



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**METODOLOGIA DE MODELAMIENTOS DE INCENDIOS
PARA MINERIA SUBTERRÁNEA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

SERGIO EDUARDO VALENCIA BRIONES

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE COMISIÓN:
LUIS FELIPE ORELLANA
JUAN PABLO HURTADO CRUZ
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS**

**SANTIAGO, CHILE
2019**

RESUMEN

Esta Tesis de Magister en Minería está enfocada en la elaboración de una metodología de modelamientos de incendios para minería subterránea. Un modelamiento de incendios en minería subterránea es necesario para estudiar el comportamiento del sistema de ventilación frente a la ocurrencia de un incendio. Permite estimar la propagación de humo y gases a través del sistema de ventilación y también sirve para identificar las medidas de mitigación y control requeridas para resguardar a los trabajadores, equipos e instalaciones.

La metodología de modelamientos de incendios para minería subterránea consiste en elaborar una serie de trabajos que inician con un estudio de ventilación de terreno y que posteriormente son utilizados para desarrollar un modelo de ventilación que represente en forma precisa las condiciones de la mina. Después se debe realizar un análisis de riesgos de incendio, identificar las conexiones a superficie que podrían servir para evacuar en caso de una emergencia, analizar las cargas de fuego de los potenciales focos de incendio que se hayan identificado y confeccionar un modelo de simulación de incendios para estudiar los efectos de cada caso.

En la elaboración de esta tesis de Magister se han tomado como referencia tres publicaciones de simulación de incendios que se han desarrollado en distintos periodos de la construcción de la mina Chuquicamata Subterránea. Que con más de 120 km de túneles construidos fue necesario hacer una sectorización para estudiar de mejor manera los efectos de cada supuesto foco de incendio simulado. La sectorización permitió confeccionar una matriz de afectación y posteriormente sirvió para elaborar cartillas de evacuación focalizadas para cada sector de trabajo.

El resultado de esta Tesis de Magister, ha sido establecer una metodología de modelamientos de incendio para minería subterránea con una secuencia lógica que sea extrapolable a otras minas subterráneas. Que permite implementar medidas de mitigación y confeccionar o actualizar planes de emergencia de incendio.

Se concluye que en toda mina subterránea se debe elaborar un plan de emergencias de incendio respaldado con estudios de modelamientos de incendio que permitan estudiar en forma precisa el comportamiento del sistema de ventilación frente a una ocurrencia de incendio. A su vez, esta metodología sirve para actualizar los planes de emergencia en la medida que una mina crece o bien cuando su sistema de ventilación tenga modificaciones que resulten significativas en esta disciplina.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
CAPITULO I	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Estado del Arte.....	1
1.3 Objetivo	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Estructura de Tesis de Magister	5
CAPITULO II	6
2.1 METODOLOGIA PARA MODELAR INCENDIOS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA	6
2.1.1 Realizar un estudio de ventilación de terreno	6
2.1.2 Desarrollar un modelo de ventilación.....	8
2.1.2.1 Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire.....	9
2.1.3 Análisis de riesgos de incendio.....	9
2.1.4 Análisis de cargas de fuego	11
2.1.5 Desarrollar un modelo de simulación de incendios.....	11
2.1.5.1 Parámetros para un modelo de simulación de incendios.....	12
2.1.6 Salidas de Emergencia	13
2.1.7 Sectorización de la mina	14
2.1.8 Simulaciones de potenciales focos de incendio.....	14
2.1.9 Confección matriz de afectación.....	15
2.1.10 Confección de cartillas de evacuación.....	16
2.2 CASO DE ESTUDIO – MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA.....	17
2.3 RESULTADOS	18
2.4 DISCUSIÓN	20
CAPITULO III	21
3.1 CONCLUSIONES	21
3.2 TRABAJO FUTURO	21
3.3 Bibliografía.....	22
ANEXO A: ARTÍCULO 1.....	23
“DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”	23
1. Introducción.....	23
2. Metodología de Estudio.....	23
3. Estudio de Ventilación	23

4.	Desarrollo del Modelo de Ventilación	24
4.1	Diferenciales de Presión por Fricción.....	25
4.2	Mediciones de las Propiedades Psicrométricas	25
5.	Medición de Ventiladores.....	25
5.1	Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire.....	27
6.	Identificación de Escenarios de Incendio	28
7.	Desarrollo del Modelo de Incendio.....	31
7.1	Conductividad	31
7.2	Difusividad	31
7.3	Temperatura de la Roca.....	31
7.4	Datos de los Ventiladores	32
8.	Resultados	32
9.	Conclusiones	33
10.	Recomendaciones	33
	ANEXO B: ARTÍCULO 2	35
	“MODELAMIENTOS DE INCENDIO EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”	35
1.	Introducción.....	35
2.	Metodología de Estudio.....	35
3.	Estudio de Ventilación	36
4.	Desarrollo del Modelo de Ventilación	37
4.1	Diferenciales de Presión por Fricción.....	37
4.2	Mediciones de las Propiedades Psicrométricas	38
4.3	Medición de Ventiladores.....	38
4.4	Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire.....	38
5.	Identificación de Escenarios de Incendio a Simular	39
6.	Desarrollo del Modelo de Incendio.....	40
6.1	Dinámica del Incendio	41
6.2	La propagación y el comportamiento del incendio.....	41
6.3	El ciclo de vida del incendio	41
6.4	Ejemplo de equipo minero.....	41
6.5	Conductividad	43
6.6	Difusividad	43
6.7	Temperatura de la Roca.....	43

7.	Resultados	43
8.	Conclusiones	45
9.	Recomendaciones	45
10.	Referencias	45
ANEXO C: ARTÍCULO 3		46
“MODELAMIENTOS DE INCENDIOS ETAPA DE INICIO DE OPERACIÓN MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”		46
1.	Introducción.....	46
2.	Metodología de Estudio.....	46
3.	Estudio de Ventilación	47
4.	Desarrollo del Modelo de Ventilación	48
4.1	Diferenciales de Presión por Fricción.....	49
4.2	Mediciones de las Propiedades Psicrométricas	49
4.3	Medición de Ventiladores	49
4.4	Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire.....	49
5.	Incendios en Minas Subterráneas.....	50
6.	Foco de incendio a Simular	51
7.	Desarrollo del Modelo de Incendio.....	52
7.1	Dinámica del Incendio	53
7.2	La propagación y el comportamiento del incendio.....	53
7.3	El ciclo de vida del incendio	53
7.4	Ejemplo de incendio en equipo minero	53
7.5	Conductividad	55
7.6	Difusividad	55
7.7	Temperatura de la Roca.....	55
7.8	Resultados Ejemplo Caso Base modelo Junio 2018.....	55
8.	Resultados simulación en sistema proyectado a diciembre 2018.....	56
9.	Conclusiones	57
10.	Recomendaciones	57
11.	Referencias	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1: Cantidad de personas fallecidas por desastres en la industria minera.	2
Figura 2-1:Técnica de Traversa Continua.....	7
Figura 2- 2: Modelo de ventilación mina subterránea.....	8
Figura 2-3: Tasa de Consumo de Combustible.....	11
Figura 2-4: Modelo de simulación de incendios confeccionado.....	13
Figura 2-5: Salidas de Emergencia de una mina subterránea.....	13
Figura 2-6: Sectorización de una mina subterránea	14
Figura 2-7: Propagación de humo y gases de una simulación de incendio.	14
Figura 2-8: Ejemplo con la ubicación de los focos de Incendio simulados	15
Figura 2-9: Rutas de Evacuación en función de la Cartilla de Evacuación.....	16
Figura 2-10: Focos de incendio simulados	18
Figura 2-11: Vista Superior con Rutas de Marinas y direcciones de los flujos de ventilación	19
Figura 2-12: Vista superior con propagación de humo y gases de un foco de incendio simulado.....	19
Figura 2-13: Vista isométrica con propagación de humo y gases hacia superficie.....	20
Figura A-1: Anemómetro de paletas.....	24
Figura A-2: Distribución de flujos de aire en Mina Chuquicamata Subterránea	26
Figura A-3: Ubicación de Incendios Simulados	29
Figura A- 4: Ubicación de Incendios Simulados en Túneles de Inyección.....	30
Figura A- 5: Ubicación de Incendios simulados en Túneles de Acceso y Transporte Principal.....	30
Figura A- 6: Propagación de humo y gases, foco de incendio en Taller de Lubricación.....	32
Figura A-7: Puertas para aislar avance de humo y gases para la situación actual.....	33
Figura A-8: Puertas de Aislamiento para fase siguiente del sistema de ventilación	34
Figura B-1: Mediciones de velocidad del aire mediante la Traversa Continua.....	36
Figura B-2: Modelo de ventilación para mina Chuquicamata Subterránea	37
Figura B-3: Ubicación de foco de incendio a simular.....	40
Figura B-4: Representación gráfica de la tasa de consumo de combustible	42
Figura B-5: Foco de incendio simulado para Rampa 9.....	43
Figura B-6: Foco de incendio simulado en Rampa 9	44
Figura C-1: Mediciones de velocidad mediante la Traversa Continua	47
Figura C-2: Modelo de Ventilación para Mina Chuquicamata Subterránea	48

Figura C-3: Ubicación Foco de Incendio a simular	52
Figura C-4: Representación gráfica de la tasa de consumo de combustible	54
Figura C-5: Vista Superior con rutas de marinas y flujos de ventilación.....	55
Figura C-6: Vista Superior con propagación de humo y gases	56
Figura C-7: Vista isométrica modelo de ventilación proyectado a diciembre 2018	56
Figura C-8: Propagación de humo y gases en modelo proyectado a diciembre 2018.....	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Criterio de Probabilidad	9
Tabla 2-2: criterio de Lesiones y Daños	10
Tabla 2-3: Magnitud del Riesgo	10
Tabla 2-4: Clasificación de Riesgo	10
Tabla 2-5: Ejemplo de Confección de una matriz de afectación.....	15
Tabla 2-6: Ejemplo de cartilla de Evacuación	16
Tabla 2-7: Matriz de Afectación con resultados de las simulaciones de incendio	18
Tabla 2-8: codificación en función del CO	18
Tabla A-1: Resultados de mediciones de ventiladores.....	27
Tabla A-2: Valores promedio de coeficientes de fricción medidos	28
Tabla A-3: Ubicación de Incendios simulados	29
Tabla B-1: Resultados de mediciones en ventiladores.....	38
Tabla B-2: Factores de Fricción obtenidos con mediciones de terreno.....	39
Tabla B-3: Elementos combustibles de un equipo minero.....	42
Tabla B-4: Tasa de consumo de combustible	42
Tabla C-1: Resultados de mediciones de ventiladores.....	49
Tabla C-2: Factores de Fricción medidos en terreno	50
Tabla C-3: Elementos Combustibles de un Equipo Minero.....	54
Tabla C-4: Tasa de consumo de Combustible.....	54

CAPITULO I

1.1 Introducción

Esta Tesis de Magister en Minería está enfocada en la elaboración de una metodología de modelamientos de incendios para minería subterránea. La ocurrencia de un incendio en una mina subterránea es un evento complejo, porque producto de la combustión se generan gases nocivos para las personas, altas temperaturas y humo que limita la visibilidad en las galerías subterráneas.

Un modelamiento de incendios en minería subterránea es necesario para estudiar el comportamiento del sistema de ventilación frente a la ocurrencia de un incendio. Permite estimar la propagación de humo y gases a través de una mina e identificar las medidas de mitigación y control que se requieren para poner a resguardo a sus trabajadores, equipos e instalaciones. Los resultados obtenidos son de gran utilidad para actualizar o confeccionar un plan de emergencia de incendio para una mina y dar cumplimiento al Reglamento de Seguridad Minera DS.132.

Por una parte, el D.S.132 exige que en una mina subterránea existan las medidas de prevención y control de incendios para resguardar la integridad de las personas, equipos e instalaciones. El plan de emergencia de una mina subterránea da cumplimiento a lo indicado y previo a su confección se debe elaborar un procedimiento de evacuación de las personas, el cual requiere estudiar el comportamiento del sistema de ventilación frente a la ocurrencia de incendio y ello se logra mediante herramientas computacionales que permiten hacer estudios de modelamiento de incendios.

Los resultados de esta Tesis de Magister se traducen en un aporte significativo en aspectos de seguridad a la minería subterránea de nuestro país, donde se han aplicado las últimas tecnologías existentes para realizar los estudios de modelamientos de incendio.

Como resultado de esta Tesis de Magister, se elaboró una metodología de modelamientos de incendios que señala una secuencia lógica para realizar un estudio de simulación de incendios. Que servirá para actualizar el plan de emergencia, entrenar a sus trabajadores mediante las cartillas de evacuación y que facilitará el manejo de una emergencia al comité encargado de liderarla.

1.2 Estado del Arte

Los incendios en la industria minera representan una gran amenaza para la seguridad de las personas y los resultados económicos de las empresas.

En un sitio web de USA, es posible acceder a una base de datos de desastres mineros:

https://usminedisasters.miningquiz.com/Mine_Disasters/search_all_industry_hilo.asp?INDUSTRY=MNM

Desde el sitio web indicado, se han tomado los desastres mineros ocurridos en faenas mineras. Los registros existentes consideran desastres ocurridos entre los años 1869 y 2010. En total existen 175 desastres mineros que suman 1.653 personas fallecidas. De este gran numero, el 36 % de las personas fallecieron por causa de incendio (595 personas fallecidas).

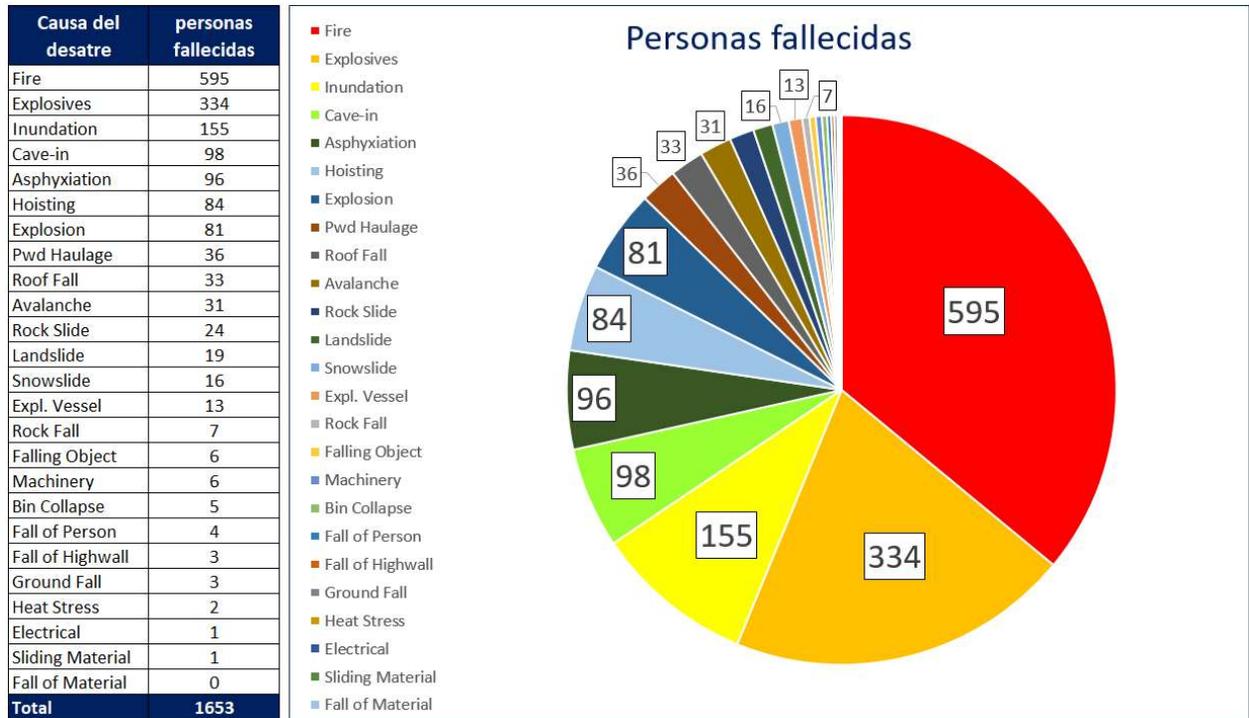


Figura 1- 1: Cantidad de personas fallecidas por desastres en la industria minera. (Grafico confeccionado a partir del resumen encontrado en sitio web señalado)

De los 175 eventos ya indicados, 30 de ellos corresponden a incendios en minería metálica y 1 corresponde a minería no metálica (mina de sal). Todos estos eventos de incendio suman un total de 595 personas fallecidas.

Año	Mina	Ubicación	Mineral	Causa del Desastre	Personas Fallecidas
1869	KY-Yellow Jacket	Gold Hill, NV	Oro	Incendio	37
1873	Yellow Jacket	Gold Hill, NV	Oro	Incendio	6
1879	Yellow Jacket	Virginia City, NV	Oro	Incendio	3
1881	Belmont	Belmont, MT	Cobre	Incendio	6
1885	Bull Domingo	Silver Cliff, CO	Oro/Plata	Incendio	10
1887	Gould and Curry	Virginia City, NV	Oro/Plata	Incendio	11
1889	St. Lawrence	Butte, MT	Cobre	Incendio	6
1889	Anaconda	Butte, MT	Plata	Incendio	4
1893	Silver Bow No. 2	Butte, MT	Cobre	Incendio	9
1895	Osceola	Calumet, MI	Cobre	Incendio	30
1895	Old Abe	White Oaks, NM	Oro	Incendio	8
1896	Hope	Basin, MT	Oro	Incendio	7
1901	Smuggler-Union	Pandora, CO	Oro/Plata	Incendio	31
1903	Koarsarge	Virginia City, MT	Oro	Incendio	9
1907	Fremont	Drytown, CA	Oro	Incendio	11
1908	Gold King	Gladstone, CO	Oro	Incendio	6
1911	Belmont	Tonopah, NV	Oro/Plata	Incendio	17
1911	Giroux	Ely, NV	Cobre	Incendio	7
1911	Hartford-Cambria No. 2	Negaunee, MI	Hierro	Incendio	7
1914	Boston	Bingham, UT	Cobre	Incendio	5
1916	Pennsylvania	Butte, MT	Cobre	Incendio	21
1917	Granite Mountain	Butte, MT	Cobre	Incendio	163
1917	Lincoln	Virginia, MN	Plomo	Incendio	-
1922	Argonaut	Jackson, CA	Oro	Incendio	47
1927	Magma	Superior, AZ	Cobre	Incendio	7
1930	Glenn	Lost Chance, CA	Oro	Incendio	5
1945	St. Anthony	Tiger, AZ	Plomo	Incendio	5
1950	Lark, U.S. Smelting	Lark, UT	Plomo/Zinc	Incendio	5
1968	Belle Isle Salt	Franklin, LA	Sal	Incendio	21
1972	Sunshine	Kellogg, ID	Plata	Incendio	91
2010	Viburnum No. 29	Viburnum, MO	Plomo/Zinc	Incendio	-
Total de personas Fallecidas					595

Tabla 1-1: Resumen eventos de incendio ocurridos en USA desde 1869 hasta 2010.

En Chile no se encontró una base de datos oficial que señale y detalle cada uno de los eventos de incendio que han ocurrido en la industria minera de nuestro país.

Sin embargo, al revisar en el sitio web https://es.wikipedia.org/wiki/Tragedia_del_humo, es posible acceder a información sobre **La Tragedia del Humo**, que fue un accidente ocurrido el 19 de junio de 1945 en la Mina El Teniente (Chile), en ese entonces propiedad de la Braden Copper Company, donde fallecieron 355 trabajadores. Que es considerado el mayor accidente ocurrido en una mina metalífera a nivel mundial.

Según se pudo establecer en las investigaciones, la tragedia se originó debido a las emanaciones de monóxido de carbono producidas por el incendio de una fragua ubicada en uno de los portales de acceso a la mina, en el nivel Teniente 1. Este humo se propagó al interior de la mina, debido a las condiciones de ventilación existentes en esa época en la mina El Teniente, asfixiando a 355 mineros. La mayor parte de las personas fallecidas se encontró en socavones y piques que fueron alcanzados por el monóxido de carbono. Algunos mineros se salvaron abriendo las llaves de aire comprimido de las redes de la mina, y otros evacuando por el sector Fortuna, ya abandonado en ese entonces.

En general, las fuentes de un incendio en una mina subterránea podrían ser las siguientes:

- Equipo minero móvil diésel
- Otros vehículos, buses, camiones de transporte, vehículos de servicio, etc.
- Subestaciones eléctricas
- Estaciones de compresores
- Motores eléctricos en máquinas y bombas
- Áreas de almacenamiento de aceite y lubricantes
- Áreas de almacenamiento o suministro de diésel
- Áreas de molienda y soldadura en talleres
- Talleres de mantenimiento
- Al efectuar orden y limpieza general
- Revestimiento de cables eléctricos
- Almacén de explosivos
- Comedor, oficinas
- Neumáticos y madera en almacenes
- Instalaciones de almacenamiento de gas comprimido

1.3 Objetivo

Confeccionar una metodología de modelamientos para minería subterránea a partir de los trabajos de modelamientos de incendios realizados durante la construcción de la mina Chuquicamata subterránea.

1.4 Hipótesis

La hipótesis de esta Tesis de Magister en Minería es, que dado que no es posible realizar un incendio real en una mina subterránea para estudiar sus efectos, se resuelve esta necesidad con la metodología de modelamientos de incendios para minería subterránea, al elaborar un modelo computacional para simular incendios; estudiar sus efectos en el sistema de ventilación y determinar con una mejor aproximación el comportamiento de humo y gases.

1.5 Estructura de Tesis de Magister

Esta Tesis ha sido estructurada de la siguiente forma:

- **Capítulo 1:** Está compuesto por la introducción, el estado del arte, los objetivos, la hipótesis y la estructura de tesis.
- **Capítulo 2:** Está compuesto por la metodología de modelamientos de incendio, los resultados y la discusión.
- **Capítulo 3:** Está compuesto por las conclusiones, el trabajo futuro y el respaldo bibliográfico.
- **Anexos:**
 - **Anexo A:** corresponde al artículo “DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”, publicado en UMining2016.
 - **Anexo B:** Corresponde al artículo “MODELAMIENTOS DE INCENDIO EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA” publicado en UMining2018.
 - **Anexo C:** corresponde al artículo “MODELAMIENTOS DE INCENDIOS ETAPA DE INICIO DE OPERACIÓN MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”, publicado en SIVM2018.

CAPITULO II

2.1 METODOLOGIA PARA MODELAR INCENDIOS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

La metodología de trabajo para desarrollar estudios de modelamiento de incendios, en primer lugar considera un estudio de ventilación de terreno que sirve para confeccionar un modelo de ventilación preciso, el cual debe representar el funcionamiento del sistema de ventilación con un error de correlación menor al 10%.

En paralelo debe realizarse un análisis de riesgos de incendio, que permita determinar potenciales focos de incendio que podrían afectar a la mina que se estudia. Una vez identificados los potenciales focos de incendio, se deben determinar y cuantificar los tipos de combustibles para cada foco. Así también, las propiedades de cada uno de ellos y las condiciones ambientales del lugar de ocurrencia.

Dependiendo de la envergadura de la mina subterránea que se estudia, es posible que sea necesario realizar una sectorización de esta. Ya sea por niveles, sectores de trabajo y ubicación respecto de la configuración del sistema de ventilación que exista. Teniendo en cuenta la cantidad de personas y cuáles son las vías que le permitan acceder a rutas de salida de emergencia.

Cuando existe un modelo de ventilación calibrado con los datos de terreno, es posible confeccionar un modelo de simulación de incendios, el cual debe configurarse con los potenciales focos de incendio a estudiar, considerando además sus cargas combustibles e información del entorno donde ocurriría el evento.

Cada foco de incendio que haya sido identificado, debe estudiarse con alguna herramienta computacional o software que permita simular incendios. Una vez realizada la simulación se debe revisar y analizar la propagación de humo y gases para identificar los sectores de trabajo afectados, la cantidad de personas expuestas, los refugios mineros existentes y rutas de evacuación disponibles (no afectadas por humo y gases).

Con la información obtenida a partir del análisis de resultados de las simulaciones de incendio es posible desarrollar una matriz de afectación, la cual debe incluir todos los potenciales focos de incendio simulados en un eje, mientras que en el otro se deben incluir todos los sectores de trabajo de la mina, estén afectados o no.

La matriz de afectación se transforma en una herramienta útil para identificar cuáles son los sectores con mayor frecuencia y a su vez cuales son los potenciales focos de incendio que generan una mayor propagación de humo y gases en la mina. Además permite identificar cuáles serían las rutas de evacuación más favorables dependiendo del tipo de incendio y el lugar de ocurrencia.

La matriz de afectación sirve para realizar cartillas de evacuación para emergencias de incendio, cuando una mina es muy grande. Dichas Cartillas señalan las rutas de evacuación disponibles para cada sector de trabajo en función de la ubicación del foco de incendio.

2.1.1 Realizar un estudio de ventilación de terreno

En toda mina subterránea se debe realizar un estudio de ventilación de terreno, el cual debe determinar las cantidades de flujo de aire y las distribuciones de presión diferencial en galerías subterráneas horizontales y verticales.

Además, se debe medir la presión total, estática y dinámica en ventiladores principales y secundarios que existan en la mina. Así también se debe medir velocidad del aire para determinar el caudal que inyecta o extrae cada uno de ellos. Se debe medir la presión barométrica para determinar la densidad del aire. Esta información es útil para determinar el punto de operación en cada ventilador y representarlo con la curva correspondiente en el modelo de ventilación.

Los caudales de aire se determinan realizando lecturas en las secciones transversales en las galerías subterráneas usando un anemómetro de paletas, mediante la travesa continua. Cuando la velocidad es muy baja para un anemómetro, se realizan mediciones en el centro de la galería usando tubos de humo. En ambos casos se debe multiplicar el valor de velocidad obtenido por el área de sección transversal medida para obtener el caudal de aire que allí existe [m^3/s].

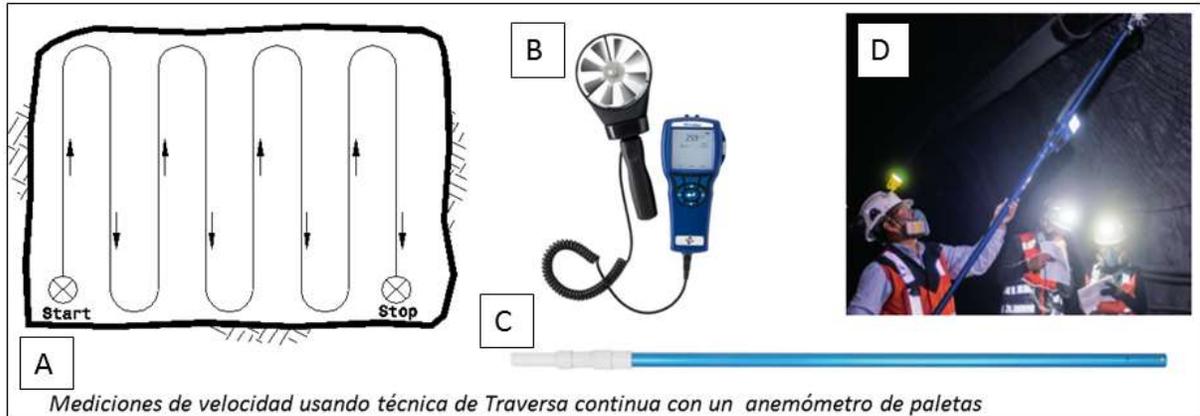


Figura 2-1: Técnica de Travesa Continua

A) Trayectoria de un anemómetro en la travesa continua (McPherson, 2009) / B) Anemómetro de paletas utilizado para medir velocidad / C) Barra de aluminio extensible utilizada para sostener el anemómetro / D) Medición de velocidad realizada en Mina Chuquicamata Subterránea.

Para las lecturas de velocidad que se desvían en más de un 5% respecto de otra, se deben repetir las mediciones, las veces que sean necesarias para eliminar dicha desviación.

En sectores donde se conectan unas galerías con otras, se deben realizar mediciones en cada galería para asegurar el cumplimiento de la Primera Ley de Kirchhoff (la suma de los caudales que ingresan en una unión debe ser igual a la suma de los caudales que salen de esa misma unión).

Para medir diferenciales de presión estática en puertas, tapados y reguladores de ventilación, se hace en forma directa usando un micro-manómetro digital conectado a una manguera cuyo diámetro es de $\frac{1}{4}$ de pulgada y su longitud estará en función de los espacios disponibles.

El método de medición con manómetro y manguera sirve para medir las caídas de presión (total) friccional a lo largo de los conductos de aire de la mina donde el caudal de aire (total) sea suficiente para dar resultados significativos. Se emplean mangueras de hasta 300 m de longitud.

Para cuantificar la energía de ventilación natural y el punto de operación de ventiladores, también se mide la temperatura del bulbo seco, la humedad relativa y la presión barométrica en cada estación de aforo de la mina.

Para cuantificar la presión de ventilación natural y el punto de operación del ventilador, se mide la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la presión barométrica en cada estación de aforo de la mina.

Donde sea posible, se deben realizar lecturas de caída de presión por fricción en circuitos cerrados, y los datos se deben revisar para verificar el cumplimiento de la Segunda Ley de Kirchhoff (que indica que la suma algebraica de las caídas de presión friccional alrededor de cualquier circuito cerrado debe ser igual a cero, después de considerar los ventiladores y la Presión de Ventilación Natural).

Para los circuitos de ventilación auxiliar se realizan mediciones de presión en la zona de descarga del ventilador a una distancia en que el flujo es lineal dentro del ducto de ventilación. En sectores intermedios de los ductos de ventilación y en la zona de descarga de aire del ducto también se realizan mediciones para

determinar la cantidad de aire que se entrega en un frente de trabajo y la cantidad de aire que se pierde por fugas. Estos circuitos también deben ser representados en el modelo de ventilación.

2.1.2 Desarrollar un modelo de ventilación

Se debe desarrollar un modelo de ventilación correlacionado y calibrado con la información de terreno, dicha correlación debe ser menor al 10 % de error para para representar las condiciones del sistema de ventilación de la mina.

Existen distintas herramientas computacionales para confeccionar un modelo de ventilación, dentro de los más populares están VnetPC (MVS - SRK Consulting), Ventsim (Howden) y VUMA (BBE Consulting).

Los parámetros a considerar en un modelo de ventilación son los siguientes:

- Características geométricas de las galerías de ventilación.
- Las resistencias de los ramales, determinadas previamente con datos medidos en terreno.
- Las presiones medidas de los ventiladores.

El error de correlación del modelo se calcula dividiendo la suma de las diferencias absolutas entre el flujo predicho y el medido en terreno para cada ramal por el flujo total medido, como se muestra a continuación en la Ecuación (2-1):

Ecuación 2-1: Error de Correlación

$$\text{Correlación} = \frac{\sum |\text{Flujo Medido} - \text{Flujo Predicho}|}{\text{Flujo Total Medido}} \times 100\% \quad (2-1)$$

Un error de correlación menor al 10% es el deseado para asegurar que el modelo es lo suficientemente preciso y que sirva como base para la planificación futura de la ventilación de la mina.

Se busca que el modelo de ventilación que se desarrolle, represente en forma adecuada el sistema de ventilación al momento de realizar la campaña de mediciones en la mina. Se muestra un modelo de ventilación de la mina Chuquicamata subterránea en la figura Figura 2-2.

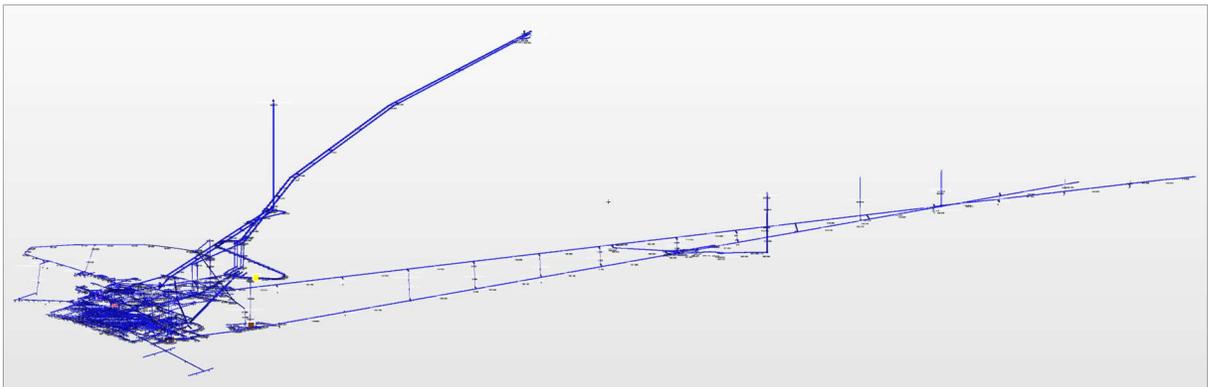


Figura 2- 2: Modelo de ventilación mina subterránea

2.1.2.1 Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire

Para las galerías donde se mida diferencial de presión por fricción y caudal de aire, se debe utilizar la Ley Cuadrática para calcular la resistencia al flujo (McPherson, 2009). Representado en este texto por la Ecuación (2-2):

Ecuación 2-2: Ley Cuadrática

$$R = \frac{p}{Q^2} \tag{2-2}$$

Donde:

- R = Resistencia (Ns²/m⁸)
- p = Caída de presión friccional (Pa)
- Q = Caudal de aire (m³/s)

Para las galerías subterráneas donde sea posible medir diferenciales de presión por fricción, se debe calcular la resistencia de los ramales usando la ecuación de Atkinson (McPherson, 2009): representado en este texto por la Ecuación (2-3):

Ecuación 2-3: Ecuación de Atkinson

$$R = \frac{k(L + L_{eq})per}{A^3} \tag{2-3}$$

Donde:

- k = factor de fricción (kg/m³)
- L = longitud del conducto de aire (m)
- Leq = longitud equivalente de pérdida por choque (m)
- per = perímetro del flujo (m)
- A = área de la sección transversal (m²)

2.1.3 Análisis de riesgos de incendio.

Para realizar simulaciones de incendio, es necesario evaluar el riesgo de incendio en la mina y sus consecuencias.

Un incendio podría ocurrir en cualquier lugar donde haya equipos, personas, instalaciones o materiales. La forma de clasificar el riesgo de incendio se describe con las siguientes tablas:

- **Criterio de Probabilidad:**

PARÁMETRO	CRITERIO PARA ESTIMAR PROBABILIDAD	VALOR	
PROBABILIDAD (P)	Probabilidad que un peligro se convierta en incidente mas de 8 veces por año	8	ALTO
	Probabilidad que un peligro se convierta en incidente entre 2 a 8 veces por año	4	MEDIO
	Probabilidad que un peligro se convierta en incidente 1 vez por año	2	BAJO
	Probabilidad que un peligro no se convierta en incidente durante el año	1	INSIGNIFICANTE

Tabla 2-2: Criterio de Probabilidad

- Criterio de Lesiones y daños:**

PARÁMETRO	CRITERIO LESIONES Y DAÑOS	VALOR	
CONSECUENCIA (C)	Muerte de una o más personas Discapacidad permanente Daño material irreparable y/o extensivo Pérdidas de producción que afectan los resultados planificados Detención de las operaciones afectando la imagen de la Compañía	8	ALTO
	Lesiones con discapacidad temporal en una o más personas Daño material reparable y/o parcial Pérdidas de producción que requieren planificación especial para ser recuperada	4	MEDIO
	Lesiones no incapacitantes Daño material que no afecta el proceso productivo Pérdidas de producción mínimas y/o pérdidas que podrían ser recuperadas en el corto plazo	2	BAJO
	Casi sin pérdidas	1	INSIGNIFICANTE

Tabla 2-3: criterio de Lesiones y Daños

- Magnitud del Riesgo:** La magnitud del riesgo (MR) para evaluar los riesgos de incendio se obtiene multiplicando la probabilidad (P) por la consecuencia (C), generando el siguiente cuadro que se muestra a continuación:

		CONSECUENCIA (C)			
		1	2	4	8
PROBABILIDAD (P)	1	1	2	4	8
	2	2	4	8	16
	4	4	8	16	32
	8	8	16	32	64

Tabla 2-4: Magnitud del Riesgo de incendio

- Clasificación de Riesgo:**

Clasificación	MR = P x C
Intolerable	32 a 64
Moderado	8 a 16
Tolerable	1 a 4

Tabla 2-5: Clasificación de Riesgo de incendio.

De acuerdo a la clasificación de riesgo, si un potencial foco de incendio se encuentra en un rango de moderado a intolerable, deberá ser simulado para determinar con exactitud la consecuencia e identificar las medidas de mitigación y control que le apliquen.

2.1.4 Análisis de cargas de fuego

Una vez identificados los potenciales focos de incendio que serán simulados, es necesario analizar y cuantificar los elementos combustibles que cada uno posee. Se debe definir el tiempo que durará el supuesto incendio y determinar las cantidades de combustibles que se quemaran en cada etapa de acuerdo al ciclo de vida de un incendio. Esta información es necesaria para determinar la tasa de consumo de combustible con que se debe configurar para cada incendio supuesto que se estudiará en el modelo de simulación de incendios.

El ciclo de vida de un incendio se compone de tres etapas, que se indican a continuación:

- **Iniciación:** Durante esta fase el fuego inicia y luego crece a una condición máxima de estado estable.
- **Intensidad máxima:** el fuego ha alcanzado su máxima intensidad (gobernado por el tipo y cantidad de combustible disponible y a su vez por la cantidad de oxígeno que exista).
- **Decaimiento:** La intensidad del fuego disminuye a medida que se consume el combustible.

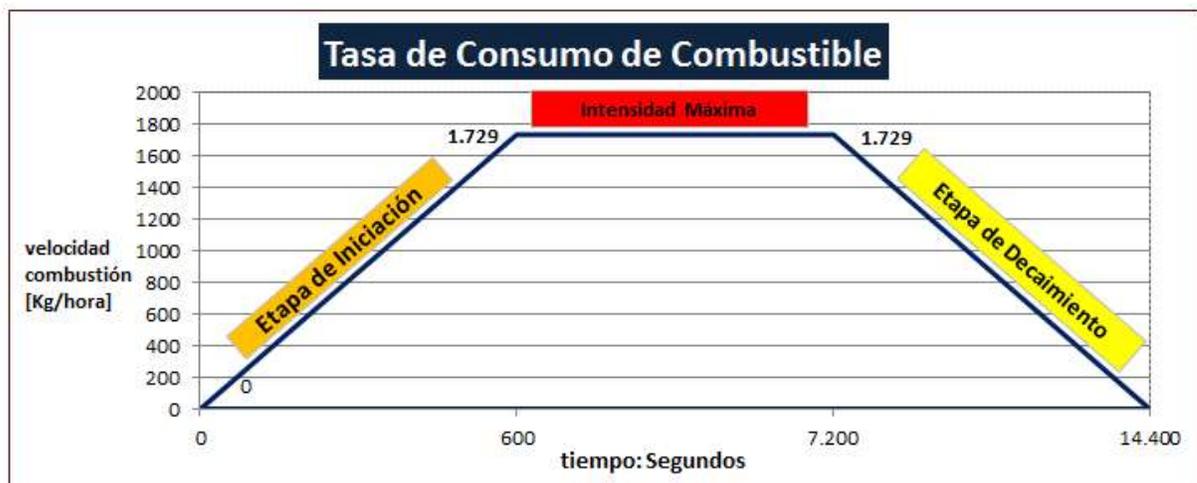


Figura 2-3: Tasa de Consumo de Combustible

2.1.5 Desarrollar un modelo de simulación de incendios.

Se debe desarrollar un modelo de simulación de incendios con alguna herramienta computacional que utilice técnicas de simulación dinámicas para modelar de manera simultánea calor, gas y cambios de caudal en un ambiente de ventilación minera durante un período de tiempo.

Dentro de lo esperable de una herramienta de simulación de incendios, se busca:

- Calcular los gases, la temperatura y el cambio en los caudales (y si es que éstos se invierten) por efectos de un incendio.
- Mostrar las concentraciones los gases en el ambiente por efectos de la combustión en varios puntos de la mina.
- Estudiar el comportamiento de humo y gases al cerrar algunas puertas o detener algunos ventiladores mientras simula un escenario de incendio.

Las herramientas computacionales más conocidas son VnetPC(MVS-SRK Consulting), Ventsim(Howden) y VUMA(BBE Consulting).

2.1.5.1 Parámetros para un modelo de simulación de incendios

- Conductividad: Esta variable corresponde a la conductividad térmica de la roca. El valor es usado por el programa para definir la difusión térmica hacia el aire a medida que este viaja a través de una galería de ventilación. Esto afecta los caudales de aire en la mina frente a una ocurrencia de incendio. Las unidades son (Btu/hr×ft×°F) or (W/m×°C).
- Difusividad de la roca: Esta variable define cuán rápido se mueve el calor en el límite entre la roca y el aire cuando éste pasa a través de un ramal. Los valores de difusividad de la roca se obtienen a partir de pruebas de laboratorio en testigos de roca o bien consultando tablas que se hayan publicado. Las unidades son (ft²/hora) o (m²/s).
- Temperatura de la Roca: Esta variable usa la temperatura promedio de la roca para un ramal dado. Las muestras pueden tomarse en varios puntos clave de la mina o se puede usar el paso geotérmico para determinar la temperatura promedio de la roca a cierta elevación.
- Configuración de incendios a simular: Los potenciales focos de incendio a estudiar, deben ser configurados en la herramienta de simulación de incendios a utilizar. Un incendio puede generar grandes cantidades de energía térmica. Lo que puede llevar varios efectos dinámicos en el sistema de ventilación de la mina durante su desarrollo.

La propagación y comportamiento de un incendio dependen de:

- Tipo y cantidad de combustible
- Ubicación del incendio
- Duración del incendio
- Suministro de oxígeno (ventilación)
- Propiedades físicas (geometría y ubicaciones) del ambiente del incendio

Las propiedades físicas de un incendio, el tipo y cantidad de combustible existente, la duración de la combustión, la liberación de calor y las limitaciones físicas. Estos parámetros pueden (y lo hacen) cambiar con el tiempo, lo que lleva a una variedad de efectos complejos e interacciones para cada escenario de incendio subterráneo.

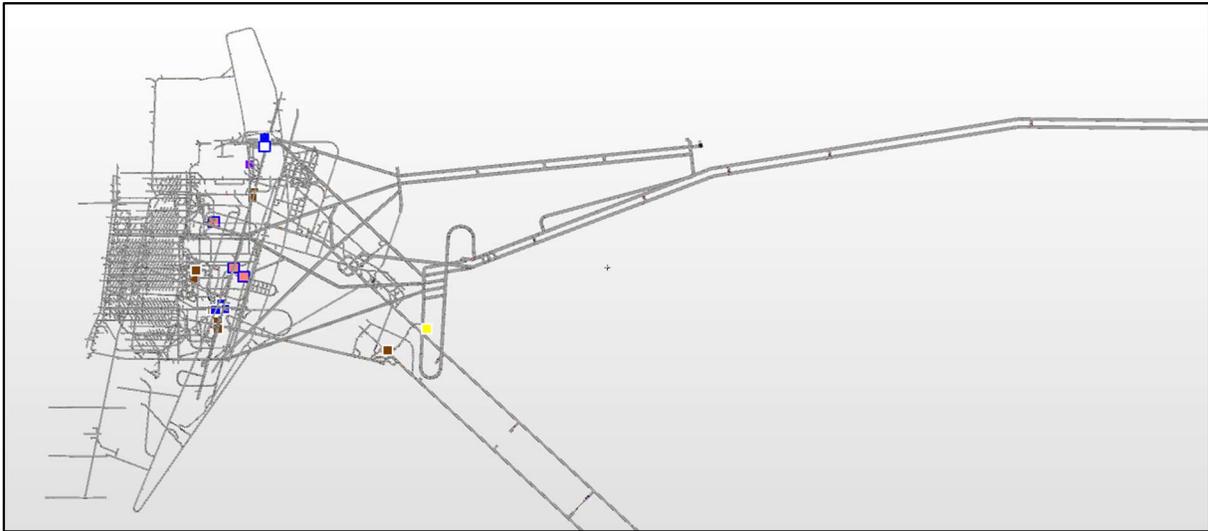


Figura 2-4: Modelo de simulación de incendios confeccionado.

2.1.6 Salidas de Emergencia

Se deben identificar y destacar las galerías mineras subterráneas que conectan a superficie y que podrían ser utilizadas para evacuar al personal en caso de existir una emergencia de incendio al interior de la mina. Cada una de estas potenciales vías de evacuación a superficie debe ser analizada conforme se desarrolla el estudio de modelamientos de incendios a objeto de validarla para ese propósito o bien determinar si en algún caso se invalida como tal.

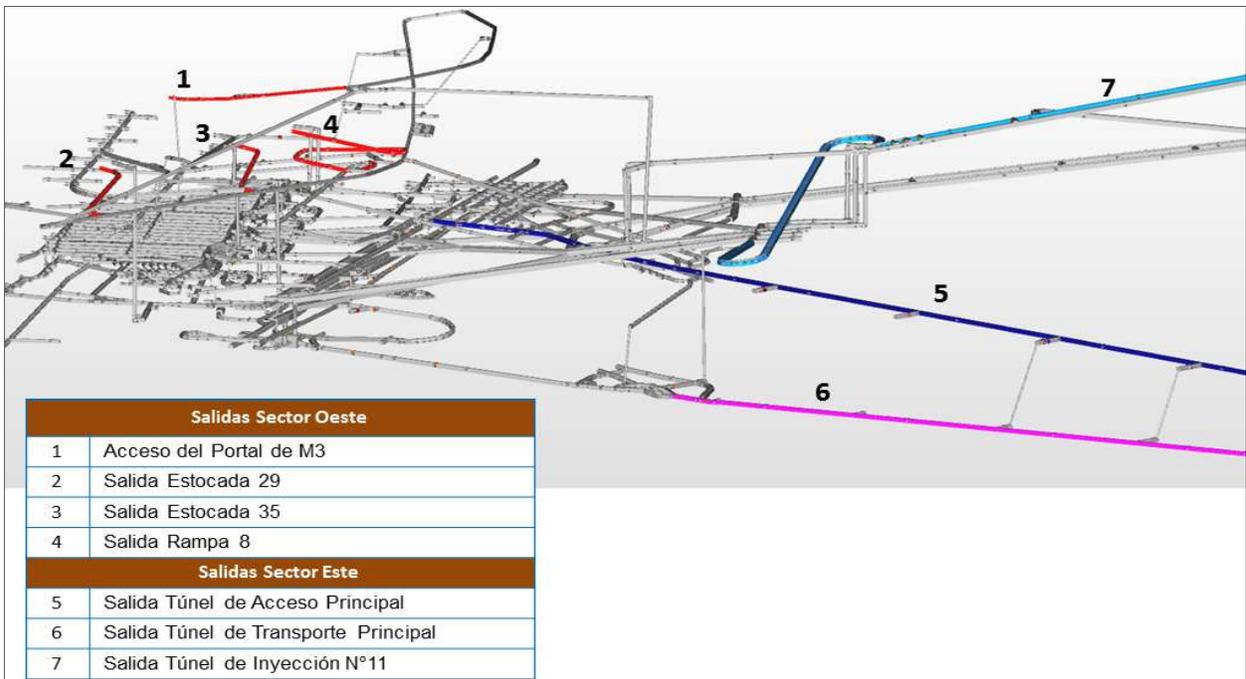


Figura 2-5: Salidas de Emergencia de una mina subterránea

2.1.7 Sectorización de la mina

Dependiendo de la envergadura de la mina subterránea que se estudia, puede ser necesaria una sectorización de esta. El criterio puede considerar una sectorización por niveles, por sectores de trabajo y la ubicación de estos respecto de la configuración del sistema de ventilación que exista.

Una sectorización de una mina, permite ser más preciso al momento del conteo de personas para cada lugar de trabajo y cuáles son las mejores rutas que le permitan acceder a las vías de evacuación para emergencias de incendio.

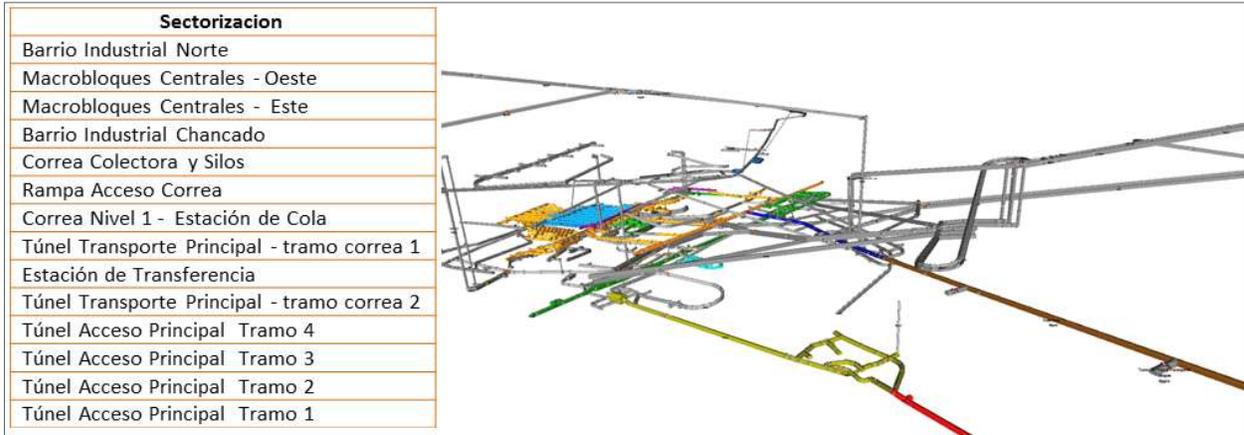


Figura 2-6: Sectorización de una mina subterránea

2.1.8 Simulaciones de potenciales focos de incendio.

Se debe simular cada potencial foco, cuya clasificación de riesgo así lo amerite de acuerdo al análisis de riesgos realizado. Habiendo configurado previamente las propiedades y elementos combustibles para cada caso en el modelo de simulación de incendios.

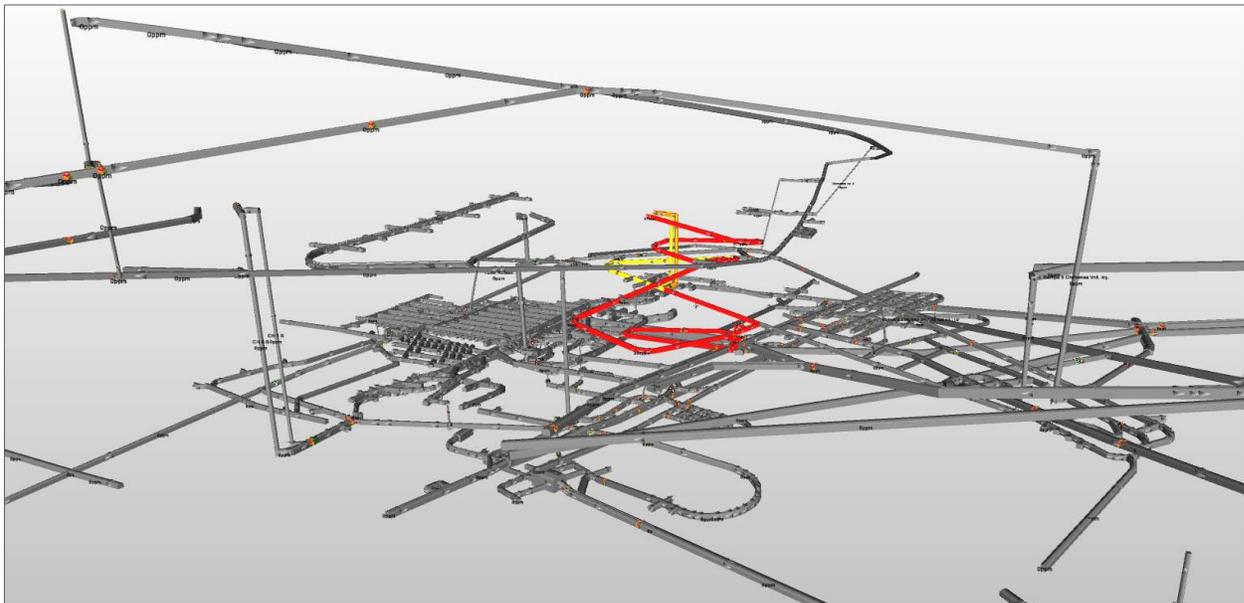


Figura 2-7: Propagación de humo y gases de una simulación de incendio.

2.1.9 Confección matriz de afectación.

Después de realizar las simulaciones de todos los potenciales focos de incendio en estudio, se deben procesar los resultados obtenidos. El análisis puede resultar más simple al desarrollar una matriz de afectación, la cual debe incluir todos los incendios simulados en un eje, mientras que en el otro se deben incluir todos los sectores de trabajo de la mina, estén afectados o no.

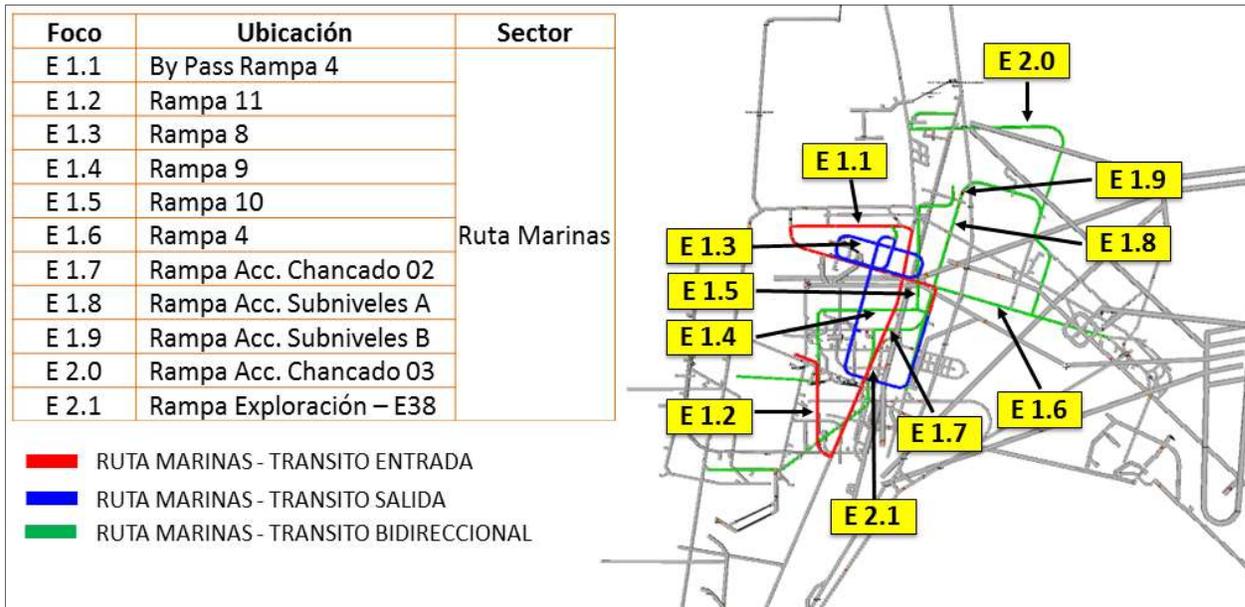


Figura 2-8: Ejemplo con la ubicación de los focos de Incendio simulados

Foco	Ubicación	POLVORIN RANPA 1	BARRIO CIVICO	TALLER EST 40	BIN	CAB-PD-N03-02	MB Central Oeste	MB Central Este	SALA CH01	BICH	Correa colectora y silos	C. NIV 1 E Cola	TTP T1	Estación Transf	TTP T2	TAP T3	Galería Conex.	TAP 1	Rutas evacuación AFECTADAS
E 3.1	RANPA 1 - Camión Aljibe																		
E 3.2	POLVORIN RANPA 1																		
E 3.3	TALLER EST-40																		
E 3.4	SURTIDOR COMBUSTIBLE																		
E 3.5	NIVEL PRODUCCION ESTE																		
E 3.6	NIVEL PRODUCCION OESTE																		
E 3.7	NIVEL HDTO ESTE																		
E 3.8	NIVEL HDTO OESTE																		
E 3.9	RANPA EXPLORACION ESTOCADA 6																		
E 4.0	RANPA DRENAJE - ESTOCADA 2																		
E 4.1	RANPA FASE 3 SUR																		
E 4.2	TALLER LUBRICANtera SOBRE E43																		
E 4.3	TALLER ZUBLIN - BIN																		

Tabla 2-6: Ejemplo de Confección de una matriz de afectación

En eje horizontal están los lugares de trabajo en función de la sectorización de la mina/ En el eje vertical están los potenciales focos de incendio que se simularan.

2.1.10 Confección de cartillas de evacuación.

Con la matriz de afectación vista en el punto anterior es posible confeccionar una cartilla de evacuación para emergencias de incendio, la cual puede ser confeccionada para cada lugar de trabajo definido en la sectorización de la mina.

Para cada lugar de trabajo, una cartilla de evacuación señalará las vías de evacuación disponibles y cuáles son los potenciales focos de incendio que lo afectarían.

USTED ESTA AQUÍ ↓		UBICACIÓN POTENCIAL FOCO DE INCENDIO						
		RAMPA EXPLORACIONES E38	RAMPA ACCESO SUBNIVELES	RAMPA ACCESO CH02	CORREA COLECTORA	CORREA NIVEL 1	ESTACION DE COLA	TTP TRAMO 1
		AFECTADA	AFECTADA	AFECTADA	AFECTADA	NO AFECTADA	NO AFECTADA	NO AFECTADA
		EVACUACIÓN	EVACUACIÓN	EVACUACIÓN	EVACUACIÓN	EVACUACIÓN	EVACUACIÓN	EVACUACIÓN
AREAS DE TRABAJO SK	CORREA COLECTORA	(1) Rampa Acceso Subniveles a TAP			(1) Rampa Acceso Subniveles a TAP			
		(1.1) RAS a Planta Hormigón			(1.1) RAS a Planta Hormigón			
		(2) Correa Nivel 1 a TTP	(2) Correa Nivel 1 a TTP	(2) Correa Nivel 1 a TTP	(2) Correa Nivel 1 a TTP			
			(3) Rampa 6 a Túnel Inyección 11	(3) Rampa 6 a Túnel Inyección 11	(3) Rampa 6 a Túnel Inyección 11	(3) Rampa 6 a Túnel Inyección 11	(3) Rampa 6 a Túnel Inyección 11	(3) Rampa 6 a Túnel Inyección 11
			(3.1) Rampa 3 a TAP	(3.1) Rampa 3 a TAP	(3.1) Rampa 3 a TAP	(3.1) Rampa 3 a TAP	(3.1) Rampa 3 a TAP	(3.1) Rampa 3 a TAP
			(4) Norte Colectora a TAP	(4) Norte Colectora a TAP	(4) Norte Colectora a TAP	(4) Norte Colectora a TAP	(4) Norte Colectora a TAP	(4) Norte Colectora a TAP

Tabla 2-7: Ejemplo de cartilla de Evacuación

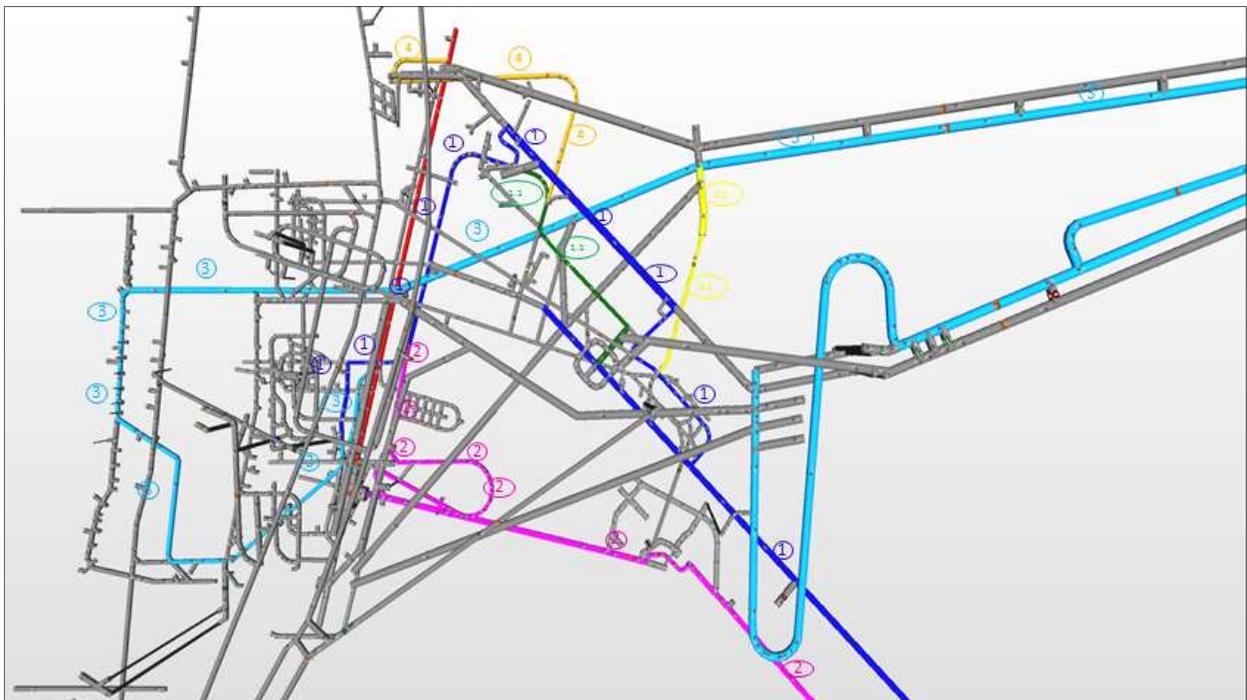


Figura 2-9: Rutas de Evacuación en función de la Cartilla de Evacuación

2.2 CASO DE ESTUDIO – MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

La elaboración de la metodología de modelamientos de incendio para minería subterránea, se basa en los estudios de modelamientos de incendios realizados durante la etapa de construcción de mina Chuquicamata subterránea en los años 2015, 2017 y 2018. Los resultados de los trabajos realizados, se publicaron tres artículos en los congresos UMining2016, UMining2018 y SIVM2018 respectivamente.

Para el estudio del año 2015, se publicó el artículo “DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”, que se explica con mayor detalle en el Anexo A de esta Tesis de Magister.

Dicho estudio de incendio se enfocó en zonas distintas debido a que la construcción de la mina Chuquicamata Subterránea inició desde 4 zonas constructivas independientes, que debían conectarse entre sí. Las zonas constructivas corresponden a: Obras Interior Mina (OIM), Túnel de Acceso y Transporte Principal (TAT), Túneles de Inyección de Aire (TIA) y el Pique de Extracción vertical (PEV).

Los estudios de ventilación de terreno consistieron en hacer levantamientos para cada una de las zonas ya mencionadas. Se confeccionó un modelo de ventilación y posteriormente un modelo de simulación de incendios para OIM, TAT y TIA. Inicialmente se realizaron simulaciones de incendio para cada zona en forma independiente y también proyectando la conexión entre ellas. Sus resultados permitieron identificar el requerimiento de elementos de mitigación y control para ambos casos.

Para el estudio de modelamientos de incendio realizado en la primera mitad del año 2017, se publicó el artículo “*MODELAMIENTOS DE INCENDIO EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA*”, que se explica con mayor detalle en el Anexo B de esta Tesis de Magister.

Dicho estudio consideró una mina subterránea en plena construcción, pero teniendo conectadas las cuatro zonas indicadas en los párrafos anteriores. Se confeccionó un modelo de ventilación en función del crecimiento de la mina subterránea y se desarrolló un modelo de simulación de incendios para estudiar potenciales focos y generar propuestas de mitigación y control.

Para el estudio realizado en junio del año 2018, se publicó el artículo “MODELAMIENTOS DE INCENDIOS ETAPA DE INICIO DE OPERACIÓN MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”, que es explicado con mayor detalle en el Anexo C de esta Tesis de Magister. Considera las condiciones del sistema de ventilación en la fecha señalada y además se describe el modelo de ventilación que se proyecta para el inicio de la operación de la mina subterránea.

2.3 RESULTADOS

Una vez concluido el modelo de simulación de incendios, que incluyó modelo de ventilación calibrado con datos de terreno; las salidas de emergencia; la sectorización de la mina y las cargas de fuego de los potenciales focos de incendio identificados, se procedió a simular cada foco de incendio.

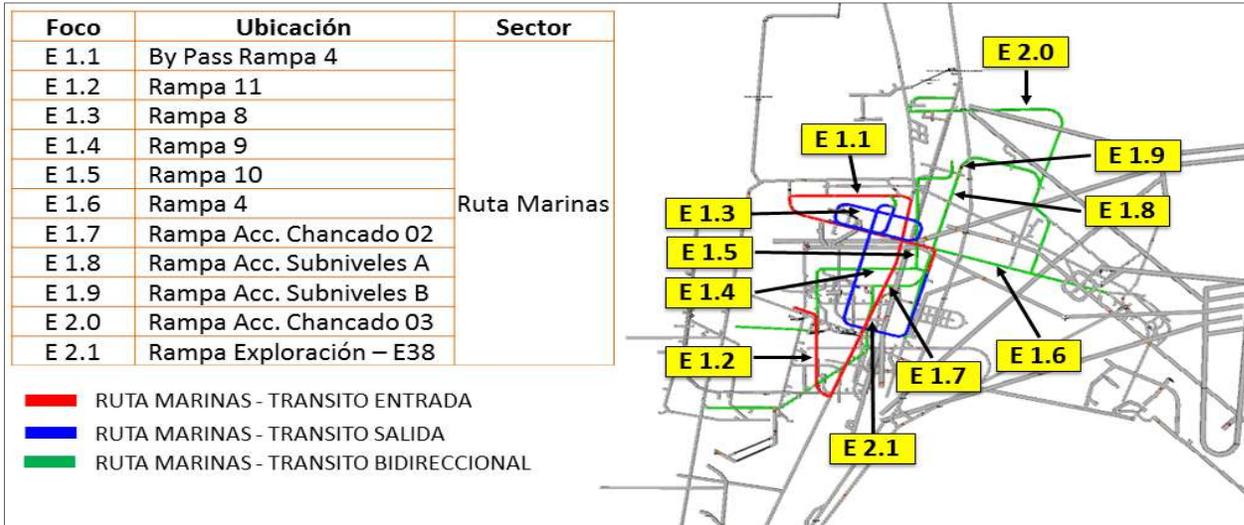


Figura 2-10: Focos de incendio simulados

Con los resultados obtenidos se confeccionó la matriz de afectación, donde se muestran los focos de incendio simulados y los sectores afectados. De igual manera se indican las rutas de evacuación afectadas en cada caso.

Foco	UBICACIÓN	BARRIO CIVICO	TALLER E 40	BIN	MB NO2-NO3	BICH	CORREA COLECTORA	SILOS	CORREA NIVEL 1	TTP TRAMO 1	ESTACION DE TRANSFERENCIA	TAP TRAMO 4	TAP TRAMO 3	GALERÍA CONEXIÓN	TAP TRAMO 2	TAP TRAMO 1	RUTAS DE EVACUACION AFECTADAS
F 1.1	By Pass Rampa 4																Rampa 8
F 1.2	Rampa 11																Rampa 11
F 1.3	Rampa 8																Rampa 8
F 1.4	Rampa 9																Rampa 8
F 1.5	Rampa 10																Rampa 8
F 1.6	Rampa 4																
F 1.7	Rampa Acceso Chancado 02																Túnel de Inyección 11
F 1.8	Rampa Acceso Subniveles A																Túnel de Inyección 11
F 1.9	Rampa Acceso Subniveles B																Túnel de Inyección 11
F 2.0	Rampa Acceso CH-03																Túnel de Inyección 11
F 2.1	REX - Estocada 38																Rampa 8 / Rampa 11 / TAP Tramo 3 y 4 / TTP Tramo 1 / Túnel Inyección 11
F 2.2	Rampa 4 - sector VEA 3.1																

Tabla 2-8: Matriz de Afectación con resultados de las simulaciones de incendio

	Concentración CO > 200 ppm
	100 ppm < Concentración CO ≤ 200 ppm
	Concentración CO ≤ 100 ppm CO
	Sector no afectado

Tabla 2-9: codificación en función del CO



Figura 2-11: Vista Superior con Rutas de Marinas y direcciones de los flujos de ventilación

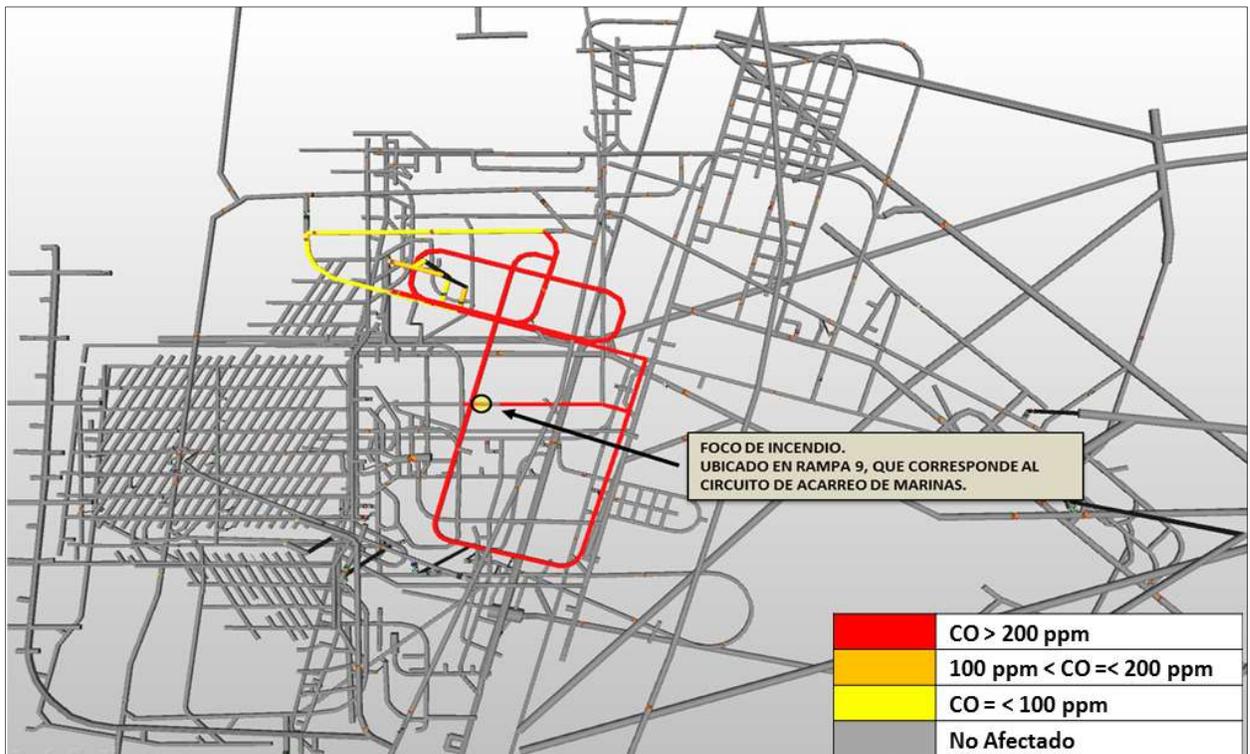


Figura 2-12: Vista superior con propagación de humo y gases de un foco de incendio simulado

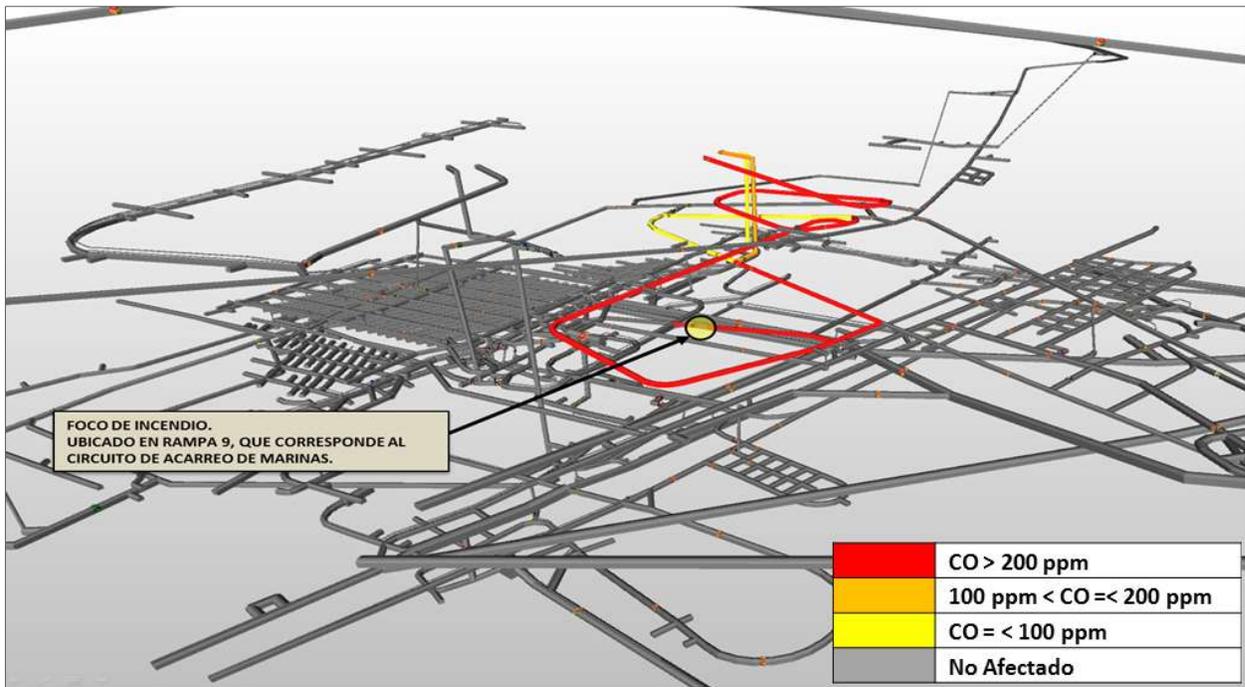


Figura 2-13: Vista isométrica con propagación de humo y gases hacia superficie.

2.4 DISCUSIÓN

2.4.1 Focos de incendio que representarían la mayor carga combustible:

Camiones de acarreo de marinas:

Corresponde a una de las potenciales fuentes de incendio más estudiadas en los modelamientos realizados para la etapa de construcción de la mina Chuquicamata Subterránea. Son vehículos mineros cuyas capacidades de carga han alcanzado las 60 toneladas y recorren rampas inclinadas con una pendiente máxima de 15%. Cada vez que se analizaron los elementos combustibles que lo componen, fue siempre uno de los equipos mineros con la mayor carga combustible en los estudios de incendio en la mina subterránea.

Las exigencias de seguridad y protección contra incendios para los camiones de transporte de marinas se cumplen y son verificadas turno a turno.

En el caso de las rutas utilizadas para el acarreo de marinas, los efectos de un incendio en la mina, se ven aminorados debido a que la configuración del sistema de ventilación para estas rutas es siempre con la dirección de aire hacia superficie. Lo que asegura que humo y gases siempre evacuen a superficie y no contaminan el resto de la mina.

2.4.2 Sector que representa el mayor riesgo frente a una ocurrencia de incendio:

Para toda mina subterránea, el lugar más crítico para una ocurrencia de incendio son las galerías de inyección de aire o cualquier sector de superficie cercano a los portales de inyección. La razón se fundamenta en que el nivel de inyección siempre entrega y distribuye aire a toda la mina, por ende frente a una ocurrencia de incendio ocurrirá lo mismo con el humo y los gases.

Las medidas de mitigación y control en estos lugares, son asegurar que no exista carga de fuego o fuente de incendio en estos lugares. En caso de que algún equipo deba circular en este lugar, lo haga con su sistema de extinción operativo y disponer de puertas contra incendio operativas.

Una ocurrencia en las vías de inyección de aire, dependiendo de su ubicación, es un lugar donde sería prudente hacer alguna detención en ventiladores de inyección para evitar el avance del frente de humo y gases hacia el resto de la mina, previamente habiendo estudiado el caso con herramientas computacionales para el modelamiento de incendios.

2.4.3 Sector que representa el menor riesgo frente a la ocurrencia de incendio.

Corresponde al nivel de extracción o galerías de extracción de aire en una mina subterránea, esto debido que frente a una ocurrencia de incendio, el humo y los gases, evacuaran en forma directa a superficie y no afectarán el resto de la mina.

2.4.4 Metodología utilizada

- La metodología de modelamientos de incendios utilizada, permite determinar en forma precisa y simple, los sectores afectados según la ubicación de un incendio.
- Sirve para determinar cuál es el evento de incendio que genera el mayor impacto en una mina subterránea.
- Permite identificar cual es la ruta de evacuación más favorable frente a una emergencia de incendio.
- La hipótesis planteada se cumple con la metodología de modelamientos de incendio utilizada. Que consiste en utilizar un modelo computacional para estudiar los efectos de un incendio en una mina subterránea y determinar con mejor aproximación el comportamiento del humo y de los gases generados por la combustión.

CAPITULO III

3.1 CONCLUSIONES

La metodología de modelamientos de incendios planteada en esta Tesis de Magister en Minería, sirve para simular potenciales focos de incendio y estudiar sus efectos en el sistema de ventilación de una mina subterránea. Permite determinar con una mejor aproximación el comportamiento del humo y de los gases.

La metodología de modelamientos de incendio, es una herramienta que sirve para determinar en forma simple cuales podrían los sectores afectados dependiendo del lugar de ocurrencia de un incendio. De igual manera sirve para identificar cual es el foco de incendio que tendría el mayor impacto en la mina subterránea, desde el punto de vista de propagación y concentraciones de monóxido de carbono que podrían alcanzar

La metodología de modelamientos de incendio planteada permite identificar en forma simple cual es la ruta de evacuación más favorable frente a una emergencia de incendio y se evidencia en la matriz de afectación.

3.2 TRABAJO FUTURO

Realizar estudios de incendio en faenas mineras subterráneas de una envergadura menor a la mina Chuquicamata Subterránea, mediante la aplicación de la metodología de modelamientos de incendio planteada en esta Tesis de Magister.

3.3 Bibliografía

INGENIERÍA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA, McPherson, M.J. 2009, Publicado por Mine Ventilation Services, Inc., 824 pp.

CONDUCIENDO UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIOS, Prosser, B. y Ruckman, R., 2010,” 13er Simposio de Ventilación de Minas en E.U.A., 365-370 pp.

USE OF LIVE SENSOR DATA IN TRANSIENT SIMULATIONS OF MINE VENTILATION MODELS, Craig M Stewart, Saiied M. Aminossadati, Mehmet S. Kizil, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia 2015.

UNDERGROUND FIRE ROLLBACK SIMULATION IN LARGE SCALE VENTILATION MODELS, Craig M Stewart. saiied M. Aminossadati, Mehmet s. kizil. The University of Queensland, Brisbane, Australia, Chasm consulting, Brisbane Australia, 2015.

FULL-SCALE FIRE EXPERIMENTS WITH MINING VEHICLES IN AN UNDERGROUND MINE, Rickard Hansen & Haukur Ingason, Mälardalen University, Studies in Sustainable Technology, 2013.

FIRE MODELLING IN UNDERGROUND MINES USING VENTSIM VISUAL VENTFIRE SOFTWARE, DJ Brake, The Australian Mine Ventilation Conference/Adelaide, Sa, 1 - 3 july 2013.

DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA, Brian Prosser, Mine Ventilation Services – SRK, Sergio Valencia, Codelco-Chuquicamata, UMining2016, 19 -21 Octubre 2016.

FIRE BEHAVIOR OF MINING VEHICLES IN UNDERGROUND HARD ROCK MINES, Rickard Hansen 2017, International Journal of Mining Science and Technology.

ANEXO A: ARTÍCULO 1

“DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”.

1. Introducción

En el año 2015, se desarrolló un estudio de modelamiento de incendios para los desarrollos mineros subterráneos en la Mina Chuquicamata. El estudio inició con mediciones de terreno de presión y flujos de aire de ventilación para desarrollar un modelo preciso y calibrado del sistema de ventilación existente. El modelo calibrado fue usado como base para los modelos de simulación de incendios. Los modelos de incendio permiten realizar simulaciones computacionales que sirven para predecir temperaturas, inversiones del flujo de aire, y propagación del frente de humo durante un incendio. Se examinaron escenarios alternativos para predecir las diversas interacciones que se producirían cuando los laboreos mineros subterráneos estuviesen conectados con los Túneles de Acceso y Transporte Principal y Túneles de Inyección de aire.

2. Metodología de Estudio

El estudio estuvo compuesto por varios segmentos que condujeron a las simulaciones finales de incendios. Los segmentos corresponden a:

- ✓ Levantamiento inicial de ventilación.
- ✓ Desarrollo del modelo de ventilación.
- ✓ Calibración del modelo de ventilación.
- ✓ Análisis de riesgos.
- ✓ Desarrollo del modelo de simulación de incendios.
- ✓ Análisis de escenarios individuales de incendios.

Para que el estudio tenga credibilidad, debe estar basado en un modelo de ventilación preciso. Para establecer un modelo de ventilación preciso, se requiere un levantamiento de ventilación en terreno donde se miden y cuantifican los caudales de aire y las pérdidas de presión por fricción. Estas mediciones se usan para determinar las resistencias de los ramales del modelo y se ingresa la geometría de los conductos de aire. Luego se correlaciona el modelo y se determina un valor de error. Un valor de error de correlación menor al 10% es aceptable y se considera que el modelo de ventilación representa a la mina en estudio.

Se realizó un análisis de riesgos para determinar la probabilidad y la consecuencia de un incendio, con la finalidad de seleccionar áreas de alto riesgo. Los incendios en esas áreas de alto riesgo son simulados con el modelo de simulación de incendios.

Un modelo de simulación de incendio requiere de parámetros adicionales de los ramales para reflejar la interacción térmica entre las altas temperaturas propiciadas por el fuego y las paredes de la roca. Los factores de fricción son requeridos para todos los ramales.

3. Estudio de Ventilación

El estudio de ventilación para las obras en construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea, involucró la determinación de caudales de aire y de distribuciones de presiones diferenciales. Los caudales de aire se determinaron llevando a cabo lecturas en las secciones transversales de los conductos de aire usando un

anemómetro de paletas Figura A-1 o efectuando mediciones centrales con tubos de humo, y multiplicando los resultados por el área de dichas secciones.

Los diferenciales de presión estática a través de tapados, puertas, y reguladores se midieron directamente usando un micro-manómetro digital conectado a una manguera. El método de medición con manómetro y manguera fue usado para medir las caídas de presión (total) friccional a lo largo de los conductos de aire de la mina donde el caudal de aire (total) era lo suficientemente importante como para dar resultados significativos. Se emplearon mangueras de hasta 300 metros de longitud.

Para cuantificar la ventilación natural y el punto de operación de los ventiladores, se midió la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la presión barométrica.

Los procedimientos de aseguramiento de la calidad estuvieron en todas las mediciones de ventilación, tomando, como mínimo, dos lecturas de velocidad en cada estación, las cuales fueron evaluadas para determinar su consistencia. Las lecturas que se desviaban en más de 10% una de otra eran repetidas tantas veces hasta eliminar dicha desviación.

En las corrientes parciales de aire, se tomaron mediciones para asegurar el cumplimiento de la Primera Ley de Kirchhoff de los caudales, el cual dice que la suma de los caudales que ingresan en una unión debe ser igual a la suma de los caudales que salen de esa misma unión.

Para definir las resistencias de los conductos de aire en forma precisa, las mediciones de las caídas de presión friccional fueron tomadas aproximadamente en la misma ubicación y en el mismo tiempo en que se tomaban las mediciones de caudal de aire.

Donde fue posible, se realizaron lecturas transversales de caída de presión friccional alrededor de circuitos cerrados, y los datos fueron revisados para verificar el cumplimiento de la Segunda Ley de Kirchhoff, (que dice que la suma algebraica de las caídas de presión friccional alrededor de cualquier circuito cerrado debe ser igual a cero, luego de haber tomado en cuenta los ventiladores y la Presión de Ventilación Natural).



Figura A-1: Anemómetro de paletas

4. Desarrollo del Modelo de Ventilación

El software de simulación de ventilación usado para establecer el modelo de ventilación de la Mina Chuquicamata Subterránea en periodo de construcción fue el programa VnetPC Pro. Usando los datos obtenidos de los levantamientos de ventilación o los determinados a partir de las características y dimensiones de las vías de aire, es posible simular redes de ventilación existentes, de tal modo que los caudales, las caídas de presión por fricción y los puntos de operación de los ventiladores se aproximen a los del sistema real.

Las resistencias de los ramales, determinadas a partir de datos medidos de los levantamientos junto con métodos empíricos, las presiones medidas de los ventiladores y las presiones de ventilación natural calculadas fueron ingresadas al programa VnetPC Pro.

El error de correlación de toda la red es calculado dividiendo la suma de las diferencias absolutas entre el flujo predicho y el medido para cada ramal por el flujo total medido, como se muestra a continuación en la ecuación (A-1):

Ecuación A-1: Error de Correlación

$$\text{Correlación} = \frac{\sum |\text{Flujo Medido} - \text{Flujo Predicho}|}{\text{Flujo Total Medido}} \times 100\% \quad (\text{A-1})$$

Un error de correlación menor al 10% es el deseado para asegurar que el modelo es lo suficientemente preciso como para servir de base para la planificación futura de la ventilación.

El modelo de ventilación confeccionado para las obras en construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea tuvo un error de correlación de 5,4%. Hay factores que contribuyeron con ese error. A pesar de que el caudal de ventilación total de la mina permanecerá relativamente constante si no se realizan cambios importantes en el sistema de ventilación, ocurrirán algunas variaciones locales durante el curso de las actividades normales. Los caudales de aire en áreas locales están afectados por el tráfico de vehículos, acarreo de marinas y la ventilación auxiliar.

4.1 Diferenciales de Presión por Fricción

Los diferenciales de presión por fricción medidos a través de reguladores, tapados, y a lo largo de las entradas principales fueron incluidos en el modelo de ventilación. Los diferenciales de presión se midieron en todos los puntos accesibles en donde las cantidades de flujo de aire fueran suficientes para producir diferencias de presión por fricción significativas.

4.2 Mediciones de las Propiedades Psicrométricas

Las mediciones de presión barométrica, temperatura de bulbo seco y humedad relativa fueron tomadas en varios lugares de la mina. Estas propiedades psicrométricas se usaron para calcular la densidad del aire para la evaluación de la presión de ventilación natural, la expansión del aire y para definir los puntos de operación de los ventiladores.

5. Medición de Ventiladores

Las mediciones de presión se obtuvieron durante el estudio de ventilación de terreno de las obras en construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea. En este documento, los valores de presión de ventilador referenciados son presiones totales, las cuales están dadas a una densidad de aire de mina promedio, y se muestran en la Tabla A-1 y la distribución de flujos de aire se muestra en la Figura A-2.

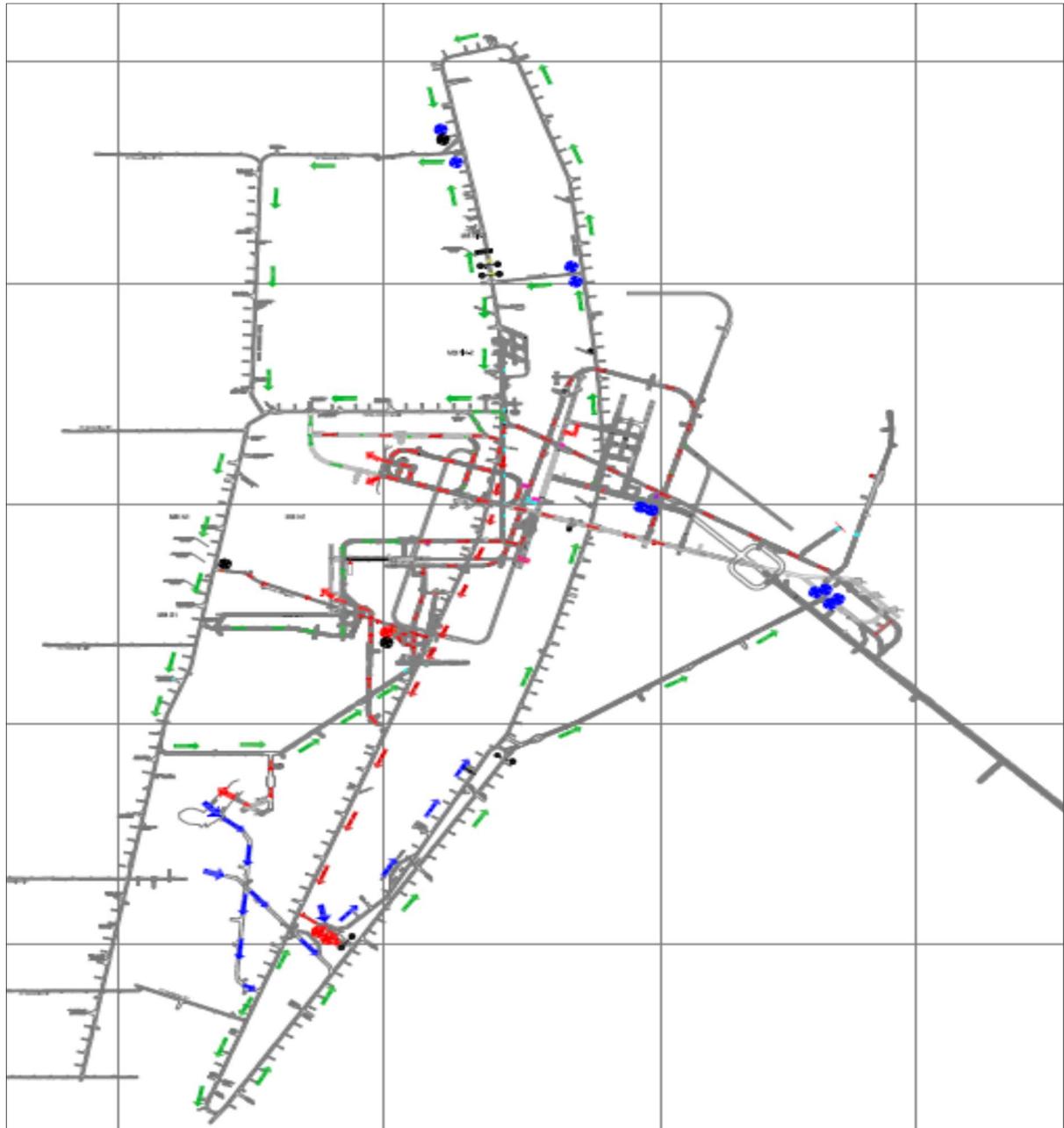


Figura A-2: Distribución de flujos de aire en Mina Chuquicamata Subterránea

Tabla A-1: Resultados de mediciones de ventiladores

Posición	Ubicación/Descripción	Marca/Modelo del Ventilador	Ventiladores en Paralelo	Caudal [m³/s]	PT Medida [Kpa]
1	Chimenea 3	Howden 66-30 S2000 FB	2	120,7	1,145
2(L)	Chimenea 5	Howden 66-30 S2000 FB	1	89,7	0,91
2(R)	Chimenea5	Alphair 5400-VAX-3150	1	104,3	0,92
3(L)	Chimenea 7 Ventilador	Howden 66-30 S2000 FB	2	78,8	1,392
3(R)	Chimenea 7 Ventilador	Howden 66-30 S2000 FB	1	43,5	1,116
4(L1)	Rampa 5 Chimnea Vnt.Iny.	Howden 66-30 S2000 FB	1	31,7	0,895
4(L2)	Chienea 5 Vent. Iny.	Alphair 54-3150 FB	1	52,1	1,728
4(R1)	Rampa 5 Chimenea Vnt. Iny.	Howden 66-30 S2000 FB	2	45,5	1,45
5	Chimenea 1	Howden 66-30 S2000 FB	2	120,8	1,145
6	Frontón Superior 2 Chim.Iny. Chancado	System Air AXC 1600	1	84,1	0,042

5.1 Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire

Para las vías de aire donde se midieron los diferenciales de presión por fricción y los caudales de aire, se utilizó la Ley Cuadrática para calcular la resistencia al flujo, (McPherson, 2009), Representado en este texto por la ecuación A-2.

Ecuación A-2: Ley Cuadrática

$$R = \frac{P}{Q^2} \tag{A-2}$$

Donde: R = Resistencia [Ns²/m⁸]
 P = Caída de presión friccional [Pa]
 Q = Caudal de aire [m³/s]

Se calculó una resistencia al flujo para cada ramal en la red esquemática de ventilación. Donde no estaban disponibles los datos de diferenciales de presión por fricción, se calcularon las resistencias de los ramales usando la ecuación de Atkinson, (McPherson, 2009), Representado en este texto por la ecuación A-3.

Ecuación A-3: Ecuación de Atkinson

$$R = \frac{k(L + L_{eq})per}{A^3} \tag{A-3}$$

Donde: k = factor de fricción (kg/m³)
 L = longitud del conducto de aire (m)
 Le = longitud equivalente de pérdida por choque (m)
 Per = perímetro del flujo (m)
 A = área de la sección transversal (m²)

Varios valores de resistencia fueron calculados incluyendo los factores k y las resistencias de la infraestructura para la Mina Chuquicamata Subterránea a partir de los datos medidos recolectados durante el curso del estudio, como se muestra en la Tabla A-2:

Tabla A-2: Valores promedio de coeficientes de fricción medidos

Ítem	Ubicación/Descripción	Factor $k(\text{kg/m}^3)^*$
1	Rampas OIM	0.0109
2	Chimenea 1	0.0008
3	Chimenea Inyección Chancado	0.0048
4	Chimenea Sur 2	0.0046
5	Transporte y Acceso Túnel	0.0088
6	Chimenea 1 Túnel Acceso	0.0065
7	Chimenea 2 Túnel Acceso	0.0028
8	Chimenea 3 Túnel Transporte	0.0044
9	Túnel 11	0.0091
10	Túnel 11/12 Duct	0.0025

* valores basados en una densidad de aire de mina promedio de 0.908 kg/m^3

6. Identificación de Escenarios de Incendio

Al inicio el estudio, el personal de ingeniería de minas realizó un análisis de riesgos para identificar probables ubicaciones de incendios y de alta consecuencia. Las fuentes de un incendio subterráneo podrían ser las siguientes:

1. Equipo minero móvil diésel
2. Otros vehículos, buses, camiones de transporte, vehículos de servicio, etc.
3. Subestaciones eléctricas
4. Estaciones de compresores
5. Motores eléctricos en máquinas y bombas
6. Áreas de almacenamiento de aceite y lubricantes
7. Áreas de almacenamiento o suministro de diésel
8. Polvo de sulfuro (combustión espontánea o súbita) y en colectores de polvo seco
9. Áreas de molienda y soldadura en talleres
10. Talleres de mantenimiento
11. Al efectuar orden y limpieza general
12. Revestimiento de cables eléctricos
13. Almacén de explosivos
14. Comedor, oficinas
15. Neumáticos y madera en almacenes
16. Instalaciones de almacenamiento de gas comprimido

Se modelaron ocho incendios en la Mina Chuquicamata Subterránea antes de que los Túneles de Inyección y los Túneles de Acceso y Transporte Principal fueran conectados a Obras Interior Mina (OIM). Estos

modelos incluyen los circuitos de ventilación auxiliar necesarios para ventilar frentes ciegos antes de que se ejecute la conexión de los túneles.

La ubicación de los incendios y sus fuentes están indicadas en la Tabla A-3 y en las Figuras A-3, A-4 y A-5. Estos incendios están simulados a una baja intensidad basada en las entradas para los parámetros de entrada de contaminantes de la simulación en MineFire.

Las ubicaciones de los incendios fueron elegidas sobre la base de posibles fuentes de combustible y del efecto del incendio. Los talleres y las subestaciones eléctricas son ejemplos de fuentes estacionarias de combustible que podrían afectar extensas áreas de la mina debido a la propagación del frente de humos.

Tabla A-3: Ubicación de Incendios simulados

Incendio No.	Ubicación	Fuente del Incendio
1	Rampa 10	Taller de Lubricación
2	Rampa Principal	Polvorín de Explosivos
3	Rampa 1	Camión de Acarreo
4	Rampa 4	Camión de Acarreo
5	Rampa Exploración	Subestación Eléctrica
6	Rampa 6	Camión de Acarreo
7	Túnel Inyección 11	Camión Lubricante
8	Túnel Transporte	Camión Lubricante

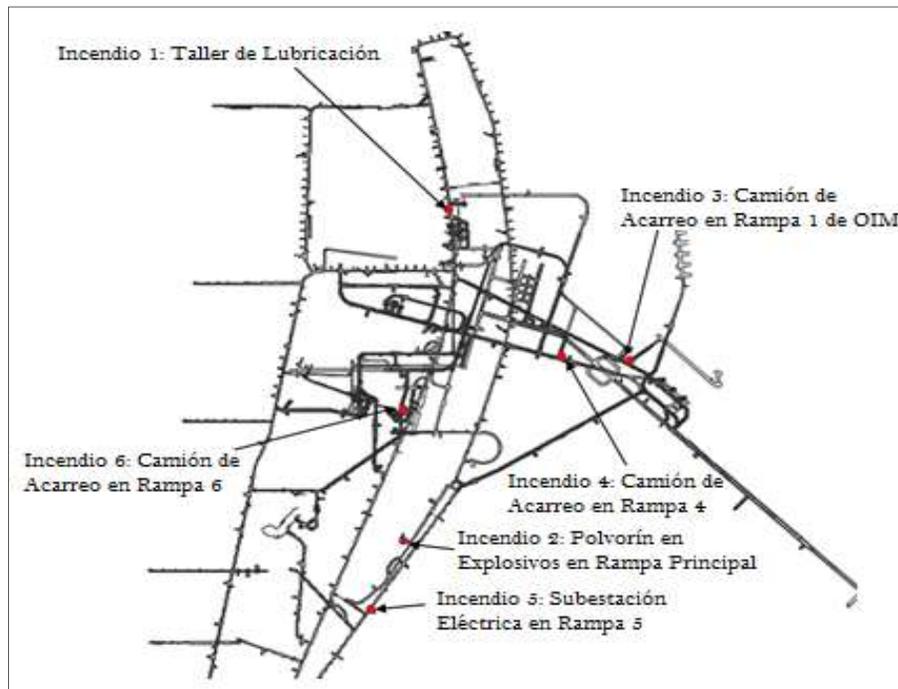


Figura A-3: Ubicación de Incendios Simulados

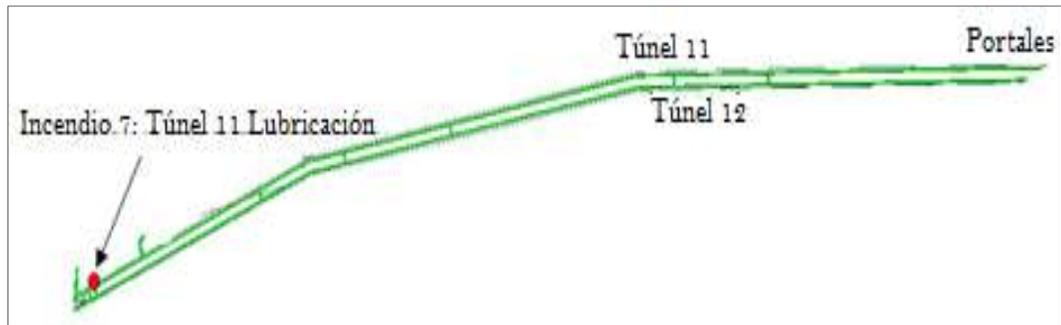


Figura A-4: Ubicación de Incendios Simulados en Túneles de Inyección

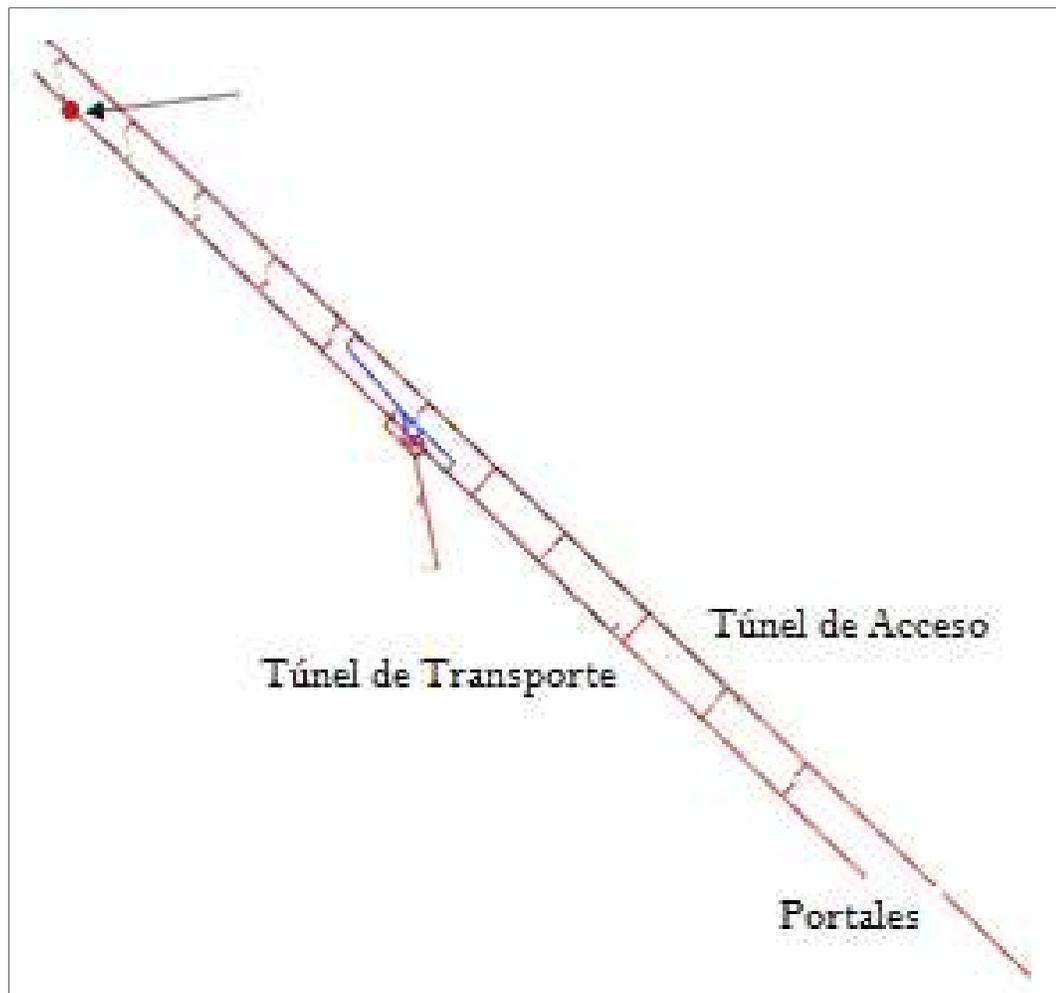


Figura A-5: Ubicación de Incendios simulados en Túneles de Acceso y Transporte Principal

7. Desarrollo del Modelo de Incendio

El software de simulación de incendios usado para este análisis fue el programa MineFire PRO. Se trata de una aplicación para Windows que debe ser usada con el paquete de software de simulación de redes de ventilación VnetPC. Está diseñado para simular la respuesta del sistema de ventilación de una mina a influencias externas, tales como un incendio.

MineFire realiza cálculos de planificación de redes de ventilación y modelamiento dinámico de estados transitorios bajo una variedad de condiciones. El programa simula la respuesta de un sistema ante parámetros de ventilación alterados tales como: la introducción de fuego al sistema, temperaturas exteriores variables, cambios en las estructuras de control de ventilación o el desarrollo de nuevos laboreos mineros. Esto se logra usando datos obtenidos de los levantamientos de ventilación junto con la información determinada a partir de características y dimensiones conocidas de conductos de aire. Las tasas de liberación de calor se calculan de acuerdo con el tipo de combustible que se quema.

La ubicación del incendio en un conducto principal de inyección o extracción o en un área de bajo flujo es importante para determinar si se asume un incendio rico en oxígeno o uno rico en combustible; por lo tanto, ayuda al usuario a determinar cuáles parámetros deberá usar en la simulación del incendio y cuáles podrían quedar en blanco. Los contaminantes podrían determinarse según la química de los componentes del combustible.

El fuego es difícil de predecir, por lo que los resultados de una simulación serán buenos si los datos ingresados fueron buenos. Por esta razón es una buena práctica simular diferentes intensidades de fuego para cada ubicación. Esto permite examinar la sensibilidad del sistema de ventilación y asociar un nivel superior de confianza al estudio.

7.1 Conductividad

Esta variable corresponde a la conductividad térmica de la roca. El valor es usado por el programa para definir la difusión térmica hacia o desde el aire a medida que viaja a través de un conducto. Esto afectará los caudales de aire en la mina. La comprensión de qué tipo de roca define un ramal es necesaria para modelos detallados. Un valor teórico general o promedio para el macizo rocoso puede ser suficiente. Donde el tipo de roca en el modelo sea uniforme, varios ramales tendrán el mismo valor. Las unidades son (Btu/hr×ft×°F) or (W/m×°C). Para este modelo, se definió el uso de un valor global de 3,5 (W/m×°C).

7.2 Difusividad

La difusividad de la roca se obtiene a partir de pruebas de laboratorio en testigos de roca o consultando tablas. Define cuán rápido se mueve el calor en el límite entre la roca y el aire cuando éste pasa a través de un ramal. Las unidades son (ft²/hora) o (m²/s). Para este modelo, se eligió un valor global de 1,6×10⁻⁶ (m²/s) equivalente a 0,072 (ft²/hora).

7.3 Temperatura de la Roca

La variable Temperatura de la Roca usa la temperatura promedio de la roca para un ramal dado. Las muestras pueden tomarse en varios puntos clave de la mina o se puede usar el paso geotérmico para determinar la temperatura promedio de la roca a cierta elevación y podría ser promediada tantas veces como fuera necesario para ramales con relieve vertical. No había la disponibilidad de información detallada con respecto a la temperatura de la roca, por lo tanto se usó un valor de 25,4 °C como temperatura básica de la roca. Este valor está basado en temperaturas promedio del aire medidas dentro de la mina.

7.4 Datos de los Ventiladores

Las curvas características de los ventiladores se registran ingresando hasta diez pares de puntos de datos de presión y caudal. Los ventiladores deben ser ingresados con una curva de al menos dos puntos para el programa MineFire. Puesto que MineFire asume un flujo compresible, no se recomienda el uso de ramales de inyección y extracción y ventiladores NVP, excepto donde sea absolutamente necesario balancear la red básica “inicial”. Los efectos de las energías de auto-compresión y ventilación son tomados en cuenta por MineFire sobre la base de los valores de temperatura, elevación y densidad.

8. Resultados

Los modelos de simulación de incendios son usados para reflejar la propagación de los humos en la mina durante el apogeo de un incendio y cuando el evento alcanza un estado estable. También se identifica la distribución de temperatura. El objetivo de la simulación es ver cómo reaccionará el sistema frente a las condiciones transitorias desarrolladas por el incendio.

La introducción del calor del incendio puede tener impactos significativos en el sistema de ventilación, que pueden dar lugar a inversiones del flujo de aire, niveles elevados de caudal, recirculación, y temperaturas elevadas.

La Figura A-6, identifica un área donde se produce la recirculación total o la inversión del circuito debido a un incendio en el taller de lubricación.

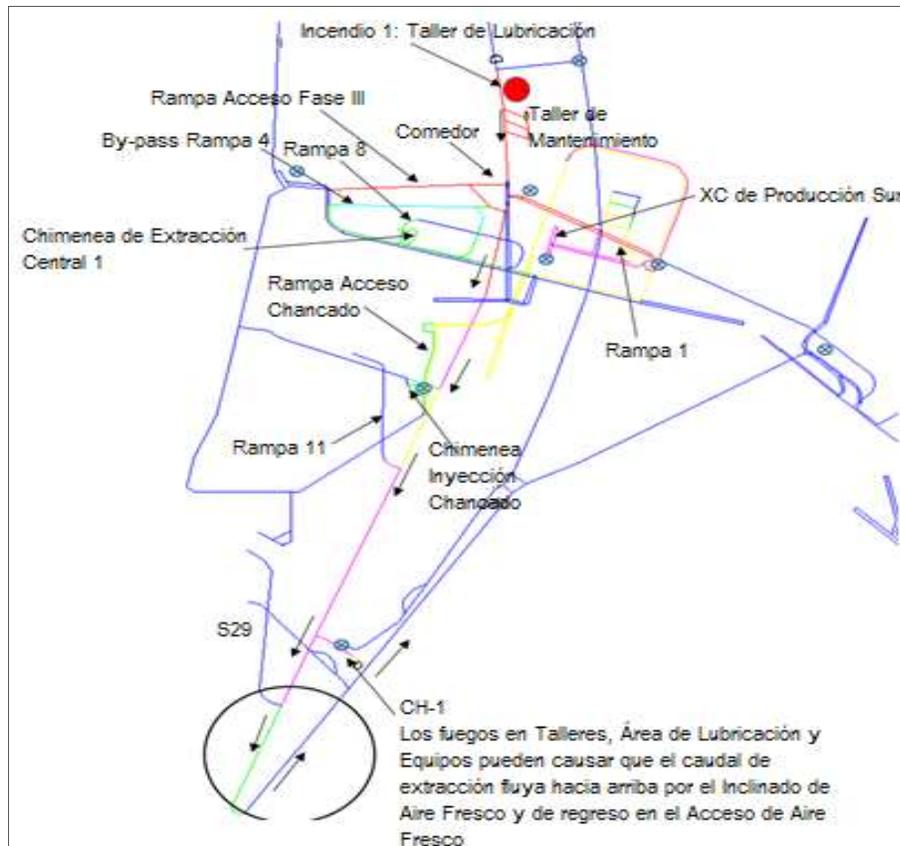


Figura A-6: Propagación de humo y gases, foco de incendio en Taller de Lubricación

9. Conclusiones

- Se debe implementar un sistema que permita el encendido y apagado de ventiladores auxiliares a distancia.
- Se debe inspeccionar y probar el refugio del comedor en forma periódica.
- Instalar puertas contra incendios para aislar frentes de humos y evitar la recirculación de estos.
- Actualizar el modelo de simulación de incendios y estudiar el comportamiento de los incendios simulados conforme avanza la construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea.

10. Recomendaciones

Sobre la base del desarrollo de los modelos de incendio y de la reacción del sistema de ventilación ante los incendios, fueron elaboradas las siguientes recomendaciones:

- Durante un incendio que ocurra en áreas con ventilación auxiliar, se deben detener sus ventiladores auxiliares, en la medida que sea posible. Con el propósito de evitar que los humos sean desplazados hacia las frentes en desarrollo.
- Inspeccionar y probar periódicamente el refugio del comedor para asegurar su funcionalidad. En la mayoría de los escenarios de incendio modelados, las galerías alrededor del comedor y del taller de mantenimiento experimentan concentraciones y permanencias significativas de humos.
- La instalación de seis 6 puertas contra incendios para aislar los frentes de humo y evitar su recirculación, como se muestra en las Figuras A-7 y A-8.



Figura A-7: Puertas para aislar avance de humo y gases para la situación actual

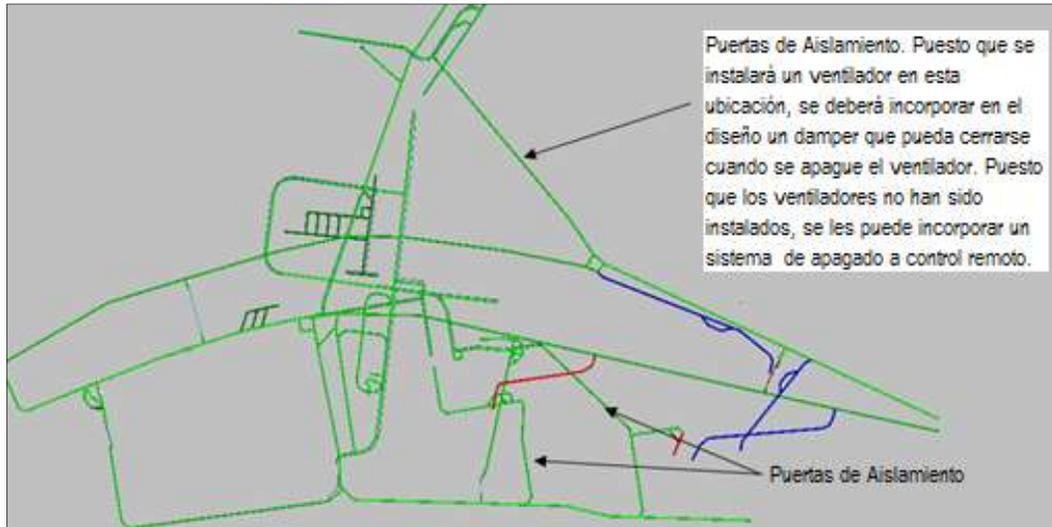


Figura A-8: Puertas de Aislamiento para fase siguiente del sistema de ventilación

- Los ventiladores principales deben permanecer encendidos durante un incendio, salvo algunas pocas excepciones críticas. Una vez que se apaga el sistema de ventilación, se pierde todo el control de la ventilación y con ello el direccionamiento del frente de humo. Es común que el caudal de aire se invierta a través del sistema y contamine más áreas de las que podría contaminar si los ventiladores permanecieran encendidos. Se examinaron varios modelos para demostrar ese fenómeno, y fueron identificados en la presentación final del estudio realizado.

ANEXO B: ARTÍCULO 2

“MODELAMIENTOS DE INCENDIO EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”

1. Introducción

La Mina Chuquicamata Subterránea actualmente se encuentra en etapa de construcción y dará inicio a la operación en el año 2019. Conforme avanza la construcción de la mina, se actualizan los modelos de ventilación y simulación de incendios.

La ocurrencia de un incendio en una mina subterránea es uno de los escenarios más complejos que podría generarse. Ningún peligro es más temible y cada mina subterránea debe estar preparada para eventos de esta naturaleza.

Es necesario hacer simulaciones de incendio para determinar con mejor precisión la propagación de humos y gases a través del sistema de ventilación. Con los resultados obtenidos es posible dimensionar el impacto de cada caso y lo más importante es que permite identificar las medidas de mitigación y control que deben ser implementadas.

Este artículo se basa en el modelado de incendio realizado por el autor en la primera mitad del año 2017, de donde se extrae en forma general la metodología para simular un escenario incendio y por ende se realizan recomendaciones generales aplicables para minería subterránea.

2. Metodología de Estudio

Metodología que se implementó en Chuquicamata para elaborar estudios de simulación de incendio en el año 2014. Dicha metodología está compuesta por varias etapas antes de tener un modelo que permita realizar las simulaciones de incendio, las que corresponden a:

- Levantamiento en terreno de ventilación.
- Actualización del modelo de ventilación existente.
- Calibración del modelo de ventilación.
- Análisis de riesgos.
- Desarrollo del modelo de simulación de incendios.
- Simulaciones de distintos escenarios de incendio.
- Medidas de mitigación y control.

Para estudiar la propagación de humos y gases en una mina subterránea, se requiere un modelo de simulación de incendios. Para ello debe elaborarse un modelo de ventilación preciso del sistema de ventilación de la mina.

Para desarrollar un modelo de ventilación, es necesario realizar un levantamiento de ventilación en terreno, donde se miden y cuantifican caudales de aire, pérdidas de presión por fricción de las galerías subterráneas, mediciones del punto de operación de todos los ventiladores, mediciones de caídas de presión en puertas, reguladores y tapados de ventilación.

Los resultados de estas mediciones se usan para determinar las resistencias de los ramales del modelo y la geometría de las galerías. Luego se correlaciona el modelo y se determina el valor de error existente entre el modelo de ventilación y los datos medidos en terreno. Se usa como criterio de aceptación un valor de error de correlación menor al 10%.

Se debe realizar un análisis de riesgos de incendio para determinar la probabilidad y la consecuencia de cada caso que tenga potencial de incendio, con la finalidad de seleccionar los escenarios a simular.

Se debe desarrollar un modelo de incendio considerando parámetros adicionales en los ramales para reflejar la interacción térmica entre las altas temperaturas propiciadas por el fuego y las paredes del macizo rocoso.

3. Estudio de Ventilación

El estudio de ventilación consideró determinar caudales de aire y distribuciones de presiones diferenciales.

Los caudales de aire se determinaron llevando a cabo lecturas en las secciones transversales de los conductos de aire usando un anemómetro de paletas que se muestra en la Figura B-1, o efectuando mediciones centrales con tubos de humo, y multiplicando los resultados por el área de dichas secciones. Se tomaron como mínimo, tres lecturas de velocidad en cada estación, las cuales fueron evaluadas para determinar su consistencia.

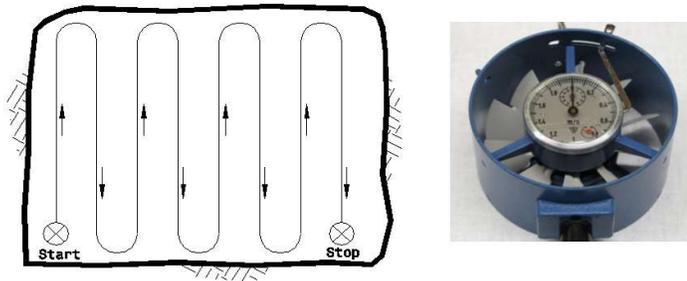


Figura B-1: Mediciones de velocidad del aire mediante la Traversa Continua

Las lecturas que se desvían en más de 10% una de otra, se repitieron las veces necesarias para eliminar dicha desviación. En sectores donde se conectan unas galerías con otras, se tomaron mediciones para asegurar el cumplimiento de la Primera Ley de Kirchhoff de los caudales (que dice que la suma de los caudales que ingresan en una unión debe ser igual a la suma de los caudales que salen de esa misma unión).

Los diferenciales de presión estática a través de tapados, puertas, y reguladores se midieron directamente usando un micro-manómetro digital conectado a una manguera cuyo diámetro es de $\frac{1}{4}$ de pulgada y su longitud en función de los espacios disponibles.

El método de medición con manómetro y manguera fue usado para medir las caídas de presión (total) friccional a lo largo de los conductos de aire de la mina donde el caudal de aire (total) fue suficiente para dar resultados significativos. Se emplearon mangueras de hasta 300 m de longitud.

Para cuantificar la presión de ventilación natural y el punto de operación del ventilador, se midió la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la presión barométrica en ubicaciones clave en la mina.

Donde fue posible, se realizaron lecturas de caída de presión de fricción en circuitos cerrados, y los datos fueron revisados para verificar el cumplimiento de la Segunda Ley de Kirchhoff (que dice que la suma algebraica de las caídas de presión friccional alrededor de cualquier circuito cerrado debe ser igual a cero, después de haber considerado los ventiladores y la Presión de Ventilación Natural).

4. Desarrollo del Modelo de Ventilación

El software usado para establecer el modelo de ventilación de las obras en construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea fue el Ventsim Visual - Versión Premium.

Al modelo de ventilación se ingresaron los siguientes datos:

- Características geométricas de las galerías de ventilación.
- Las resistencias de los ramales, determinadas a previamente con datos medidos en terreno.
- Las presiones medidas de los ventiladores.

El error de correlación del modelo es calculado dividiendo la suma de las diferencias absolutas entre el flujo predicho y el medido para cada ramal por el flujo total medido, como se muestra a continuación en la Ecuación B-1:

Ecuación B- 1: Ecuación de Correlación

$$\text{Correlación} = \frac{\sum |\text{Flujo Medido} - \text{Flujo Predicho}|}{\text{Flujo Total Medido}} \times 100\% \quad (\text{B-1})$$

Un error de correlación menor al 10% es el deseado para asegurar que el modelo es lo suficientemente preciso para servir como base de la planificación futura de la ventilación de la mina.

El modelo de ventilación actualizado para las obras en construcción de Mina Chuquicamata Subterránea tuvo un error de correlación de 5,8%. El factor que contribuyó con ese error, corresponde a las mediciones en sectores afectados por el tráfico de vehículos de acarreo de marinas y otros vehículos de envergadura parecida.

El modelo de ventilación desarrollado representa en forma adecuada el sistema de ventilación al momento de realizar la campaña de mediciones y está representado en la Figura B-2

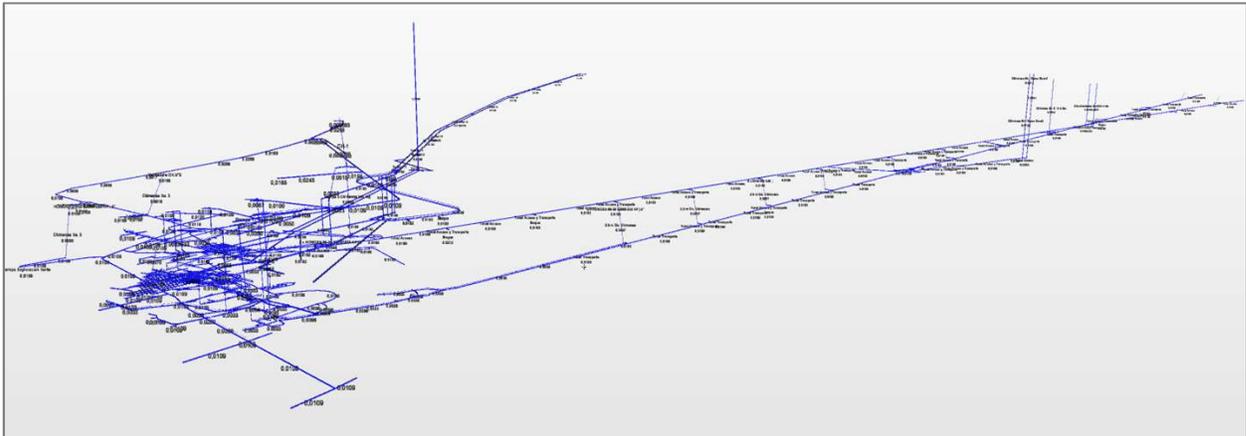


Figura B-2: Modelo de ventilación para mina Chuquicamata Subterránea

4.1 Diferenciales de Presión por Fricción

Los diferenciales de presión existentes en el modelo fueron medidos en lugares accesibles en donde las cantidades de flujo de aire fueron suficientes para producir diferencias de presión por fricción significativas. Los diferenciales de presión por fricción medidos en reguladores, tapados también fueron ingresados al modelo de ventilación.

4.2 Mediciones de las Propiedades Psicrométricas

Las mediciones de presión barométrica, temperatura de bulbo seco y humedad relativa fueron tomadas en varios lugares de la mina. Información usada para calcular la densidad del aire, evaluación de la presión de ventilación natural, expansión del aire y para ubicar los puntos de operación de los ventiladores en sus respectivas curvas.

4.3 Medición de Ventiladores

Las mediciones de presión en ventiladores corresponden a presiones totales, las cuales están dadas a la densidad de aire promedio de la mina, y se muestran en la Tabla B-1.

Tabla B-1: Resultados de mediciones en ventiladores

Ubicación/Descripción	Marca/Modelo del Ventilador	Cantidad	Caudal Total [m ³ /s]	Presión Total Medida [Pa]
Rampa 5 / VIA 1.1 y 1.2	AFSO 13 1400 2396	2 en paralelo	326	1.952
Chimenea 3	Howden 66-30 S2000 FB 125	2 en paralelo	91	844
Chimenea 5	Howden 66-30 S2000 FB 250	1	81	1.533
E-37 Chimenea Inyección Chancado	Howden 66-30 S2000 FB 250	2 en paralelo	145	502
Rampa Fase 3	SYSTEM AIR 200	1	83,8	235
Chimenea 122	Alphair 84 VAX 3150	2 en paralelo	210	985
Galería extracción Inferior	AFSO 11 1200 2440	2 en paralelo	351	1.360
Chimenea Extracción Central	AFSO 11 1500 3136	1	328	484
Chimeneas 2-1	Howden 66-30 S2000 FB	2 en paralelo	116	1.225
Chimenea GE-10	Howden 66-30 S2000 FB 250	2 en paralelo	130	955

4.4 Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire

Para las galerías donde se midió diferencial de presión por fricción y caudal de aire, se utilizó la Ley Cuadrática para calcular la resistencia al flujo (McPherson, 2009), representado en este texto por la Ecuación B-2.

Ecuación B-2: Ley Cuadrática

$$R = \frac{P}{Q^2} \quad (\text{B-2})$$

Donde:

R = Resistencia (Ns²/m⁸)

p = Caída de presión friccional (Pa)

Q = Caudal de aire (m³/s)

El modelo de ventilación se muestra en la Figura B-2, actualizado con el avance de los desarrollos mineros realizados en la fecha de este estudio.

Para las galerías subterráneas donde no estuvieron disponibles los datos de diferenciales de presión por fricción, se calculó la resistencia de los ramales usando la ecuación de Atkinson, (McPherson, 2009) Representado en este texto por la Ecuación B-3.

Ecuación B-3: Ecuación de Atkinson

$$R = \frac{k(L + L_{eq})per}{A^3} \quad (B-3)$$

Donde:

- K = factor de fricción (kg/m³)
- L = longitud del conducto de aire (m)
- Leq = longitud equivalente de pérdida por choque (m)
- Per = perímetro del flujo (m)
- A = área de la sección transversal (m²)

Varios valores de resistencia fueron calculados incluyendo los factores k y las resistencias de la infraestructura para la Mina Chuquicamata Subterránea a partir de los datos medidos en terreno, como se muestra en la Tabla B-2.

Tabla B-2: Factores de Fricción obtenidos con mediciones de terreno

Ítem	Ubicación/Descripción	Factor k (kg/m ³)*
1	Rampas principales en Sector OIM	0,0109
2	Chimenea N°1 sector OIM	0,008
3	Chimenea Inyección Chancado sector OIM	0,0048
4	Chimenea Sur 2 sector OIM	0,0046
5	Túnel Acceso Principal (TAP)	0,0088
6	Chimenea 1 sector TAP	0,0065
7	Chimenea 2 sector TAP	0,0028
8	Chimenea 3 sector TTP	0,0044
9	Túnel de Inyección 11	0,0091

* valores basados en una densidad de aire de mina promedio de 0.908 kg/m³

5. Identificación de Escenarios de Incendio a Simular

Para simular potenciales escenarios de incendio, se utilizó la herramienta de Identificación de Peligro y Evaluación de Riesgos (IPER) utilizada en el la gestión de seguridad de la empresa.

Los vehículos mineros están equipados con sistemas de extinción de incendios y aunque la probabilidad de ocurrencia es baja, a modo de ejemplo para este documento se realizó una simulación de incendio en un camión destinado al acarreo de marinas para estudiar cómo afectaría al sistema de ventilación. La ubicación del escenario de incendio supuesto se muestra en Figura B-3.

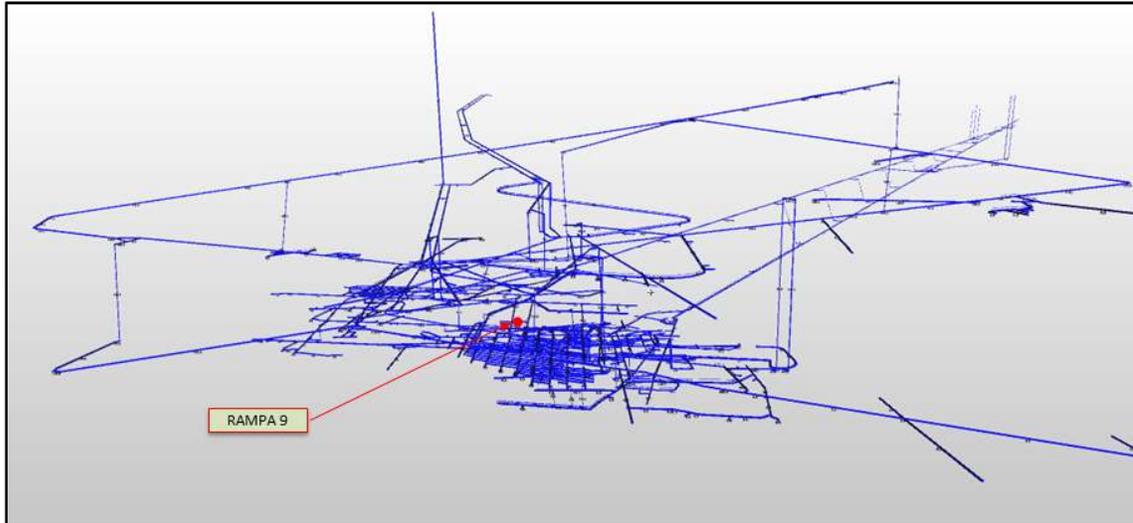


Figura B-3: Ubicación de foco de incendio a simular

6. Desarrollo del Modelo de Incendio

La simulación de incendio se efectuó con el módulo VentFIRE del software Ventsim Visual - Versión Premium, herramienta computacional que utiliza técnicas de simulación dinámicas para modelar de manera simultánea calor, gas y cambios de caudal en un ambiente de ventilación minera durante un período de tiempo.

Además permite que el modelo sea dinámico durante el proceso de simulación, es decir abrir o cerrar puertas, encender o detener ventiladores en el momento en que el usuario defina.

Las simulaciones en VentFIRE permiten:

- Calcular los gases, la temperatura y el cambio en los caudales (y si es que éstos se invierten) por efectos de un incendio.
- Mostrar las concentraciones de los gases en el ambiente por efectos de la combustión en varios puntos de la mina.
- Estudiar el comportamiento de humo y gases al cerrar algunas puertas o detener algunos ventiladores mientras simula un escenario de incendio.

VentFIRE utiliza un método discreto de mezcla de nodos y sub unidades de transporte para simular las porciones de calor y gas que se mueven a través de la mina.

Para modelar de manera dinámica la ventilación en una mina y tomar en cuenta los cambios continuos en las concentraciones de gases y calor atmosférico, incluyendo recirculación, VentFIRE divide el modelo en pequeñas “celdas” independientes que se mueven libremente a través del mismo, mezclándose con otras celdas en las uniones.

Las celdas se mueven en diferentes direcciones y sus velocidades se calculan en base a la simulación global de caudal (Una Simulación Hardy Cross basada en caudales compresibles y en densidades producto de la ventilación natural).

Se realiza una simulación de aire periódicamente (el período lo configura el usuario), para recalcular las cantidades de flujo y las direcciones de los mismos en el modelo. Las presiones de ventilación natural del conducto se modifican cada vez, mediante la recolección de la densidad total de aire de las celdas al interior

del conducto. En algunos casos, esto puede cambiar la dirección y velocidad del flujo de aire dentro del modelo.

6.1 Dinámica del Incendio

Se refiere a las propiedades físicas del incendio, tipo de combustible, cantidad, relación de equivalencia, duración de la combustión, liberación de calor y limitaciones físicas.

Todos estos parámetros pueden (y lo hacen) cambiar con el tiempo, lo que lleva a una variedad de efectos complejos e interacciones para cada escenario de incendio subterráneo.

6.2 La propagación y el comportamiento del incendio

La propagación y comportamiento de un incendio dependen de:

- Tipo y cantidad de combustible
- Ubicación del incendio
- Duración del incendio
- Suministro de aire (ventilación)
- Propiedades físicas (geometría y ubicaciones) del ambiente del incendio.

Los incendios generan grandes cantidades de energía térmica, cambiando las densidades y las interacciones de los gases que se mueven sobre el incendio. Esto lleva a varios efectos dinámicos en el sistema de ventilación de la mina durante un evento de incendio.

La tasa de liberación de calor es la cantidad de calor generado por el fuego a lo largo del tiempo (J/s) o vatios (W). Se rige principalmente por la cantidad de oxígeno que llega al incendio en un momento dado, (Brake, 2013).

6.3 El ciclo de vida del incendio

Ciclo de vida de un incendio tiene tres etapas que se describen a continuación:

- **Iniciación:** durante esta fase el fuego inicia y luego crece a una condición máxima de estado estable.
- **Intensidad máxima:** el fuego alcanza su máxima intensidad, gobernado por el tipo y cantidad de combustible disponible y a su vez por la cantidad de oxígeno que exista.
- **Decaimiento:** La intensidad del fuego disminuye a medida que se consume el combustible.

6.4 Ejemplo de equipo minero.

Bajo el supuesto de que un camión utilizado para el transporte de minas se quemara, se debe analizar la cantidad de elementos combustibles que posee dicho equipo. Se definen cantidades de combustibles que se quemaran para cada etapa indicada en el ciclo de vida de un incendio. Este equipo minero posee 960 L de combustible diésel, 650 L de aceite y 4 neumáticos.

Tabla B-3: Elementos combustibles de un equipo minero.

Materiales combustibles Camion Marinas	Unidad	cantidad
Aceite Motor Cártter con filtro	Lts	64
Aceite Sistema de Transmisión	Lts	53
Aceite hidráulico	Lts	258
Aceite Diferenciales frontales y unidades finales	Lts	138
Aceite Diferencial trasero y Discos finales	Lts	138
Depósito de combustible (diesel)	Lts	960
Neumaticos 35x65 R33	unit	4

En este ejemplo se simuló como si fuese el caso más desfavorable, es decir que el sistema de extinción del vehículo no se activó o bien que se activó y no logró extinguir el fuego y que como consecuencia de ello el vehículo se quemó en su totalidad, considerando un periodo de 4 horas de duración del incendio.

Se consideró que la etapa inicial del fuego es de 10 minutos, la etapa de intensidad máxima del fuego se extendió por casi 2 horas y que la etapa de decaimiento del fuego se extendió por otras 2 horas.

Tabla B-4: Tasa de consumo de combustible

Materiales combustibles	Tipo de Combustible	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)
1	Petróleo	768	15%
2	Neumáticos	3.800	75%
3	Aceite	520	10%
		5088	100%

Tiempo (Segundos)	0	600	7.200	14.400
Velocidad de combustión (kg/hr)	0	1.744,5	1.744,5	0
Combustible Quemado (kg)	0	145	3198	1744,5

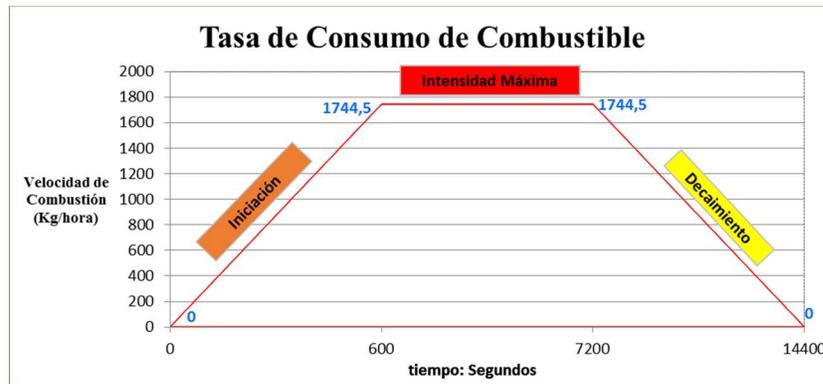


Figura B-4: Representación gráfica de la tasa de consumo de combustible

6.5 Conductividad

Esta variable corresponde a la conductividad térmica de la roca para el macizo rocoso. El valor es usado por el programa para definir la difusión térmica hacia o desde el aire a medida que viaja a través de una galería de ventilación. Esto afectará los caudales de aire en la mina. El valor global utilizado para el macizo rocoso en este modelamiento de incendios es $3,5 \text{ W/m}\times^{\circ}\text{C}$, de acuerdo a la información de mina Chuquicamata.

6.6 Difusividad

La difusividad de la roca se obtiene a partir de pruebas de laboratorio en testigos de roca. Define cuán rápido se mueve el calor en el límite entre la roca y el aire cuando éste pasa a través de un ramal. Para este modelo, se utilizó un valor global de $1.6 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$, de acuerdo a la información existente de mina Chuquicamata.

6.7 Temperatura de la Roca

La variable Temperatura de la Roca usa la temperatura promedio de la roca para un ramal dado. Las muestras pueden tomarse en varios puntos clave de la mina o se puede usar el gradiente geotérmico para determinar la temperatura promedio de la roca a cierta elevación. Debemos considerar que el gradiente geotérmico podría no proveer resultados completamente precisos para laboreos antiguos donde la roca ha envejecido y el perfil de temperaturas ha cambiado. Se utilizó un valor de $25,4^{\circ}\text{C}$ como temperatura básica de la roca. Este valor está basado en temperaturas promedio del aire medidas dentro de la mina.

7. Resultados

Los circuitos de ventilación de las rutas de marinas fueron diseñados con aire saliendo a superficie en las etapas de ingeniería del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, con el propósito de asegurar la evacuación de humos y gases a superficie en caso de alguna ocurrencia de incendio, que se puede ver en Figura B-5 y Figura B-6.

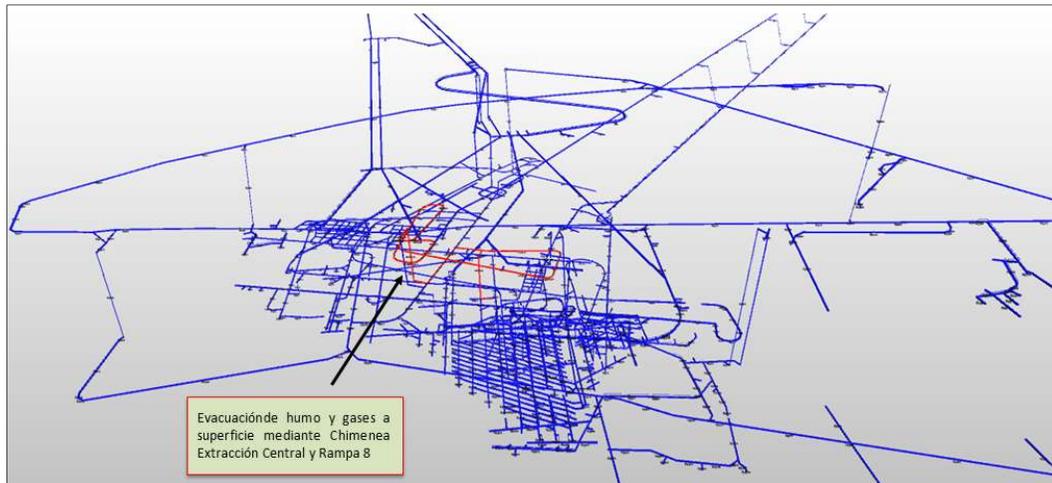


Figura B-5: Foco de incendio simulado para Rampa 9

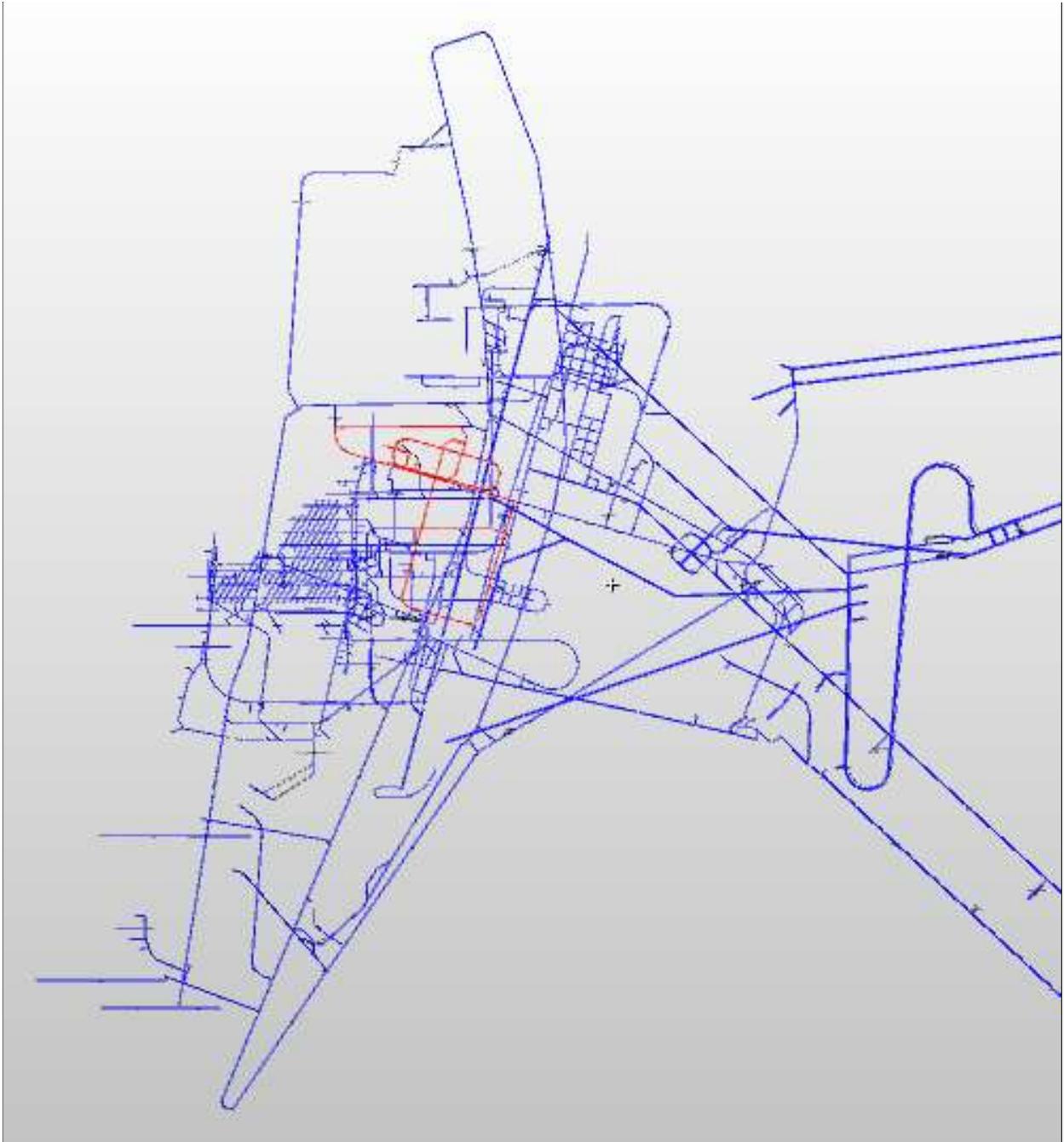


Figura B-6: Foco de incendio simulado en Rampa 9

8. Conclusiones

La configuración de los circuitos de ventilación para rutas de extracción de marinas permite la evacuación directa de humos y gases a superficie frente a una emergencia de incendio. Lo cual es favorable porque no contaminan otras zonas.

En la medida que crece una mina subterránea, es absolutamente necesario actualizar el modelo de ventilación y el modelo para simulación de incendios, con esto se pueden implementar medidas de mitigación y control para ocurrencia de incendio.

9. Recomendaciones

Asegurar que los flujos de aire para rutas de marinas y otras galerías que conectan con superficie, siempre estén direccionados hacia superficie.

Mantener actualizado el modelo de simulación de incendios de una mina subterránea.

Mantener actualizados los planes de evacuación para emergencias de incendio.

Inspeccionar y mantener operativos los sistemas de extinción de incendio en vehículos mineros y lugares fijos como subestaciones eléctricas, talleres, etc.

Asegurar el mantenimiento preventivo de puertas contra incendio, puertas de aislación, puertas de ventilación, sensores de temperaturas y gases distribuidos en la mina.

10. Referencias

- **INGENIERÍA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA**, McPherson, M.J. 2009, Publicado por Mine Ventilation Services, Inc., 824 pp.
- **CONDUCIENDO UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIOS**, Prosser, B. y Ruckman, R., 2010," 13er Simposio de Ventilación de Minas en E.U.A., 365-370 pp.
- **USE OF LIVE SENSOR DATA IN TRANSIENT SIMULATIONS OF MINE VENTILATION MODELS**, Craig M Stewart, Saïied M. Aminossadati, Mehmet S. Kizil, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia 2015.
- **UNDERGROUND FIRE ROLLBACK SIMULATION IN LARGE SCALE VENTILATION MODELS**, Craig M Stewart. saïied M. Aminossadati, Mehmet s. kizil. The University of Queensland, Brisbane, Australia, Chasm consulting, Brisbane Australia, 2015.
- **FULL-SCALE FIRE EXPERIMENTS WITH MINING VEHICLES IN AN UNDERGROUND MINE**, Rickard Hansen & Haukur Ingason, Mälardalen University, Studies in Sustainable Technology, 2013.
- **FIRE MODELLING IN UNDERGROUND MINES USING VENTSIM VISUAL VENTFIRE SOFTWARE**, DJ Brake, The Australian Mine Ventilation Conference/Adelaide, Sa, 1 - 3 July 2013.
- **DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**, Brian Prosser, Mine Ventilation Services – SRK, Sergio Valencia, Codelco-Chuquicamata, UMining2016, 19 -21 Octubre 2016.

ANEXO C: ARTÍCULO 3

“MODELAMIENTOS DE INCENDIOS ETAPA DE INICIO DE OPERACIÓN MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”

1. Introducción

En mina Chuquicamata Subterránea se pondrá en funcionamiento el sistema de ventilación principal en diciembre del año 2018.

El trabajo descrito en este documento toma como base el modelo de ventilación actualizado y calibrado con información de terreno correspondiente a junio del año 2018.

Para confeccionar el modelo de ventilación que representará la condición correspondiente a diciembre 2018, se incorporaron al modelo base las obras proyectadas, ventiladores, puertas para el sistema de ventilación correspondiente a esa fecha.

Las simulaciones de incendio permiten determinar, con mejor precisión, la propagación de humos y gases a través del sistema de ventilación. Con estos resultados es posible dimensionar el impacto de cada potencial foco de incendio y lo más importante es que permite elaborar las medidas de mitigación y control que deben ser implementadas, en cada caso.

Este artículo muestra la metodología implementada en el PMCHS para simular incendios con herramientas computacionales y en forma general describe un ejemplo de simulación de incendios que considera recomendaciones generales aplicables en minería subterránea.

2. Metodología de Estudio

Metodología implementada en Chuquicamata en el año 2014, para elaborar estudios de simulación de incendios, se estructura de la siguiente forma:

- a) Levantamiento en terreno del sistema de ventilación.
- b) Confección y/o actualización de un modelo de ventilación para las obras existentes.
- c) Calibración del modelo de ventilación.
- d) Análisis de riesgos.
- e) Desarrollo de un modelo de simulación de incendios.
- f) Simulaciones de potenciales focos de incendio.
- g) Medidas de mitigación y control.

Para estudiar la propagación de humos y gases en una mina subterránea, se requiere un modelo de simulación de incendios, el cual se confecciona con un modelo de ventilación que represente en forma precisa el sistema de ventilación de dicha mina.

Para desarrollar un modelo de ventilación, es necesario realizar un levantamiento de ventilación en terreno, donde se miden y cuantifican caudales de aire, pérdidas de presión por fricción de las galerías subterráneas, mediciones de puntos de operación de la totalidad de los ventiladores, mediciones de caídas de presión en puertas, reguladores y tapados de ventilación.

Los resultados de estas mediciones se usan para determinar las resistencias de los ramales del modelo y la geometría de las galerías. Luego se correlaciona el modelo y se determina el valor de error existente entre el modelo de ventilación y los datos medidos en terreno. Se usa como criterio de aceptación un valor de error de correlación menor al 10%.

Se debe realizar un análisis de riesgos de incendio para determinar la probabilidad y la consecuencia de cada caso que tenga potencial de incendio, con la finalidad de seleccionar los escenarios a simular.

Se debe desarrollar un modelo de incendio considerando parámetros adicionales en los ramales para reflejar la interacción térmica entre las altas temperaturas propiciadas por el fuego y las paredes del macizo rocoso.

3. Estudio de Ventilación

El estudio de ventilación consideró determinar caudales de aire y distribuciones de presiones diferenciales.

Los caudales de aire se determinaron llevando a cabo lecturas en las secciones transversales de los conductos de aire usando un anemómetro de paletas que se muestra en la Figura 4.3.1, efectuando mediciones centrales de velocidad del aire, o con tubos de humo, y multiplicando los resultados por el área de dichas secciones. Se registraron como mínimo, tres lecturas de velocidad en cada punto de medición, las cuales fueron evaluadas para determinar su consistencia.

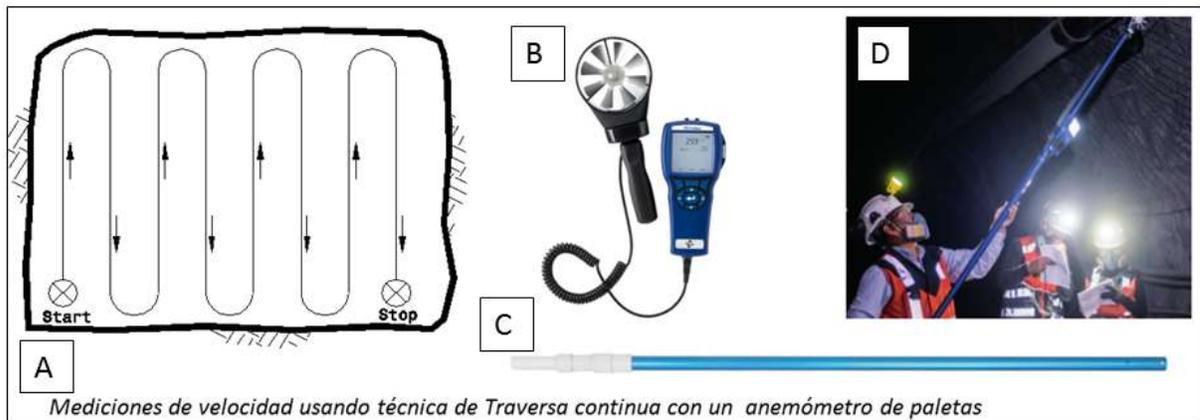


Figura C-1: Mediciones de velocidad mediante la Traversa Continua

A) Trayectoria de un anemómetro en la travesa continua (McPherson, 2009) / B) Anemómetro de paletas utilizado para medir velocidad / C) Barra de aluminio extensible utilizada para sostener el anemómetro / D) Medición de velocidad realizada en PMCHS.

Las lecturas que se desvían en más de un 5% una de otra, se deben repetir las veces que sea necesario para eliminar dicha desviación. En sectores donde se conectan unas galerías con otras, se deben tomar mediciones para asegurar el cumplimiento de la Primera Ley de Kirchhoff de los caudales, que indica que la suma de los caudales que ingresan en una unión debe ser igual a la suma de los caudales que salen de esa misma unión.

Los diferenciales de presión estática a través de tapados, puertas, y reguladores se midieron directamente usando un micro-manómetro digital conectado a una manguera cuyo diámetro es de ¼ de pulgada y su longitud en función de los espacios disponibles.

El método de medición con manómetro y manguera fue usado para medir las caídas de presión (total) friccional a lo largo de los conductos de aire de la mina donde el caudal de aire (total) fue suficiente para dar resultados significativos. Se emplearon mangueras de hasta 300 m de longitud.

Para cuantificar la presión de ventilación natural y el punto de operación del ventilador, se midió la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la presión barométrica en ubicaciones clave en la mina.

Donde fue posible, se realizaron lecturas de caída de presión de fricción en circuitos cerrados, y los datos fueron revisados para verificar el cumplimiento de la Segunda Ley de Kirchhoff, que indica que la suma algebraica de las caídas de presión friccional alrededor de cualquier circuito cerrado debe ser igual a cero, después de haber considerado los ventiladores y la Presión de Ventilación Natural.

4. Desarrollo del Modelo de Ventilación

El software usado para establecer el modelo de ventilación de las obras en construcción de la Mina Chuquicamata Subterránea fue Ventsim Visual - Versión Premium.

Al modelo de ventilación se ingresaron los siguientes datos:

- Características geométricas de las galerías de ventilación.
- Las resistencias de los ramales, determinadas a previamente con datos medidos en terreno.
- Las presiones medidas de los ventiladores.

El error de correlación del modelo es calculado dividiendo la suma de las diferencias absolutas entre el flujo predicho y el medido para cada ramal por el flujo total medido, como se muestra a continuación en la ecuación C-1.

Ecuación C-1: Ecuación de Correlación

$$\text{Correlación} = \frac{\sum |\text{Flujo Medido} - \text{Flujo Predicho}|}{\text{Flujo Total Medido}} \times 100\% \quad (\text{C-1})$$

Un error de correlación menor al 10% es el deseado para asegurar que el modelo es lo suficientemente preciso para servir como base de la planificación futura de la ventilación de la mina.

El modelo de ventilación actualizado para las obras en construcción de Mina Chuquicamata Subterránea tuvo un error de correlación de 7,4 %. El factor que contribuyó con ese error, corresponde a las mediciones en sectores afectados por el tráfico de vehículos destinados al acarreo de marinas.

El modelo de ventilación desarrollado representa en forma adecuada el sistema de ventilación al momento de realizar la campaña de mediciones y está representado en la Figura C-2

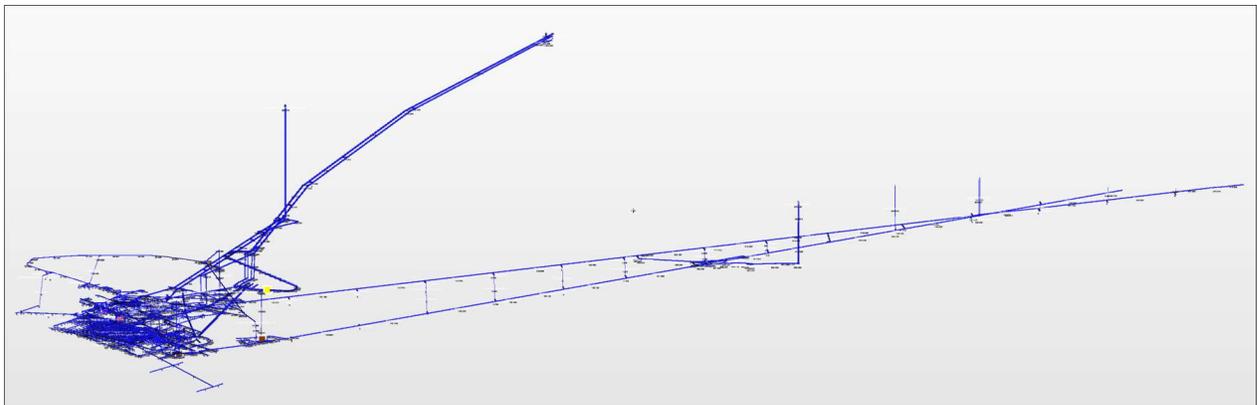


Figura C-2: Modelo de Ventilación para Mina Chuquicamata Subterránea

4.1 Diferenciales de Presión por Fricción

Los diferenciales de presión existentes en el modelo fueron medidos donde las cantidades de flujo de aire fueron suficientes para producir diferencias de presión por fricción significativas. Los diferenciales de presión por fricción medidos en reguladores y tapados de ventilación, también fueron ingresados al modelo de ventilación.

4.2 Mediciones de las Propiedades Psicrométricas

Las mediciones de presión barométrica, temperatura de bulbo seco y humedad relativa fueron tomadas en las estaciones de aforo de ventilación distribuidas en la mina. Información usada para calcular la densidad del aire, evaluación de la presión de ventilación natural, expansión del aire y para ubicar los puntos de operación de los ventiladores en sus respectivas curvas.

4.3 Medición de Ventiladores

Las mediciones de presión en ventiladores corresponden a presiones totales, las cuales están dadas a la densidad de aire promedio de la mina, y se muestran en la Tabla C-1

Tabla C-1: Resultados de mediciones de ventiladores

VENTILADOR	TIPO	CAUDAL [cfm]	Presión [pulg. H ₂ O]
VIA 6.1/6.2	Inyector	754.266	4,3
VEA 1.1/1.2	Extractor	865.481	2,2
VIA 2.1	Inyector	205.139	3
VIA 3.1	Inyector	606.303	3
CH-5	Inyector	80.318	4,3
CH-3	Inyector	276.344	3,9
CH-122	Inyector	493.350	1,2
VIA 101	Inyector	350.092	1,4
VIA 102	Inyector	466.224	1,3
VEA 102/103	Extractor	1.115.928	2,9
V1221/V1222	Inyector	1.535.148	4,2
VEA 3.1	Extractor	987.759	1

4.4 Cálculo de las Resistencias de los Conductos de Aire

Para las galerías donde se midió diferencial de presión por fricción y caudal de aire, se utilizó la Ley Cuadrática para calcular la resistencia al flujo, (McPherson, 2009), Representado en este texto por la ecuación C-2.

Ecuación C- 2: Ley Cuadrática

$$R = \frac{p}{Q^2} \quad (C-2)$$

Donde:

R = Resistencia (Ns²/m⁸)

p = Caída de presión friccional (Pa)

Q = Caudal de aire (m³/s)

El modelo de ventilación se muestra en la Figura C-2, actualizado con el avance de los desarrollos mineros realizados en la fecha de este estudio.

Para las galerías subterráneas donde no estuvieron disponibles los datos de diferenciales de presión por fricción, se calculó la resistencia de los ramales usando la ecuación de Atkinson, (McPherson, 2009). Representado en este texto por la ecuación C-3.

Ecuación C-3: Ecuación de Atkinson

$$R = \frac{k(L + L_{eq})per}{A^3} \quad (C-3)$$

Donde:

- K = factor de fricción (kg/m³)
- L = longitud del conducto de aire (m)
- Leq = longitud equivalente de pérdida por choque (m)
- Per = perímetro del flujo (m)
- A = área de la sección transversal (m²)

Varios valores de resistencia fueron calculados incluyendo los factores k y las resistencias de la infraestructura para la Mina Chuquicamata Subterránea a partir de los datos medidos en terreno, como se muestra en la Tabla C-2.

Tabla C-2: Factores de Fricción medidos en terreno

ítem	GALERIAS SUBTERRANEAS	SECCIÓN [ancho x alto]	AREA [m ²]	PERÍMETRO [m]	FACTOR K* [kg/m ³]
1	Galerías Rampa Exploración SSPP	5.9 x 5.7	31,5	20.6	0.0109
2	Rampa Drenaje	5.9 x 5.8	32,5	20.7	0.0120
3	Chimenea 1	2.4 Ø	4,5	7,5	0.0008
4	Chimenea Inyección Chancado	4.0 Ø	12,6	12,6	0.0048
5	Chimenea Sur 2	4.0 Ø	12,6	12,6	0.0046
6	Transporte y Acceso Túnel	9.1 x 6.3	48.7	27.0	0.0088
7	Chimenea 1 Túnel Acceso	4.0 Ø	12,6	12,6	0.0065
8	Chimenea 2 Túnel Acceso	4.0 Ø	12,6	12,6	0.0028
9	Chimenea 3 Túnel Transporte	4.0 Ø	12,6	12,6	0.0044
10	Túnel 11	10.5 x 7.6	74.2	33.6	0.0091
11	Túnel 12	11.2 x 9.1	95,6	35.7	0.0087
12	Rampa SNV	5.8 x 5.4	29.4	19.7	0.0093
13	Rampa SNV Norte	5.4 x 5.9	29.9	19.9	0.0093
14	Correa Nivel 1	9.1 x 6.3	53.7	27.1	0.0094

* valores basados en una densidad de aire de mina promedio de 0.908 kg/m³

5. Incendios en Minas Subterráneas

El modelamiento de incendios en minas subterráneas requiere una comprensión de la química del incendio, de la dinámica del incendio y de un software para realizar un modelamiento termodinámico.

La química del fuego se relaciona con la cantidad de calor y gases producidos por el fuego. Mientras que la dinámica del fuego se relaciona con las etapas de crecimiento y decaimiento del fuego y la tasa de liberación de calor (HRR).

Los incendios producen grandes cantidades de gases, muy caliente y de muy baja densidad. Esto resulta en cuatro efectos principales en el sistema de ventilación de una mina subterránea.

- Un efecto de estrangulamiento causado por el aumento de volumen del aire que pasa a través de la zona de fuego que da como resultado velocidades del viento más altas a favor del viento y, por lo tanto, mayores pérdidas de presión por fricción.
- Efecto de ventilación natural causada por la mayor flotabilidad del "aire" a sotavento del fuego que da lugar a presiones de ventilación natural muy grandes y potencialmente inestables en el sistema de ventilación.
- Inversión del flujo: se han experimentado en la práctica y también se han demostrado teóricamente a través del modelamiento de incendio.
- Rollback o Inversión localizada de la dirección del flujo de aire por encima de un incendio, generalmente caracterizada por el humo cerca del techo de la galería que se mueve hacia atrás contra el flujo general de aire sobre el fuego. Esto es principalmente un problema de convección con los gases calientes de baja densidad producidos por el fuego que sube y se expande por encima del fuego.

La intensidad de un incendio (tasa de liberación de calor, HRR) está determinada en gran medida por la velocidad a la que el aire (oxígeno) puede alcanzar el fuego y el área de superficie y el tipo de combustible disponible para quemar. Dentro de los límites, si llega más aire al fuego, la intensidad del fuego aumenta.

Los incendios que involucren equipos diésel producirán gases al quemar elementos hidrocarburos y también a partir de cualquier componente de plástico o caucho que pueda calentarse.

- Monóxido de carbono
- Dióxido de carbono
- Dióxido de azufre
- Óxido de nitrógeno
- Hidrógeno
- Sulfuro de hidrógeno

6. Foco de incendio a Simular

Para simular potenciales escenarios de incendio, se utilizó la herramienta de Identificación de Peligro y Evaluación de Riesgos (IPER) utilizada por el área de SSO del PMCHS.

Los vehículos mineros están equipados con sistemas de extinción de incendios y aunque la probabilidad de ocurrencia es baja, a modo de ejemplo para este documento se realizó una simulación de incendio en un camión destinado al acarreo de marinas para estudiar cómo afectaría al sistema de ventilación. La ubicación de foco de incendio supuesto se muestra en Figura C-3.

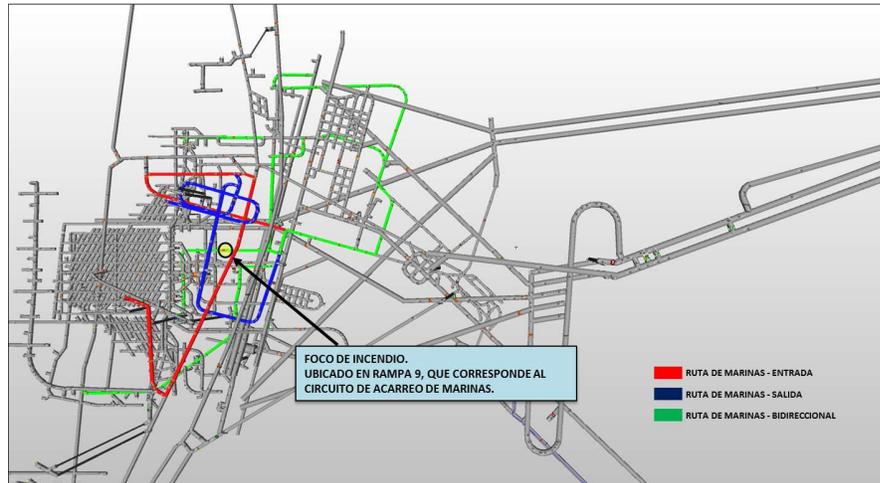


Figura C-3: Ubicación Foco de Incendio a simular

7. Desarrollo del Modelo de Incendio

La simulación de incendio se efectuó con el módulo VentFire™ del software Ventsim™ - versión Premium. Herramienta computacional para el modelamiento de incendios que utiliza técnicas de simulación dinámicas para modelar de manera simultánea calor, gas y cambios de caudal en un ambiente de ventilación minera durante un período de tiempo.

Además permite que el modelo sea dinámico durante el proceso de simulación, es decir abrir o cerrar puertas, activar o detener funcionamiento de ventiladores en el momento en que el usuario defina.

Las simulaciones en VentFire™ permiten:

- Calcular los gases, la temperatura y el cambio en los caudales (y si es que éstos se invierten) por efectos de un incendio.
- Mostrar las concentraciones los gases en el ambiente por efectos de la combustión en varios puntos de la mina.
- Estudiar el comportamiento de humo y gases al cerrar algunas puertas o detener algunos ventiladores mientras simula un escenario de incendio.

VentFIRE™ utiliza un método discreto de mezcla de nodos y subunidades de transporte para simular las porciones de calor y gas que se mueven a través de la mina.

Para modelar de manera dinámica la ventilación en una mina y tomar en cuenta los cambios continuos en las concentraciones de gases y calor atmosférico, incluyendo recirculación, VentFIRE™ divide el modelo en pequeñas “celdas” independientes que se mueven libremente a través del mismo, mezclándolas con otras celdas en las uniones.

Se realiza una simulación de aire periódicamente, para recalculer las cantidades de flujo y las direcciones de los mismos en el modelo. Las presiones de ventilación natural del conducto se modifican cada vez, mediante la recolección de la densidad total de aire de las celdas al interior del conducto. En algunos casos, esto puede cambiar la dirección y velocidad del flujo de aire dentro del modelo.

7.1 Dinámica del Incendio

Se refiere a las propiedades físicas del incendio, tipo de combustible, cantidad, relación de equivalencia, duración de la combustión, liberación de calor y limitaciones físicas.

Todos estos parámetros pueden (y lo hacen) cambiar con el tiempo, lo que lleva a una variedad de efectos complejos e interacciones para cada escenario de incendio subterráneo.

7.2 La propagación y el comportamiento del incendio

La propagación y comportamiento de un incendio dependen de:

- Tipo y cantidad de combustible
- Ubicación del incendio
- Duración del incendio
- Suministro de aire (ventilación)
- Propiedades físicas (geometría y ubicaciones) del ambiente del incendio.

Los incendios generan grandes cantidades de energía térmica, cambiando las densidades y las interacciones de los gases que se mueven sobre el incendio. Esto lleva a varios efectos dinámicos en el sistema de ventilación de la mina durante un evento de incendio.

La tasa de liberación de calor es la cantidad de calor generado por el fuego a lo largo del tiempo (J /s) o vatios (W). Se rige principalmente por la cantidad de oxígeno que llega al incendio en un momento dado, (Brake, 2013).

7.3 El ciclo de vida del incendio

Ciclo de vida de un incendio tiene tres etapas que se describen a continuación:

- **Iniciación:** Durante esta fase el fuego inicia y luego crece a una condición máxima de estado estable.
- **Intensidad máxima:** El fuego alcanza su máxima intensidad, gobernado por el tipo y cantidad de combustible disponible y a su vez por la cantidad de oxígeno que exista.
- **Decaimiento:** La intensidad del fuego disminuye a medida que se consume el combustible.

7.4 Ejemplo de incendio en equipo minero

Bajo el supuesto de que un camión utilizado para el transporte de minas se quema, se analiza la cantidad de elementos combustibles que posee dicho equipo. Se definen cantidades de combustibles que se quemaran para cada etapa indicada en el ciclo de vida de un incendio. Este equipo minero posee 960 L de combustible diésel, 650 L de aceite y 4 neumáticos.

Tabla C-3: Elementos Combustibles de un Equipo Minero

Materiales combustibles en camión de acarreo marinas	cantidad
Aceite Motor [Lts]	64
Aceite sistema de Transmision [Lts]	53
Aceite Hidráulico [Lts]	258
Aceite Diferenciales frontales [Lts]	139
Aceite Diferencial Trasero [Lts]	139
Estanque combustible [Lts]	950
Neumaticos [unidad]	4

Este ejemplo se simuló como si fuese el caso más desfavorable, bajo el supuesto de que el sistema de extinción del vehículo no se activó o bien que se activó y no logró extinguir el fuego y como consecuencia de ello el vehículo se quemó en su totalidad, considerando un periodo de 4 horas de duración del incendio.

Se consideró que la etapa inicial del fuego es de 10 minutos, la etapa de intensidad máxima del fuego se extendió por 110 minutos y que la etapa de decaimiento del fuego se extendió 120 minutos.

Tabla C- 4: Tasa de consumo de Combustible

Materiales combustibles	Tipo de Combustible	Cantidad (Kg)	Porcentaje (%)
1	Petróleo	760	15%
2	Neumáticos	3.804	75%
3	Aceite	480	10%
		5044	100%

Tiempo (Segundos)	0	600	7.200	14.400
Velocidad de combustión (kg/hr)	0	1.729,0	1.729,0	0
Combustible Quemado (kg)	0	144	3170	1729

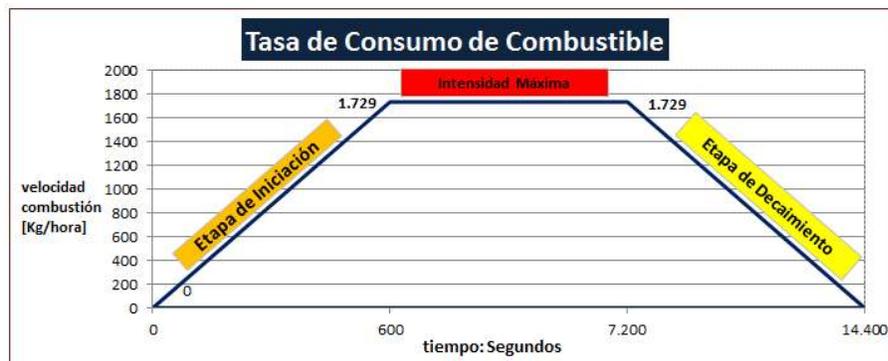


Figura C-4: Representación gráfica de la tasa de consumo de combustible

7.5 Conductividad

Esta variable corresponde a la conductividad térmica de la roca para el macizo rocoso. El valor es usado por el programa para definir la difusión térmica hacia o desde el aire a medida que viaja a través de una galería de ventilación. Esto afectará los caudales de aire en la mina. El valor global utilizado para el macizo rocoso en este modelamiento de incendios es $3,5 \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$, de acuerdo a la información de mina Chuquicamata.

7.6 Difusividad

La difusividad de la roca se obtiene a partir de pruebas de laboratorio en testigos de roca. Define cuán rápido se mueve el calor en el límite entre la roca y el aire cuando éste pasa a través de un ramal. Para este modelo, se utilizó un valor global de $1,6 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$, de acuerdo a la información existente de mina Chuquicamata.

7.7 Temperatura de la Roca

La variable Temperatura de la Roca usa la temperatura promedio de la roca para un ramal dado. Las muestras pueden tomarse en varios puntos clave de la mina o se puede usar el gradiente geotérmico para determinar la temperatura promedio de la roca a cierta elevación. Se utilizó un valor de $25,4^\circ\text{C}$ como temperatura básica de la roca. Este valor está basado en temperaturas promedio del aire medidas dentro de la mina.

7.8 Resultados Ejemplo Caso Base modelo Junio 2018

Los circuitos de ventilación de las rutas de marinas fueron diseñados, en las etapas de ingeniería del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, con aire saliendo a superficie con el propósito de asegurar la evacuación de humos y gases a superficie en caso de alguna ocurrencia de incendio, que se puede ver en Figura C-5.

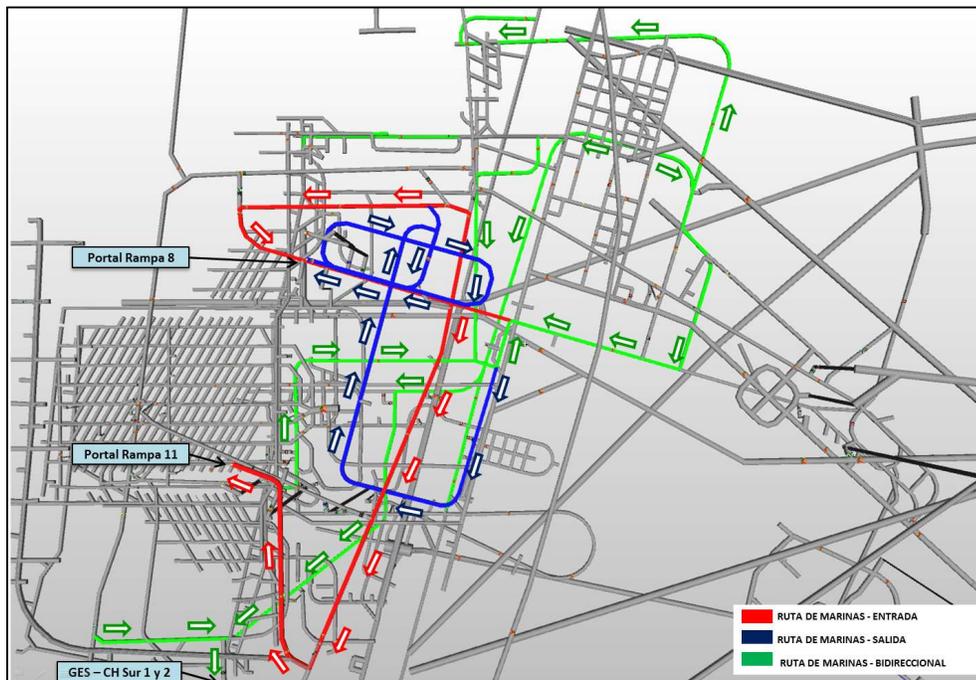


Figura C-5: Vista Superior con rutas de marinas y flujos de ventilación

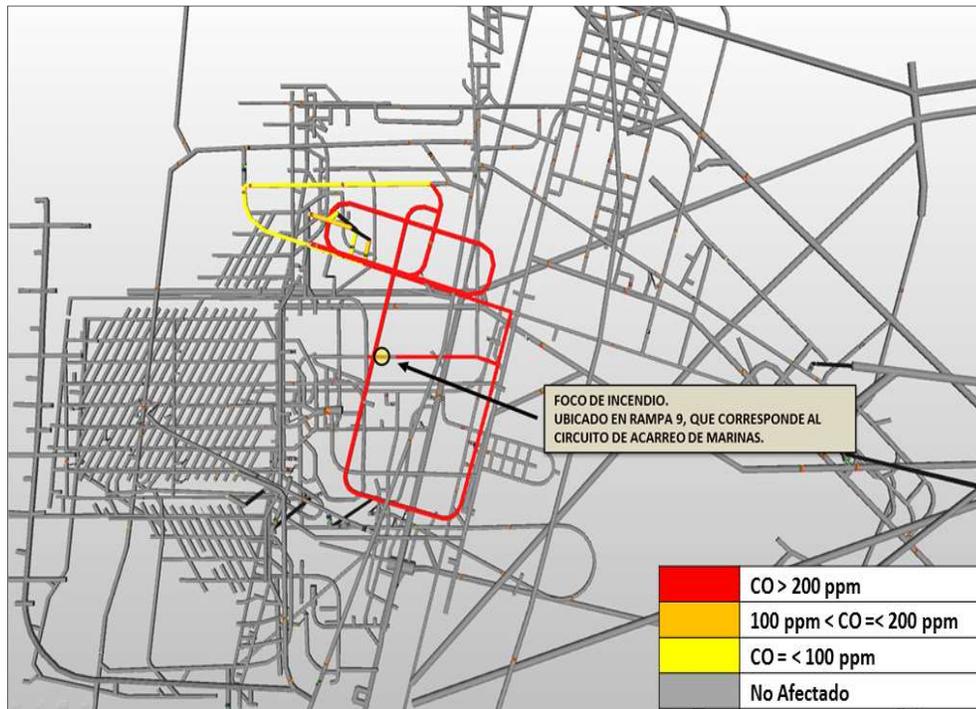


Figura C-6: Vista Superior con propagación de humo y gases

8. Resultados simulación en sistema proyectado a diciembre 2018

Para la confección del modelo de ventilación fueron incorporadas las obras mineras proyectadas a diciembre 2018, así también todas las modificaciones que tendrá el sistema de ventilación.

Posteriormente se desarrolló el modelo de simulación de incendios bajo la misma metodología descrita en el punto 6 de este documento. En figura C-7 se muestra el modelo de ventilación correspondiente a diciembre 2018.

Se simuló el mismo camión destinado al acarreo de marinas, en la misma ubicación que el ejemplo anterior correspondiente a Rampa 9. Mostrando propagación de humo y gases hacia el sistema de extracción principal. Ver en Figura C-8.

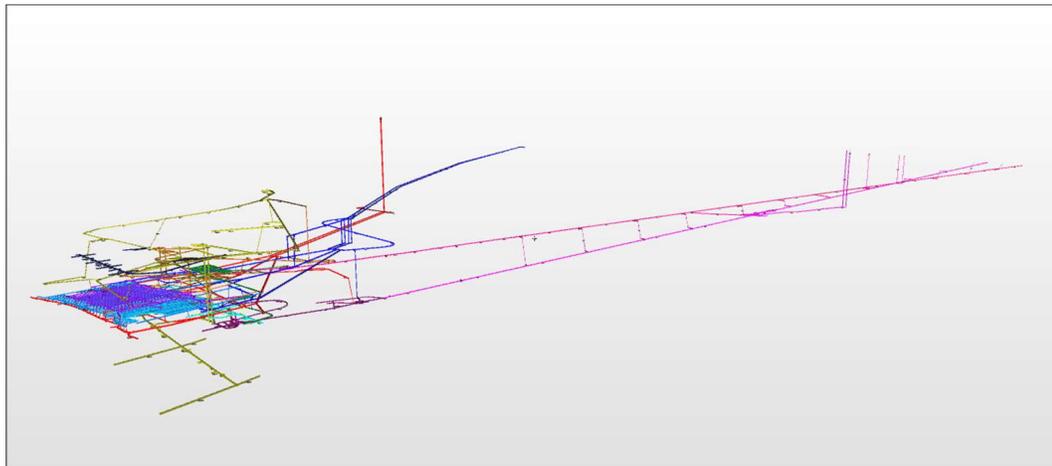


Figura C-7: Vista isométrica modelo de ventilación proyectado a diciembre 2018

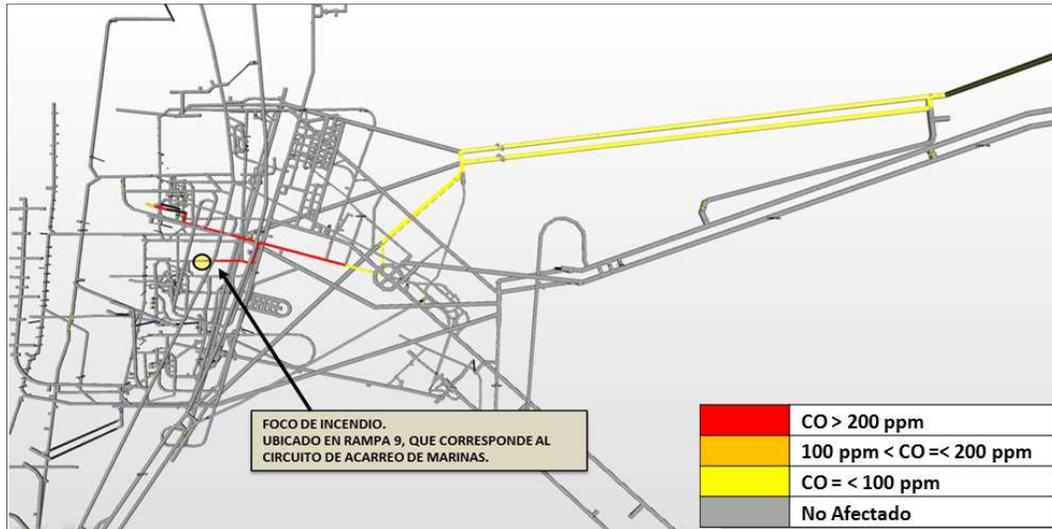


Figura C-8: Propagación de humo y gases en modelo proyectado a diciembre 2018

9. Conclusiones

- La configuración de los circuitos de ventilación para rutas de extracción de marinas permite la evacuación directa de humos y gases a superficie frente a una emergencia de incendio. Lo cual es favorable porque no contaminan otras zonas.
- El sistema de ventilación definitivo cuya operación está proyecta a iniciar en diciembre 2018, después de realizada la simulación de incendio se evidencia que existe evacuación directa de humo y gases al sistema principal de extracción de aire, evacuando a superficie mediante el pique de extracción principal. Dicha configuración del sistema de ventilación principal es favorable porque no permite que se contaminen otras zonas de la mina subterránea.

10. Recomendaciones

- Asegurar que los flujos de aire para rutas de marinas y otras galerías que conectan con superficie, siempre estén direccionados hacia superficie.
- Mantener actualizado el modelo de simulación de incendios de la mina subterránea.
- Mantener actualizados los planes de evacuación para emergencias de incendio.
- Inspeccionar y mantener operativos los sistemas de extinción de incendio en vehículos mineros y lugares fijos como subestaciones eléctricas, talleres, etc.
- Asegurar el mantenimiento preventivo de puertas contra incendio, puertas de aislación, puertas de ventilación, sensores de temperaturas y gases distribuidos en la mina.

11. Referencias

- **INGENIERÍA DE VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA**, McPherson, M.J. 2009, Publicado por Mine Ventilation Services, Inc., 824 pp.
- **CONDUCIENDO UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIOS**, Prosser, B. y Ruckman, R., 2010, "13er Simposio de Ventilación de Minas en E.U.A.", 365-370 pp.

- **USE OF LIVE SENSOR DATA IN TRANSIENT SIMULATIONS OF MINE VENTILATION MODELS**, Craig M Stewart, Saïied M. Aminossadati, Mehmet S. Kizil, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia 2015.
- **UNDERGROUND FIRE ROLLBACK SIMULATION IN LARGE SCALE VENTILATION MODELS**, Craig M Stewart. saïied M. Aminossadati, Mehmet s. kizil. The University of Queensland, Brisbane, Australia, Chasm consulting, Brisbane Australia, 2015.
- **FULL-SCALE FIRE EXPERIMENTS WITH MINING VEHICLES IN AN UNDERGROUND MINE**, Rickard Hansen & Haukur Ingason, Mälardalen University, Studies in Sustainable Technology, 2013.
- **FIRE MODELLING IN UNDERGROUND MINES USING VENTSIM VISUAL VENTFIRE SOFTWARE**, DJ Brake, The Australian Mine Ventilation Conference/Adelaide, Sa, 1 - 3 july 2013.
- **DESARROLLO DE UN ESTUDIO DE MODELAMIENTO DE INCENDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**, Brian Prosser, Mine Ventilation Services – SRK, Sergio Valencia, Codelco-Chuquicamata, UMining2016, 19 -21 Octubre 2016.
- **MODELAMIENTOS DE INCENDIO EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**. Sergio Valencia, Codelco-Chuquicamata, Umining2018, 13-15 Junio 2018.