ventilación del complejo minero Farallón Negro» cuyo objetivo fue realizar un análisis exhaustivo del sistema de ventilación para identificar áreas críticas y determinar los caudales de aire disponibles y requeridos en diferentes sectores. El estudio reveló que el caudal de aire entrante es superior al saliente, con una diferencia de 48.113,07 CFM (15,3 %). Se estimó que la cantidad total de aire para la mina es de 257.415,29 CFM, incluyendo un factor de seguridad del 10 %. Aunque el caudal de aire fresco cubre el requerido, existe un exceso del 17,9 %. Sin embargo, se encontraron problemas de ventilación en ciertas áreas, indicando ineficiencias en la distribución del aire. Se recomienda mejorar esta distribución para asegurar una ventilación adecuada y facilitar la expansión de las operaciones en el sector de la veta Encuentro Inferior, donde la ventilación es deficiente.

León y Proaño (8), en su tesis «Diseño y elaboración de un dispositivo detector de gases tóxicos dentro de las minas de oro, plata y cobre», el objetivo fue crear un detector de gases, enfocado en la detección de amoníaco, óxido nitroso y monóxido de carbono, con el fin de controlar los niveles de gases peligrosos en las minas. Se utilizó una metodología PMI, que incluyó la investigación de los gases presentes y el desarrollo de un prototipo capaz de proporcionar datos en tiempo real. Los resultados demostraron que el prototipo cumplió plenamente con los objetivos establecidos, alcanzando un 100 % de éxito en seis pruebas de funcionamiento. Se definieron los niveles permisibles de gases tóxicos: 50 ppm para CO, 25 ppm para óxido de nitrógeno y 25 ppm para amoníaco. El dispositivo fue diseñado con componentes estándar y se construyó de manera que pueda mejorarse y ampliarse en el futuro. Además, el prototipo puede presentar datos en diversas plataformas y permite la personalización de la visualización mediante código abierto, lo que lo hace accesible desde cualquier ordenador con conexión LAN.

Agudelo et al. (9), en el artículo «Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia» el objetivo fue medir las concentraciones de PM10, mercurio y plomo en el aire de viviendas cercanas a zonas mineras, así como, en fuentes de agua y suelos de estos municipios. Para ello, se utilizó una metodología que incluyó la evaluación de seis puntos en áreas de influencia minera y dos en áreas de control. Se emplearon los métodos NIOSH para medir los contaminantes en el aire, guías del IDEAM para analizar el agua, y técnicas de vapor frío y absorción atómica para el análisis de suelos.

Los resultados mostraron que las concentraciones promedio de PM10 y mercurio en el aire de las viviendas excedieron los niveles de seguridad establecidos, mientras que el plomo se mantuvo dentro de los límites permitidos. En los cuerpos de agua, se detectaron concentraciones elevadas de plomo, y en algunas zonas mineras, altos niveles de hierro, mercurio y aluminio. En el análisis de los suelos, las concentraciones de mercurio estuvieron por debajo del límite de detección, aunque se observaron variaciones en los niveles de plomo. A pesar de que se encontraron diversas fuentes de contaminación, lo que hace difícil establecer una relación directa con las actividades mineras, el estudio proporciona información importante para investigadores y autoridades de salud ambiental, recomendando la instalación de redes de monitoreo ambiental para un seguimiento continuo.

Mayorga (11), en su tesis «Exposición a monóxido de carbono, alteraciones clínicas y funcionamiento neuropsicológico en trabajadores de minas de carbón subterráneas en Cundinamarca, 2018», tuvo como objetivo explorar la relación entre los niveles de carboxihemoglobina en sangre, las alteraciones clínicas y el desempeño neuropsicológico de los trabajadores en minas de carbón subterráneas. Se empleó una metodología epidemiológica analítica de corte transversal, que incluyó la medición de un biomarcador de exposición, exámenes médicos toxicológicos y pruebas neuropsicológicas. Los resultados revelaron que los niveles de carboxihemoglobina en sangre variaban entre 1.90 % y 11.51 %, con un promedio de  $6.19 \pm 2.2$  %. También se identificaron afectaciones en la memoria, las funciones ejecutivas y otras áreas cognitivas, lo que sugiere una posible relación entre la exposición al monóxido de carbono (CO) y las alteraciones observadas. Sin embargo, se reconoció que otros factores de exposición mencionados por los trabajadores podrían haber influido en los resultados obtenidos.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Piérola (12), en su estudio «Diseño y modelamiento con los *softwares* Ventsim™ y Vuma3D para optimizar el circuito de ventilación en la zona Esperanza, unidad minera San Juan de Arequipa» tuvo como objetivo mejorar el caudal de aire y la temperatura en esta área de la mina. Se identificó que el sistema de extracción de aire viciado era ineficiente y dependía de chimeneas antiguas, las cuales presentaban riesgos de colapso. Para abordar este problema, se recolectaron datos sobre los flujos de aire y las condiciones térmicas, y se realizaron simulaciones computacionales con el *software* Ventsim Design 5.1 para el flujo de aire y Vuma 3D Network 2020 para la temperatura. Los resultados indicaron que la cobertura de aire alcanzó un 87 %, con un requerimiento de 45,941 cfm, y una potencia instalada de 398.5 HP, lo que generó un costo anual de energía de 364 429 USD. La temperatura en los tajos de profundización superó los 29 °C, con un promedio de 26.3 °C en toda la mina. Como solución,

se propuso el diseño de una nueva chimenea de ventilación en el lado este de la zona Esperanza, que va desde el nivel 609 hasta la superficie, y la instalación de un ventilador de 50 000 cfm para cubrir la demanda de aire.

Llacho y Vargas (13), en su estudio «Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, U. O. Pallancata – veta Pablo – 2018» el objetivo fue evaluar la efectividad del sistema de ventilación en la mina, enfocándose en su capacidad para controlar los agentes generados durante las actividades de voladura, transporte y acarreo del mineral. Se recopilaron datos sobre concentraciones de gases como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, polvo, temperaturas y velocidad del aire en diferentes niveles de la veta Pablo. Los resultados indicaron que el sistema de ventilación actual no es suficiente para controlar y eliminar los agentes contaminantes generados en la mina. Como solución, se propuso modificar el circuito de ventilación de la veta Pablo, con el objetivo de lograr una cobertura del 102 % al incorporar el RC 04 Pablo.

Díaz (14), en su tesis «Diseño de infraestructura para mejorar el circuito de ventilación de la veta Rosa - zona norte en el consorcio minero Horizonte, Pataz, 2018», el objetivo principal fue evaluar cómo las especificaciones del diseño de infraestructura podrían optimizar el sistema de ventilación de la veta Rosa en la zona norte. Se utilizó una metodología experimental y de campo, que permitió la observación directa y la recolección de datos, junto con simulaciones del flujo de aire para mejorar el circuito. Entre las conclusiones, se destacó que la ejecución del proyecto es crucial para garantizar la viabilidad de las operaciones en niveles inferiores a largo plazo. También se recomendó llevar a cabo inspecciones periódicas de las labores de ventilación para asegurar el flujo adecuado de aire y prevenir cualquier obstrucción que afecte la eficiencia de los ventiladores extractores. El estudio combinó diversas metodologías, como investigaciones explicativas, descriptivas y evaluativas.

Valqui (15), en su tesis «Diseño e implementación de un sistema electrónico de monitoreo de gases tóxicos para minería subterránea con acceso remoto mediante un servidor web», buscó desarrollar un sistema electrónico que permita el monitoreo remoto de gases tóxicos en minas subterráneas, con el fin de evitar la rápida saturación del aire y mejorar la seguridad de los trabajadores. La metodología consistió en tomar múltiples muestras individuales en períodos cortos para obtener datos representativos, permitiendo observar las variaciones en la concentración de gases a lo largo del tiempo y en conductos. Como resultado, se diseñó e implementó un procedimiento de verificación de la sensibilidad de los detectores, configurando un modo de verificación que se activa cada viernes a las 17:30 durante 3 minutos, durante los cuales se suministra aire sintético y *span*, logrando lecturas de concentraciones cercanas o iguales a los patrones establecidos.

Salazar (16), en su tesis «Diseño de un prototipo portátil para la detección del monóxido de carbono y material particulado en las actividades mineras subterráneas», se desarrolló un modelo de dispositivo portátil para monitorear monóxido de carbono y material particulado en labores mineras subterráneas, enfocándose en la unidad minera Papagayo de la Cía. minera Poderosa S. A., donde se identificó una alta producción de gases y partículas tóxicos debido al tránsito de vehículos y la falta de ventilación. Se observó que los accidentes fatales eran más comunes entre personal inexperto y con equipos de protección insuficientes. El dispositivo emite una alarma sonora al detectar monóxido de carbono en concentraciones superiores a 50 ppm y utiliza sensores para medir contaminantes, cuya señal es procesada por un microcontrolador y visualizada en una pantalla LCD portátil y con batería de litio, el dispositivo cuenta con dos tipos de alarmas, lo que permite prevenir la exposición a contaminantes dañinos en el entorno de trabajo minero subterráneo.

Chipana (17), en su tesis «Diseño del sistema de captación de polvo centralizada para control del impacto ambiental en la sociedad minera Corona», el objetivo fue desarrollar un sistema centralizado de captación de polvo para minimizar el impacto ambiental. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, recopilando datos tanto de fuentes primarias como secundarias para evaluar los efectos en términos numéricos. El diseño de los sistemas de extracción localizada se basó en las recomendaciones del Manual de ventilación industrial ACGIH, ajustando los caudales y las velocidades de transporte para garantizar un rendimiento óptimo y evitar la acumulación de partículas en los ductos. Se concluyó que el diseño propuesto mejorará significativamente las condiciones laborales, al ajustar las velocidades de transporte a los límites establecidos por las normas nacionales, reduciendo así los problemas de obstrucción y promoviendo un entorno de trabajo más saludable.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Aire óptimo para minería**

El aire es un elemento fundamental para la supervivencia de los seres humanos y al ingresar a una mina subterránea, su composición se ve modificada. El aire es una mezcla de diversos gases, incluyendo nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, argón, entre otros. La composición del aire seco es la siguiente:

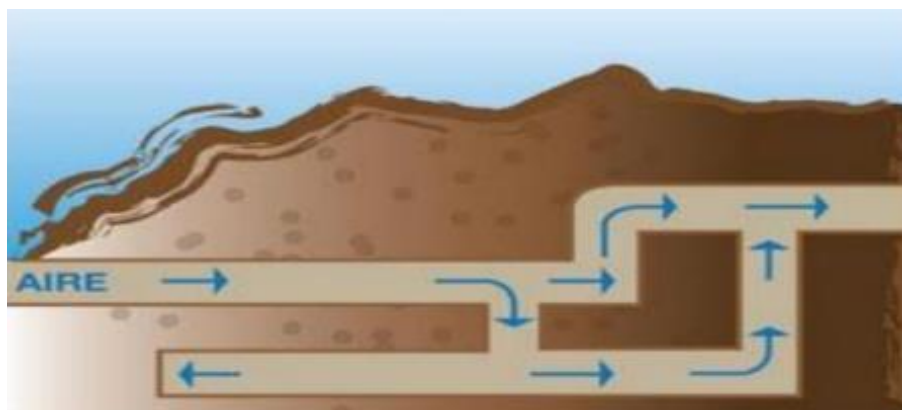
**Tabla 2. Estándares para garantizar un ambiente seguro en las operaciones mineras peruanas**

Gas	% en volumen	% en peso
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.08	75,53
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.95	23,14
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.04	0,046
Argón (Ar)	0.93	1,284

Otros gases: trazas de otros gases como neón, helio, metano y criptón (menos del 0.01 % en total)

Nota: Calidad del aire y su composición dentro de parámetros óptimos, asegurando niveles adecuados de oxígeno y mínimas concentraciones de gases tóxicos, para un ambiente seguro en las operaciones mineras.

La ventilación natural en las minas ocurre debido a la diferencia de peso del aire que entra y sale, influenciada principalmente por la temperatura, y en menor medida, humedad, presión y composición química del aire. Este tipo de ventilación es irregular y se ve afectada por factores externos como el viento y las estaciones del año, por lo que es más frecuente en minas poco profundas, de hasta unos 600 metros, o en operaciones de minería artesanal. Sin embargo, su falta de consistencia puede generar problemas, por lo que se recomienda medirla en las bocaminas en distintos momentos, en lugar de depender únicamente de cálculos teóricos (19).

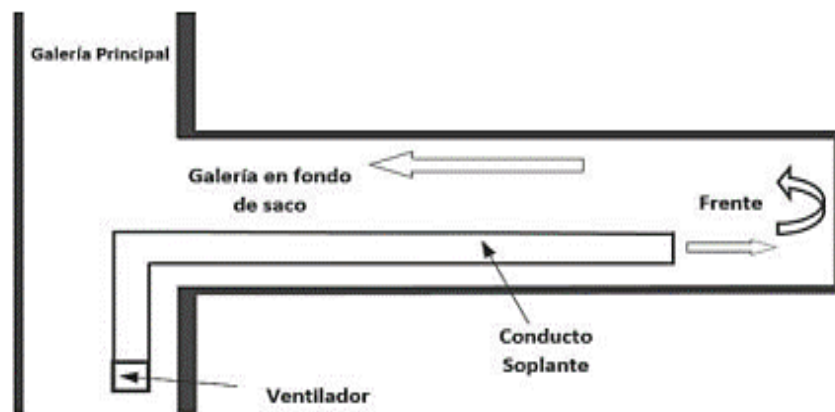


**Figura 1. Esquema de ventilación natural**  
Fuente: Sernageomin

El aire en los socavones difiere del de la superficie debido a la reducción de oxígeno y el aumento de dióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua, además de la presencia de gases y partículas específicas según la mineralización. El aire de la mina se clasifica en tres tipos: atmosférico, gases activos y aire muerto. Para un entorno laboral seguro y eficiente, es esencial que la atmósfera minera mantenga una composición, temperatura y humedad adecuadas (19).

**La ventilación mecánica:** en minas se genera con ventiladores que ejercen presión sobre el aire, ya sea para introducir aire fresco o extraer aire contaminado, logrando una presión y flujo constantes gracias a un motor eléctrico. Esto permite que la operación sea más estable y segura, aunque implica un costo elevado por el uso de electricidad. Su objetivo principal es diluir y remover contaminantes para mejorar el ambiente laboral con la mayor eficiencia posible (19).

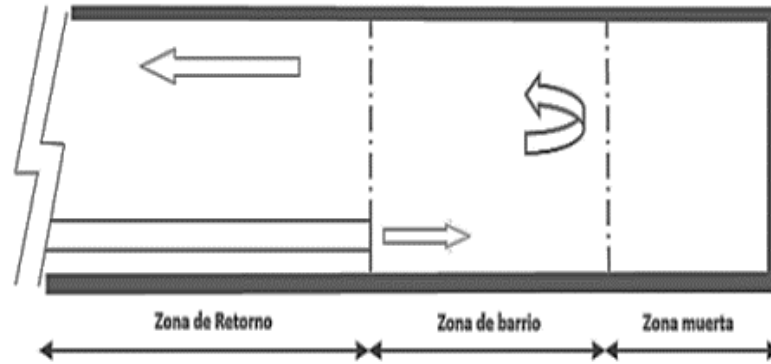
**Sistema de ventilación impelente:** el aire se impulsa mediante ductos hasta el final de la labor minera, desplazando el aire contaminado hacia afuera. Es el método más común en minas subterráneas, pues utiliza conductos flexibles y económicos que permiten un flujo de aire más eficiente y manejable.



**Figura 2. Ventilación impelente**

**Nota.** El aire es conducido mediante ductos hasta el extremo de la labor minera, expulsando el aire contaminado hacia el exterior

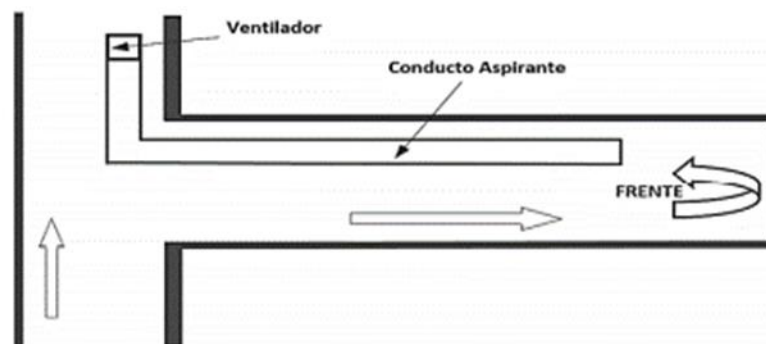
Cuando la corriente de aire limpio llega al frente de la labor, se mezcla de manera turbulenta con los gases presentes, lo que ayuda a prevenir la acumulación de estos gases en áreas cercanas al tope. Es fundamental que el extremo del conducto esté a una distancia adecuada del frente para que el aire pueda barrer eficientemente la zona. Si esta distancia es demasiado larga, se formará una zona muerta donde el aire se estanca y no se renueva.



**Figura 3. Zonas del sistema de ventilación impelente**

*Nota. La llegada de aire limpio al frente de la labor genera una mezcla turbulenta con los gases presentes, lo que previene su acumulación en las áreas cercanas al tope*

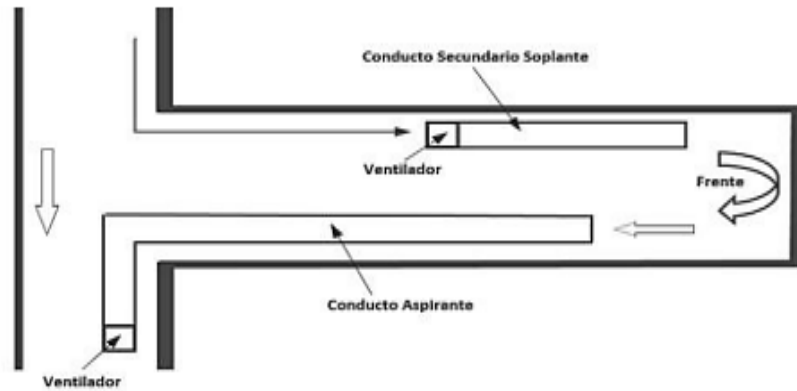
El sistema aspirante funciona succionando el aire contaminado del frente mediante un conducto de ventilación, lo que crea una depresión que permite la entrada de aire fresco por la galería. Dado que la galería tiene una sección mayor que el conducto, la velocidad y turbulencia del aire fresco disminuyen, lo que puede dificultar el barrido efectivo del tope, especialmente si el frente es amplio o si el conducto de aspiración no está ubicado adecuadamente. Para mejorar la eficiencia, se recomienda combinar este sistema con un ventilador de refuerzo impelente, que ayude a generar la turbulencia necesaria para diluir los gases. Además, el sistema requiere el uso de conductos rígidos o flexibles reforzados, y en casos de caudales elevados, puede ser técnicamente complicado debido a la necesidad de altas presiones y múltiples ventiladores en serie.



**Figura 4. Sistema de ventilación aspirante**

*Nota: El aire contaminado en el frente es aspirado mediante un conducto de ventilación, creando una depresión que permite la entrada de aire fresco por la galería*

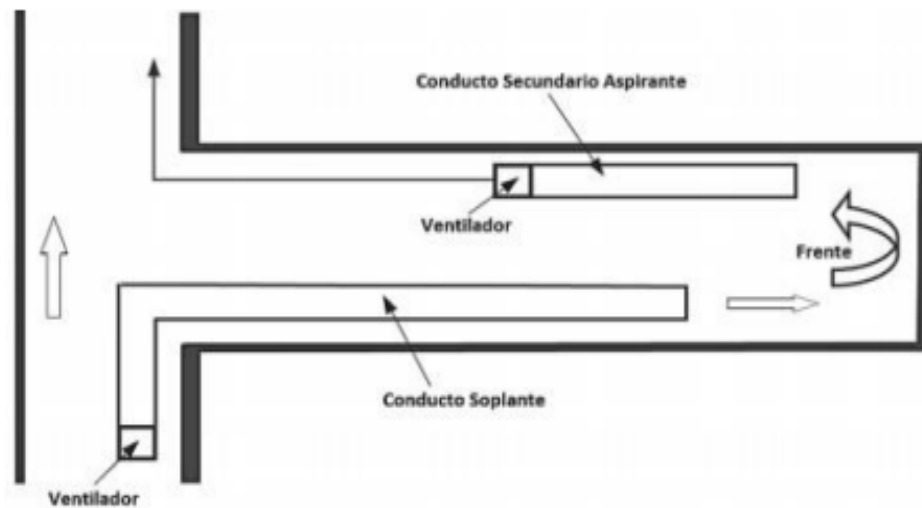
El sistema impelente con apoyo aspirante emplea un ventilador auxiliar cerca del frente de trabajo y un conducto corto, lo que mejora la ventilación al traer aire fresco y eliminar el polvo, mejorando así la calidad del aire en el entorno laboral (18).



**Figura 5. Sistema de ventilación mixta**

*Nota. El sistema solapado, o impelente con apoyo aspirante, emplea un ventilador auxiliar cerca del frente de trabajo, junto con un corto tramo de conducto*

El sistema aspirante con apoyo impelente combina dos métodos de ventilación para mejorar la calidad del aire en las minas. Este sistema principal extrae el aire contaminado mediante conductos rígidos, lo que permite que el aire fresco ingrese a la galería. Además, un ventilador auxiliar se encarga de dirigir el aire de la galería hacia el frente de trabajo, asegurando una adecuada circulación y evitando zonas muertas. Aunque este sistema ofrece una renovación constante de aire limpio y una mejor dilución de gases generados por las voladuras, su instalación y mantenimiento son más costosos (19).



**Figura 6. Sistema aspirante con apoyo impelente**

*Nota. El sistema aspirante con apoyo impelente combina dos enfoques de ventilación para mejorar la calidad del aire en las minas, asegurando un entorno de trabajo más seguro y saludable para los mineros*

### 2.2.1.1. Respiración humana

Es esencial que los trabajadores en el interior de la mina respiren aire limpio con el oxígeno suficiente, ya que esto es vital para su salud y seguridad. El sistema respiratorio es

responsable de suministrar oxígeno a la sangre y eliminar el dióxido de carbono. La cantidad de aire inhalado y el consumo de oxígeno dependen de la actividad física, y la capacidad respiratoria varía, siendo el volumen de aire inhalado mucho mayor que el oxígeno realmente consumido (20).

Composición general del aire exhalado:

**N<sub>2</sub>: 79%; O<sub>2</sub>: 16%; CO<sub>2</sub>: 5%**

**Tabla 3. Inhalación de oxígeno y aire en la respiración humana**

Actividad	Reposo	Moderada	Muy vigorosa
Ritmo respiratorio por minuto	12-ene	30	40
Aire inhalado por respiración m <sup>3</sup> /seg x 103	13-may	46 - 59	98
Aire inhalado por respiración m <sup>3</sup> /seg x 104	4,70	33,04	47,20
Cociente respiratorio CR	0,75	0,90	1,00

Nota. Se inhala aire, una mezcla de gases donde el oxígeno, aunque solo constituye aproximadamente el 20.95 %, es esencial para los procesos celulares y la producción de energía en el cuerpo

### 2.2.1.2. Cociente respiratorio

El cociente respiratorio es un indicador que mide la relación entre la cantidad de oxígeno consumido y la cantidad de anhídrido carbónico expulsado durante la respiración, lo que proporciona información sobre el esfuerzo físico que está realizando el cuerpo humano. Si el cociente respiratorio se acerca a 1, significa que el esfuerzo es mayor, mientras que, si es menor que 1, indica que la persona se encuentra en reposo. Esta relación se expresa en volúmenes de CO<sub>2</sub> expulsados por el oxígeno contaminado:

$$CR = \frac{CO_2 \text{ expelido}}{O_2 \text{ consumido}}$$

### 2.2.2. Contaminación del aire

En la minería subterránea, los ventiladores se utilizan para introducir aire fresco y mantener un ambiente seguro para los trabajadores. Sin embargo, debido a la presencia de equipos Diesel, explosiones, polvo y personas, el aire en la mina pierde oxígeno y acumula gases peligrosos como monóxido de carbono, dióxido de carbono y gases nitrosos. Este aire viciado debe ser eliminado debido a su bajo contenido de oxígeno y el riesgo de intoxicación para los trabajadores.

### **2.2.2.1. Gases en la mina**

La minería subterránea es propensa al peligro de intoxicación por gas, lo cual es una amenaza común. Los gases tóxicos en niveles superiores a los límites permitidos en el ambiente minero dan lugar a accidentes mortales.

Los gases liberados en las minas son altamente volátiles y pueden provocar accidentes mortales. Estos gases son producidos por diversas fuentes, como voladuras, equipos Diesel y materiales naturales. Comprender esta amenaza permite tomar medidas preventivas para evitar que los trabajadores se vean expuestos a gases peligrosos. Es importante conocer las propiedades de los gases de alta potencia presentes en la mina en cuestión.

### **2.2.2.2. Clasificación de gases en minería subterránea**

Se clasifica para los gases en minería subterránea así:

- ✓ **Gases asfixiantes:** estos gases reducen el nivel de oxígeno en el aire al ocupar el espacio que este debería tener en la atmósfera del entorno.
- ✓ **Gases tóxicos:** estos gases reducen la cantidad de oxígeno en el ambiente, lo que puede afectar la salud de las personas al inhalarlos y disminuir el suministro de oxígeno en sus cuerpos.
- ✓ **Gases explosivos:** estos gases pueden causar daños graves al cuerpo humano, incluyendo intoxicación, envenenamiento, deterioro de tejidos y órganos, y en casos extremos, la muerte. Además, si estos gases se mezclan con el aire y se encuentran con un factor de ignición, pueden generar una explosión.

### **2.2.2.3. Génesis de los gases en la mina subterránea**

La clasificación de los riesgos en la minería subterránea, se ordena en forma decreciente de importancia, siendo los más peligrosos los estratos, seguido por las voladuras, la marcha de las máquinas con combustión interna, explosiones y fuegos, la presencia de seres humanos y las estaciones de carga de baterías.

- ✓ **Gases de estratos:** el gas más frecuente en las minas es el metano, el cual es liberado a una tasa de 0,6 a 1,2 m<sup>3</sup>/min por m<sup>2</sup> de carbón expuesto. Sin embargo, en casos de emisiones repentinas de gas, esta cantidad puede aumentar hasta 120 metros cúbicos por minuto.

- ✓ **Gases de voladuras:** el ANFO y las dinamitas son utilizados comúnmente como agentes de voladura en minería subterránea, y al detonar producen gases. El ANFO genera cantidades de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub> y NO) en pequeñas cantidades.
- ✓ **Máquinas de combustión interna:** pueden emitir una cantidad considerable de contaminantes, llegando hasta 0,28 m<sup>3</sup>/min por cada caballo de fuerza. Los gases liberados incluyen CO, NO<sub>2</sub>, aldehídos, humos, metano y SO<sub>2</sub>. La cantidad de contaminantes depende de factores como la mezcla de combustible, el estado de la máquina, las características del combustible y las condiciones atmosféricas.
- ✓ **Explosiones y fuegos:** en los incendios y explosiones, la combustión incompleta genera gases como monóxido de carbono y metano. En las minas, los incendios suelen quedar confinados, y las muestras tomadas detrás de las barreras indican cuándo se sofoca el fuego. Este proceso puede durar semanas o meses, pero si la barrera es hermética, la combustión se detendrá cuando se agote el oxígeno.
- ✓ **Respiración humana:** como se mencionó anteriormente, la actividad respiratoria de cada trabajador produce alrededor de 47,20 m<sup>3</sup>/seg de CO<sub>2</sub>.
- ✓ **Baterías:** durante el proceso de recarga, se produce una liberación de cantidades reducidas de hidrógeno.

### 2.2.3. Descripción de los principales gases en una mina subterránea

- a. **El oxígeno (O<sub>2</sub>):** tiene una gravedad específica de 1.1054 y, aunque no es explosivo por sí mismo, juega un papel crucial en el proceso de combustión al facilitar la reacción con otros gases. Respirar aire con niveles bajos de oxígeno puede ser muy peligroso, e incluso mortal, ya que el oxígeno es vital para la vida humana, aunque el oxígeno en el aire normal no es tóxico. Este gas es incoloro, inodoro e insípido. En la atmósfera, el oxígeno representa alrededor del 21 %, siendo el segundo componente más abundante después del nitrógeno.

**Tabla 4. Efectos en el cuerpo humano de la deficiencia de oxígeno**

Porcentaje de oxígeno en el aire	Efectos en el cuerpo humano
21 % (Normal)	Condiciones normales, suficiente oxígeno para mantener las funciones celulares
19.5 - 16 %	Primeros síntomas de hipoxia: ligera dificultad para respirar, disminución en la coordinación física y mental
16 - 14 %	Dificultad respiratoria más intensa, disminución en el rendimiento mental y físico, fatiga notable
14 - 10 %	Somnolencia, mareos, náuseas, vómitos, visión borrosa y confusión mental, riesgo de desmayos
10 - 6 %	Pérdida de conciencia, incapacidad de movimiento. Riesgo de daño cerebral si la deficiencia de oxígeno persiste
Menos del 6 %	Colapso inmediato, convulsiones, daño cerebral permanente o muerte en pocos minutos si no se restablece el oxígeno

*Nota. la reducción en los niveles de oxígeno afecta progresivamente al cuerpo, comenzando con síntomas leves y, en casos graves, poniendo en riesgo la vida según la OSHA - «Oxygen Deficiency»*

- b. El monóxido de carbono (CO)** es un gas altamente peligroso con una gravedad específica de 0.9672, lo que lo hace ligeramente más liviano que el aire. Aunque no es inflamable por sí mismo, puede explotar y arder en presencia de oxígeno, con un rango de explosividad que va del 12.5 % al 74.2 % en aire normal. Su solubilidad en agua es baja, lo que dificulta su disolución. Este gas se genera principalmente por la combustión incompleta de materiales que contienen carbono, como en incendios mineros, explosiones de gas o la emisión de los escapes de motores de combustión interna. El monóxido de carbono es un indicador claro de la presencia de incendios en minas o de explosiones, y su acumulación puede ser explosiva si supera las 120 000 partes por millón, especialmente en áreas confinadas y sin ventilación adecuada. Para detectar su presencia, se utilizan detectores de CO o multigases, y se recomienda realizar pruebas periódicas en áreas de trabajo, especialmente si se sospecha de un incendio. Si los niveles de CO persisten, es un signo claro de un incendio subterráneo.
- c. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)** es un gas incoloro e inodoro, con una gravedad específica de 1.5291, lo que lo hace más pesado que el aire. Aunque no es inflamable ni explosivo, su presencia en concentraciones altas puede ser peligrosa para la salud. El aire normal contiene aproximadamente un 0,03 % de CO<sub>2</sub>, pero cuando los niveles alcanzan el 2 %, puede causar respiración más profunda y rápida. En concentraciones del 5 %, la respiración puede aumentar hasta un 300 %, provocando dificultades para respirar, y en niveles del 10 %, puede causar jadeo violento y la muerte. El CO<sub>2</sub> se genera en la respiración, en la combustión completa de materiales, durante explosiones, y en operaciones mineras, como las voladuras. Este gas es soluble en agua y se acumula especialmente en áreas bajas de las minas o en lugares abandonados, después de incendios o detonaciones. Para detectar el CO<sub>2</sub>, se emplean detectores específicos de este gas o multigases, así como, análisis químicos de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub> o N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

## 2.2.4. Medidas preventivas para la medición de gases

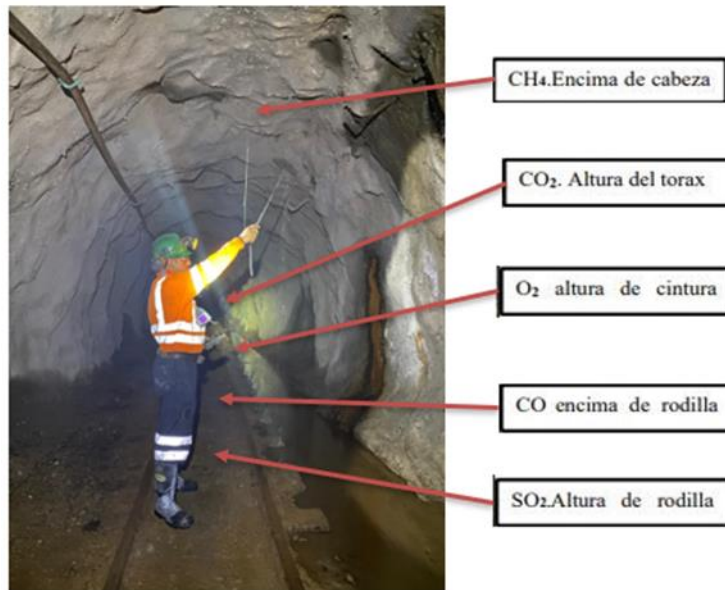
### 2.2.4.1. Procedimiento para la medición de gases

- ✓ Se ajusta el dispositivo para que suene una alarma audible cuando las lecturas de gases superen los límites permitidos. Para lograr esto, se realiza una prueba de verificación de funcionamiento con un cilindro patrón, lo que se debe realizar antes de cada medición.
- ✓ Se procede a tomar mediciones de los gases O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en los frentes de trabajo de la mina. Para asegurarse de que los niveles de gases no superen los límites permitidos, el aparato utilizado se calibra previamente mediante un cilindro patrón, lo que se debe hacer cada vez que se realice una medición.
- ✓ Si los valores de los gases medidos en los frentes de trabajo de la mina superan los límites permitidos, se requiere la firma de un acta de compromiso donde se acuerda no ingresar a ese frente de trabajo hasta que se realice la inyección de aire y se alcancen niveles seguros. Para hacer esto, se puede instalar un ventilador auxiliar que suministre aire al frente de trabajo.
- ✓ Se registra la fecha, hora, valores de los gases y el nombre del profesional que realizó la medición. Esta información se muestra en un panel de control. Los gases se miden según su peso específico: el CH<sub>4</sub> y CO en la parte superior (más ligeros que el aire), el CO<sub>2</sub> y gases nitrosos en la parte inferior (más densos), y el O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en la zona media.

**Tabla 5. Densidad relativa de los gases en el interior de la mina**

Gas	Fórmula	Peso específico (kg/m)
Oxígeno	O <sub>2</sub>	1.429
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	1.251
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1.977
Metano	CH <sub>4</sub>	0.717
Monóxido de carbono	CO	1.145
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	2.927
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	0.0899
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	0.73
Argón	Ar	1.784

*Nota:* Estos valores son clave para diseñar sistemas de ventilación eficientes y aplicar medidas de seguridad en minería subterránea, ya que permiten prever la distribución y acumulación de gases en espacios confinados



**Figura 7. Medición de gases según su densidad relativa**

Equipos utilizados para la medición de contaminantes y parámetros de ventilación:

Para garantizar un ambiente de trabajo seguro en las minas, se emplean diversos instrumentos electrónicos que permiten medir la calidad del aire y los niveles de contaminantes.

- El detector multigases *Passport* (modelo G2-5719-I99) se utiliza para detectar la presencia de diferentes gases en espacios cerrados y en ambientes laborales, brindando información precisa sobre la calidad del aire en estos lugares.
- El MSI PRO2 I (serie KRYN-0035) es un dispositivo especializado en medir la concentración de monóxido de carbono (CO) en las emisiones de los vehículos dentro de la mina. Junto con él, también se utiliza el detector multigases *Passport* (modelo G2-5719-I99) para medir los gases en espacios confinados y asegurar que el entorno de trabajo sea seguro.
- Para la medición de aldehídos en el interior de la mina, se emplea la bomba *Kwik Dra* (serie 11332), un equipo diseñado específicamente para monitorear estos compuestos potencialmente peligrosos.



*Figura 8. Equipos de medición de gases*

*Nota. El dispositivo de la marca MSA llamado «Altair 5R» es un monitor de gases que puede medir hasta cinco gases diferentes, incluyendo O<sub>2</sub>, LEL, H<sub>2</sub>S y CO. Viene con una bomba integrada, pantalla LED y también cuenta con tecnología bluetooth*

- El *Passport 5 Star* de MSA es un medidor de gases ampliamente utilizado en la minería. Este dispositivo digital es capaz de detectar una variedad de gases, como oxígeno (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), proporcionando mediciones precisas y confiables para mantener la seguridad en el entorno laboral subterráneo.
- El *Kestrel 4000* es un anemómetro digital diseñado para medir la velocidad del aire, así como, la temperatura y la humedad relativa. Este dispositivo es esencial en la minería, ya que facilita la toma de muestras de contaminantes en el aire, permitiendo determinar la altura adecuada para realizar mediciones según el peso específico de los gases presentes en el entorno.

#### **2.2.5. Sistema de emergencia en mina por presencia de gases tóxicos por incendio**

Para evitar la exposición a gases tóxicos por un incendio en una mina, se ha implementado un sistema de emergencia en el que se activa una alarma cuando los sensores de gas detectan la presencia de niveles peligrosos. Los trabajadores deben entonces evacuar la zona afectada y dirigirse a una zona de seguridad preestablecida. Se deben seguir los protocolos de emergencia y los equipos de rescate deben ser alertados para intervenir de manera rápida y segura.

La planificación de respuestas adecuadas a emergencias, como los incendios subterráneos, puede ser muy difícil debido a que estos eventos no están programados en términos de tiempo, lugar y magnitud, y sus consecuencias son impredecibles. En caso de incendio, se deben considerar otros sistemas de emergencia, como el análisis de la ventilación. Es fundamental examinar las zonas donde podrían ocurrir los incendios y determinar cómo se puede lograr un aislamiento efectivo mediante el cierre y sellado de puertas, la detención de ventiladores, entre otras medidas.

Es crucial que el trabajador esté adecuadamente capacitado, con conocimiento claro de las medidas que deben tomar en caso de emergencia, y que la supervisión tenga un conocimiento detallado de la mina, incluyendo la ubicación de los lugares de trabajo y todas las rutas de escape en caso de emergencia.

- a. **Equipo autorrescatador:** es un equipo de protección personal destinado a resguardar las vías respiratorias de los trabajadores durante la evacuación de áreas afectadas por gases tóxicos de incendios en minas subterráneas o en zonas con bajo nivel de oxígeno (menos del 19.5 %).
- b. **Funcionamiento del autorrescatador:** es un dispositivo diseñado para proteger a los trabajadores en caso de incendios subterráneos al filtrar los gases tóxicos mediante un catalizador especial que convierte el CO en aire respirable, proporcionando al trabajador un suministro de aire por un máximo de 30 minutos. Cabe destacar que el autorrescatador solo debe ser utilizado en situaciones de emergencia y no para llevar a cabo actividades. Además, estos equipos cuentan con fecha de caducidad que se basa en la fecha de fabricación y funcionan dentro de ciertos rangos de temperatura, que van desde -5 °C a 50 °C según las especificaciones del fabricante.
- c. **Refugios mineros:** son lugares específicos diseñados para asegurar la supervivencia de los trabajadores y cualquier persona presente en una mina subterránea en caso de un incidente o emergencia, durante un periodo determinado de tiempo.

En la industria minera, la labor diaria conlleva riesgos de falta de oxígeno, gases tóxicos o partículas. Los refugios mineros proporcionan protección necesaria contra estos peligros. Los refugios pueden variar en tamaño, desde los que alojan a 6 personas hasta los móviles con capacidad para 25 personas. Estos refugios pueden ser autónomos y proporcionar protección por un periodo de tiempo de 24 a 96 horas. La portabilidad de estos refugios es una de sus principales ventajas, lo que permite su uso en labores de exploración, ajustándose a las necesidades de la operación a medida que esta crece (21).

#### **d. Temperatura en las minas subterráneas**

El aire en el interior de las minas es afectado por diversos factores, siendo los más relevantes:

- **Influencia de la temperatura del aire exterior.** La temperatura dentro de una mina depende de la temperatura del aire exterior, que varía según la región y la temporada. En general, el aire es más cálido en verano y más frío en invierno, lo que puede influir considerablemente en todas las áreas de la mina.
- **Influencia del calor de compresión.** El aumento de temperatura del aire en las minas se produce por su compresión al descender. Cada metro de profundidad en una mina contribuye a un aumento de la temperatura del aire en 0,0098 °C, mientras que cada 100 metros de profundidad contribuyen a un aumento de 1 °C. Por lo tanto, a una profundidad de 1000 metros, el aumento de la temperatura debido únicamente a este efecto sería de 10 °C.
- **Influencia de la temperatura de las rocas.** El calentamiento del aire en la mina depende de la temperatura de las rocas, la cual aumenta conforme se profundiza. Este aumento se mide con el «grado geotérmico», que indica el incremento de temperatura por cada metro de profundidad. Este valor varía según factores locales como la composición de las rocas y la presencia de agua. El «gradiente geotérmico» es el valor inverso y muestra la temperatura correspondiente al aumento de profundidad por metro.
- **Influencias de los procesos químicos.** Los procesos químicos que afectan la temperatura incluyen la oxidación de materiales como la pirita, la descomposición de la madera, la oxidación del carbón, entre otros.
- **Influencias de la evaporación del agua.** La evaporación del agua puede reducir el aumento de temperatura generado por procesos exotérmicos, pero no es ideal, ya que incrementa la humedad relativa, lo que puede hacer las condiciones en la mina incómodas.
- **Impacto de la velocidad del aire.** La velocidad del aire es fundamental en las minas, ya que cuando está estancado, los trabajadores se sienten incómodos debido a la acumulación de calor corporal. A medida que la velocidad del aire aumenta, la productividad mejora, pero este efecto se reduce cuando la velocidad supera los 5 m/s.

- **Acción de las temperaturas ( $T^\circ$ ) elevadas sobre el personal.** Se produce calor, el cuerpo humano genera calor debido a los procesos metabólicos que ocurren durante la digestión de los alimentos, lo que mantiene una temperatura constante de  $36,6^\circ\text{C}$ . En reposo o sueño, un adulto produce alrededor de 70-80 kcal/hora, mientras que, durante el esfuerzo físico, la producción de calor puede llegar a ser de hasta 500 kcal/hora. Este exceso de calor debe ser disipado por la piel mediante convección, radiación y evaporación. La eficiencia en la eliminación de calor depende de varios factores:

a. La temperatura del aire, que influye en la sensación térmica al afectar la diferencia de temperatura entre la piel y el aire.

b. El nivel de humedad relativa

c. La velocidad del aire, ya que en minas secas no hay obstáculos para la evaporación del sudor. El aire puede absorber la humedad necesaria para igualar su nivel de humedad relativa y absoluta. Sin embargo, cuando la diferencia entre la humedad relativa y absoluta del aire es pequeña, o cuando la humedad está cerca del 100 %, la evaporación del sudor se vuelve más difícil (20).

- **Medida de la temperatura en minas subterráneas**

Se usa:

a. Instrumentos comunes para medir la temperatura (psicrómetro y termoanemómetro)

b. Pares – termo – eléctricos

c. Dispositivos que cambian su resistencia y tienen coeficientes de temperatura positivos o negativos.

Los dispositivos más relevantes son los termostatos de coeficiente negativo, los cuales están hechos de materiales semiconductores y la resistencia varía en función de la temperatura absoluta.

d. Psicrómetros

e. El termohigroanemómetro, además de medir la velocidad del aire, también registra la humedad.

### 2.2.6. Polvo de minas

El polvo minero está compuesto por partículas presentes en el aire y en las superficies de las excavaciones. Cuando estas partículas se suspenden en el aire, forman un aerosol que puede mantenerse en el ambiente durante un tiempo determinado. La duración de esta suspensión depende de factores como el tamaño y la forma de las partículas, su peso específico, la velocidad del aire, la humedad y la temperatura. La peligrosidad de estas partículas aumenta a medida que su tamaño aerodinámico disminuye, lo que facilita su penetración en las vías respiratorias más profundas. Las actividades de perforación, voladura, transporte de mineral y remoción de material pueden generar partículas finas (polvo) en las operaciones mineras. Estas partículas pueden contener sílice, arsénico, plomo, entre otros (22).

#### a. Ingeniería de control de polvo

En términos generales, muchas de las estrategias empleadas para controlar el polvo son similares a las utilizadas para regular los gases. Las siguientes acciones se presentan en orden de preferencia:

- **Prevención:** Se pueden modificar las operaciones o mejorar las prácticas actuales para reducir la generación de polvo, así como, utilizar equipos específicamente diseñados para su control.
- **Eliminación:** Otras acciones incluyen la limpieza de las áreas de trabajo para remover el polvo acumulado y la purificación del aire mediante el uso de colectores de polvo.
- **Supresión:** También se pueden implementar medidas como la aplicación de agua o vapor antes de iniciar las actividades, el uso de rociadores de agua o espuma para reducir el polvo en suspensión, y tratar el polvo depositado con productos químicos que atraen la humedad del aire.
- **Aislamiento:** Otras opciones para controlar el polvo incluyen limitar las voladuras o realizarlas con el personal fuera de la zona de riesgo, cerrar las operaciones que generan polvo y establecer sistemas de ventilación localizados.
- **Dilución:** Además, se pueden aplicar técnicas como la dilución local mediante ventilación auxiliar, la dilución mediante la corriente de ventilación principal, y la neutralización del polvo depositado mediante la adición de polvo inerte para reducir su capacidad combustible.

**b. Normas legales referente de contaminantes de aire de minas:** En la legislación peruana, se establecen dos tipos de valores de referencia: los estándares de calidad ambiental (ECA) y los límites máximos permisibles (LMP). Los ECA son valores que no suponen un riesgo significativo ni para la salud humana ni para el medio ambiente, y son obligatorios en el diseño de políticas y herramientas para la gestión ambiental. Por otro lado, los LMP son valores que, si se superan, pueden causar daños a la salud de las personas, a su bienestar y al entorno, y su cumplimiento puede ser exigido por las autoridades competentes (22).

## **2.2.7. Propiedades físicas del aire**

### **2.2.7.1. Parámetros básicos**

Como se sabe, el aire en las minas está compuesto por una mezcla de gases y vapor de agua, cuyas propiedades físicas son muy similares a las de los gases ideales. En este documento, se utilizaron diversas leyes físicas bien conocidas.

- **Densidad:** La densidad del aire se refiere a la cantidad de masa de aire presente en un volumen determinado.
- **Peso específico del aire:** El peso específico del aire es la cantidad de aire contenido en un volumen específico. En el contexto de la ventilación en minas, se utiliza un valor estándar de peso específico de 1,2 kg/m<sup>3</sup>, que representa el peso de 1 metro cúbico de aire a una presión de 1 atmósfera, temperatura de 15 °C y una humedad del 60 %. Este valor también se usa para comparar la densidad de un gas con la del aire. Además, el volumen específico es el volumen ocupado por 1 kg de aire a una presión y temperatura determinadas.
- **Presión:** La presión de un gas puede medirse en atmósferas absolutas o atmósferas técnicas. La atmósfera absoluta se define como una presión de 1,0333 kg/cm<sup>2</sup>, equivalente a la presión de una columna de mercurio de 760 mm a 0 °C a nivel del mar. La presión «p» puede variar dependiendo de la altitud sobre el nivel del mar y la temperatura.
- **Humedad del aire:** El aire siempre contiene una cierta cantidad de vapor de agua. Según la ley de Dalton, la presión total de una mezcla de gases se determina por la suma de las presiones parciales de los gases individuales:

$$P_t = p_a + p_v$$

**Donde:**

pt = presión total

pa = presión parcial del aire seco

pv = presión parcial del vapor de agua (23)

### 2.2.7.2. Leyes básicas del aire

Leyes generales:

#### 1. Ley de Boyle y Mariotte

T = cte (temperatura constante)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

O también:

$$p_1 * v_1 = p_2 * v_2 = \text{cte.}$$

#### 2. Ley de Gay-Lussac

A presión constante p = cte

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

A volumen constante: v = cte.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

La combinación de las leyes de Boyle-Mariotte y Gay-Lussac da lugar a lo que se conoce como la «Ecuación general de estado de los gases ideales». Esta ecuación describe el comportamiento de los gases bajo condiciones ideales, integrando los principios establecidos por ambas leyes.

$$p \cdot v = R \cdot T$$

**3. Ley de Dalton:** afirma que la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales que cada gas tendría si estuviera solo en el mismo volumen, bajo condiciones de temperatura y volumen constantes. Este principio también se aplica al vapor de agua que forma parte de la mezcla (14, pp. 45 – 46):

$$p = \sum_{i=1}^n p_i$$

### **2.2.8. Desplazamiento laminar y turbulento del aire:**

El flujo de aire que se mueve de manera suave y en corrientes paralelas sin mezclarse se conoce como flujo laminar. Sin embargo, cuando la velocidad del aire aumenta, estas corrientes se mezclan y generan vórtices o remolinos, lo que da lugar al flujo turbulento. En las minas, el flujo laminar es poco frecuente y solo se presenta en circunstancias específicas, como cuando el aire circula mediante un material denso o compacto. En la mayoría de las actividades mineras, donde la velocidad del aire es considerablemente mayor, el flujo es turbulento. Estos fenómenos de movimiento de los fluidos fueron estudiados por Reinold (Re).

#### **2.2.8.1. Medición de ciertos parámetros del aire (presión y velocidad de aire)**

- **Evaluación de la presión en el interior de la mina**

El dispositivo comúnmente utilizado para medir la presión absoluta dentro de la mina y en la superficie es el «barómetro aneroide». El uso de un barómetro convencional de mercurio, un barómetro de estación o un barógrafo para mediciones en interiores es limitado debido a su manejo complicado y alta sensibilidad

- **Manómetro ordinario**

Para medir la presión en la galería de ventilación y en el exterior de las minas, se suele utilizar el «barómetro aneroide», el cual se coloca cerca de los ventiladores principales. Para evitar las fluctuaciones bruscas del agua en su interior, se insertan tubos capilares en los extremos o se llena la curva del tubo con perdigones. Es fundamental que el instrumento esté correctamente sellado, colocando uno de sus extremos en un lado de la pared y el otro en el otro lado, para obtener una medición precisa. El barómetro de mercurio, el barómetro de estación y el barógrafo son menos convenientes para estas mediciones debido a su sensibilidad y dificultad de manejo.

- **El micromanómetro**

Los micromanómetros con escala inclinada se emplean para medir pequeñas depresiones, como las que se presentan en la ventilación natural de las minas y tienen un rango de 2 a 4 mm de columna de agua. Estos instrumentos permiten mediciones precisas debido a que la inclinación de la escala produce un gran desplazamiento del líquido con pequeñas presiones.

- **Medición de la velocidad del aire**

La medición de la caída de presión en la ventilación minera debe complementarse con la determinación del volumen de aire. Para calcular este volumen ( $m^3/seg$ ), se emplea la ecuación de continuidad,  $Q = V \cdot A$ , donde se mide la velocidad del aire y el área de la sección de la galería. Para medir la velocidad, se utilizan instrumentos como el anemómetro.

- **Anemómetro de paleta**

Se utilizan aeromotores con ruedas de paletas de aluminio que giran por la velocidad del aire, activando un mecanismo indicador. Este permite medir la distancia recorrida por el aire, y al dividirla por el tiempo, se calcula la velocidad del aire en m/min. La medición dura entre uno y cuatro minutos, y el anemómetro mide velocidades entre 0,2 y 6 m/seg.

- **Anemómetro sensible a par termoeléctrico**

La técnica utilizada en este instrumento se fundamenta en la evaluación de la temperatura de una junta termoeléctrica que es calentada por una resistencia. Al transitar el aire por la junta, se produce una disminución de su temperatura; y a mayor velocidad del aire, mayor será la variación térmica. De esta manera, es posible obtener una lectura de la velocidad. Este dispositivo es adecuado para medir velocidades de 0 a 1,5 m/seg.

- **Tubo de humo**

Este simple instrumento permite medir rápidamente la dirección y velocidad de flujos de aire lentos. Consiste en un tubo de vidrio de 10 mm de diámetro y 14 cm de largo, lleno de piedra pómez tratada con cloruro. Al abrir los extremos del tubo y soplar aire mediante él con una pera de succión, se genera un humo blanco debido a la reacción del cloruro con la humedad del aire. Este humo se desplaza a la misma velocidad que el aire, permitiendo una medición rápida y aproximada. Para determinar la velocidad del aire, se mide el tiempo que tarda el humo en recorrer una distancia de aproximadamente dos metros en una galería de sección uniforme. En las galerías, la velocidad del aire varía, siendo mayor en el centro y menor en los bordes, lo que forma fajas circulares. La velocidad media se relaciona con la velocidad máxima para calcular el caudal de aire:

$$V_m = \delta * V_{m\acute{a}x}$$

Donde:

$\delta$ : varía entre 0,75 y 0,80

Este simple instrumento permite medir rápidamente la dirección y velocidad de flujos de aire lentos. Consiste en un tubo de vidrio de 10 mm de diámetro y 14 cm de largo, lleno de piedra pómez tratada con cloruro. Al abrir los extremos del tubo y soplar aire mediante él con una pera de succión, se genera un humo blanco debido a la reacción del cloruro con la humedad del aire. Este humo se desplaza a la misma velocidad que el aire, permitiendo una medición rápida y aproximada. Para determinar la velocidad del aire, se mide el tiempo que tarda el humo en recorrer una distancia de aproximadamente dos metros en una galería de sección uniforme. En las galerías, la velocidad del aire varía, siendo mayor en el centro y menor en los bordes, lo que forma fajas circulares. La velocidad media se relaciona con la velocidad máxima para calcular el caudal de aire:

$$C = (A - 0,4) / A;$$

Donde: A es el área de la galería en m<sup>2</sup>.

El caudal del aire que pasa por la galería es:

$$Q = c * v * A, \text{ m}^3 / \text{min.}$$

Las dimensiones del área de la galería se miden con una precisión de hasta 1 cm. En cada sección se deben hacer dos o tres mediciones con el anemómetro.

## **2.2.9. Resistencia al movimiento de aire**

### **2.2.9.1. Teorema de Bernoulli**

El principio de conservación de la energía, formulado por este destacado científico, establece que la energía total de un fluido en un sistema se mantuvo constante, siempre y cuando no haya pérdidas debido a factores como la fricción, la compresión, la fuga o la incorporación de más fluido. Esta energía total se compone de tres componentes: la energía de presión (o carga estática), la energía de velocidad (o carga cinética) y la energía de posición (o carga geodésica) (23).

### **2.2.9.2. Caída de presión del aire**

En la ventilación de minas, así como, en otras disciplinas como la hidráulica, lo que

realmente importa es la diferencia de presión entre dos puntos, más que la presión en sí en cada uno de esos puntos. El flujo de aire ocurre debido a una diferencia de presión entre dos áreas dentro del sistema, lo que obliga a añadir energía al sistema. Esta energía se utiliza para superar las resistencias que dificultan el flujo de aire en las minas, las cuales provocan una pérdida de presión o caída de presión. Esta caída se mide en milímetros de columna de agua o en  $\text{kg/m}^2$  y se representa con la letra «H».

### **2.2.10. Sistemas de ventilación**

El acto de hacer circular el aire adecuado por el interior de una mina subterránea se conoce como ventilación minera, y su objetivo principal es garantizar una atmósfera respirable y segura para la realización de las labores necesarias.

Se establece un circuito de circulación de aire en todas las labores de la mina para lograr la ventilación adecuada. Es esencial que la mina tenga dos accesos separados, como dos chimeneas, dos socavones, una chimenea y un socavón, entre otros, para lograr esto (19).

La ventilación es fundamental en la actividad minera y su presencia es esencial para poder llevar a cabo cualquier tipo de producción en la mina.

#### **2.2.10.1. Conceptos básicos de ventilación**

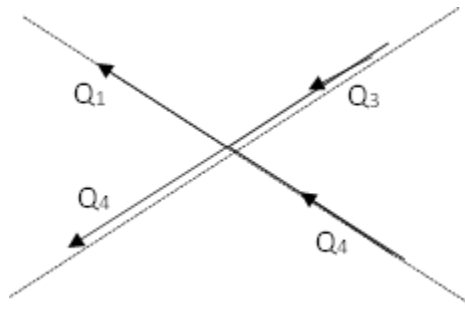
- 1.- Leyes de ventilación
- 2.- Ecuación de Atkison
- 3.- Ecuación básica de energía

#### **2.2.10.2. Circuitos de ventilación**

##### **✓ Leyes de Kirchhoff**

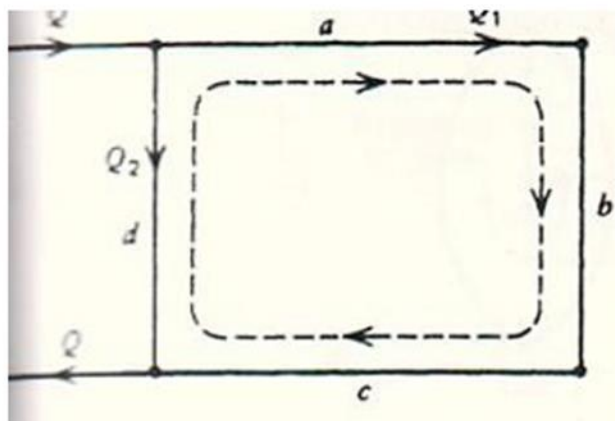
Las Leyes de Kirchhoff son un conjunto de principios que se aplican tanto a circuitos eléctricos como a sistemas de fluidos. La Primera Ley, conocida como la Ley de Continuidad, establece que la cantidad total de fluido o corriente que entra y sale de un punto en un sistema cerrado debe ser igual. En el contexto de un sistema de tuberías, esto significa que la cantidad de fluido que entra debe ser igual a la cantidad que sale, y en conjunto, la suma de los flujos de entrada y salida debe dar cero.

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$



**Figura 9. Primera Ley de Kirchhoff**

La Ley de Energía de Kirchhoff, también conocida como la Segunda Ley de Kirchhoff, dice que la suma total de las variaciones de presión en un circuito eléctrico cerrado debe ser igual a cero. Es decir, la cantidad de energía que se gana o pierde en una parte del circuito debe ser compensada por la energía ganada o perdida en otras partes del mismo circuito. Esto se logra sumando las variaciones de presión a lo largo de cualquier recorrido cerrado dentro del circuito eléctrico.



$$Hl = Hla + Hlb + Hlc - Hld = 0$$

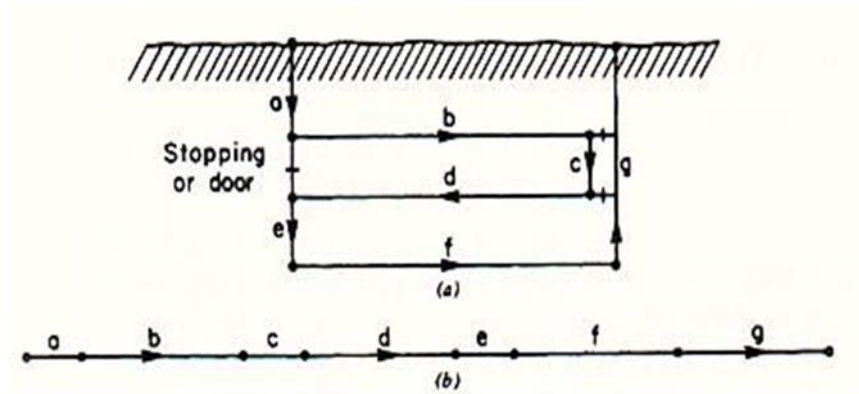
**Figura 10. Segunda Ley de Kirchhoff**

**a. Circuito en serie y paralelo**

- i. **Circuito en serie:** Un circuito en serie se refiere a un arreglo donde las galerías de ventilación se conectan de tal manera que fluyen desde el principio hasta el final, y donde la cantidad de flujo de aire, representada por Q, es la misma en todo el circuito.
- ii. **Circuito en paralelo:** Un circuito se considera que está en paralelo cuando las galerías de ventilación se separan en un punto y se distribuyen en dos o más caminos distintos que se vuelven a unir en un punto posterior del circuito. En este tipo de arreglo, la corriente total se divide entre los diferentes caminos, pero el voltaje en cada uno de ellos es el mismo.

## b. Circuitos complejos

Un circuito se considera complejo cuando se compone de una combinación de circuitos que están interconectados y que incluyen tanto conexiones en serie como en paralelo. Esto significa que hay varios caminos para que la corriente fluya mediante el circuito, algunos de los cuales pueden estar conectados en serie y otros en paralelo. La complejidad de estos circuitos puede variar dependiendo de la cantidad y la disposición de las conexiones en serie y en paralelo que se utilizan.



*Figura 11. Circuitos complejos*

## c. Principios básicos de ventilación

Para que se produzca ventilación debe haber:

Dos puntos con presiones distintas ( $>P$  a  $<P$ ) y temperaturas diferentes ( $T^\circ$  a  $<T^\circ$ ).

#### d. Procedimiento para diseño de sistema ventilación

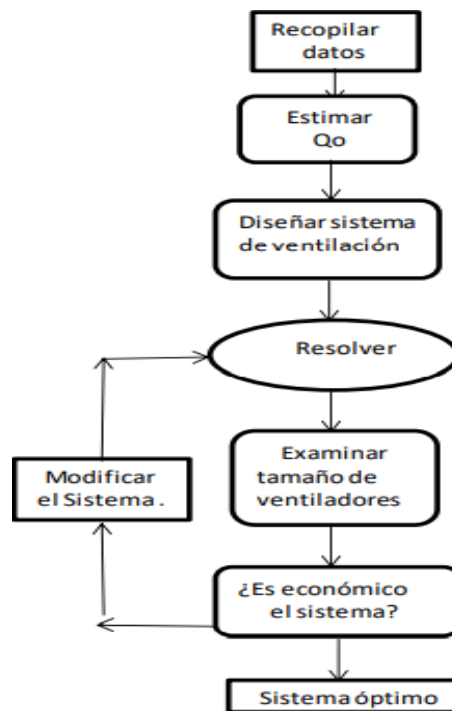


Figura 12. Esquema de flujo del proceso para el diseño de un sistema de ventilación

Qo= Caudal Inicia

#### e. Diseño de sistema de ventilación

La planificación y diseño ingenieril del sistema de ventilación de una mina involucra una serie de etapas y procesos. Para llevar a cabo un diseño adecuado de este sistema, es necesario considerar varios factores, entre ellos:

- Establecer las entradas y salidas de aire
- Identificar los frentes de trabajo activos
- Calcular los caudales de aire necesarios (Qo)
- Diseñar una red de ventilación adecuada
- Analizar y resolver la red de ventilación
- Determinar las especificaciones de los ventiladores necesarios

#### f. Red de sistema de ventilación

Un conjunto de conductos de aire, que representan las labores de una mina, conforma una red de galerías y nodos. En esta red, los conductos de aire, como galerías, chimeneas o rampas, se consideran como ramales, mientras que los nodos son las intersecciones donde se unen dos o más ramales.

### **g. Métodos para resolver redes de sistema de ventilación**

Cuando las conexiones entre las galerías de una mina son demasiado complejas y no es posible identificar claramente si hay conexiones en serie, en paralelo o diagonales en el circuito, se hace necesario emplear métodos de cálculo más avanzados. Estos métodos suelen requerir la ayuda de instrumentos o computadoras para poder ser realizados con precisión. Algunos ejemplos de estos métodos son:

- Método de aproximaciones iterativas
- Métodos basados en analogías
- Método de los caminos H

### **h. Ventilación natural**

En minas pequeñas y de superficie, el flujo de aire, conocido como « tiro natural », ocurre debido a la diferencia de densidad entre el aire que entra y el que sale. Esta variación de densidad es mayormente provocada por los cambios de temperatura del aire, aunque también influye, en menor medida, la presión, la humedad y la composición química del aire. El « tiro natural » no necesita un sistema mecánico para su funcionamiento, lo que lo hace adecuado para este tipo de minas más pequeñas y superficiales.

### **i. Ventilación mecánica o forzada**

El flujo de aire en una mina es generado por un ventilador que crea una diferencia de presión entre la entrada y la salida del aire. Sin embargo, el aire no se mueve por sí solo hacia donde se desea, es necesario crear un circuito para direccionarlo mediante elementos que le presenten cierta resistencia. Estos elementos, como conductos y otros dispositivos, se utilizan para llevar el aire a los frentes de trabajo de manera eficiente y segura.

#### **2.2.11. Determinación de caudal de aire requerido en minería subterránea**

La cantidad de aire fresco requerida en una mina se establece según lo indicado en el Artículo 252.º del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional D. S.-024-2016-MEM. Esto asegura que se cumpla con las necesidades de ventilación adecuadas, especialmente en lo que respecta a la demanda de aire para las personas que trabajan en el interior de la mina.

### 2.2.11.1. Demanda de aire para personas

**Tabla 6. Requerimiento de aire**

Altitud de la mina (m s. n. m.)	Cantidad Aire por Hombre
Hasta 1500	3 m <sup>3</sup> /min
1500 a 3000	4 m <sup>3</sup> /min (+40 %)
3000 a 4000	5 m <sup>3</sup> /min (+70 %)
sobre 4000	6 m <sup>3</sup> /min (+100 %)

Nota: Tomada de DS-024-2016-EM y su Modificación DS-023-EM (Promulgado 18 de agosto 2017 - Art. 247.°)

### 2.2.11.2. Demanda de aire para maquinaria

Según la normativa, la cantidad de aire necesaria para cada equipo en una mina se calcula en función de la potencia máxima de su motor, estimándose en 3 m<sup>3</sup>/min por cada caballo de fuerza (HP). Además, se debe considerar el número de equipos que están operando en la mina y tener en cuenta el período de mayor actividad del día. Para determinar la demanda total de aire, se aplica un factor de simultaneidad y se toma en cuenta la disposición mecánica de los equipos.

Altitud de la mina (msnm)	Cantidad de aire por equipo
HP (Equipo Diesel)	3m <sup>3</sup> /min/ HP

Nota: Tomado de DS-024 -2016- EM y su Modificatoria DS-023 -023-EM (Promulgado 18 de agosto 2017- Art. 247)

*Figura 13. Demanda de aire para las maquinarias*

### 2.2.12. Demanda de aire total

Q total requerido = Q personal + Q equipos

### 2.2.13. Cálculo de cobertura de aire

Se puede calcular la cobertura del sistema de ventilación del aire mediante la medición de los puntos de entrada y salida de aire.

$$\text{Cobertura} = \frac{Q \text{ ingreso}}{Q \text{ operativo}}$$

### 2.2.14. Ventiladores

Un ventilador es un dispositivo que proporciona energía a un fluido (ya sea aire o gas), generando el aumento de presión requerido (Presión Total) para mantener un flujo constante del fluido en cuestión.

### **2.2.15. Tipos de ventiladores**

- a. Ventiladores centrífugos:** El ventilador centrífugo está compuesto por un rotor rodeado por una carcasa en forma de espiral. El aire es aspirado por el rotor desde su ojo, que se encuentra paralelo al eje del ventilador, y es impulsado hacia la envolvente. Finalmente, el aire es expulsado mediante la salida, que está dispuesta perpendicularmente al eje del ventilador. Este tipo de ventilador puede tener una entrada de aire sencilla o doble.
- b. Ventiladores axiales:** Se puede definir un ventilador axial como un dispositivo que consta de un rotor colocado en una carcasa cilíndrica. Al comparar los ventiladores axiales y centrífugos, se pueden observar algunas diferencias significativas. Por ejemplo, los ventiladores axiales tienen una eficiencia superior en una amplia gama de puntos de operación, mientras que los ventiladores centrífugos pueden ofrecer un rendimiento muy alto en un rango muy limitado y solo en una curva característica. Dado que el costo de la energía es un factor importante por considerar, el rendimiento es un parámetro fundamental, y se prefiere obtener altas eficiencias en una amplia gama de puntos de operación, algo que es más difícil de conseguir con los ventiladores centrífugos que con los axiales.

### **2.2.16. Mantenimiento predictivo de ventiladores**

Se requiere de personal capacitado y especializado para llevar a cabo la revisión y mantenimiento periódico de los ventiladores con el objetivo de prevenir posibles accidentes y daños. Es importante prestar especial atención a posibles fallos en los rodamientos y vibraciones excesivas, ya que estos pueden ser la causa de roturas y daños graves en el sistema.

### **2.2.17. Elementos de control de ventilación**

Los elementos de control en un sistema de ventilación son clave para dirigir y regular el flujo de aire en las minas, asegurando que llegue a los puntos de trabajo y separando las entradas de las salidas de aire. Estos incluyen muros, cortinas, puertas, reguladores y ventiladores auxiliares, cuya selección depende de factores como la presión del aire y la calidad de la roca en el área. Los ventiladores primarios y secundarios generalmente usan muros, puertas y acoplamientos. Es fundamental realizar un mantenimiento regular de estos elementos para prevenir daños o accidentes, ya que fallos como rodamientos defectuosos y vibraciones excesivas pueden causar roturas graves.

### **2.2.18. Buenas prácticas en instalación de ventiladores**

El rendimiento de un sistema de ventilación en una mina depende de la correcta selección y ubicación de los ventiladores, considerando factores como el flujo de aire, la fricción y la presión en las galerías, así como, la vida útil de la mina. El tipo, capacidad y



verificar la estabilidad de las labores, el estado de las cortinas, la estanqueidad de las puertas y los reguladores. Un mantenimiento insuficiente puede provocar la contaminación del aire fresco, mayor resistencia al flujo, recirculación de aire viciado y una evacuación más lenta de gases contaminantes, lo que podría comprometer la seguridad de los trabajadores.

### **2.2.20. Software especializado para optimización de sistema de ventilación**

El *software* especializado en ventilación es una herramienta fundamental para que los ingenieros puedan anticipar cómo se distribuirá el aire en una mina bajo diferentes condiciones, que varían con el tiempo debido a factores como el aumento de profundidad, la expansión hacia áreas más distantes, la mayor emisión de gases y el cierre de viejos tajos. Para aprovecharlo al máximo, este simulador debe integrarse en el proceso de planificación y actualizarse regularmente. Hoy en día, los estudios de ventilación se realizan utilizando diversos simuladores numéricos, entre los más comunes están:

- VNET PC (EE. UU.)
- Ventsim (Australia)
- Vunidad mineraA (Sudáfrica)

Todos se basan en los mismos principios, como la ecuación de Atkinson y las leyes de ventilación.

#### **1. Simulador especializado de ventilación-*software* Vunidad mineraA**

Vunidad mineraA, que en inglés significa «Ventilation of Underground Mine Atmospheres» (ventilación de atmósferas en minas subterráneas), fue creado para resolver problemas relacionados con la ventilación, el calor y el polvo en las minas profundas de Sudáfrica. Este *software* utiliza el método de Hardy Cross en su versión dual, el cual resuelve el sistema mediante un proceso de iteración. Comienza con un modelo inicial y emplea un número de ecuaciones que corresponde al número de nodos del circuito. A cada nodo se le asigna una carga (presión), y las diferencias entre estas cargas se ajustan de acuerdo con la segunda ley de Kirchhoff. El proceso iterativo se detiene cuando la suma de los flujos de aire que entran y salen de cada nodo se aproxima a cero, o es igual a cero.

#### **✓ Características importantes del *software* Vunidad mineraA de ventilación**

La empresa subrayó que el *software* Vunidad mineraA puede gestionar de forma interactiva la distribución del aire, los contaminantes y la temperatura en los sistemas de ventilación y refrigeración. Emplea un algoritmo que realiza cálculos termodinámicos

detallados e incluye aire comprimido. Además, su motor de soluciones contiene algoritmos específicos para modelar la planificación de yacimientos estrechos, grandes cuerpos mineralizados y minas de carbón subterráneas. Este *software* es valioso no solo como herramienta de planificación, sino también para evaluar los parámetros de rendimiento ambiental en minas en funcionamiento.

✓ **Importancia del simulador en la planificación minera**

- a. **Alternativas de ventilación:** En las minas, las condiciones operativas pueden verse alteradas por factores como derrumbes en las galerías, lo que hace esencial evaluar opciones de ventilación para asegurar la seguridad de los trabajadores y reducir los riesgos. Un simulador es una herramienta eficaz para analizar estas alternativas, ya que ofrece resultados precisos y rápidos.
- b. Es importante almacenar los resultados de estas simulaciones en un banco de datos para su posterior uso en situaciones de emergencia. De esta manera, se pueden tomar decisiones informadas y rápidas en caso de que surja una emergencia o si las condiciones operativas cambian en la mina. Un banco de datos de simulación de ventilación también puede ayudar a los ingenieros de minas a optimizar los sistemas de ventilación y mejorar la eficiencia energética de la mina en general.
- c. **Cambios en el frente de trabajo:** Los factores que afectan las condiciones laborales pueden dividirse en dos categorías principales: naturales y operacionales.
- d. **Factores naturales:** Elementos como el contenido de gas en la roca, el calor, las características geológicas y otros factores similares escapan al control del ingeniero.
- e. **Factores operacionales:** Aspectos como el método de explotación, la producción diaria, la ubicación de los frentes, entre otros, pueden ser evaluados y analizados con el uso de simuladores, lo que permite estudiar sus efectos y reducir los costos operativos de la mina

**2.2.21. Legislación minera sobre la calidad del aire en las minas**

En los últimos años, el sector minero en Perú ha implementado diversas regulaciones que incluyen los límites máximos permisibles (LMP) y los estándares de calidad ambiental para el aire (ECA Aire), entre otras normativas. Estas leyes son fundamentales para la gestión ambiental en la industria minera, contribuyendo al desarrollo sostenible de los proyectos mineros (20).

#### **2.2.21.1. Límite máximo permisible de contaminantes de aire (LMP)**

Las emisiones atmosféricas están sujetas a regulaciones que fijan límites máximos para determinados gases y partículas, con el objetivo de prevenir o reducir los riesgos relacionados con su presencia en el aire. La R. M. 315-96-EM/VMM estableció los niveles máximos permisibles para el anhídrido sulfuroso, las partículas, el plomo y el arsénico en las emisiones gaseosas de las unidades minero-metalúrgicas, asegurando que estas emisiones se mantengan dentro de los valores permitidos por la normativa.

#### **2.2.21.2. Estándar de calidad de ambiental (ECA)**

Las emisiones atmosféricas están sujetas a regulaciones que fijan límites máximos para determinados gases y partículas, con el objetivo de prevenir o reducir los riesgos relacionados con su presencia en el aire. La R. M. 315-96-EM/VMM estableció los niveles máximos permisibles para el anhídrido sulfuroso, las partículas, el plomo y el arsénico en las emisiones gaseosas de las unidades minero-metalúrgicas, asegurando que estas emisiones se mantengan dentro de los valores permitidos por la normativa.

#### **2.2.21.3. D. S. 024 –EM-2016 y modificatoria D. S. 023-2017-EM**

El Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional (D. S. 024-2016-EM) y su modificación, en los artículos 246.º a 257.º, determinan la responsabilidad del titular minero respecto a la salud de los trabajadores en la minería subterránea. Este reglamento exige que el aire en las labores mineras sea limpio y adecuado tanto para los trabajadores como para los equipos. También establece que debe garantizarse la evacuación de gases, humos y polvo suspendido que puedan afectar la salud de los trabajadores. Además, cualquier sistema de ventilación en minería subterránea debe asegurar que la calidad del aire se mantenga dentro de los límites de exposición ocupacional para agentes químicos (18).

### **2.3. Definición de términos**

- **Aire (industria minera).** En las minas, al entrar al interior, el aire experimenta cambios en su composición, con un aumento del nitrógeno (N<sub>2</sub>) y una disminución del oxígeno (O<sub>2</sub>). También se incrementan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua, y otros gases y partículas generados por diversas actividades como la respiración de los trabajadores, maquinaria, explosiones, incendios y descomposición de materiales (24).
  
- **Cámara (industria minera).** El «corte» es una sección de una mina subterránea donde se extrae progresivamente el mineral, especialmente en depósitos formados por capas o vetas inclinadas (24).

- **Contaminación.** La contaminación se refiere a cualquier cambio en las características del aire, agua o suelo que perjudica a los seres vivos (24).
- **Contaminación ambiental.** La contaminación ocurre cuando los humanos introducen contaminantes en el medio ambiente, lo que puede alterar sus características y ser perjudicial para la salud, la naturaleza y la propiedad si exceden los niveles permitidos o permanecen demasiado tiempo (24).
- **Control de polvos.** Son un conjunto de acciones destinadas a controlar las emisiones de polvo respirable, asegurando que se cumplan las normativas vigentes, tanto en el área de trabajo de la cantera o tajo abierto, como en los alrededores (24).
- **Estudio de impacto ambiental (E. I. A.).** La evaluación ambiental es un informe técnico que el responsable del proyecto debe presentar antes de comenzar una actividad. Este estudio examina cómo las acciones del proyecto afectarán al medio ambiente y a las áreas naturales cercanas (24).
- **Gas (industria minera).** En las minas, se encuentran gases como el metano, gases combustibles, combinaciones de aire y gases inflamables, entre otras mezclas explosivas (24).
- **Gases esenciales.** En la industria minera, el aire atmosférico y el oxígeno son elementos esenciales para la supervivencia humana (24).
- **Gases explosivos.** En la minería, gases como el metano ( $\text{CH}_4$ ), el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), el acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) y el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) pueden formar mezclas explosivas con el aire cuando están en concentraciones altas, especialmente el  $\text{CO}$ , que es peligroso entre el 13 % y el 75 % (24).
- **Gases nitrosos  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ .** Los gases de óxidos de nitrógeno, comunes tras las voladuras en minas, son peligrosos y pueden causar edema pulmonar. Se deben tomar precauciones como rociar agua para disolverlos. Se detectan con tubos colorimétricos y tienen un olor acre (24).
- **Gases sofocantes.** En minería, algunos gases como el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en concentraciones superiores al 15 %, metano ( $\text{CH}_4$ ) y el gas de carburo ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), que tiene olor a ajo, pueden ser mortales a altas concentraciones debido a que causan asfixia (24).

- **Gases tóxicos.** En minería, existen gases peligrosos para la salud como el monóxido de carbono (CO), los humos nitrosos (con olor y sabor ácido), el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) (con olor a huevos podridos y un límite permisible de 8 partes por millón), y el anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>), que en concentraciones superiores al 15 % puede ser mortal, con un límite permisible de 1,6 ppm (24).
  
- **Riesgo.** La capacidad potencial de una sustancia peligrosa para causar daño o lesiones cuando se usa en cantidades específicas bajo ciertas condiciones se define como toxicidad (20).
  
- **Sustancias tóxicas.** Son sustancias, ya sean gases, líquidos o sólidos, que, debido a sus características químicas, pueden causar daño o incluso la muerte a un organismo vivo al ser inhaladas, absorbidas o metabolizadas, sin necesidad de provocar daño físico directo (24).
  
- **Toxicidad.** Se refiere a la capacidad de una sustancia para causar un efecto no deseado en un organismo, cuando su concentración en una determinada parte del cuerpo es lo suficientemente alta (24).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Método de la investigación**

La investigación sobre la optimización y mejora del circuito de ventilación en el nivel 4100 zona norte, mina Yauliyacu se desarrolló bajo un enfoque científico y metodológico mixto. Se aplicó el método científico analizando la evidencia, descomponiéndola y evaluándola de manera detallada, para medir la concentración de gases tóxicos y la efectividad del sistema de ventilación. El estudio incluyó la revisión bibliográfica, donde se diagnosticó de manera inicial las condiciones actuales, donde se identificaron los factores críticos, propuesta de mejoras, implementación de un piloto y evaluación de resultados, con el objetivo de optimizar el sistema de ventilación y reducir la contaminación del aire, mejorando así la seguridad laboral y el cumplimiento de normativas ambientales.

#### **3.2. Tipo de investigación**

El tipo de investigación de este estudio fue aplicada, ya que se centró en la resolución de un problema práctico y específico relacionado con la optimización y mejora del circuito de ventilación en el nivel 4100 zona norte, mina Yauliyacu. La investigación tuvo como objetivo desarrollar soluciones técnicas y operativas que permitan reducir la concentración de gases tóxicos y la contaminación en el ambiente subterráneo, mejorando así las condiciones laborales y garantizando la seguridad de los trabajadores. Al tratarse de una investigación aplicada, se buscó implementar directamente los resultados obtenidos en el entorno real de la mina, con un enfoque orientado a la mejora continua de los procesos y el cumplimiento de normativas de seguridad.

### **3.3. Diseño de investigación**

El diseño de la investigación de este estudio fue cuasiexperimental con un enfoque preexperimental, ya que se llevó a cabo en un contexto real de la mina nivel 4100 zona norte, mina Yauliyacu, donde se implementaron intervenciones para optimizar el sistema de ventilación y reducir la concentración de gases tóxicos. Mediante un diagnóstico inicial, se identificaron los problemas existentes en el sistema de ventilación y, a partir de ahí, se aplicaron las soluciones propuestas en un piloto para evaluar su efectividad. La investigación se basó en la recopilación de datos antes y después de la intervención para analizar las mejoras en la calidad del aire y en las condiciones de trabajo, sin contar con un grupo de control, lo que caracterizó el enfoque cuasiexperimental.

Este diseño se enfocó en:

- Recolección de datos iniciales: identificación y análisis de los parámetros críticos del sistema actual de ventilación.
- Simulación de escenarios: utilización de *software* para simular mejoras y evaluar su impacto en la ventilación y concentración de gases.
- Validación y análisis de resultados: comparación de las concentraciones simuladas de gases con los límites máximos permisibles y propuestas de ajustes necesarios.

### **3.4. Nivel de investigación**

Esta investigación adoptó un enfoque integral que combinó aspectos descriptivos, correlacionales, explicativos y predictivos para optimizar la ventilación y el control de contaminantes en la mina. Mediante simulaciones, se validaron y perfeccionaron las estrategias de ventilación (25). El estudio se abordó en diferentes niveles de análisis, cada uno con un propósito específico. En el nivel descriptivo, se buscó identificar y detallar los factores críticos que afectan la ventilación y la concentración de gases en la mina. En el nivel correlacional y explicativo, se analizó la relación entre las acciones propuestas y la reducción de contaminantes, evaluando su efectividad para mantener los gases dentro de los límites permitidos, además de entender cómo el sistema de ventilación impacta en estos niveles. Finalmente, en el nivel predictivo y experimental, se utilizaron simulaciones con *software* especializado para predecir los efectos de las modificaciones propuestas en el sistema de ventilación, evaluando el impacto de los cambios en la mejora de la calidad del aire.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

La población para el presente trabajo de investigación fue la Cía. minera Yauliyacu, ubicada en el distrito de Chicla, provincia de Huarochirí, departamento de Lima. geográficamente se localiza en la zona central, flanco Occidental de la cordillera de los Andes.

#### **3.5.2. Muestra**

La muestra corresponde al nivel 4100 zona norte, mina Yauliyacu.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se utilizó un enfoque de muestreo no probabilístico, específicamente la técnica de conveniencia, para seleccionar el sistema de ventilación como unidad de observación. La recolección de datos se realizó mediante técnicas documentales y empíricas, como la observación directa y el uso de equipos para la toma de datos topográficos, termómetros para medir la temperatura, y equipos Solaris para determinar la composición de los gases presentes en el polvo y calcular la variación de la presión.

### **3.7. Técnica de procesamiento de datos**

Se utilizó el enfoque de estadística descriptiva para procesar los datos, y se realizó un análisis estadístico adecuado mediante la representación gráfica, por ejemplo, mediante diagramas de barras. Se emplearon técnicas de recolección de datos documentales y empíricas, como la observación directa, la medición de temperatura y la utilización de equipos Solaris para determinar la composición de los gases presentes en el polvo, entre otros. La unidad de observación se centró en el sistema de ventilación y se utilizó un enfoque no probabilístico con la técnica de conveniencia.

## **CAPÍTULO IV**

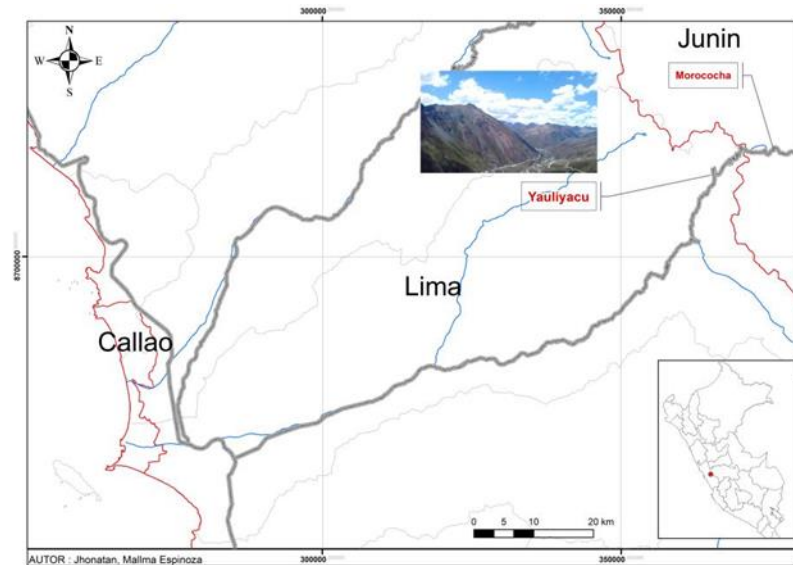
### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Generalidades**

##### **4.1.1. Ubicación y acceso**

La unidad minera Yauliyacu está ubicada en el distrito de Chicla, en la provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima. Se encuentra en la zona central de Perú, en el flanco occidental de la cordillera de los Andes, a una altitud de entre 4000 y 4250 m s. n. m., aunque algunas secciones de la mina, como la sección I, superan los 5000 metros.

La mina está a 155 km de la ciudad de Lima y a 25 km de La Oroya. Para llegar a la zona, se toma la carretera central, que es asfaltada y se encuentra a unas tres horas de distancia de Lima (129 km). Además, Yauliyacu está conectada por una vía férrea que facilita el transporte de concentrados.



**Figura 15. Ubicación y acceso**

#### **4.2. Diagnóstico de la situación**

La empresa minera Los Quenuales, unidad Yauliyacu se dedica principalmente al desarrollo, preparación, explotación y concentración de minerales, contribuyendo de manera significativa al sector minero. Su método de extracción es el *sub level stoping*, una técnica que permite aprovechar al máximo los recursos mediante la perforación de largos taladros de manera radial, optimizando así el proceso de extracción. Con un promedio semanal de 26 690 toneladas extraídas, la empresa se destaca en la producción de plata y zinc, con una ley promedio de 2.113 Oz de plata por tonelada y 2.09 % de zinc. A diario, se logran extraer aproximadamente 3813 toneladas, lo cual refleja un alto nivel de eficiencia operativa. Esta capacidad productiva sostiene la demanda y asegura un flujo constante de recursos minerales en el mercado.

##### **4.2.1. Exposición a los gases de mina**

En las operaciones mineras subterráneas, contar con una ventilación adecuada es crucial para proteger la salud y seguridad de los trabajadores. La ventilación en la mina cumple una función esencial al asegurar el suministro de aire suficiente para los equipos diésel, permitiendo que los motores funcionen correctamente, lo que reduce la generación de contaminación innecesaria y mejora el rendimiento de la maquinaria. Además, contribuye al control y eliminación del polvo generado por actividades como perforación, voladura, acarreo y carguío, que, de no ser controlado, podría afectar tanto la visibilidad como la salud respiratoria del personal. Otro de sus beneficios es la dilución y remoción de los gases peligrosos producidos por las voladuras, como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), evitando así riesgos de intoxicación. La ventilación también permite mantener un ambiente confortable, regulando la temperatura en las áreas de trabajo, lo

cual facilita que los trabajadores se sientan más cómodos y se concentren mejor en sus tareas. Asimismo, garantiza un suministro constante de oxígeno para la respiración segura, previniendo situaciones de falta de aire y la exposición a gases venenosos que podrían poner en riesgo la vida. En conjunto, estas medidas crean un entorno laboral seguro y confortable, favoreciendo la eficiencia operativa y el bienestar del personal, lo que permite que cada jornada se desarrolle en condiciones óptimas.

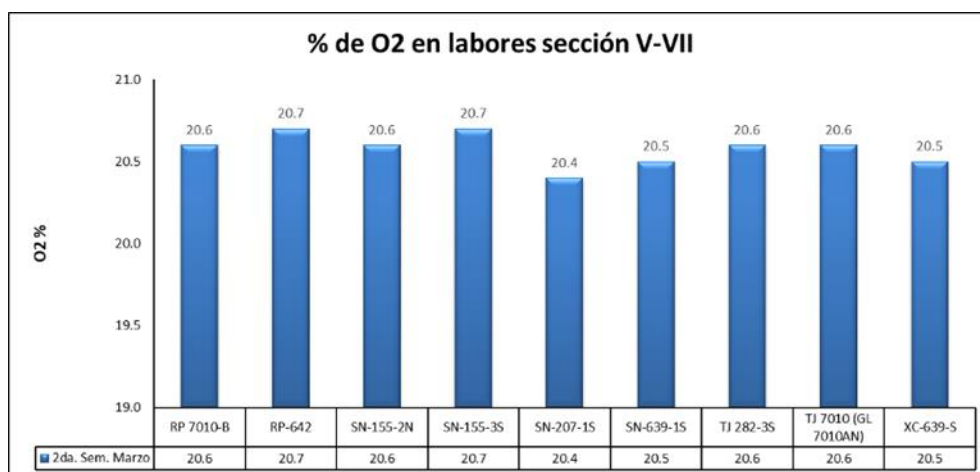
**Tabla 7. Nivel de riesgo a la exposición de gases tóxicos**

Nivel de riesgos	Observaciones
<b>Alto</b>	Monóxido de carbono (CO) mayor de 250 ppm y víctimas mayor o igual a <b>5 personas</b> (implica <b>riesgo catastrófico</b> )
<b>Medio</b>	Monóxido de carbono (CO) entre 25 y 250 ppm y ninguna persona se ve afectada
<b>Bajo</b>	Subestaciones eléctricas ubicadas cerca de un circuito principal de extracción de aire viciado y ninguna persona se ve afectada

**Tabla 8. Los promedios de exposición a los gases de mina**

Sección	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	LEL (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
1	20.6	3.6	0.1	0.1	0.0	0.0
2	20.6	5.0	0.1	0.1	0.0	0.0
4	20.5	5.0	0.1	0.1	0.0	0.0
5	20.5	6.2	0.1	0.1	0.0	0.0
Prom. general	20.6	4.9	0.10	0.10	0.0	0.0
LMP	19.5	25	3	0.5	5	10

*Nota.* Se representan mediciones de gases de la zona de estudio



**Figura 16. Porcentaje de O<sub>2</sub> en labores subterráneas**

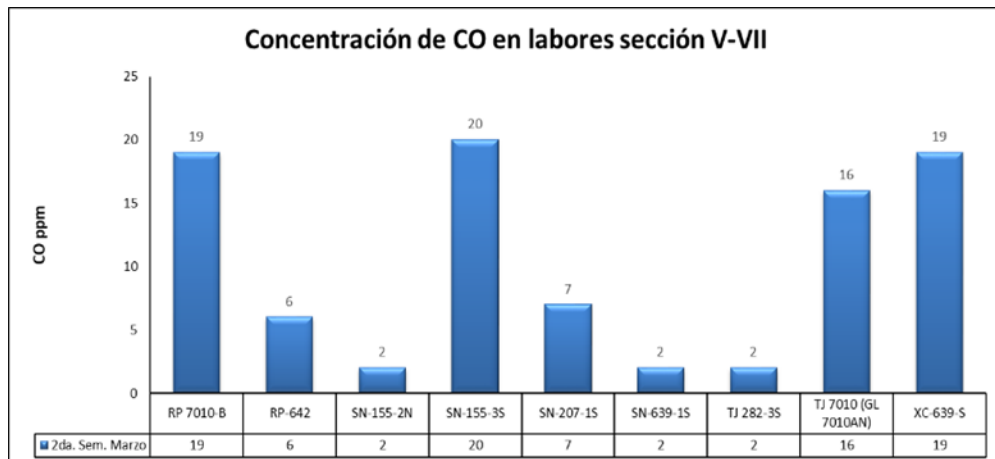


Figura 17. Porcentaje de CO en labores subterráneas

Tabla 9. Balance general de ingreso de aire

Item	Seccion	Estacion	Nivel	Labor	Circuito	Tipo aire	Area[m2]	VP[m/s]	V[m/min]	Q[m3/min]	Q[cfm]
1	I	EV-01	H1	BM H1	Balance G	Ingreso	14.89	0.42	25.20	375.23	13,251
2	I	EV-02	H2	BM H2- intermedio	Balance G	Ingreso	8.39	0.07	4.20	35.22	1,244
3	I	EV-03	H2	BM H2 Base	Balance G	Ingreso	13.45	1.52	91.20	1226.32	43,306
4	I	EV-04	H2	BM H2 Base Troncal IV	Balance G	Ingreso	13.43	1.84	110.40	1482.58	52,356
5	I	EV-05	H3	BM H3 San Juan	Balance G	Ingreso	11.18	1.33	79.80	892.18	31,506
6	I	EV-06	H3	BM H3 GL 714	Balance G	Ingreso	11.37	2.36	141.60	1610.65	56,878
7	I	EV-07	200	BM 200	Balance G	Ingreso	8.83	4.01	240.60	2124.63	75,029
8	II	EV-08	400	Carmen BP 706	Balance G	Ingreso	13.54	0.34	20.40	276.18	9,753
9	II	EV-09	H3	RB San Antonio	Balance G	Ingreso	1.77	0.98	58.80	103.91	3,669
10	II	EV-10	800	BM 800	Balance G	Ingreso	11.97	1.38	82.80	991.28	35,006
11	II	EV-11	800	BM 800 Solar	Balance G	Ingreso	5.52	0.55	33.00	182.08	6,430
12	II	EV-12	800	BM Corina	Balance G	Ingreso	13.75	3.39	203.40	2797.22	98,781
13	II	EV-13	1700	BM 800 Carmen	Balance G	Ingreso	10.15	1.02	61.20	621.21	21,938
14	II	EV-14	800	Carmen Polvorin	Balance G	Ingreso	5.07	0.83	49.80	252.36	8,912
15	II	EV-16	800	CX Carmen	Balance G	Ingreso	2.97	1.10	66.00	196.26	6,931
16	II	EV-17	1000	Bocamina antigua	Balance G	Ingreso	10.57	1.88	112.80	1191.79	42,087
17	II	EV-18	800	AK 760 -base Corina	Balance G	Ingreso	12.10	0.50	30.00	363.09	12,822
18	IV	EV-19	1500	Carmen BP 645	Balance G	Ingreso	12.61	0.78	46.80	590.33	20,847
19	IV	EV-20	1700	BM AFE	Balance G	Ingreso	7.50	3.62	217.20	1629.01	57,527
20	IV	EV-21	1700	BM Carlos Frandisco	Balance G	Ingreso	7.03	2.76	165.60	1164.89	41,137
21	IV	EV-22	1900	BM Ricardito	Balance G	Ingreso	15.74	3.20	192.00	3022.02	106,720
22	IV	EV-23	2100	BM Antuquito	Balance G	Ingreso	3.85	2.88	172.80	665.04	23,485
23	IV	EV-24	2700	BM Yauliyacu	Balance G	Ingreso	8.90	2.83	169.80	1511.51	53,377
24	IV	EV-26	1700	AFE Sur	Balance G	Ingreso	9.24	0.45	27.00	249.38	8,806
25	II	EV-28	1000	BP-1013	Balance G	Ingreso	7.45	1.06	63.60	473.69	16,728
26	I	EV-29	H2	Paste fill	Balance G	Ingreso	8.26	1.67	100.20	827.44	29,220
27	II	EV-30	1200	Tajeo antiguo	Balance G	Ingreso	12.64	0.84	50.40	636.80	22,488

Item	m3/min	CFM
Ingreso de Aire Fresco	25,492	900,235
Salida de Aire Contaminado	25,796	910,959
% error		1.2%

	CANTIDAD
<b>Ventiladores principales</b>	7
100 KCFM	6
200 KCFM	1
<b>Ventiladores secundarios</b>	7
60 KCFM	5
100 KCFM	2
<b>Ventiladores auxiliares</b>	56
5 KCFM	1
10 KCFM	4
15 KCFM	7
20 KCFM	3
30 KCFM	33
35 KCFM	1
40 KCFM	7

**Tabla 10. Balance general de salida de aire**

Item	Seccion	Estacion	Nivel	Labor	Circuito	Tipo aire	FCS	Area[m2]	VP[m/s]	V[m/min]	Q[m3/min]	Q[cfm]
1	I	EVS-01	H0	RB 9 Superficie	Balance G	Salida	1.00	2.11	24.52	1471.20	3107.77	109,748
2	I	EVS-02	H1	San Juan 600-1er Intermedio	Balance G	Salida	1.00	10.07	1.09	65.40	658.31	23,248
3	II	EVS-04	800	San Juan 800 Base	Balance G	Salida	0.95	9.17	0.23	13.80	126.54	4,469
4	I	EVS-05	600	San Juan 600 2do Intermedio	Balance G	Salida	0.95	12.85	0.49	29.40	377.77	13,340
5	I	EVS-06	200	Troncal IV 200 Base	Balance G	Salida	0.95	9.42	0.72	43.20	407.02	14,373
6	II	EVS-07	1000	San Juan 1000 Base S	Balance G	Salida	0.95	9.21	0.49	29.40	270.77	9,562
7	II	EVS-08	1200	San Juan 1200 Base N	Balance G	Salida	0.95	11.23	0.48	28.80	323.31	11,417
8	II	EVS-09	1000	San Juan 1000 Base N	Balance G	Salida	0.95	11.37	1.24	74.40	845.93	29,873
9	II	EVS-10	1000	AK 1000 base N	Balance G	Salida	0.95	9.38	1.73	103.80	974.05	34,398
10	II	EVS-11	1000	AK 1000 base S	Balance G	Salida	0.95	15.38	1.28	76.80	1181.08	41,709
11	II	EVS-12	1000	Troncal IV 1000 Base	Balance G	Salida	0.95	13.50	1.55	93.00	1255.70	44,344
12	IV	EVS-13	1700	Troncal IV 1700 Base	Balance G	Salida	0.95	10.52	0.75	45.00	473.19	16,710
13	II	EVS-14	1200	San Juan 1200 Base S	Balance G	Salida	0.95	10.43	0.54	32.40	337.79	11,929
14	IV	EVS-15	1700	CX-712 1700 Base N	Balance G	Salida	0.95	13.33	0.68	40.80	543.73	19,201
15	IV	EVS-16	1700	CX-712 1700 Base S	Balance G	Salida	0.95	8.61	1.39	83.40	718.22	25,363
16	IV	EVS-17	2100	Troncal IV 2100-base	Balance G	Salida	0.95	11.63	1.94	116.40	1353.50	47,797
17	IV	EVS-18	2100	CX Araucana 2100 Base	Balance G	Salida	0.95	7.00	4.47	268.20	1878.06	66,322
18	IV	EVS-19	1900	1900 Base Troncal IV	Balance G	Salida	0.95	13.25	1.17	70.20	930.45	32,858
19	IV	EVS-20	2700	Troncal IV 2700-base	Balance G	Salida	0.95	12.92	1.20	72.00	930.36	32,855
20	V	EVS-21	3900	Troncal IV 3900-base	Balance G	Salida	0.95	14.01	2.87	172.20	2412.09	85,180
21	VII	EVS-22	5200	RB Graton 5200 Base	Balance G	Salida	0.95	7.47	3.23	193.80	1447.25	51,108
22	VII	EVS-27	4100	Troncal V 4100-Rp 639	Balance G	Salida	0.95	13.31	2.46	147.60	1964.03	69,358
23	VII	EVS-30	4500	Troncal V 4100-CX 642-B	Balance G	Salida	0.95	17.16	2.38	142.80	2450.14	86,524
24	IV	EVS-29	2300	Troncal IV 2300 CX-668	Balance G	Salida	0.95	15.52	0.89	53.40	828.93	29,273

Secciones Descripción	Sección I		Sección II		Sección V		Sección VII	
	CFM	m³/min	CFM	m³/min	CFM	m³/min	CFM	m³/min
Ingreso de aire fresco	134,702	3,814	180,044	5,098	176,316	4,993	331,717	9,393
Salida de aire viciado	127,161	3,601	186,618	5,284	174,812	4,950	337,546	9,558
Requerimiento de aire	117,855	3,337	127,591	3,613	147,716	4,183	379,030	10,733
<b>Cobertura del sistema</b>	<b>114 %</b>	<b>114 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>119 %</b>	<b>119 %</b>	<b>88 %</b>	<b>88 %</b>

La capacidad energética en el área, ya que las caídas de voltaje afectan la operación continua de los ventiladores. Mejorar la eficiencia de estos equipos es prioritario para mantener un ambiente seguro y adecuado para las actividades mineras diarias.

**Tabla 11. Consumo de energía mensual**

Ítem	Tipo	Sección	Nivel	Código	Marca	Capacidad	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Trabajos horas día	Consumo		Costo mes US\$
										kW h/día	kW h/mes	
1	Principal	I	H3	VT 100-09	AIRTEC	100 000	250	187	24	4476	134 280	940
2	Principal	I	H0	VT 100-02	AIRTEC	100 000	250	187	24	4476	134 280	940
3	Principal	I	H3	VT 100-10	AIRTEC	100 000	250	187	24	4476	134 280	940
4	Principal	I	H3	VT 100-01	AIRTEC	100 000	250	187	24	4476	134 280	940
5	Principal	I	H3	VT 100-05	AIRTEC	100 000	250	187	24	4476	134 280	940
6	Principal	II	1000	VT 200-02	AIRTEC	200 000	600	448	24	10 742	322 272	2256
7	Principal	II	1000	VT 100-06	AIRTEC	100 000	240	179	24	4297	128 909	902
8	Principal	IV	2100	VT 60-07	AIRTEC	60 000	150	112	24	2686	80 568	564
<b>Total</b>						<b>860,000</b>	<b>2240</b>	<b>1674</b>	<b>192</b>	<b>40 105</b>	<b>1 203 149</b>	

Ítem	Tipo	Sección	Nivel	Código	Marca	Capacidad	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Trabajos horas día	Consumo		Costo mes US\$
										kW h/día	kW h/mes	
1	Secundario	II	600	VT 60-02	JOY	60 000	150	112	24	2685.6	80 568	564
2	Secundario	IV	3300	VT 60-09	AIRTEC	60 000	150	112	24	2685.6	80 568	564
3	Secundario	V	2700	VT 60-04	AIRTEC	60 000	150	112	24	2685.6	80 568	564
4	Secundario	V	3600	VT 60-06	AIRTEC	60 000	150	112	24	2685.6	80 568	564
5	Secundario	IV	3000	VT 100-11	JOY	100 000	200	149	24	3580.8	107 424	752
6	Secundario	V - VII	3000	VT 100-07	AIRTEC	100 000	250	187	24	4476.0	134 280	940
7	Secundario	IV	1700	VT 60-01	AIRTEC	60 000	150	112	24	2685.6	80 568	564
<b>Total</b>						<b>500 000</b>	<b>1200</b>	<b>896</b>	<b>168</b>	<b>21 484.8</b>	<b>644 544</b>	<b>4512</b>

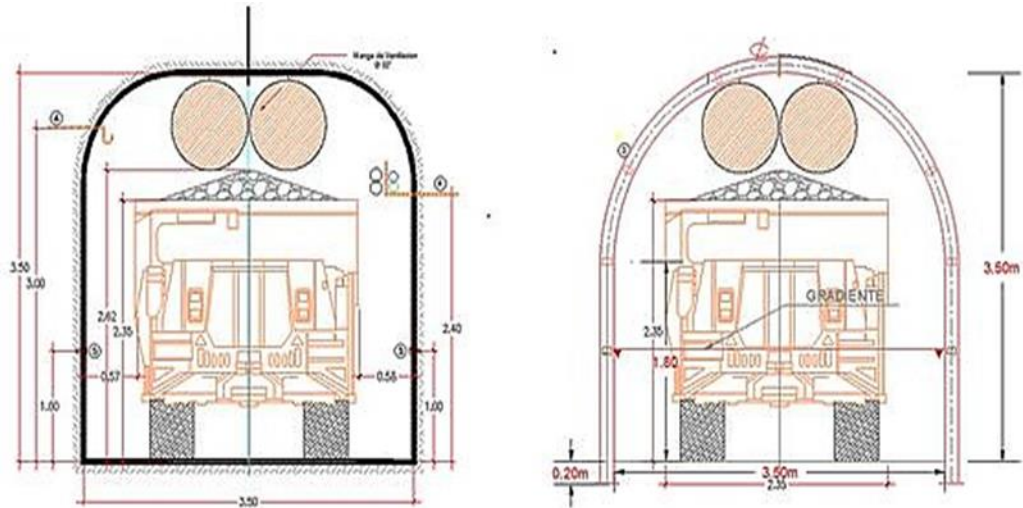


Figura 18. Manga y flujo de aire

#### 4.1.2. Monitoreo de gases en labores al interior de la mina

El nuevo D. S. 023-2017 EM establece nuevos parámetros para el cálculo del requerimiento de aire de una mina subterránea.

$$Q_{T_o} = Q_{T_1} + Q_{F_u}$$

Donde:

$Q_{T_o}$ : es el caudal total necesario para la operación.

$Q_{T_1}$ : es la suma del caudal requerido para distintos aspectos, como el número de trabajadores ( $Q_{T_r}$ ), el consumo de madera ( $Q_{M_a}$ ), las temperaturas en las labores de trabajo ( $Q_{T_e}$ ) y los equipos con motor de combustión ( $Q_{E_q}$ ).

$Q_{f_u}$ : representa el 15 % de  $Q_{T_1}$

**Tabla 12. Según Leo TWA para agentes químicos permisibles**

Gas	LEO TWA (ppm)
Monóxido de carbono CO	25
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	5000
Dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub>	3
Ácido sulfhídrico H <sub>2</sub> S	10
Anhidrido sulfuroso SO <sub>2</sub>	2
Oxígeno O <sub>2</sub>	19.50 %

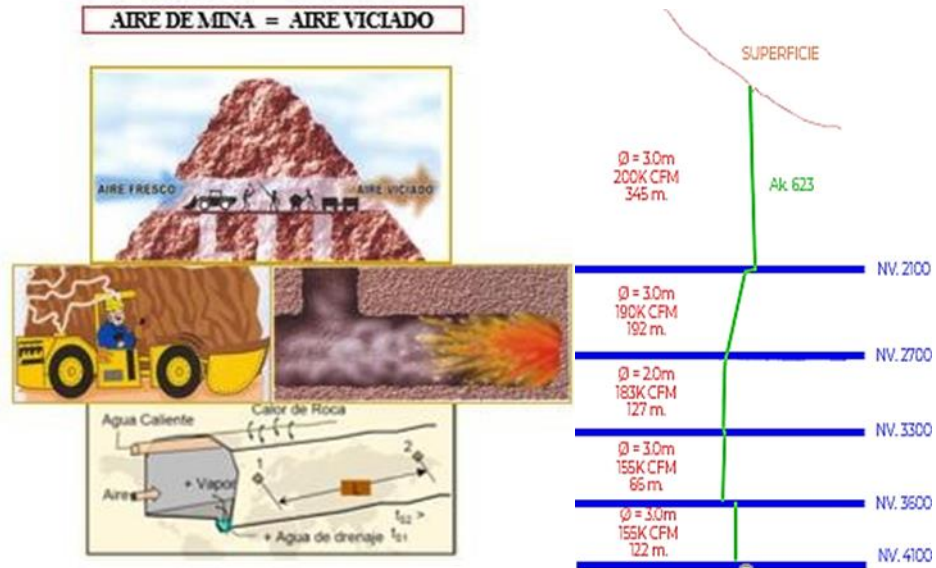


Figura 19. Cálculo de requerimiento de aire

#### 4.1.3. Caudal requerido por el número de trabajadores $Q_{Tr}$

$$Q_{Tr} = F * N \left( \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right)$$

Donde:

**$Q_{Tr}$** : caudal total necesario para (n) trabajadores, medido en  $\text{m}^3/\text{min}$

**F**: caudal mínimo por persona según la escala definida en el artículo 247 del reglamento

**N**: número de trabajadores en la guardia más grande

#### Cantidad mínima de aire necesario por persona

Hasta 1500 m s. n. m.:  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ .

De 1500 a 3000 m s. n. m.:  $4 \text{ m}^3/\text{min}$

De 3000 a 4000 m s. n. m.:  $5 \text{ m}^3/\text{min}$

Por encima de 4000 m s. n. m.:  $6 \text{ m}^3/\text{min}$

#### 4.1.4. Caudal requerido por el consumo de madera $Q_{Ma}$

$$Q_{Ma} = T * u \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Donde:

**$Q_{Ma}$** : volumen de aire necesario por cada tonelada de producción, expresado en  $\text{m}^3/\text{min}$ .

u: factor de producción, de acuerdo con la escala indicada en el segundo párrafo del inciso d) del artículo 252 del reglamento.

T: cantidad de producción en toneladas métricas húmedas por turno.

**Tabla 13. Factor de producción según el uso de madera**

Consumo de madera	(%) Factor de producción (m <sup>3</sup> /min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
> 70	1.25

#### 4.1.5. Cálculo requerido por temperatura en las labores de trabajo QTe

$$Q_{Te} = V_m * A * N \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Donde:

QTe: caudal necesario debido a la temperatura (m<sup>3</sup>/min)

Vm: velocidad mínima del aire

A: área promedio de la labor

N: número de niveles con temperatura superior a 23 °C, según lo establecido en el tercer párrafo del literal d) del artículo 252.º del reglamento

**Tabla 14. Velocidad mínima**

Temperatura seca (°C)	Velocidad mínima (m/min)
< 24	0.00
24 A 29	30.00

#### 4.1.6. Caudal requerido por equipo con motor petrolero

$$Q_{Eq} = 3 * HP * D_m * F_u \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Donde:

QEq = volumen de aire necesario para la ventilación (m<sup>3</sup>/min)

HP = capacidad efectiva de potencia (HPs)

Dm = disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%)

Fu = factor de utilización promedio de los equipos (%)

### **1. El aforo global para el balance de ventilación global a julio 2024**

- Caudal de ingreso de aire total: 23 299 m<sup>3</sup>/min (822 779 CFM)
- Caudal de salida o viciado total: 23 394 m<sup>3</sup>/min (826 137 CFM)
- Diferencia: 95 m<sup>3</sup>/min (3,358 CFM)

### **2. El requerimiento de aire necesario para cumplir las operaciones de minado**

- Caudal para el personal (324 trabajadores): 1944 m<sup>3</sup>/min (68 652 CFM)
- Caudal para el funcionamiento de equipos diésel (15 478 HP). 16 094 m<sup>3</sup>/min (568 351 CFM).
- En resumen, el caudal total requerido es de 23 153 m<sup>3</sup>/min (817 625 CFM)

3. **La cobertura de aire total (julio 2024):** se encuentra en un 101 %, con un superávit de caudal de 146 m<sup>3</sup>/min (5154 CFM).

El cálculo para definir el requerimiento del caudal del aire global, se ha contabilizado de la información del área de mina, un total de 324 personas/guardia (6 m<sup>3</sup>/hombre para una altitud por encima de 4500 m s. n. m.) y un inventario operativo de 104 equipos diésel operativos (entre *scooptram*, *dumpers*, *jumbos* y camionetas), cuya potencia nominal de sus motores es de 15 478 HP.

#### **4.1.7. Requerimiento y cobertura de aire zona norte**

El sistema de ventilación en la zona alta de la mina cubre los niveles que van desde H0 hasta el nivel 1500, asegurando que el aire fresco ingrese principalmente mediante varias bocaminas en los niveles H1, H2, H3, 200, 800 y 1000. Estos puntos de entrada son esenciales para mantener un flujo adecuado de aire limpio en la zona de trabajo. Por otro lado, el aire viciado, es decir, el aire que ya ha circulado y necesita ser renovado, es evacuado mediante diversas rutas de salida, como las troncales de ventilación en San Juan, OP 9 y AK 1000, además de una salida adicional en la troncal IV a nivel 1000.

La demanda de aire fresco en esta zona alta es de 313 788 CFM (pies cúbicos por minuto), mientras que el flujo actual de ingreso es de 482 597 CFM, lo que significa que la cobertura de ventilación es de 154 %. Esta cobertura superior al 100 % asegura que las condiciones de trabajo en términos de calidad de aire estén bien atendidas, protegiendo así la salud y el confort de los trabajadores en las áreas subterráneas.

**Tabla 15. Requerimiento total de aire en la unidad minera Yauliyacu**

Sección	Q <sub>Tr</sub> (trabajadores)	Q <sub>eq</sub> (equipos)	Q <sub>ma</sub> (madera)	Q <sub>re</sub> (temperatura)	Q <sub>T1</sub> (subtotal)	Q <sub>fu</sub> (fugas)	Q <sub>to</sub> Total (CFM)
I	13 561	100 737	0	0	114 298	17 145	<b>131 443</b>
II	17 163	141 399	0	0	158 562	23 784	<b>182 346</b>
III	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
IV	15 892	97 510	0	36 988	150 390	22 558	<b>172 948</b>
V-VII	22 036	228 706	0	36 988	287 730	43 159	<b>330 889</b>
<b>Total</b>	<b>68 652</b>	<b>568 352</b>	<b>0</b>	<b>73 976</b>	<b>710 980</b>	<b>106 646</b>	<b>817 625</b>

Ítem	m <sup>3</sup> /min	CFM
Requerimiento de aire fresco	23 153	817 625
Ingreso de aire fresco	23 299	822 779
Cobertura	101 %	101 %
Ítem	m <sup>3</sup> /min	CFM
Ingreso de aire fresco	23 299	822 779
Salida de aire contaminado	23 394	826 137
% error	0.4 %	

**Tabla 16. Requerimiento de Aire Zona Alta - unidad minera Yauliyacu**

Circuito	Sección	Q <sub>Tr</sub> (trabajadores)	Q <sub>eq</sub> (equipos)	Q <sub>ma</sub> (madera)	Q <sub>re</sub> (temperatura)	Q <sub>T1</sub> (subtotal)	Q <sub>fu</sub> (fugas)	Q <sub>to</sub> Total (CFM)	Q <sub>to</sub> Total (CFM)
Zona alta	I	13 561	100 737	0	0	114 298	17 145	131 443	313 788
	II	17 163	141 399	0	0	158 562	23 784	182 346	

Ítem	m <sup>3</sup> /min	CFM
Requerimiento de aire fresco	8885	313 788
Ingreso de aire fresco	13 666	482 597
Cobertura	154 %	154 %

#### 4.1.8. Descripción del sistema de ventilación de la mina

En la mina Yauliyacu, el sistema de aireación incluye 4 conductos principales de ventilación (con 6 ventiladores principales) que tienen una capacidad operativa de 800 000 pies cúbicos por minuto (cfm) de salida de aire. Además, se han instalado 8 ventiladores secundarios en el interior de la mina, los cuales aseguran un caudal efectivo de extracción de aire ascendente de 1 248 193 cfm.

**Tabla 17. Ventiladores principales**

Código	Fabricante	Ventiladores principales				
		Caudal (CFM)	Potencia (HP)	Presión diseño (NM)	Ubicación superficie	Estado
VT-100-09	AIRTEC	100 000	250	TP 17.6 wgi	Troncal IV	Operativo
VT-100-02	AIRTEC	100 000	250	TP 17.6 wgi	OP 9	Operativo
VT-100-05	AIRTEC	100 000	200	TP 17.6 wgi	Troncal IV	Operativo
VT-100-10	HOWDEN	100 000	250	TP 6.0 wgi	Troncal IV	Operativo
VT-200-01	AIRTEC	200 000	600	TP 13.7 wgi	Troncal San Juan	Operativo
VT-200-02	AIRTEC	200 000	600	TP 13.7 wgi	Troncal V	Operativo

**Tabla 18. Ventiladores secundarios**

Ventiladores secundarios							
Código	Marca	Caudal (CFM)	Potencia (HP)	Ubicación		Función	Estado
				Nivel	Labor		
VT 60-03	JOY	60,000	200	H2	RB 765 PASFILL	Extractor	Operativo
VT 100-06	AIRTEC	100,000	240	1000	Ak 1000	Extractor	Operativo
VT 60-04	AIRTEC	100,000	150	2700	Ak 674	Inyector	Operativo
VT 60-01	AIRTEC	60,000	150	1700	CX 712	Extractor	Operativo
VIM 079	AIRTEC	60,000	150	2100	Tunel Araucana	Extractor	Operativo
VT 100-03	AIRTEC	100,000	200	800	OP - 09	Extractor	Operativo
VT 60-05	JOY	60,000	120	3000	OP - 660	Extractor	Operativo
VT 100-04	JOY	100,000	200	3300	Ch - RP 648	Extractor	Operativo

**Tabla 19. Promedio de oxígeno O<sub>2</sub> de la zona 4100**

Sección	VII
Semana	(Varios elementos)
<b>Etiquetas de fila</b>	<b>Promedio de Gas_ O<sub>2</sub></b>
<b>4100</b>	<b>20,31428571</b>
CX_639-1N	20,5
RP_642	20,2
RP_640	20,25
RP_422	20,5
CX_639-S	20,2
RP_639	20,3

### % O2 en labores - Seccion II

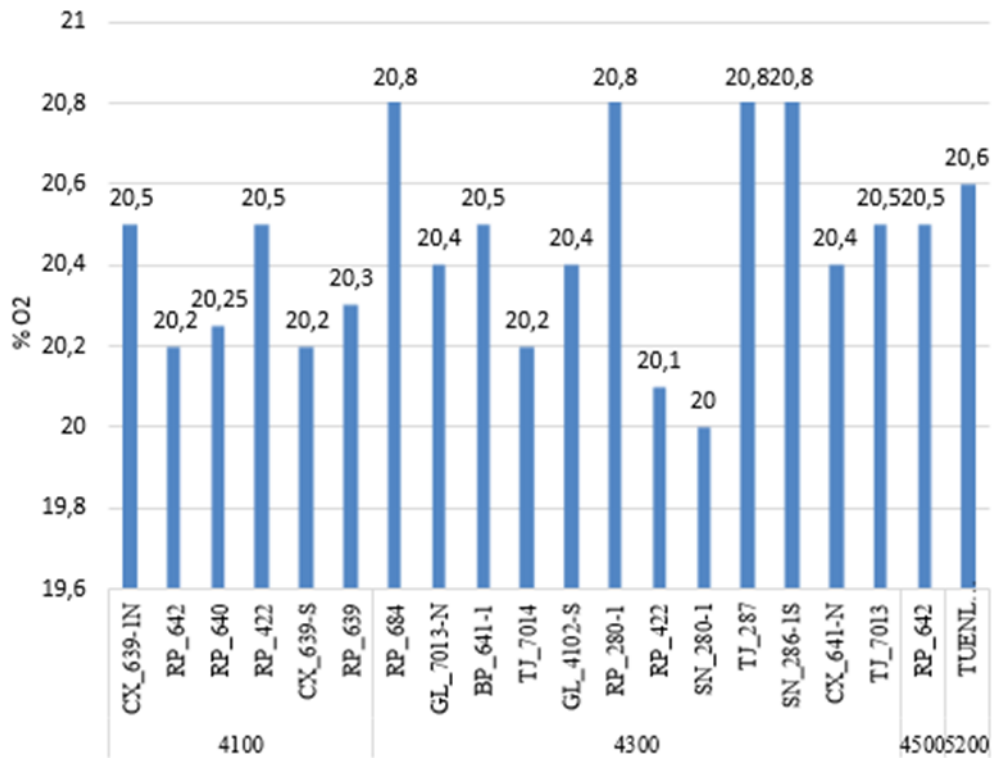


Figura 20. Porcentaje de oxígeno en las labores del nivel 4100

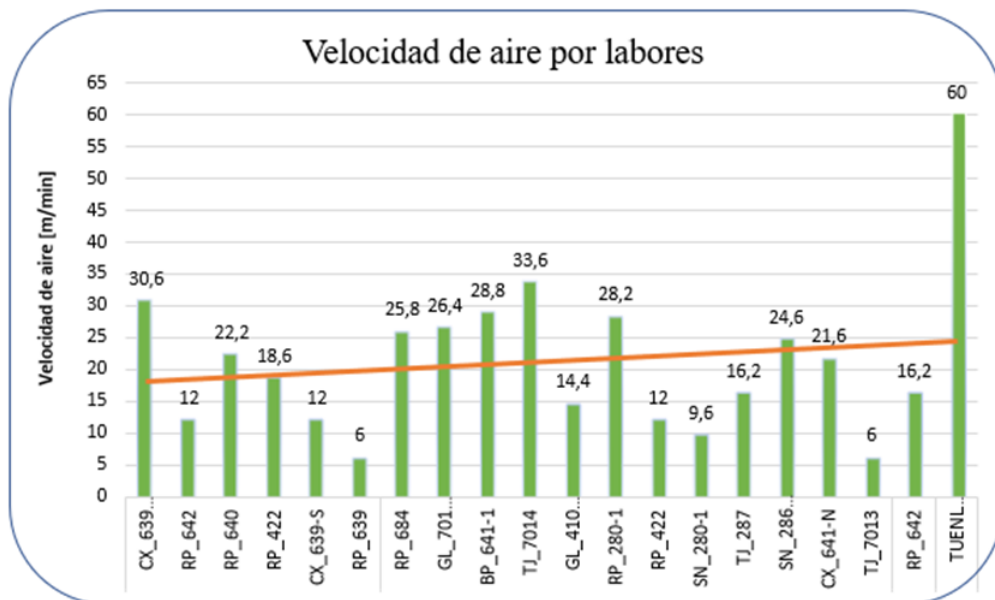


Figura 21. Velocidad de aire por labores del nivel 4100



Figura 22. Vista de frente y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación de la unidad minera



*Figura 23. Vista de frente y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación de la unidad minera*

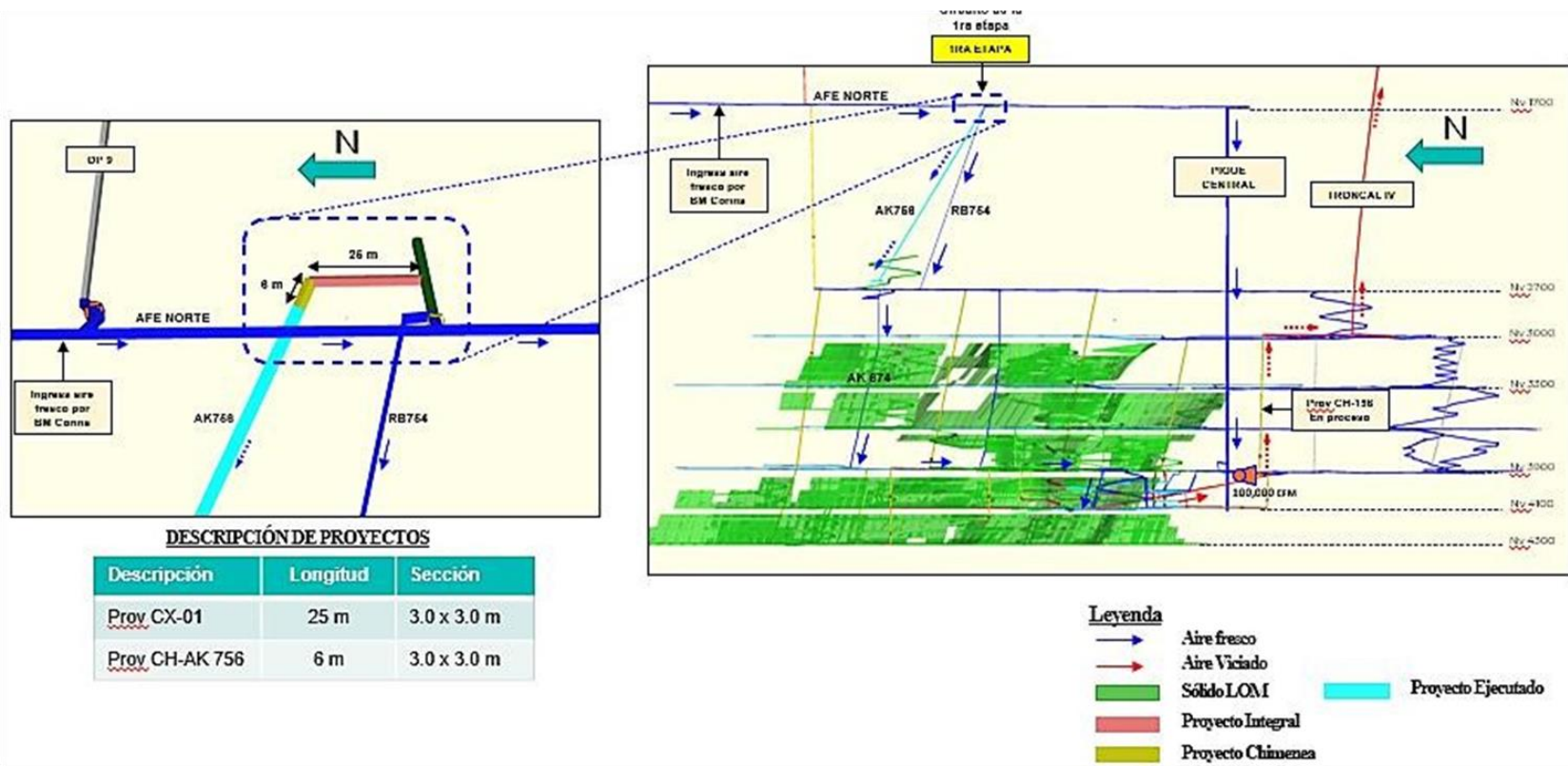
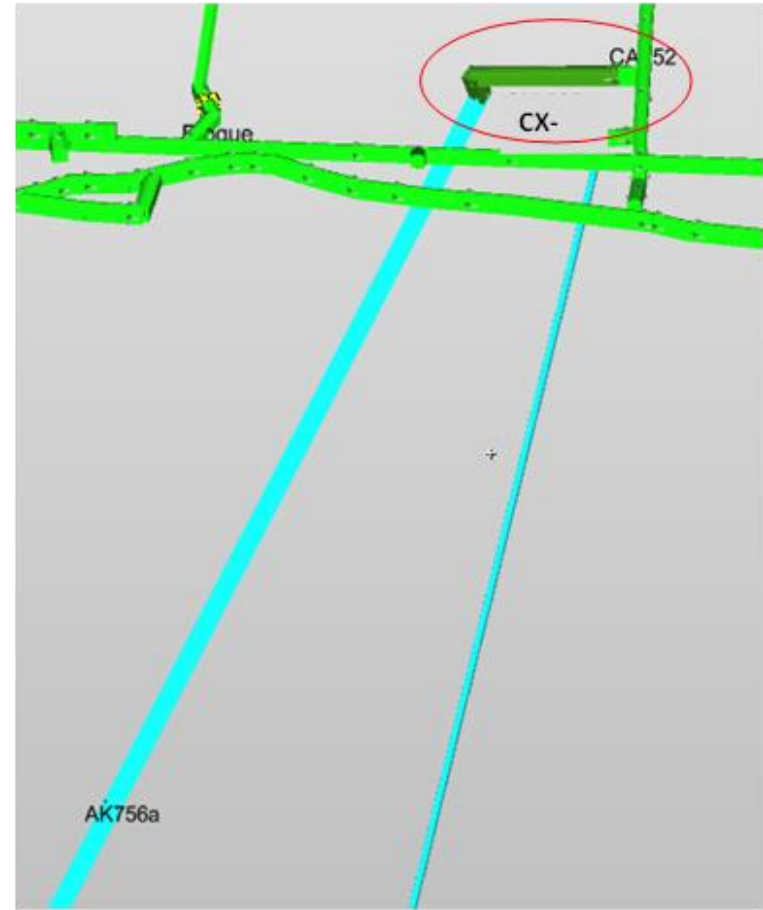
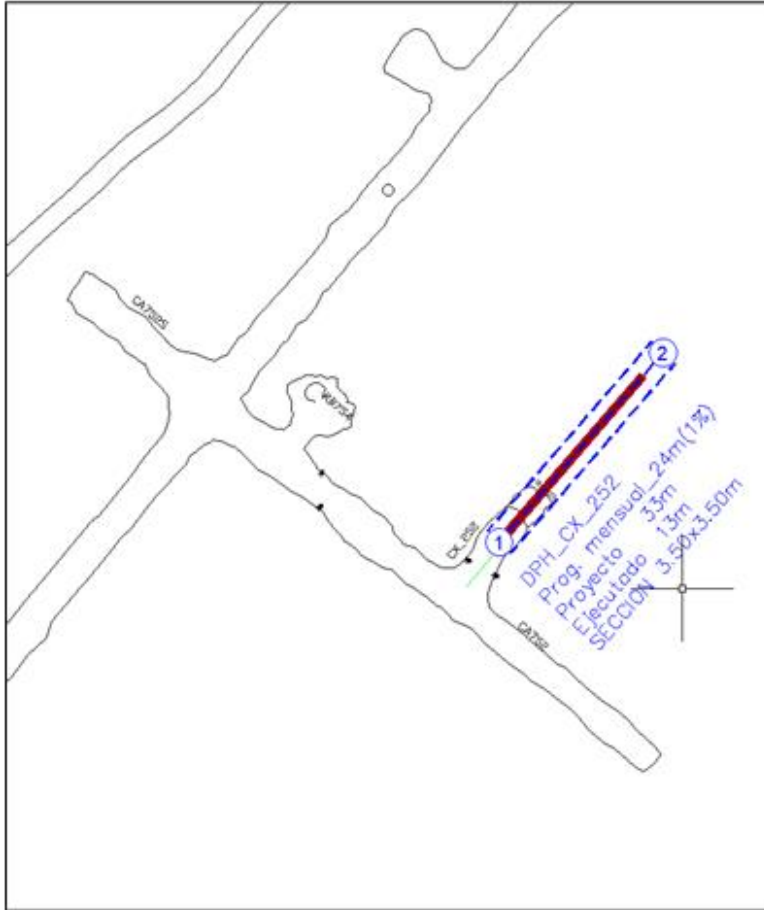


Figura 24. Sistema de ventilación actual



*Figura 25. Ejecución de crucero para optimizar la ventilación*

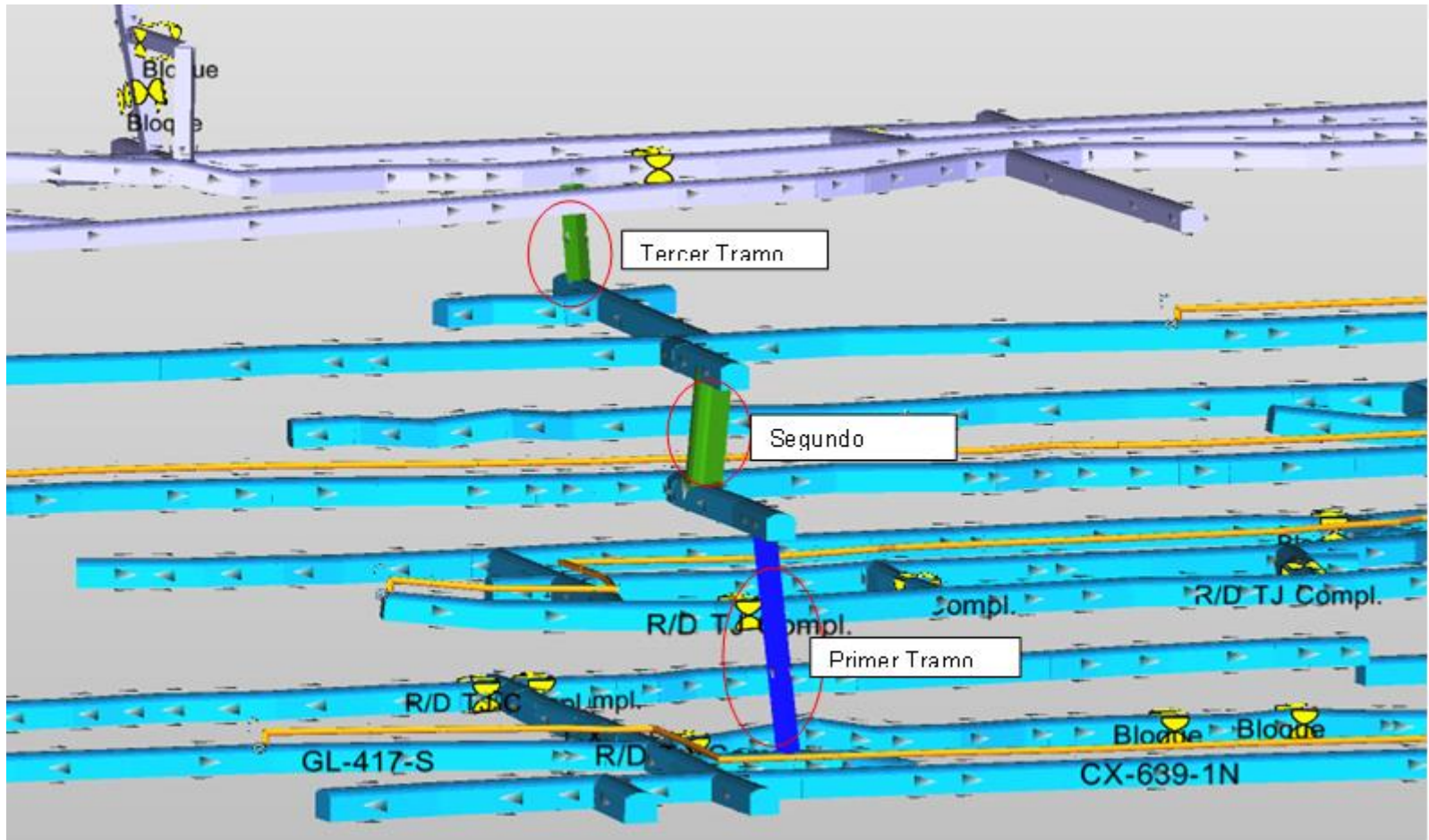


Figura 26. Vista de planta y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte)

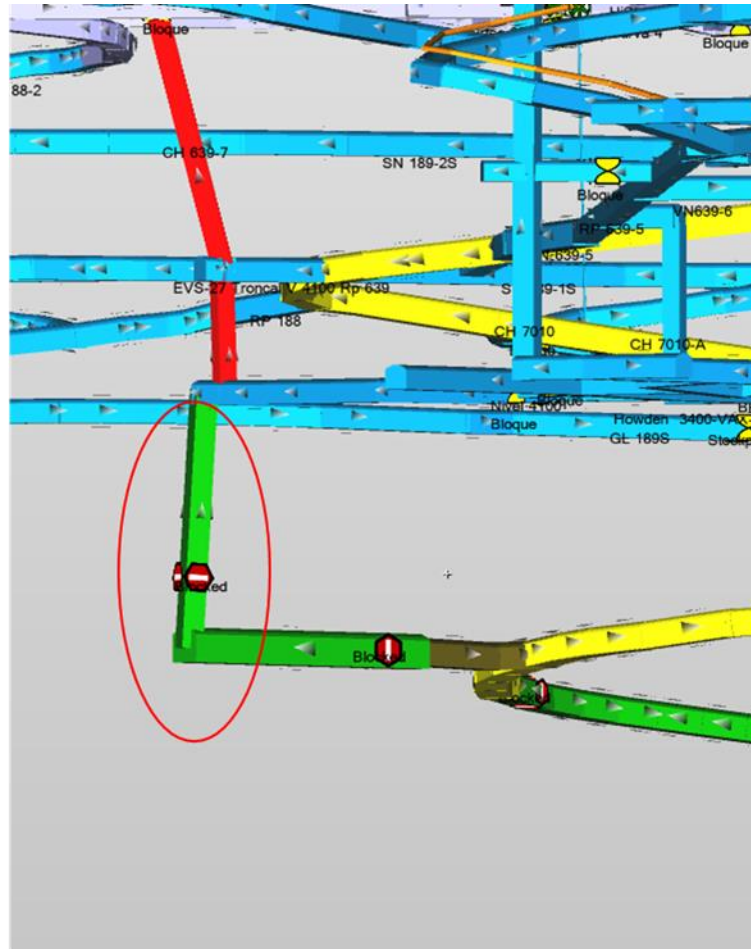


Figura 27. Modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte)

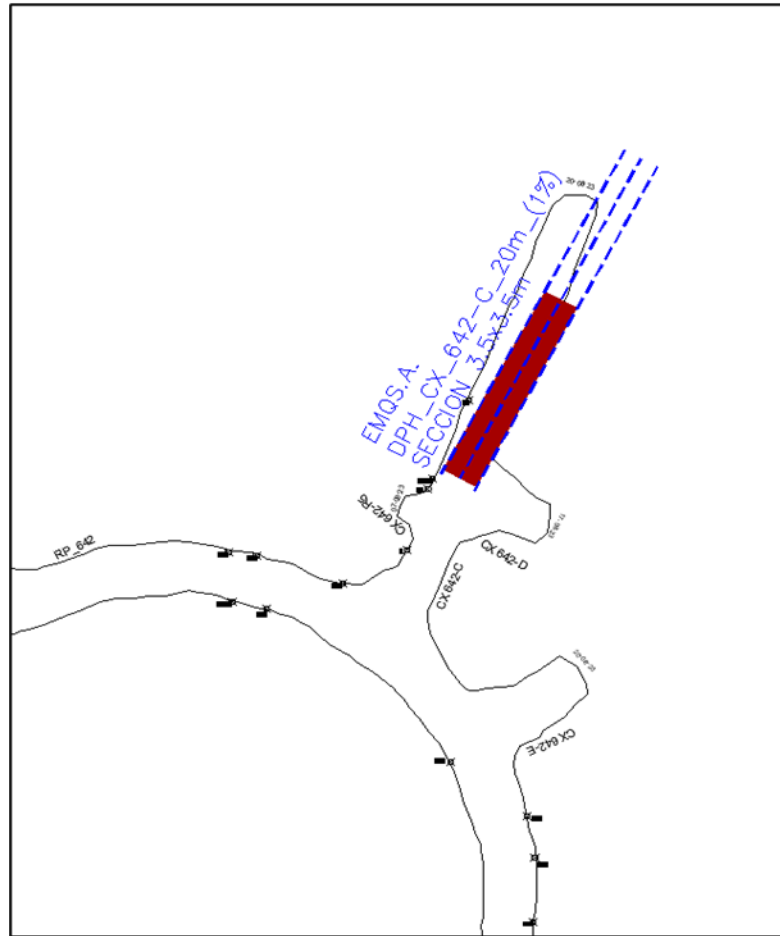
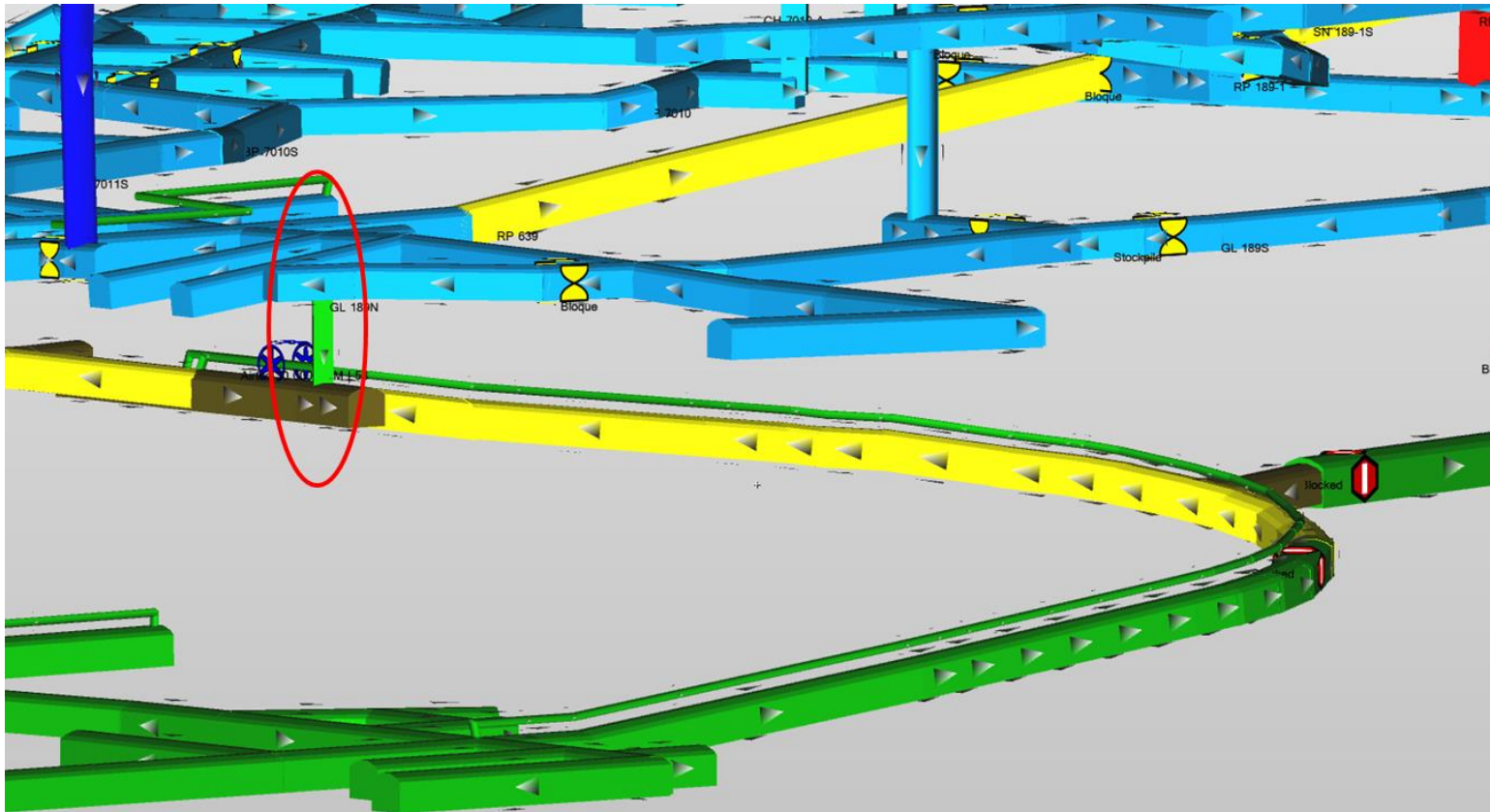


Figura 28. Vista de planta del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte)



*Figura 29. Vista de frente y modelado en el software Ventsim del circuito de ventilación zona 1 (nivel 4100 norte)*



*Figura 30. Ventilación principal*



*Figura 31. Ventilación secundaria*



*Figura 32. Ventilación auxiliar*

#### **4.2. Discusión de resultados**

La optimización del sistema de ventilación en el nivel 4100 de la zona norte de la mina Yauliyacu no solo tiene un impacto técnico en los procesos de extracción, sino que representa un cambio significativo en las condiciones de trabajo para los colaboradores. Mediante un enfoque sistemático y colaborativo, se busca mejorar la calidad del aire en el ambiente subterráneo, minimizando la exposición a gases peligrosos que podrían afectar la salud y seguridad de los trabajadores. Los resultados obtenidos, en conjunto con las acciones correctivas y mejoras implementadas, validan la importancia de esta investigación para crear espacios de trabajo más seguros y sostenibles.

##### **1. Identificación de los parámetros críticos del sistema de ventilación**

Una de las primeras y más fundamentales tareas de esta investigación fue identificar los parámetros críticos que afectan la dilución y evacuación de los gases contaminantes en el nivel 4100 de la mina Yauliyacu. Este proceso resultó ser esencial para comprender las dinámicas de circulación de aire y su impacto en la seguridad y salud de los operarios que trabajan bajo condiciones subterráneas, donde la exposición a gases peligrosos como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y metano ( $\text{CH}_4$ ) puede representar un grave riesgo.

Al estudiar el sistema de ventilación, se encuentra con que la distribución y el caudal del aire son factores determinantes para mantener la calidad del aire dentro de los límites permitidos. Aunque

el caudal de aire fresco que entra en el sistema supera el requerido por la mina, los análisis revelaron que algunas zonas específicas no contaban con suficiente circulación de aire. Esto daba lugar a la acumulación de gases contaminantes, especialmente en áreas con mayor actividad o en las más alejadas de las salidas de aire, donde el flujo de ventilación es menos eficiente. Como se detalla en el estudio de Barros (7), se encontró que el caudal de aire entrante era superior al saliente, con una diferencia de 48 113,07 CFM (15,3 %). Aunque este exceso de aire entrante parecía ser suficiente para cubrir las necesidades de ventilación de la mina (con un caudal total estimado de 257 415,29 CFM, incluyendo un factor de seguridad del 10 %), no se lograba una distribución homogénea en todo el nivel 4100. Esto significa que, a pesar de que el sistema de ventilación proporcionaba un caudal de aire adecuado, existían ineficiencias en la distribución del aire, lo que resultaba en la acumulación de gases tóxicos en sectores críticos de la mina. Este hallazgo es crucial, ya que la presencia de estos gases en niveles elevados pone en riesgo la seguridad de los trabajadores, quienes dependen de un ambiente de trabajo saludable para realizar sus tareas con seguridad.

Este diagnóstico técnico no solo tiene implicaciones en términos de eficiencia del sistema de ventilación, sino que también pone en evidencia el impacto directo que estos problemas de distribución de aire pueden tener sobre los trabajadores que operan en esas zonas afectadas. Los trabajadores subterráneos se encuentran constantemente expuestos a riesgos asociados con la mala calidad del aire, como la intoxicación por monóxido de carbono (CO) o el riesgo de explosiones debido a la acumulación de metano (CH<sub>4</sub>). Las condiciones de ventilación deficientes pueden aumentar significativamente el riesgo de accidentes y enfermedades respiratorias, afectando tanto su salud como su seguridad en el lugar de trabajo.

### **Contrastación de la hipótesis H<sub>1</sub>**

La hipótesis inicial (H<sub>1</sub>) planteaba que la identificación de estos parámetros críticos sería clave para lograr una dilución efectiva de los gases contaminantes. Los resultados confirmaron la suposición. Al ajustar la ubicación de los ventiladores y mejorar la circulación del aire, los niveles de gases tóxicos se redujeron de manera significativa. Este cambio no solo mejoró las condiciones de trabajo, sino que también aumentó la seguridad del entorno laboral, proporcionando a los operarios un espacio de trabajo más saludable y menos riesgoso para su salud.

## **2. Propuestas de acciones y mejoras en el sistema de ventilación**

Una vez que se identificaron los parámetros críticos del sistema de ventilación y se detectaron las áreas con deficiencias, el siguiente paso fue desarrollar un plan de acciones correctivas y mejoras que garantizaran un funcionamiento óptimo del sistema de ventilación en todo el nivel 4100 de la mina Yauliyacu. Entre las soluciones propuestas, se incluyó la instalación de ventiladores adicionales en puntos estratégicos donde se había identificado una circulación de aire deficiente.

Además, se sugirió la mejora de los conductos de aire existentes para asegurar una distribución más eficiente del flujo de aire en todas las zonas del nivel 4100. También se propuso la implementación de un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire, lo que permitiría evaluar en tiempo real las concentraciones de gases peligrosos y activar alertas automáticas si los niveles superan los límites permitidos. Como resalta Díaz (14), la ejecución efectiva de este proyecto es esencial, ya que las operaciones de la mina en niveles inferiores estarán directamente relacionadas con el desempeño de este sistema de ventilación a largo plazo. El mantenimiento adecuado y la mejora continua de la infraestructura de ventilación no solo afectan la eficiencia operativa, sino que también son un factor crítico para la seguridad de los operarios, garantizando un ambiente controlado y saludable para las actividades mineras.

Además de las mejoras técnicas, se recomendó la implementación de inspecciones periódicas para verificar que el sistema de ventilación mantuviera un flujo de aire adecuado y no se generaran obstáculos que pudieran reducir la eficiencia de los ventiladores extractores. Las inspecciones deben ser regulares y realizarse en todas las áreas de la mina, ya que incluso un pequeño obstáculo, como la acumulación de escombros o fallos en los conductos, podría comprometer la efectividad del sistema.

La importancia de estas acciones correctivas y de mantenimiento es clara cuando se considera que la capacidad de los ventiladores originales no era suficiente para cubrir la demanda de aire fresco en varias áreas críticas del nivel 4100. A pesar de que el caudal total de aire que ingresaba al sistema parecía adecuado, en algunos puntos, el flujo de aire era insuficiente para disipar correctamente los contaminantes generados por las actividades mineras, lo que resultaba en acumulaciones peligrosas de gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$ . Estos gases, además de ser tóxicos, pueden provocar explosiones en ambientes de alta concentración de metano, lo que aumenta significativamente el riesgo de accidentes.

### **Contrastación de la hipótesis H<sub>2</sub>**

La segunda hipótesis (H<sub>2</sub>) afirmaba que estas acciones mejorarían las condiciones del aire y mantendrían las concentraciones de gases dentro de los límites máximos permitidos. Los datos postimplementación dieron la razón. Después de introducir los cambios en el sistema de ventilación, los niveles de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$  se mantuvieron dentro de los rangos recomendados por las normas de seguridad laboral. La constante medición y monitoreo del aire aseguraron que las mejoras fueran efectivas y sostenibles a largo plazo. Este resultado no solo validó la hipótesis, sino que también generó un impacto directo en la protección de los trabajadores, quienes ahora podían desempeñar sus tareas con mayor confianza y menor exposición a riesgos.

### 3. Simulaciones con *software* especializado

Una parte crucial de la investigación fue la **simulación computarizada** del comportamiento del aire en el subsuelo utilizando *software* especializado, como **VentSim**. Estas simulaciones permitieron modelar diferentes escenarios con base en las mejoras propuestas, evaluando cómo el aire fluía y cómo los gases se dispersaban bajo diversas condiciones, fue fundamental para comprender la dinámica del flujo y la dispersión de gases en condiciones variables. Como señalan Ramírez y Fuentes (5), la creación de un modelo de flujo de aire ajustado, que incluía reguladores y ventiladores auxiliares, fue crucial para cumplir con los caudales y velocidades requeridos en el entorno minero. La incorporación de las emisiones de metano provenientes de seis paneles de explotación permitió evaluar cómo el flujo de aire podría diluir este gas en distintas áreas, un aspecto esencial para garantizar la seguridad laboral y el cumplimiento normativo. Se identificaron situaciones en las que la dilución del metano no alcanzaba niveles aceptables, lo que llevó a proponer la desgasificación como técnica complementaria. Esta estrategia se fundamentó en la evaluación de cuatro escenarios de emisión de metano, lo que permitió determinar el nivel mínimo de desgasificación necesario en los paneles críticos para cumplir con las regulaciones pertinentes. Uno de los principales beneficios de las simulaciones fue la capacidad de anticipar soluciones efectivas sin necesidad de realizar intervenciones costosas o disruptivas en la mina. Mediante este análisis, se logró identificar la opción de ventilación más adecuada, equilibrando la eficiencia del sistema con el bienestar de los trabajadores. Esto permitió optimizar el flujo de aire en áreas clave, minimizando la acumulación de contaminantes y mejorando las condiciones laborales en el entorno minero.

#### **Contrastación de la hipótesis H<sub>3</sub>**

La tercera hipótesis (H<sub>3</sub>) postulaba que el uso de simulaciones permitiría seleccionar la opción de ventilación más adecuada para mantener un ambiente seguro. Al final, los resultados de las simulaciones confirmaron esta hipótesis. No solo se encuentran soluciones técnicas que mejoraban la calidad del aire, sino que también se lograron reducir los costos operativos del sistema de ventilación. Este enfoque permitió que la mina Yauliyacu pudiera contar con un sistema de ventilación eficiente y económicamente viable, sin comprometer la salud y seguridad de los operarios.

## CONCLUSIONES

1. La investigación ha demostrado que la identificación de los parámetros críticos del sistema de ventilación es esencial para garantizar la dilución y evacuación efectiva de gases contaminantes en el nivel 4100 de la mina Yauliyacu. A pesar de contar con un caudal de aire fresco superior al requerido, las ineficiencias en la distribución del aire llevaron a la acumulación de gases peligrosos, comprometiendo la seguridad y salud de los trabajadores.
2. Los hallazgos resaltan que la mala calidad del aire y la acumulación de gases como CO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub> representan un riesgo significativo para los operarios. Las condiciones de ventilación deficientes pueden aumentar la probabilidad de accidentes y enfermedades respiratorias, lo que subraya la necesidad de un sistema de ventilación eficiente.
3. La implementación de mejoras en el sistema de ventilación, como la instalación de ventiladores adicionales y la optimización de conductos, resultó en una reducción significativa de los niveles de gases tóxicos, validando la hipótesis de que tales acciones mejorarían las condiciones del aire y la seguridad laboral.
4. Las simulaciones computarizadas realizadas con VentSim permitieron modelar diferentes escenarios y prever soluciones sin intervenciones disruptivas. Esto no solo facilitó la identificación de la mejor opción de ventilación, sino que también confirmó la hipótesis de que el uso de simulaciones es fundamental para mantener un ambiente seguro en la mina.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda proceder con la instalación de ventiladores adicionales en áreas identificadas con deficiencias de circulación de aire y mejorar los conductos existentes para asegurar una distribución más homogénea del flujo de aire en todo el nivel 4100.
2. Implementar un sistema de monitoreo continuo que evalúe en tiempo real las concentraciones de gases peligrosos. Esto permitió activar alertas automáticas y tomar medidas correctivas de manera oportuna, garantizando la seguridad de los trabajadores.
3. Realizar inspecciones regulares del sistema de ventilación para verificar la efectividad del flujo de aire y detectar posibles obstrucciones. Estas inspecciones deben ser parte de un plan de mantenimiento continuo para asegurar que el sistema funcione de manera óptima.
4. Proporcionar capacitación a los trabajadores sobre la importancia de la ventilación y las medidas de seguridad relacionadas con la calidad del aire. Esto no solo aumentará la conciencia sobre los riesgos, sino que también fomentará la colaboración en la identificación de problemas en el sistema de ventilación.
5. Continuar utilizando simulaciones para evaluar el sistema de ventilación ante nuevas condiciones operativas o cambios en la actividad minera. Esto permitió ajustar las estrategias de ventilación de manera proactiva y asegurar un entorno de trabajo seguro y saludable.

## REFERENCIAS

1. **RAMÍREZ GONZÁLEZ, Nicolás Alexander; FUENTES ORTEGA, Claudio Fernando.** *Modelamiento del sistema de ventilación y control de metano con el simulador Ventsim™ en la mina subterránea de carbón Fezmine-Polonia.* Polonia: Universidad de Concepción, 2019.
2. **BARRERA MANCERO, Paúl Humberto; PESÁNTEZ ANDRADE, Paúl Esteban.** *Diseño y optimización del circuito de ventilación en el tramo norte-sur de la mina Goldmins, Zaruma – El Oro.* Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay, 2019 - 2020.
3. **BARROS, Ana Soledad.** *Estudio y optimización del sistema de ventilación del complejo minero Farallón Negro.* Argentina: Universidad Nacional de Catamarca, 2020.
4. **LEÓN MURILLO, Jonathan German; PROAÑO GUADALUPE, Carlos Luis.** *Diseño y elaboración de un dispositivo detector de gases tóxicos dentro de las minas de oro, plata y cobre.* Guayaquil – Ecuador: Universidad de Guayaquil, 2020.
5. **AGUDELO CALDERÓN, Carlos A.** *Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia.* Boyacá, Colombia: 2016, 18(1).
6. **MAYORGA RUGE, Leidy Alejandra.** *Exposición a monóxido de carbono, alteraciones clínicas y funcionamiento neuropsicológico en trabajadores de minas de carbón subterráneas en Cundinamarca, 2018.* Bogotá D. C., Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 2019.
7. **PIEROLA TORRES, Roger.** *Diseño y modelamiento con los softwares Ventsim y Vuma 3D, para optimizar el circuito de ventilación en zona Esperanza, U. M. San Juan de Arequipa.* Arequipa – Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2021.
8. **LLACHO ALHURCA, Ubaldo Cesar; VARGAS CASTRO-CUBA, Armando David.** *Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, U. O. Pallancata – veta Pablo – 2018.* Arequipa – Perú: Universidad Tecnológica del Perú, 2020.
9. **DIAZ AVALOS, Roberto Carlos.** *Diseño de infraestructura para mejorar el circuito de ventilación de la veta Rosa - zona norte en consorcio minero Horizonte, Pataz 2018.* Trujillo - Perú: Universidad Nacional de Trujillo, 2018.
10. **VALQUI CIEZA, Rildon.** *Diseño e implementación de un sistema electrónico de monitoreo de gases tóxicos para minería subterránea con acceso remoto a través de web Server.* Lima: Universidad Tecnológica del Perú, 2019.
11. **SALAZAR QUISPE, Jhony.** *Diseño de un prototipo portátil para la detección del monóxido de carbono y material particulado en las actividades mineras subterráneas.* Lima: Universidad Tecnológica del Perú, 2020.
12. **CHIPANA CALDERÓN, Alexis Gustavo.** *Diseño del sistema de captación de polvo centralizada para control del impacto ambiental en la sociedad minera Corona.* Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2018.
13. **JIMÉNEZ, P.** *Ventilación de minas subterráneas y túneles, descripción de control de*

- contaminantes del aire*. Lima, Perú: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, 2018.
14. **TRONCOSO, R.** *Ventilación*. Santiago, Chile: Sernageomin, 2005.
  15. **Draeger.** *Refugios mineros móviles*. S. L.: Dräger, 2018.
  16. **OSWALDO, A.** *Evaluación de calidad de aire en minería. 2da. jornada técnico- científico de «medio ambiente subterráneo y sostenibilidad*. Lima - Perú: SVS Ingenieros S. A. C., 2010.
  17. **MALCOLM, J. M.** *Subsurface ventilation engineering*. Virginia, EE. UU.: Polytechnic Institute And State University, 1993.
  18. **Ministerio de Energía y Minas.** *Glosario técnico minero*. Bogotá D. C. - Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2003.
  19. **ARIAS, Fidiás G.** *El proyecto de investigación*. Caracas - República Bolivariana de Venezuela: Editorial Episteme, C. A., 2012. ISBN: 980-07-8529-9.
  20. **HERRERA, Juan Herbert.** *Introducción a la ventilación minera*. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
  21. **ROJAS, Ignacio Roberto.** *Elementos para el diseño de técnicas de investigación: una propuesta de definiciones y procedimientos en la investigación propuesta de definiciones y procedimientos en la investigación*. [Ed.] Crotte. México: 2011, Tiempo de Educar, 12(24), págs. 277-297.
  22. **DURAN JANAMPA, Jimmi Robert.** *Mejoramiento de la ventilación en la mina subterránea - mina Colquijirca Cía. de minas Buenaventura S. A. A. Pasco - Perú: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2018.*
  23. **ARANGUREN CASTILLO, Daniel Ricardo.** *Evaluación del sistema de ventilación de la mina El Roble*. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2018.
  24. **VARGAS TIERRAS, Tannia Jazmín.** *Evaluación de riesgos para la salud de la población por contaminación de agua con metales pesados (cadmio, níquel y plomo) derivados de explotación minera ilegal, Cantón Esmeraldas*. Ambato – Ecuador: Universidad Técnica de Ambato, 2022.
  25. **Positiva Compañía de Seguros.** *Guía de seguridad para ventilación de minas subterráneas*. Bogotá, Colombia: Positiva Compañía de Seguros, 2017. pág. 9.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Matriz de consistencia

Planteamiento del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Método y diseño	Población y muestra
<p><b>Problema general</b> ¿De qué manera se puede optimizar y mejorar el circuito de ventilación para reducir la concentración de gases tóxicos y polución en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, en 2024?</p> <p><b>Problemas específicos</b> a. ¿Cuáles son los parámetros críticos del sistema de ventilación necesarios para diluir y evacuar los gases contaminantes en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024?</p> <p>b. ¿Qué acciones y mejoras se pueden implementar para mantener las concentraciones de gases tóxicos, polución y otros contaminantes dentro del límite máximo permisible en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu en 2024?</p> <p>c. ¿Cómo pueden las simulaciones con <i>software</i> especializado ayudar a determinar la mejor opción para garantizar una ventilación adecuada para el personal, equipos y procesos en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu en 2024?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Optimizar y mejorar el circuito de ventilación para reducir la concentración de gases tóxicos y polución en el nivel 4100 zona - norte mina – Yauliyacu, 2024.</p> <p><b>Objetivos específicos</b> a. Identificar los parámetros críticos del sistema de ventilación necesarios para diluir y evacuar los gases contaminantes en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.</p> <p>b. Proponer acciones y mejoras para mantener las concentraciones de gases tóxicos, polución y otros contaminantes dentro de límite máximo permisible en el nivel 4100 zona - norte mina - Yauliyacu, 2024.</p> <p>c. Evaluar mediante simulaciones con <i>software</i> especializado</p>	<p><b>Hipótesis general</b> La optimización y mejora del circuito de ventilación reducirá significativamente la concentración de gases tóxicos y polución, asegurando un ambiente de trabajo más seguro y saludable para el personal en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b> H1: La identificación y ajuste de los parámetros críticos del sistema de ventilación permitió una dilución y evacuación efectiva de los gases contaminantes, logrando una calidad de aire óptima en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.</p> <p>H2: La implementación de acciones y mejoras específicas en el sistema de ventilación mantuvo las concentraciones de gases tóxicos y polución dentro del límite máximo permisible en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, en 2024.</p> <p>H3: Las simulaciones realizadas con <i>software</i> especializado</p>	<p><b>Variable independiente</b> X: Sistema de circuito de ventilación</p> <p><b>Variable dependiente</b> Y: Concentración de gases tóxicos y polución</p>	<p><b>Tipo:</b> El tipo de investigación aplicada.</p> <p><b>Diseño:</b> cuasiexperimental,</p> <p><b>Nivel:</b> integra un enfoque descriptivo, correlacional, explicativo y predictivo,</p>	<p><b>La población</b> Cía. Minera Yauliyacu.</p> <p><b>La muestra</b> Corresponde al nivel 4100 zona - norte mina Yauliyacu.</p>

---


la mejor opción para garantizar una ventilación adecuada para el personal, equipos y procesos en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu en 2024.

---

permitieron seleccionar la mejor opción de ventilación para garantizar que el sistema proporcione condiciones adecuadas para el personal, equipos y procesos en el nivel 4100, zona norte de la mina Yauliyacu, 2024.

---

## Anexo 2. Formatos de capacitación en circuito de ventilación

	FORMULARIO	CODIGO	FC-CHO-018
	LISTA DE ASISTENCIA	REVISION	02

Razón Social o Denominación Social: EMPRESA MINERA LOS QUENUALES S.A.	RUC: 20332907990
Domicilio: UNIDAD MINERA YAULIYACU - CHICLA - HUROCHIRI - LIMA	Actividad Económica: MINERÍA
Instructor/Moderador: Victor Casachagua Camarena	Fecha: 28/04/2021
Gerencia/Superintendencia/Área: Ventilación	N° Trabajadores: 1234

Lista de Asistencia por: Capacitación

Desde: 7:30 pm	Hasta: 8:10 pm	Duración: 40 min	Asistentes: 17	H-H:
----------------	----------------	------------------	----------------	------

Temas tratados:

- Circuito de ventilación Sec. VII
- 
- 


**RELACION DE ASISTENTES**

N°	Apellidos	Nombres	Área	Empresa	Firma	DNI
1	Huante Huamandani	Alvario	Mina	EMOSA	[Firma]	16135542
2	Ayupac Paucor	Monclino	MINA	EMOSA	[Firma]	70563749
3	Bunato Quimari	Aidon	MINA	EMOSA	[Firma]	16134039
4	Huanc Abal	Yuri	Mina	EMOSA	[Firma]	40403665
5	Ordoñez de la Cruz	Hector	MINA	EMOSA	[Firma]	20554997
6	Campe Paucarcaya	Teodoro	Mina	EMOSA	[Firma]	40934755
7	Ramos Perez	Pablo	Mina	EMOSA	[Firma]	40928478
8	Paguayari Balito	Jesús	Mina	EMOSA	[Firma]	43503104
9	Arcote Cardenas	Juan	Mina	EMOSA	[Firma]	41681365
10	Aparicio Huillcas	Jesús	"	"	[Firma]	2346408
11	Dellado meje	Angel	"	"	[Firma]	19968110
12	Riveros Escobar	Fortunato	"	"	[Firma]	23201002
13	Tarpe Sotucuro	Leocadio	"	"	[Firma]	23264705
14	Estrada Vasquez	Calderon	"	"	[Firma]	42934174
15	Montoya BENITO	RONDO	MINA	EMOSA	[Firma]	22408643
16	Bautista Corinto	Cesar	MINA	"	[Firma]	20698558
17	SOTO MILLAN	YIPERA	MINA	"	[Firma]	40248221

Responsable del registro (Nombre, cargo, fecha, firma) / Comentarios - observaciones - sugerencias:

  
 Firma Instructor / Moderador



FORMULARIO

CODIGO

FC-DHD-018

## LISTA DE ASISTENCIA

REVISION

02

Razón Social o Denominación Social: EMPRESA MINERA LOS QUENUALES S.A.		RUC: 20332907990
Domicilio: UNIDAD MINERA YAULIYACU - CHICLA - HUROCHIRI - LIMA		Actividad Económica: MINERÍA
Instructor/Moderador: Renato Ortega Huarcanca	Fecha: 28/04/21	
Gerencia/Superintendencia/Área: Ventilación	N° Trabajadores: 1234	
Lista de Asistencia por: Capacitación		
Desde: 7:30 Pm	Hasta: 8:10 Pm	Duración: 40 min
Asistentes: 16	H-H:	

## Temas tratados:

1. Circuito de ventilación Sec V-VII
- 2.
- 3.

## RELACION DE ASISTENTES

N°	Apellidos	Nombres	Área	Empresa	Firma	DNI
1	Daga Kables	José	Mina	EMUSA	[Firma]	09047221
2	Brellana Reyes	Russ	Mina	EMUSA	[Firma]	40598088
3	Capani Condori	Hilario	Mina	EMUSA	[Firma]	23265647
4	Antero Caste	Pedro	Mina	EMUSA	[Firma]	40626415
5	Espinosa Huamani	Felix	Mina	EMUSA	[Firma]	23257640
6	Asme Mallasca	Victor	Mina	EMUSA	[Firma]	20019878
7	Espinosa Cajas	Luis	Mina	EMUSA	[Firma]	42513750
8	Hendozon Villanueva	Diego	"	"	[Firma]	04047054
9	Vera Guillen	[Firma]	"	"	[Firma]	59197714
10	Condo Puchungu	[Firma]	"	"	[Firma]	20903786
11	Yupanqui Siles	Erosimo	Mina	EMUSA	[Firma]	10500738
12	Vale Chremare	Jose	Mina	EMUSA	[Firma]	40933025
13	Del Castillo Jarraguano	Javier	Mina	EMUSA	[Firma]	19447514
14	Peche Davila	Miguel	Mina	EMUSA	[Firma]	20263956
15	BRUCOS POTOS	Nico	"	"	[Firma]	10750002
16	Alfredo Urbano L	Alfredo	Mina	EMUSA	[Firma]	80341187
17						

Responsable del registro (Nombre, cargo, fecha, firma) / Comentarios - observaciones - sugerencias:

[Firma]

Firma Instructor / Moderador

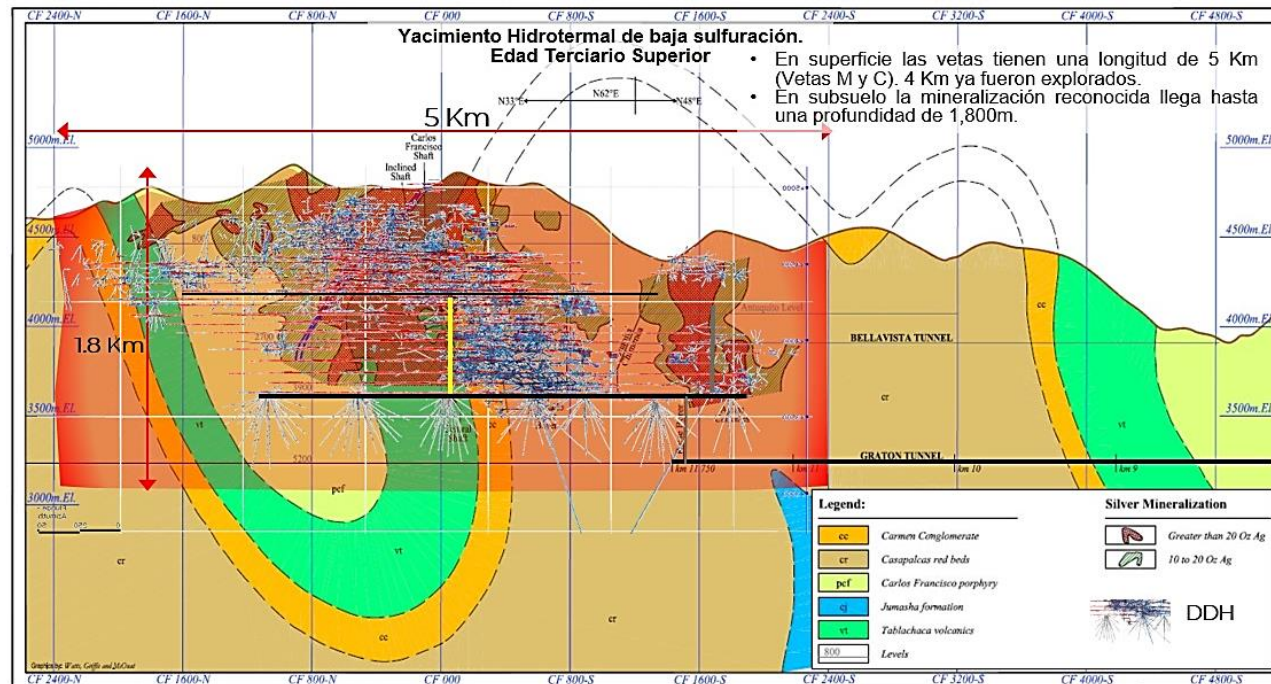
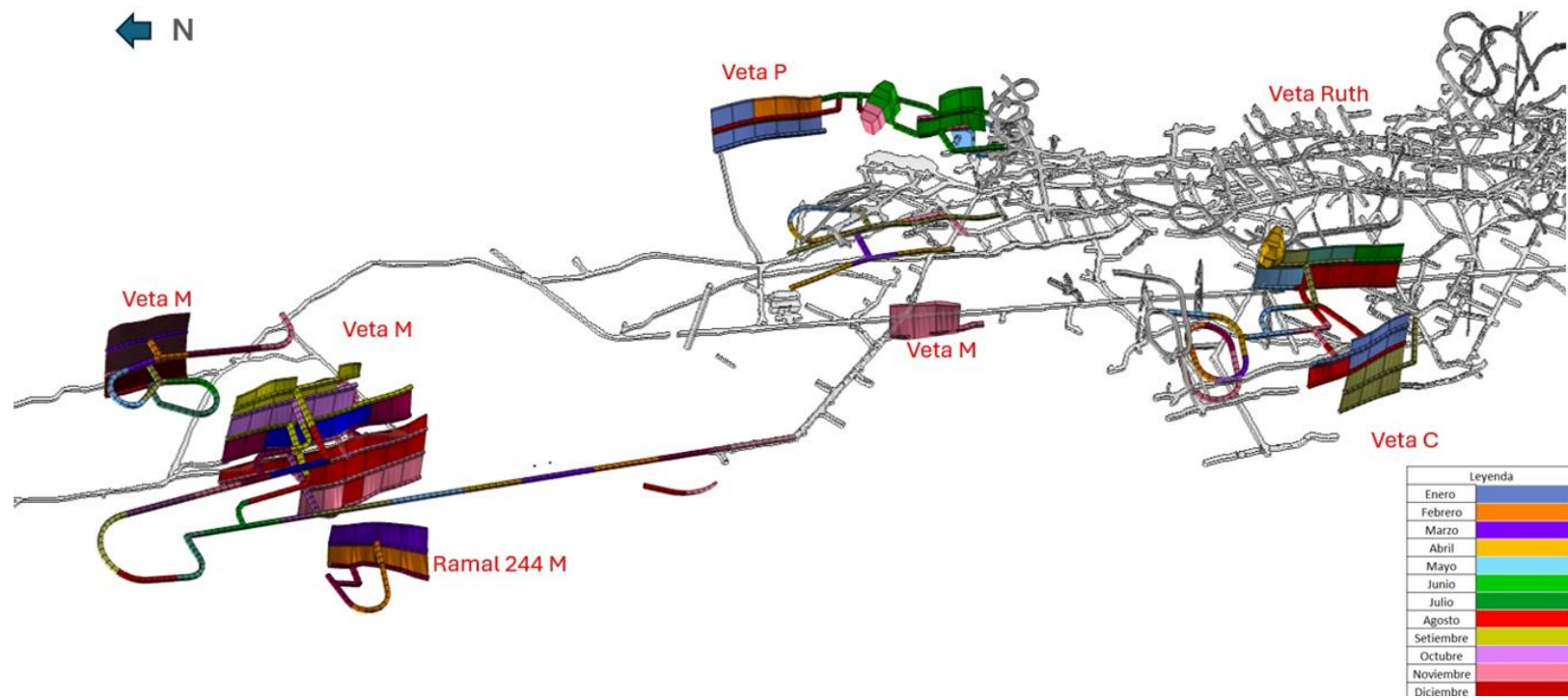


Figura 33. Modelado geológico del yacimiento

- Las vetas son angostas con diseminaciones en las cajas y ramales que forman lazos cimoides o en echelón.
- Las potencias son variables. En la zona central e inferior, presentan su mayor ancho (0.70-1.50m.), hacia los extremos y superior la potencia baja hasta 0.15 - 0.25m.
- La mineralización por debajo del nivel 3900 (3650msnm), continua con valores económicos, especialmente.
- en contenido de Ag y Zn hasta el Nv. 5200 (3240msnm)



*Figura 34. Vista de isométricas, reservas Budget*

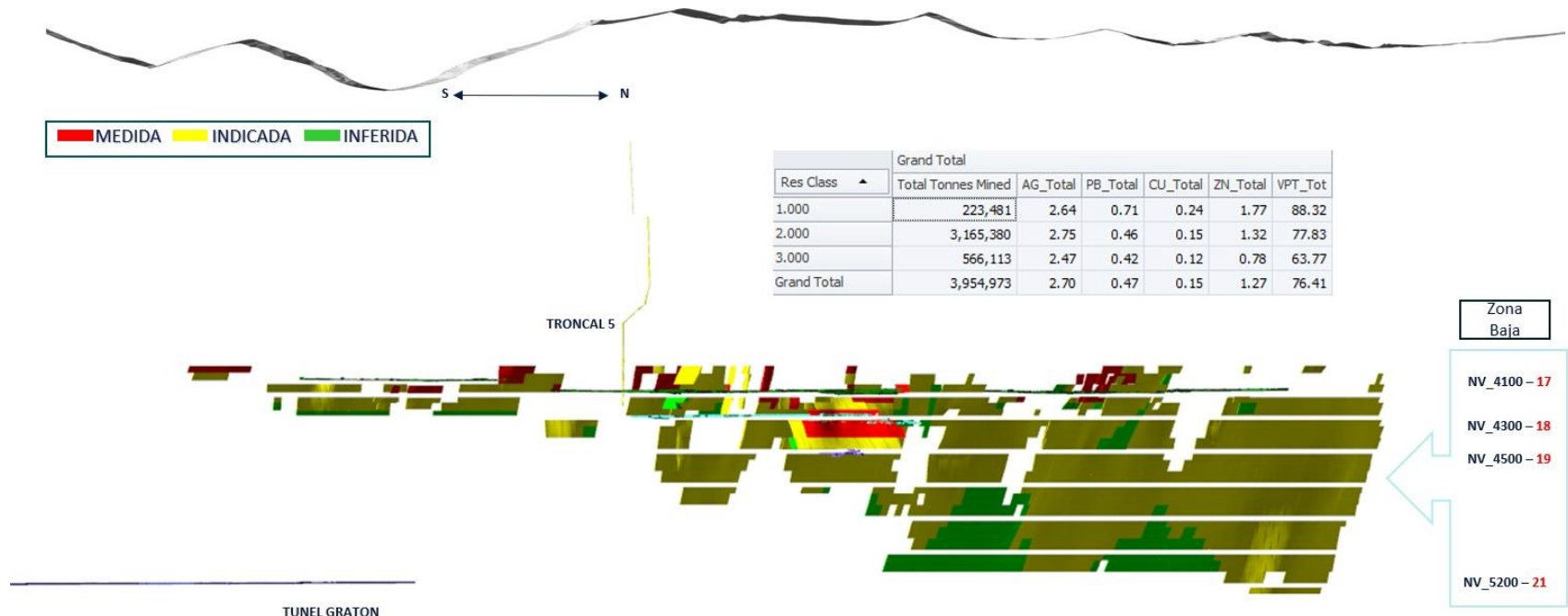


Figura 35. Vista de reservas sección VII

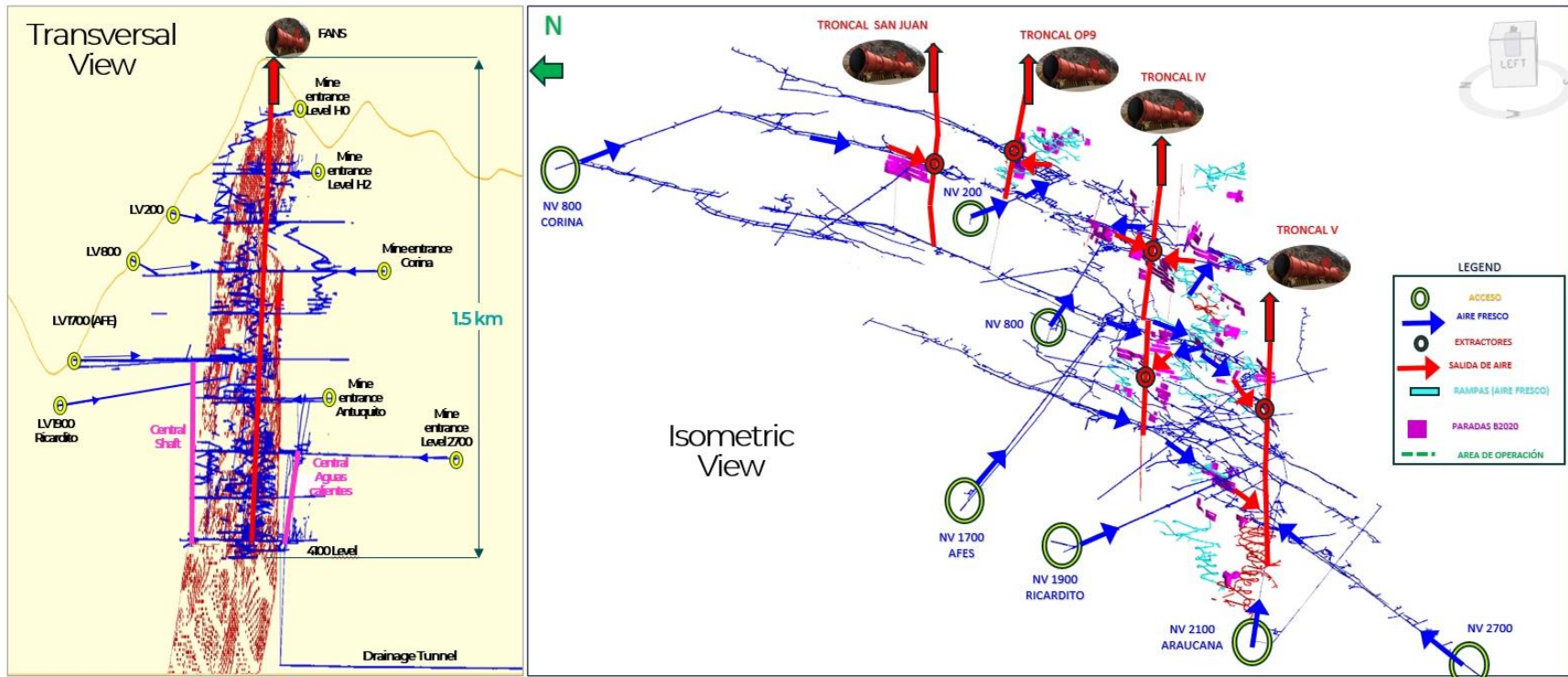
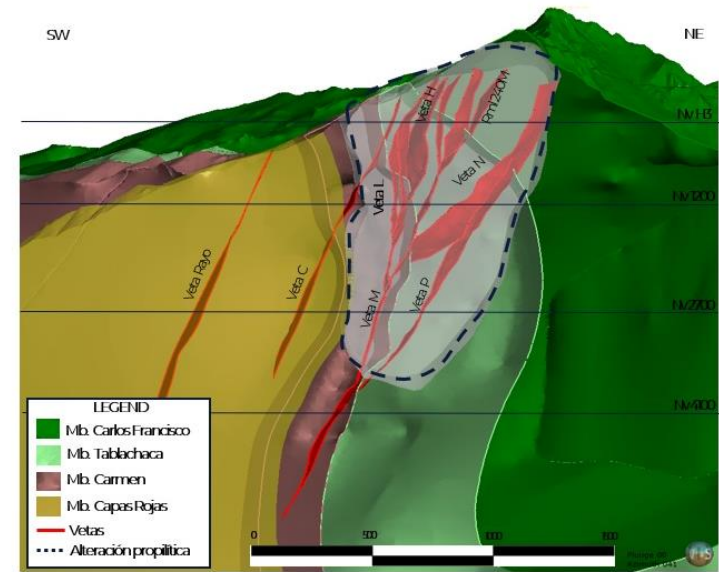
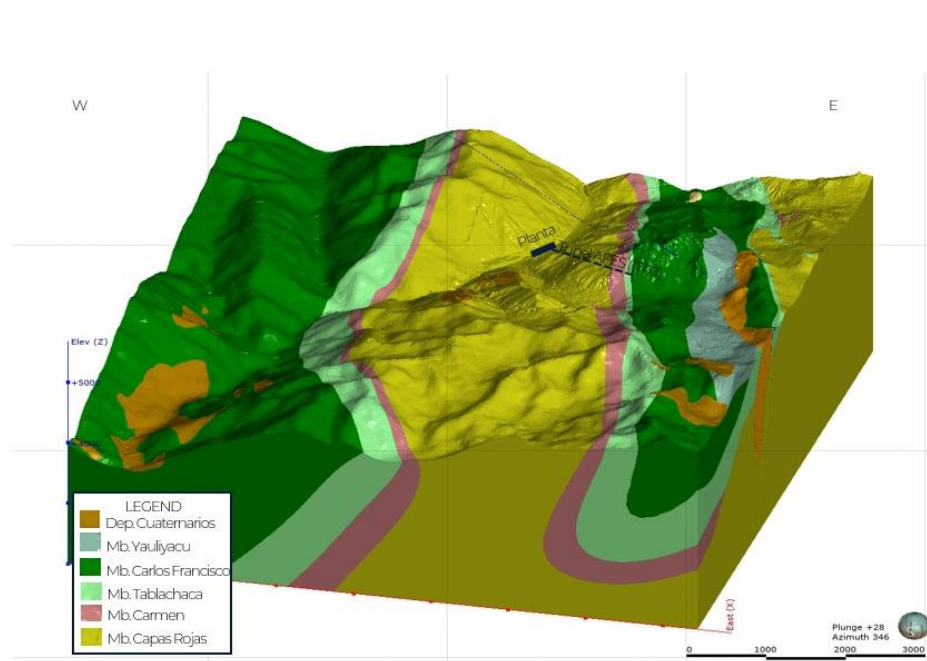


Figura 36. Flujo de producción de la mina



Types	N°
Veins + disseminated	22
Veins	20
branched veins	60
<u>Disseminated</u>	<u>10</u>
<b>Total</b>	<b>112</b>

Figura 37. Modelado geológico

