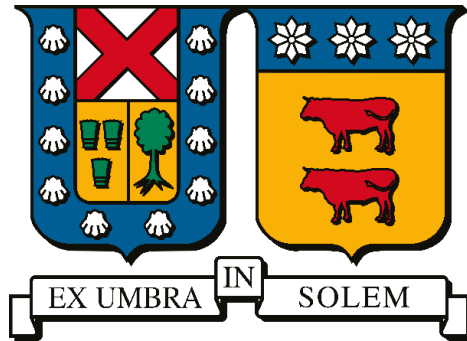


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



**DESARROLLO DE UNA MATRIZ DE RIESGO TRAS LA
OCURRENCIA DE UN AIRBLAST EN MINERÍA
SUBTERRÁNEA UTILIZANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

Presentado por:

DIEGO ALONSO MORENO HERRERA

Profesor Guía:

Dr. Sergio Palma M.

OCTUBRE 2023

Agradecimientos

No fue un camino exento de dificultades, más de una vez pensé en rendirme, pero gracias a ustedes, gracias a sus recomendaciones y cariño, me fue posible llegar hasta aquí. Gracias Mamá, papá y Juanito, sin ustedes no sería quien soy.

Resumen

En este estudio, se analiza el comportamiento de las ráfagas de aire generadas por un airblast en distintos puntos del diseño de la mina Diamante de CODELCO.

Se lleva a cabo la simulación de un airblast en un diseño de block caving, para distintas zonas de hundimiento y velocidades, clasificando las velocidades registradas en distintos puntos en el interior de la mina según la escala de Beaufort. Además, se propone un modelo matemático destinado a predecir las velocidades generadas por un airblast en diversos puntos del diseño.

Se realizaron simulaciones numéricas de airblast utilizando el software Ventsim, el que se emplea en el diseño de sistemas de ventilación subterránea. Se generaron airblast con velocidades en batea que oscilan entre 10 y 1000 km/h, esto para todas las bateas de una misma zona de hundimiento. A su vez, se inyectan flujos de aire en las galerías correspondientes a la zona en el nivel de hundimiento con una velocidad un 20% superior que en bateas. Este proceso se aplicó a todas las zonas de hundimiento del diseño, las que varían en área y ubicación dentro del mismo.

Posteriormente, se registran las velocidades generadas por el airblast en diferentes ubicaciones dentro de la mina, y estos datos se categorizan de acuerdo con la escala de Beaufort. Además de la clasificación, se presenta un modelo matemático que tiene la capacidad de predecir la velocidad generada por un airblast en el interior de la mina, considerando las velocidades generadas por el airblast en las bateas y parámetros geométricos relacionados con las distancias hasta el punto de medición y a la zona de hundimiento responsable de la generación del airblast.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	7
2.	Estado del arte	9
2.1	Galindo Torres et al. 2018.....	9
2.2	Palma et al. 2019.....	10
2.3	Rojas et al. 2023.....	12
2.4	Morales 2023.....	14
3.	Objetivos	17
3.1	Objetivo General	17
3.2	Objetivos específicos	17
4.	Metodología.....	18
4.1	Diseño de los niveles mina	18
4.2	Diseño de los bloques de explotación	22
4.3	Simulación de inyección de aire en bateas y nivel de hundimiento.....	23
4.4	Puntos de medición y registro de datos	25
5.	Resolución numérica de Ventsim	27
6.	Compresibilidad del aire.....	30
7.	Resultados	30
8.	Modelo matemático	37
9.	Clasificación en escala de Beaufort.....	40
10.	Conclusiones	44
11.	Referencias	45
12.	Anexos	46

Índice de figuras

.....	
Figura 1. Esquema de cómo se produce un airblast. a) Etapa inicial del método block caving. b) Propagación del caving. c) Formación de air gap producto de colgadura del cave back. d) Crecimiento del air gap por continuar con la explotación. e) Colapso de la colgadura. f) Generación de ráfagas de aire de alta velocidad, producto del colapso del cave back. Adaptación Palma et al. [4].	8
Figura 2. a) Esquema del Block Caving. b) Simulación realizada con puntos de extracción y conducto de observación. Galindo Torres et al. 2018 [7].	9
Figura 3. Definición de parámetros en el modelo numérico para diferentes escenarios, según la secuencia de extracción. En este contexto, H, W y L representan la altura, el ancho y la longitud de la mina, respectivamente. Además, LT y h se refieren al tamaño del air gap, la altura del muckpile y el diámetro del conducto de observación, respectivamente. Por otro lado, dS y S representan el diámetro de los puntos de extracción y la distancia entre ellos, respectivamente. Finalmente, M representa el ángulo del muckpile y K la permeabilidad del mismo. Palma et al. (2019) [4].	11
Figura 4. Diagrama del área unitaria utilizada en las simulaciones. (a) Geometría del drawbell y puntos de extracción; (b) ubicación de la unidad de área en relación con el nivel de producción. Rojas et al. (2023) [5].	13
Figura 5. Evolución temporal de la velocidad generada por un airblast en dos escenarios distintos del primer caso de estudio. Morales 2023 [6].	15
Figura 6. Evolución temporal de la velocidad del aire para el segundo caso de estudio en el que se produce el fenómeno de airblast en la batea 1 para dos escenarios diferentes. Morales 2023 [6].	16
Figura 7. Gálibo arqueado utilizado en todos los niveles.	18
Figura 8. Vista en planta desde el software Ventsim del nivel de hundimiento.	19
Figura 9. Vista en planta desde el software Ventsim nivel de producción.	19
Figura 10. Vista en planta desde el software Ventsim nivel de transporte.	20
Figura 11. Vista en planta desde el software Ventsim nivel de ventilación.	20
Figura 12. Vista en planta desde el software Ventsim barrios cívicos.	21
Figura 13. Vista en planta desde el software Ventsim acceso principal.	21
Figura 14. Vista en planta desde el software Ventsim del layout general.	22
Figura 15. División del nivel de producción en 6 zonas de hundimiento.	23
Figura 16. Área unitaria nivel de producción.	23
Figura 17. Puntos de inyección en bateas.	25
Figura 18. Puntos de inyección de aire en el nivel de hundimiento.	25
Figura 19. Puntos de medición en el nivel de producción, transporte y barrio cívico.	26
Figura 20. Velocidad provocada por un airblast de 250 km/h.	33

Índice de tablas

Tabla 1. Área en m ² de cada zona de hundimiento.	22
Tabla 2. Estadística de parámetros de ajuste del modelo.	38
Tabla 3. Escala de Beaufort.	40
Tabla 4. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 1.....	41
Tabla 5. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 2.....	41
Tabla 6. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 3.....	42
Tabla 7. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 4.....	42
Tabla 8. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 5.....	43
Tabla 9. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 6.....	43

Índice de gráficos

Gráfico 1. Velocidad promedio del aire en el tiempo medida en el punto de extracción central a) Diferentes valores de la posición vertical del conducto de observación. b) Diferentes ángulos del muckpile. Galindo Torres et al. (2018) [7].	10
Gráfico 2. Representación adimensional de la velocidad máxima del aire, V_{max} , donde $\alpha_1 = 2.223$ y $\alpha_2 = 1.19 \cdot 10^{-6}$, en el punto de extracción DP18. En este caso, toda la información física de los Escenarios 1, 2, 3 y 4 está incluida en el término V_{int} . Las líneas negras representan el modelo propuesto en función del número de Darcy. Palma et al. (2019) [4].	12
Gráfico 3. Comparación entre la velocidad máxima normalizada de las ráfagas de aire de los experimentos computacionales y el modelo multivariante propuesto a partir de números adimensionales, $V_{max} / V_0 = \alpha_1 L \alpha_2 D \alpha_3$, donde $\alpha_1 = 270.5$, $\alpha_2 = 0.137$ y $\alpha_3 = 0.635$, Rojas et al. (2023) [5].	14
Gráfico 4. Comparativa entre la velocidad máxima normalizada en los puntos de extracción a partir de las simulaciones numéricas realizadas y el modelo multivariable propuesto con dos variables de estudio, donde $\alpha_1 = 0.72$, $\alpha_2 = -0.23$ y $\alpha_3 = 0.26$ Valentina Morales 2023 [6].	15
Gráfico 5. Gráficos de velocidad medida en función de la velocidad en batea para cada zona de hundimiento del diseño.	32
Gráfico 6. Velocidad en función de la distancia al airblast nivel producción para la zona 2.	34
Gráfico 7. Velocidad en función de la distancia al airblast nivel producción para la zona 6.	35
Gráfico 8. Velocidad medida en la conexión con superficie de los conductos de ventilación.	36
Gráfico 9. Velocidad medida en la conexión con superficie del acceso principal.	36
Gráfico 10. Correlación entre el modelo y los datos obtenidos mediante simulación numérica.	39
Gráfico 11. Comportamiento del modelo y datos simulados.	39

1. Introducción

Debido al agotamiento de las reservas superficiales, los yacimientos mineros optan cada vez más por métodos de extracción subterráneos, un ejemplo de esto es la reciente conversión de Chuquicamata de CODELCO, mina que alcanza su límite final económico de explotación superficial, sin embargo, aún cuenta con reservas minerales técnica y económicamente viables de explotar mediante el método de explotación subterránea block caving [1].

El método de block caving implica un diseño que incluye varios niveles, se tiene el nivel de hundimiento, producción, transporte y ventilación. Este método divide las reservas minerales en bloques de extracción. Su principio radica en crear una cavidad basal en el nivel de hundimiento, con un radio hidráulico tal, que provoque que el macizo rocoso se fracture y colapse de forma natural, permitiendo que el mineral fragmentado sea extraído a través del nivel de producción, que se encuentra debajo del nivel de hundimiento. Estos niveles están conectados mediante bateas, a través de las cuales el mineral se desplaza por gravedad y se extrae generalmente utilizando LHD's, para ser traspasado al nivel de transporte a través de piques [2].

Sin embargo, este método de explotación conlleva desafíos operativos significativos, como la formación de colgaduras en el cave back. Estas colgaduras se producen cuando el proceso de hundimiento alcanza un equilibrio estable, creando un air gap en el bloque a medida que el mineral se extrae a través del nivel de producción. Este fenómeno representa un riesgo potencial de generación de un airblast, en el cual el cave back colapsa abruptamente, provocando la evacuación repentina del air gap a través de las bateas del nivel de producción generando ráfagas de aire de alta velocidad, como se ilustra en la Figura 1.

Estos eventos han resultado en tragedias y daños, como lo ocurrido en la mina Northparkes, donde se registraron 4 fatalidades el 24 de noviembre de 1999. Además, ese mismo año, el 5 de diciembre, se produjo un airblast en la mina Salvador de CODELCO, donde se estima que se alcanzaron velocidades superiores a los 500 km/h en sus accesos principales [2]. En Chuquicamata subterráneo recientemente existió una colgadura del cave back de unos 13.000 m², con el potencial de haber generado un airblast, a partir de un air gap de 56.000 m³ [3].

Los airblast son eventos difíciles de mitigar una vez que se producen debido a su naturaleza repentina y destructiva. Por tanto, el objetivo de este estudio es proponer una matriz de riesgo que permita predecir y evaluar las consecuencias de un airblast. Para lograrlo, se empleará simulación numérica utilizando el software Ventsim.

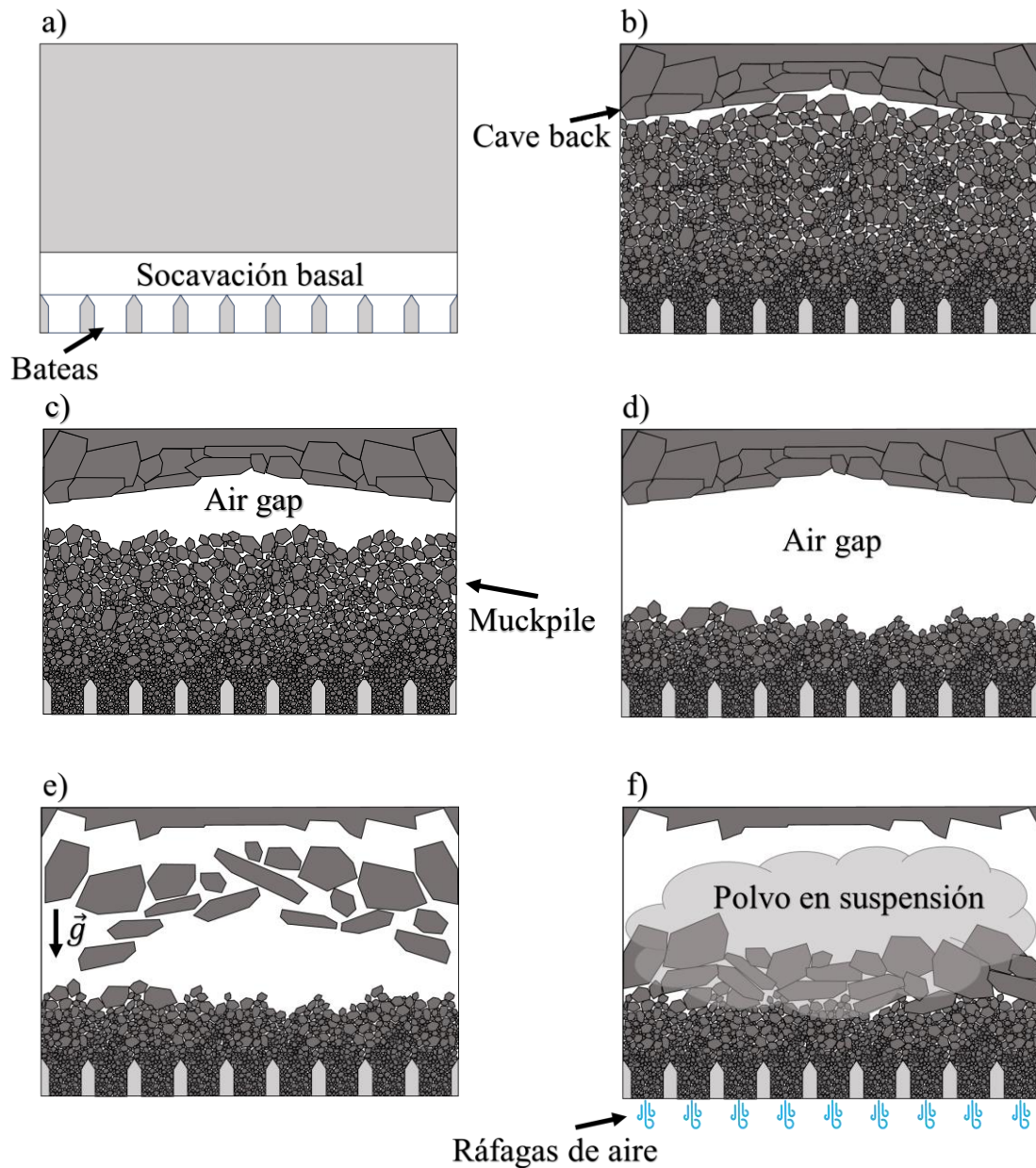


Figura 1. Esquema de cómo se produce un airblast. **a)** Etapa inicial del método block caving. **b)** Propagación del caving. **c)** Formación de air gap producto de colgadura del cave back. **d)** Crecimiento del air gap por continuar con la explotación. **e)** Colapso de la colgadura. **f)** Generación de ráfagas de aire de alta velocidad, producto del colapso del cave back. Adaptación Palma et al. [4].

2. Estado del arte

Actualmente existen 3 modelos que permiten predecir la velocidad generada por un airblast en las bateas Palma et al. [4], Rojas et al. [5] y Morales [6]. Sin embargo, aún no hay forma de predecir el efecto más allá de las bateas del nivel de producción, es por eso por lo que en el presente trabajo se busca generar una matriz de riesgo tras la ocurrencia de un airblast, empleando Ventsim con el fin de cuantificar el efecto de las ráfagas de aire de alta velocidad en el diseño completo de una mina subterránea, más allá de las bateas.

2.1 Galindo Torres et al. 2018

En este artículo, se presenta la implementación novedosa de la combinación de dos métodos de simulación, el Método de Elementos Discretos (DEM) y el Método de Lattice Boltzmann (LBM), con un enfoque particular en la simulación de eventos de airblast en minería de block caving.

Se validó experimentalmente la simulación comparando las velocidades del aire simuladas con las medidas en un modelo de laboratorio a escala. Las velocidades simuladas resultaron similares, aunque ligeramente más altas, que las velocidades experimentales, lo que demuestra que el método utilizado en la simulación puede utilizarse para obtener estimaciones realistas de las velocidades del aire.

Se simuló una geometría simplificada del método block caving para estudiar el efecto de dos variables, la posición de un conducto de observación del avance del cave back y la pendiente del muckpile. Como se ilustra en la Figura 2.

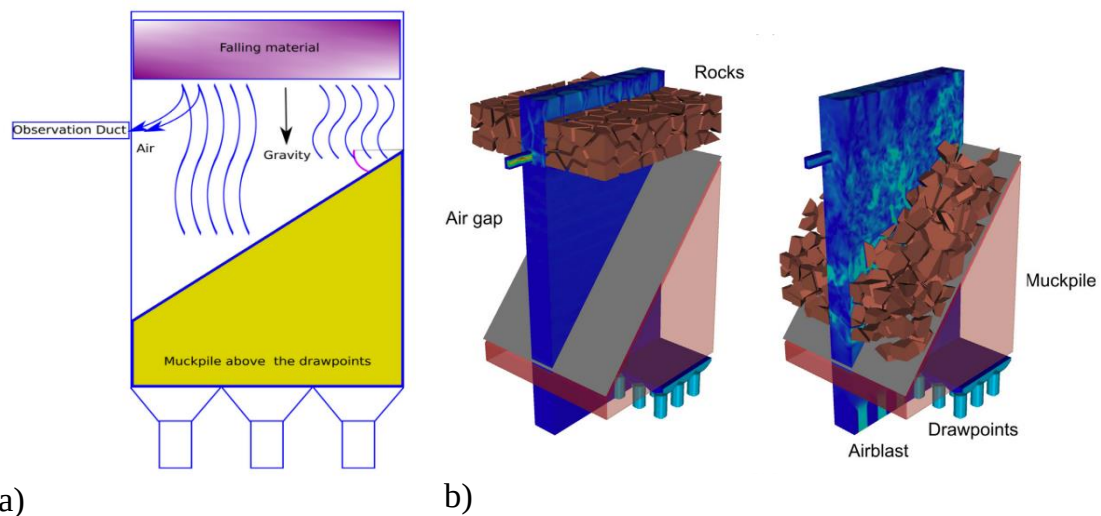


Figura 2. a) Esquema del Block Caving. b) Simulación realizada con puntos de extracción y conducto de observación. Galindo Torres et al. 2018 [7].

En ambos casos, se observó que la velocidad del aire en los puntos de extracción era considerablemente más baja que la medida en el conducto de observación. Esto es concordante con lo ocurrido en Northparkes en el 1999, donde las ráfagas de aire producidas por el airblast afectaron en mayor medida al conducto de observación.

También se muestra cómo la posición del conducto de observación en relación con el muckpile es importante para la mitigación del daño que podría causar el airblast.

Además, se observa que a mayores ángulos del muckpile, se genera un aumento en las velocidades producidas en las bateas producto del airblast. Como se aprecia en el Gráfico 1.

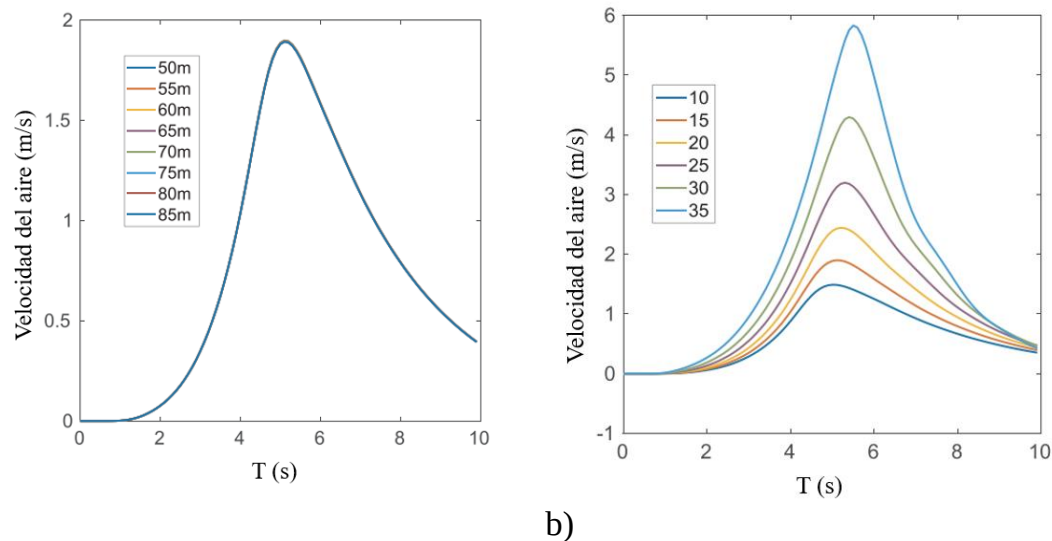


Gráfico 1. Velocidad promedio del aire en el tiempo medida en el punto de extracción central a) Diferentes valores de la posición vertical del conducto de observación. b) Diferentes ángulos del muckpile. Galindo Torres et al. (2018) [7].

2.2 Palma et al. 2019

El artículo se centra en la simulación numérica de airblast mediante el acoplamiento del Método de Lattice Boltzmann (LBM) y el Método de Elementos Discretos (DEM) para representar de manera realista la interacción entre el aire comprimido y los bloques de roca. Además, se propone un nuevo modelo físico matemático para predecir la velocidad máxima generada por un airblast en bateas.

Se estudian varios escenarios de simulación que representan diferentes secuencias de extracción de material de la mina, representados por distintas geometrías del muckpile. Se concluye que la forma del muckpile tiene una influencia directa en la velocidad del aire en los diferentes puntos de extracción. Geometrías del muckpile las cuales se ilustran en la Figura 3.

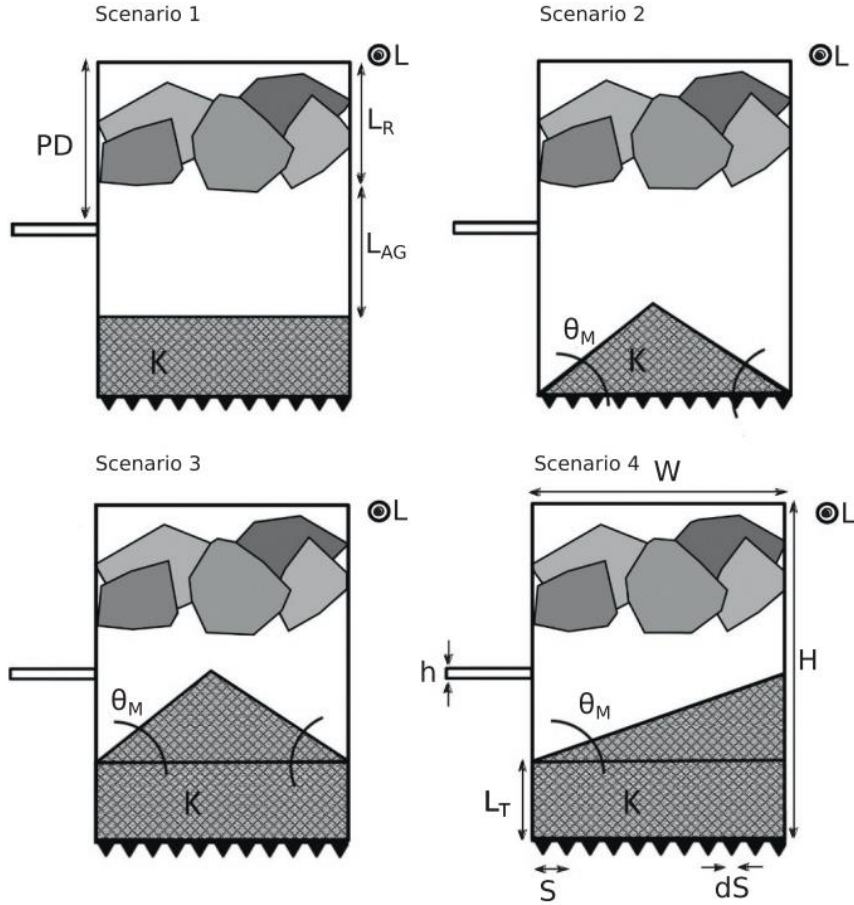


Figura 3. Definición de parámetros en el modelo numérico para diferentes escenarios, según la secuencia de extracción. En este contexto, H , W y L representan la altura, el ancho y la longitud de la mina, respectivamente. Además, L_T y h se refieren al tamaño del air gap, la altura del muckpile y el diámetro del conducto de observación, respectivamente. Por otro lado, dS y S representan el diámetro de los puntos de extracción y la distancia entre ellos, respectivamente. Finalmente, M representa el ángulo del muckpile y K la permeabilidad del mismo. Palma et al. (2019) [4].

Finalmente, el artículo propone un nuevo modelo matemático basado en el número de Darcy para describir la velocidad máxima del aire en los puntos de extracción en función de la permeabilidad del muckpile y otras propiedades geométricas de los escenarios estudiados, el modelo se muestra en el Gráfico 2.

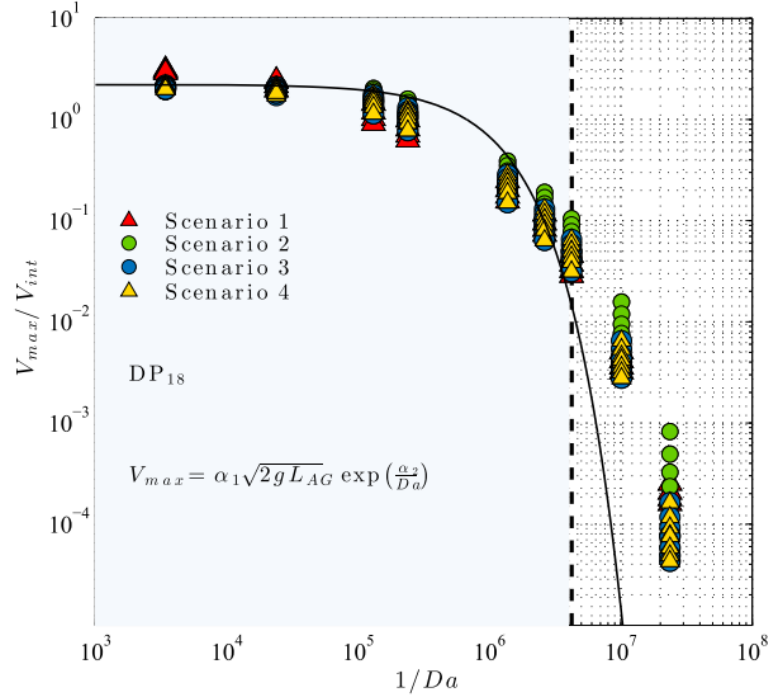


Gráfico 2. Representación adimensional de la velocidad máxima del aire, V_{max} , donde $\alpha_1 = 2.223$ y $\alpha_2 = 1.19 \cdot 10^{-6}$, en el punto de extracción DP_{18} . En este caso, toda la información física de los Escenarios 1, 2, 3 y 4 está incluida en el término V_{int} . Las líneas negras representan el modelo propuesto en función del número de Darcy. Palma et al. (2019) [4].

2.3 Rojas et al. 2023

En este estudio, se abordó la caracterización de las velocidades del aire durante eventos de airblast en minería subterránea de block caving. La metodología involucró una serie de simulaciones numéricas utilizando elementos finitos (FEM) para analizar cómo varían las velocidades máximas del aire en los puntos de extracción durante estos eventos. A partir de estas simulaciones, se desarrolló un modelo matemático para estimar estas velocidades máximas en función de dos parámetros clave, el tamaño del air gap y el diámetro promedio de las partículas del muckpile. En la Figura 4 se muestra el esquema de la geometría utilizada en el estudio.

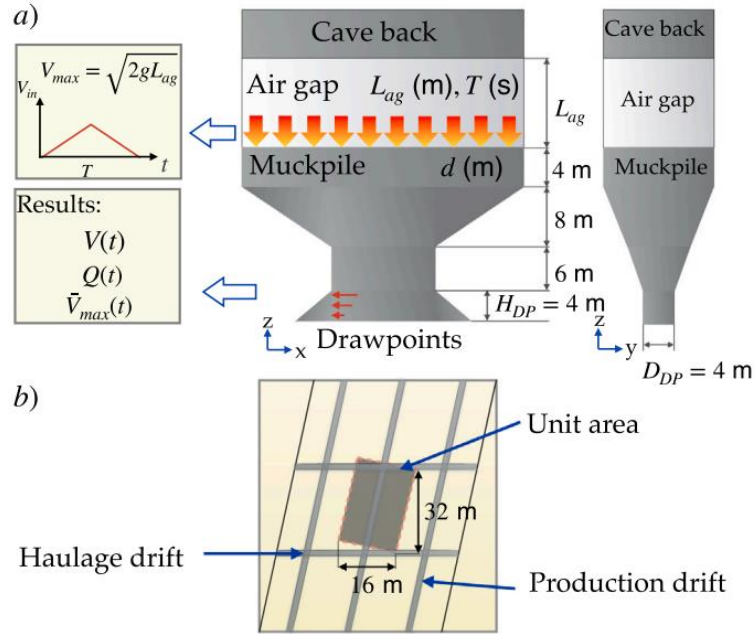


Figura 4. Diagrama del área unitaria utilizada en las simulaciones. (a) Geometría del drawbell y puntos de extracción; (b) ubicación de la unidad de área en relación con el nivel de producción. Rojas et al. (2023) [5].

Los resultados de las simulaciones mostraron que las velocidades máximas del aire en los puntos de extracción aumentaban a medida que se incrementaba el tamaño del air gap y el diámetro de las partículas de roca del muckpile.

El modelo matemático propuesto permite estimar las velocidades máximas del aire en los puntos de extracción producto de un airblast en función de las dimensiones del air gap y el tamaño de las partículas de roca que componen al muckpile. Se muestra la correlación entre las simulaciones realizadas y el modelo propuesto en el Gráfico 3.

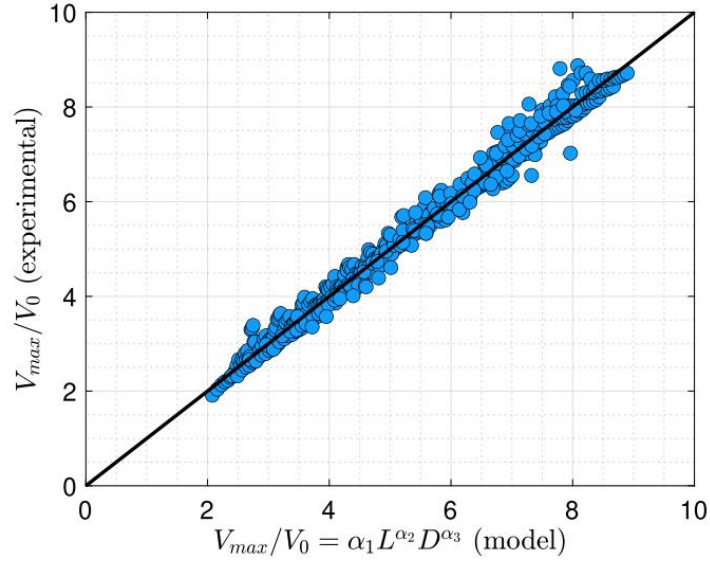


Gráfico 3. Comparación entre la velocidad máxima normalizada de las ráfagas de aire de los experimentos computacionales y el modelo multivariante propuesto a partir de números adimensionales, $V_{max} / V_0 = \alpha_1 L^{\alpha_2} D^{\alpha_3}$, donde $\alpha_1 = 270.5$, $\alpha_2 = 0.137$ y $\alpha_3 = 0.635$, Rojas et al. (2023) [5].

2.4 Morales 2023

En este estudio, se llevó a cabo la simulación de airblast, donde se utilizó el método de elementos finitos (FEM). El enfoque experimental se dividió en dos partes, y se presentó un nuevo modelo matemático para predecir la velocidad máxima generada en batea producto de un airblast.

En la primera parte, se generó un diseño que consiste en una batea con dos puntos de extracción, dividida en tres secciones: una en el centro y una en cada extremo. En la Figura 5 se muestra el primer caso de estudio utilizado. Este diseño tiene como objetivo ilustrar la relación entre la velocidad del aire y las zonas en las que se produce la liberación de aire respecto a los puntos de extracción. Además, a partir de los datos recopilados experimentalmente, se desarrolló un modelo matemático que considera el tamaño del air gap y el grosor del muckpile para determinar la velocidad máxima del aire en los puntos de extracción. En el Gráfico 4 se muestra la correlación de los datos experimentales con el modelo propuesto.

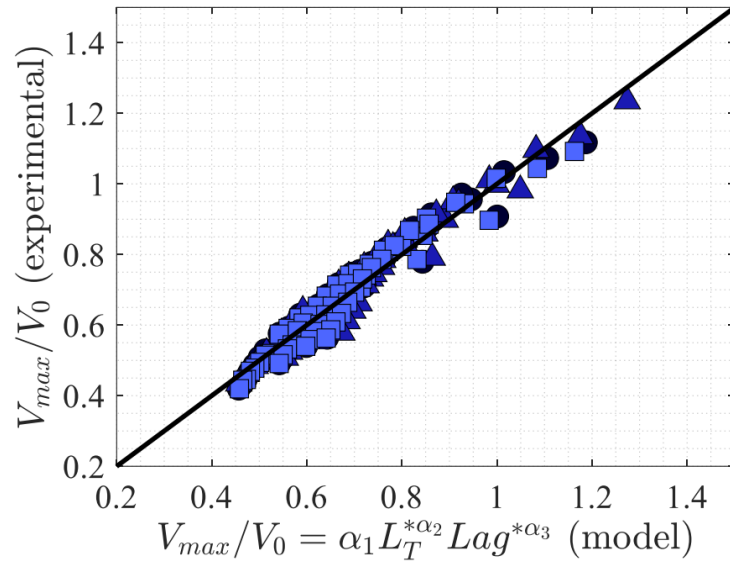


Gráfico 4. Comparativa entre la velocidad máxima normalizada en los puntos de extracción a partir de las simulaciones numéricas realizadas y el modelo multivariable propuesto con dos variables de estudio, donde $\alpha_1 = 0.72$, $\alpha_2 = -0.23$ y $\alpha_3 = 0.26$ Valentina Morales 2023 [6].

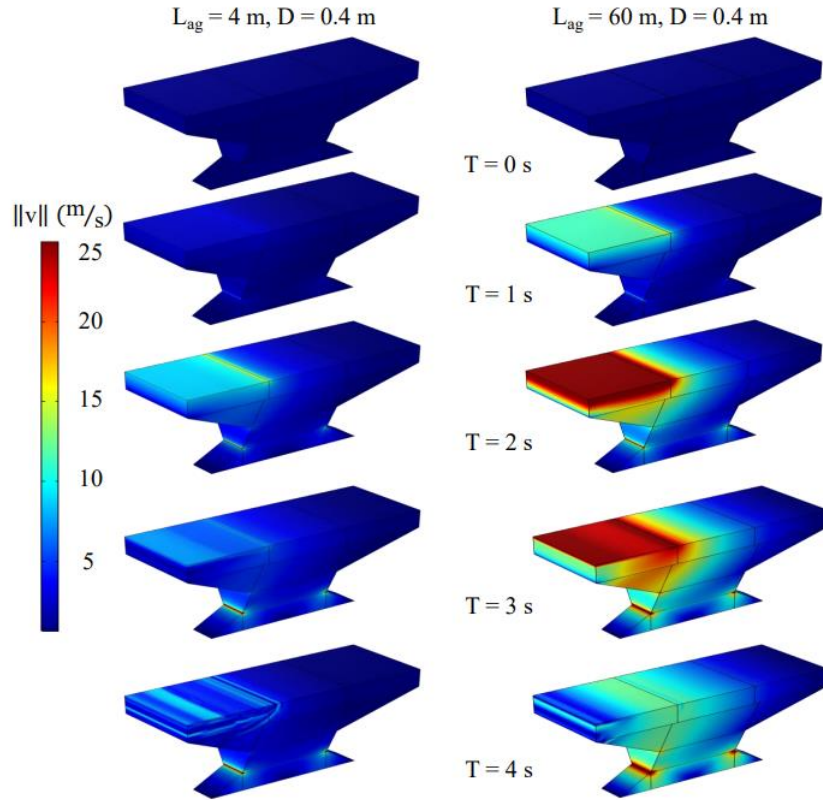


Figura 5. Evolución temporal de la velocidad generada por un airblast en dos escenarios distintos del primer caso de estudio. Morales 2023 [6].

En la segunda parte del estudio, se creó un módulo de producción que replicaba las condiciones de la mina El Teniente. Esto se hizo con el propósito de determinar la velocidad del aire asociada con diferentes escenarios en los que se produce el airblast. Esto permitió establecer una zona de seguridad en relación con este riesgo. En la Figura 6 se muestra el segundo caso de estudio utilizado.

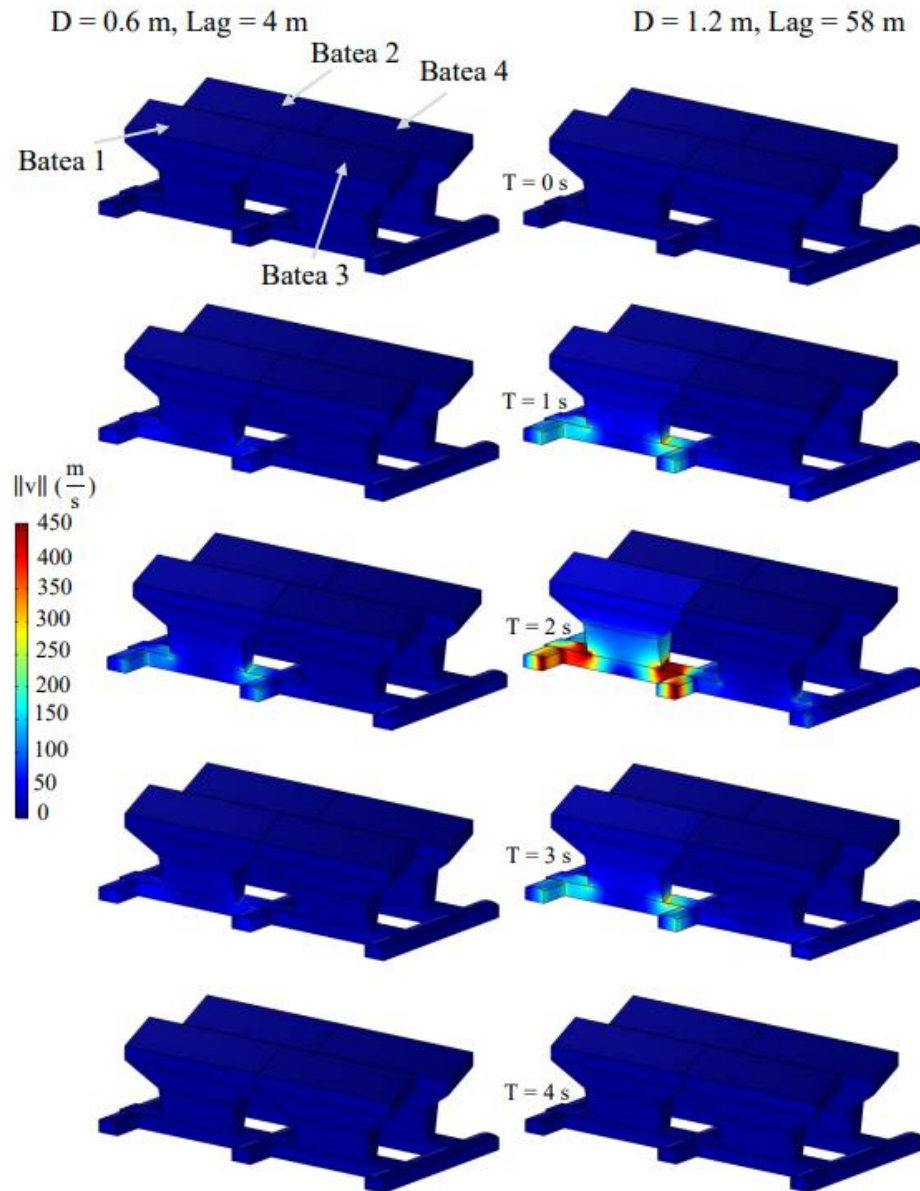


Figura 6. Evolución temporal de la velocidad del aire para el segundo caso de estudio en el que se produce el fenómeno de airblast en la batea 1 para dos escenarios diferentes. Morales 2023 [6].

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Desarrollar una matriz de riesgo que permita evaluar y gestionar los riesgos con la ocurrencia de un airblast en minería subterránea, utilizando simulación numérica.

3.2 Objetivos específicos

- Simular mediante el software Ventsim la ocurrencia de un airblast en minería subterránea.
- Medir en la simulación la velocidad del flujo de aire producto del airblast en distintos puntos de interés, donde transite el personal.
- Clasificar el riesgo generado a raíz de la velocidad del flujo de aire según la escala de Beaufort.

4. Metodología

4.1 Diseño de los niveles mina

El diseño empleado en este estudio se basa en el diseño real de la mina Diamante de CODELCO, este comprende varios niveles, que incluyen hundimiento, producción, transporte, ventilación, barrios cívicos y acceso principal. Sin embargo, se ha adaptado asumiendo la explotación en bloques, y se ha creado el nivel de ventilación por autoría propia.

Inicialmente, se cuenta con los ejes centrales de cada galería en formato DWG de AutoCAD. Ejes los cuales fueron importados a Ventsim, donde se generaron las galerías en tres dimensiones (3D), configurando un gálibo con dimensiones adecuadas para cada nivel.

Es importante destacar que todos los niveles presentan una misma forma de gálibo arqueado, la que se ilustra en la Figura 7, aunque las dimensiones varían entre cada nivel para adaptarse a los requisitos de los equipos que transitan por ellos y los parámetros de diseño de ventilación.

A continuación, se proporciona una descripción detallada de las características geométricas de cada nivel acordes al diseño real de la mina Diamante de CODELCO. Se presentan los niveles mencionados, junto con una ilustración que muestra la disposición de cada uno de estos niveles dentro del diseño general de la mina.

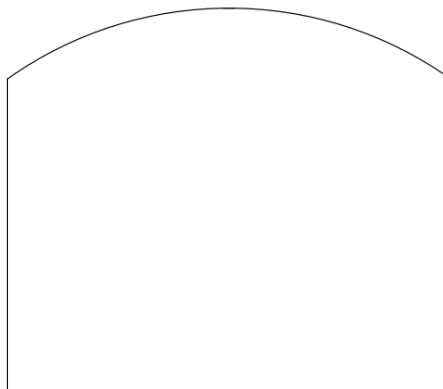


Figura 7. Gálibo arqueado utilizado en todos los niveles.

- **Hundimiento:** El nivel de hundimiento se encuentra en la cota superior con respecto a los demás niveles, el área del gálibo es de 19 m^2 con un perímetro de 16.7 m , en este nivel se realiza la inyección de aire en la simulación del airblast.

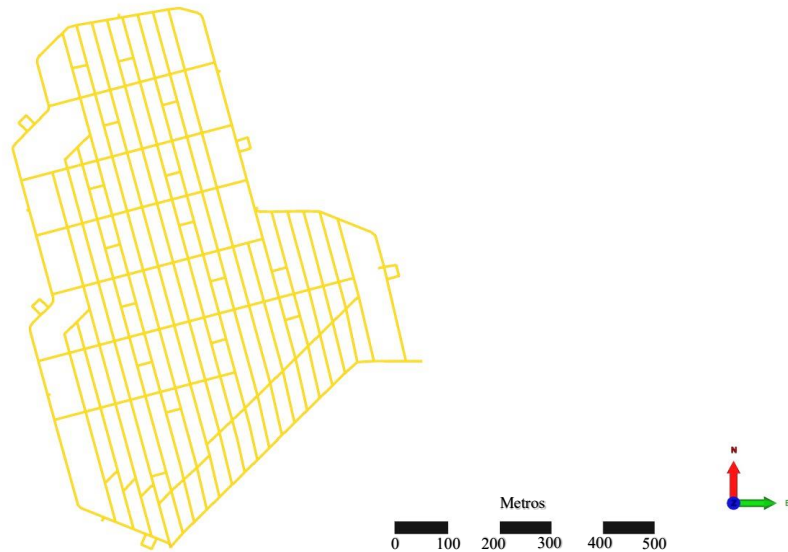


Figura 8. Vista en planta desde el software Ventsim del nivel de hundimiento.

- **Producción:** El nivel de producción posee un diseño de malla de extracción tipo teniente, se encuentra 18.2 m por debajo del nivel de hundimiento, el área del gálibo es de 22.9 m^2 con un perímetro de 18.4 m , en este nivel se realiza la inyección de aire en la simulación del airblast.

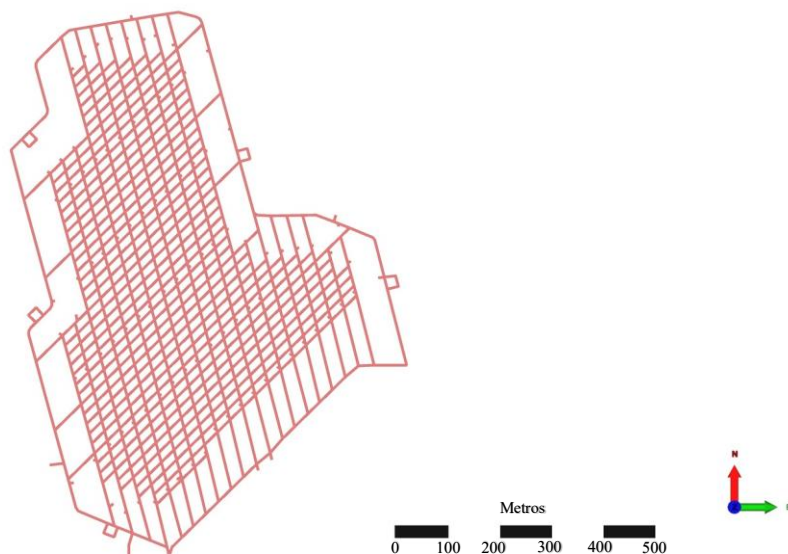


Figura 9. Vista en planta desde el software Ventsim nivel de producción.

- **Transporte:** El nivel de transporte se encuentra 32 m por debajo del nivel de producción, el área del gálibo es de 25.4 m^2 con un perímetro de 19.3 m.

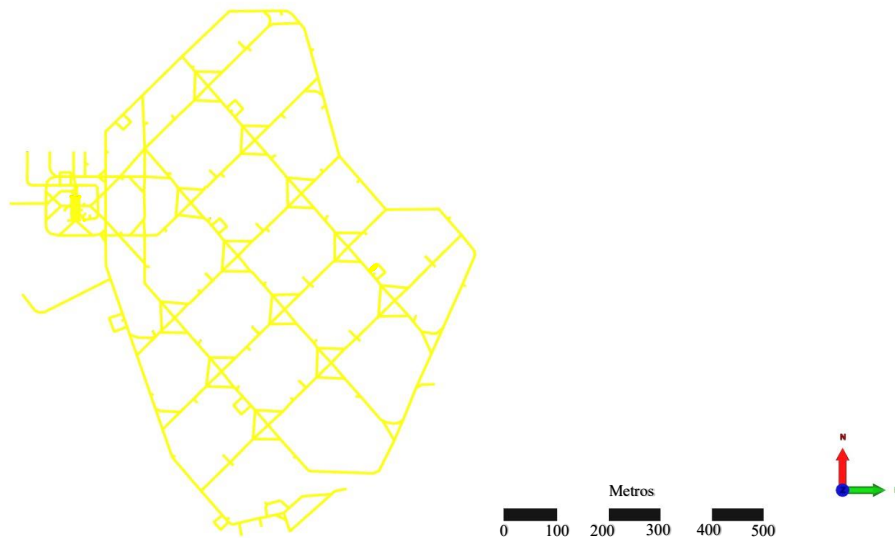


Figura 10. Vista en planta desde el software Ventsim nivel de transporte.

- **Ventilación:** El nivel de ventilación se divide en dos tipos, inyección de aire fresco (azul) y extracción de aire viciado (rojo) a 13 m y 30 m por debajo del nivel de transporte respectivamente. El área del gálibo en ambos niveles es de 45.9 m^2 con un perímetro de 26 m. Se conectan ambos con los demás niveles mediante chimeneas de 3.2 m de diámetro. Ambos niveles conectan con superficie mediante chimeneas de 400 m de longitud, las que se encuentran en la parte superior izquierda de la vista en planta de la Figura 11.

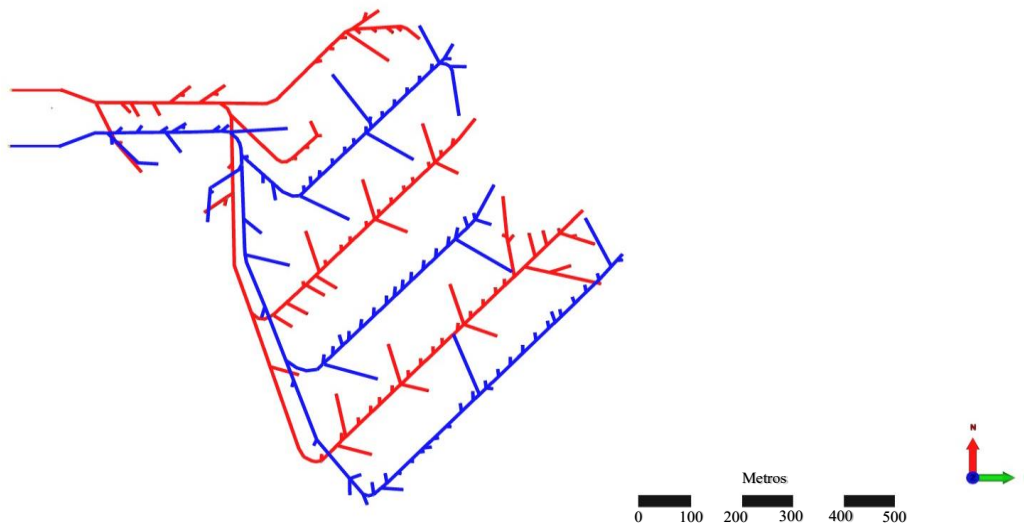


Figura 11. Vista en planta desde el software Ventsim nivel de ventilación.

- **Barrios cívicos:** Los barrios cívicos se encuentra la misma cota de los niveles de producción (color cerceta) y transporte (color rosado), el área del gálibo de ambos barrios cívicos es de 25.4 m² con un perímetro de 19.3 m.

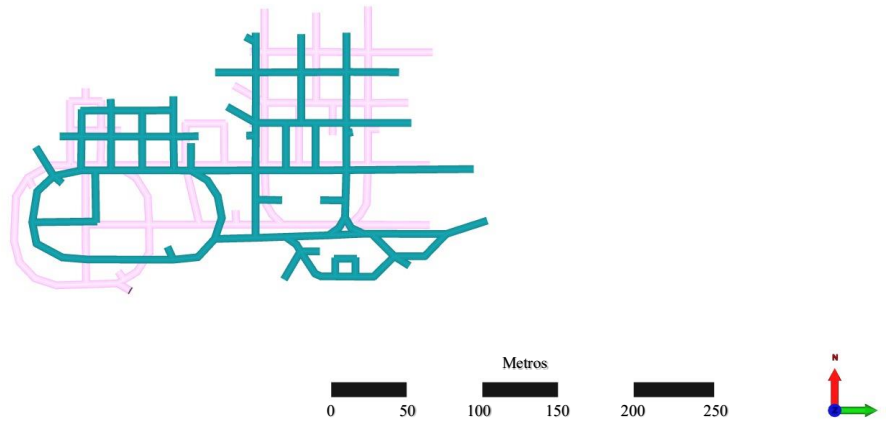


Figura 12. Vista en planta desde el software Ventsim barrios cívicos.

- **Acceso principal:** El acceso principal se conecta a ambos barrios cívicos, el área del gálibo es de 29.3 m² con un perímetro de 20.8 m.

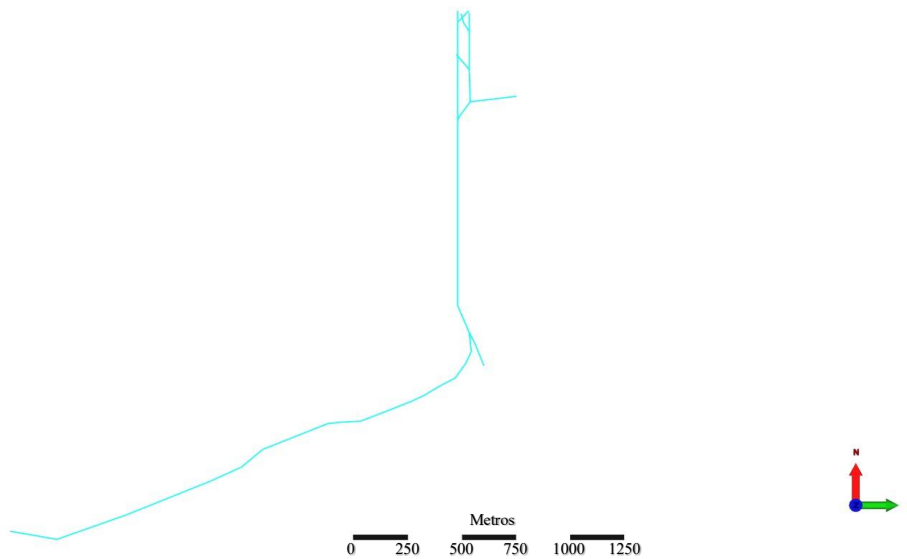


Figura 13. Vista en planta desde el software Ventsim acceso principal.

- **Layout general:** En el layout general se aprecia que los niveles se conectan entre si mediante distintas rampas (de color morado). Conectándose los niveles Hundimiento-Producción, Producción-Transporte y Barrios cívicos-Acceso principal.

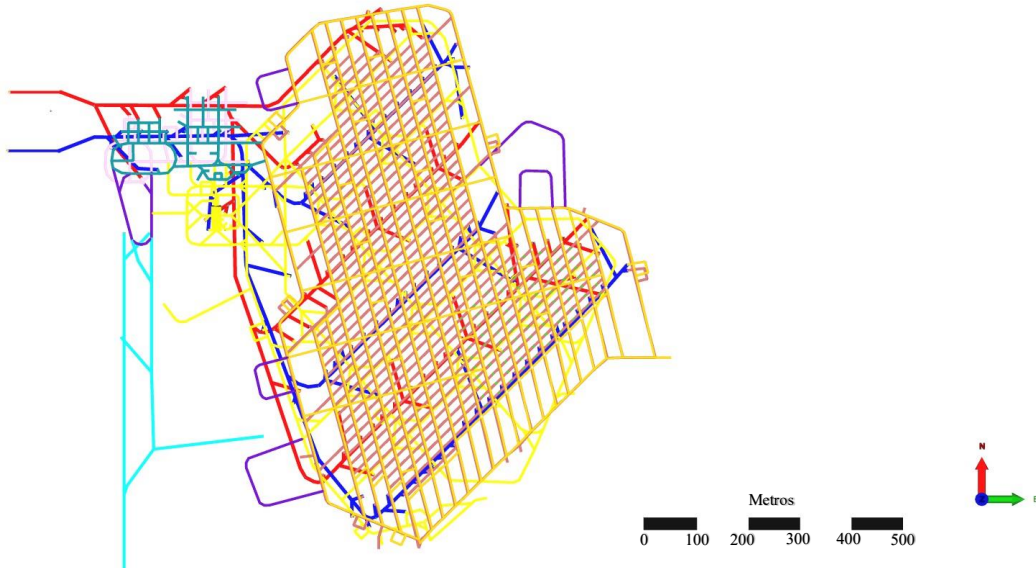


Figura 14. Vista en planta desde el software Ventsim del layout general.

4.2 Diseño de los bloques de explotación

Se asumieron 6 zonas de hundimiento, las cuales simbolizan el primer bloque en explotación, se tienen distintas áreas que van desde los 35.000 a 46.000 m² aproximadamente. Indicados en la Figura 15 y Tabla 1. Son valores acordes a los utilizados actualmente en Chuquicamata de CODELCO, con bloques promedio de 35.000 m² [1].

Tabla 1. Área en m² de cada zona de hundimiento.

Zona de hundimiento N°	Área (m ²)
1	46.745
2	45.546
3	35.358
4	46.146
5	41.951
6	41.951

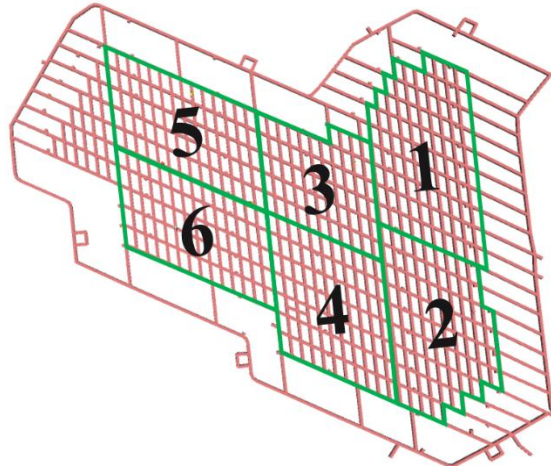


Figura 15. División del nivel de producción en 6 zonas de hundimiento.

El área fue determinada en primer lugar de forma unitaria, esto se realizó mediante el comando “AREA” de AutoCAD, obteniendo un área de 599.3 m^2 , como ilustra la Figura 16, para luego escalar este valor a cada zona de hundimiento.

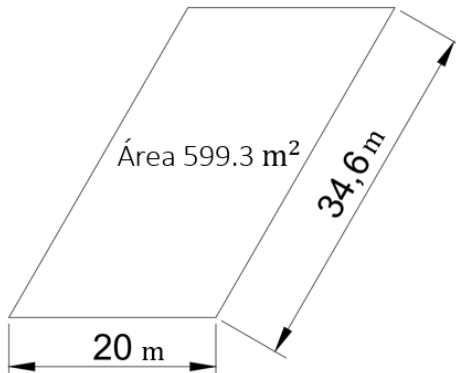


Figura 16. Área unitaria nivel de producción.

4.3 Simulación de inyección de aire en bateas y nivel de hundimiento

La simulación de airblast utilizando Ventsim implica la generación de simulaciones de inyección de aire de manera independiente en los niveles de producción y hundimiento para cada zona de hundimiento del diseño. En estas simulaciones, se varía la velocidad de inyección.

Se parte del supuesto de que, en el momento de realizar la simulación de airblast para cada zona de hundimiento, esta es la primera en entrar en explotación, mientras que el resto del nivel ya está construido.

Es importante señalar que en este diseño no se consideran ni puertas ni ventiladores, sino que solo se tiene en cuenta la geometría de las galerías. Además, se utilizan los parámetros de resistencia para conductos por defecto de Ventsim.

Para llevar a cabo estas simulaciones de airblast relacionadas con cada zona de hundimiento, se crean puntos de inyección de aire utilizando geometrías cilíndricas en Ventsim, tanto en los niveles de producción como en el nivel de hundimiento. Cada zona cuenta exclusivamente con los puntos de inyección que se encuentran directamente sobre él. Estos puntos de inyección se configuran con un caudal fijo en cada simulación. Para efectos del software, cada punto de inyección se considera como una conexión con la superficie.

Se establecen un total de 100 etapas de inyección de aire, con un aumento gradual de la velocidad de inyección de 10 km/h por etapa para el nivel de producción, abarcando velocidades que van desde 10 hasta 1000 km/h, por su parte en el nivel de hundimiento la velocidad de inyección es un 20% superior que el nivel de producción para cada etapa, abarcando velocidades desde los 12 a 1200 km/h, esto bajo el supuesto de que las ráfagas de aire generadas en el nivel de hundimiento son de mayor velocidad que en el nivel de producción debido a que el muckpile es de menor dimensión en el nivel de hundimiento que en el nivel de producción [4] y [5].

Dado que Ventsim requiere un caudal fijo como entrada, y el objetivo de las simulaciones es variar la velocidad en cada etapa, se realiza el cálculo para determinar la equivalencia entre la velocidad deseada y el caudal. Esto se hace considerando el área basal del cilindro (12.6 m^2) donde se inyecta el caudal, como se muestra en la Ecuación 1.

$$\text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \text{Velocidad deseada} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \text{Área basal del cilindro} (\text{m}^2) \quad (1)$$

- **Nivel de producción:** Se incorpora un punto de inyección de aire en cada batea del nivel de producción, lo que suma un total de 439 puntos de inyección en el nivel de producción, tal como ilustra la Figura 17. Se configuran 100 etapas de inyección, con velocidades entre 10 y 1000 km/h, aumentando cada etapa en 10 km/h.

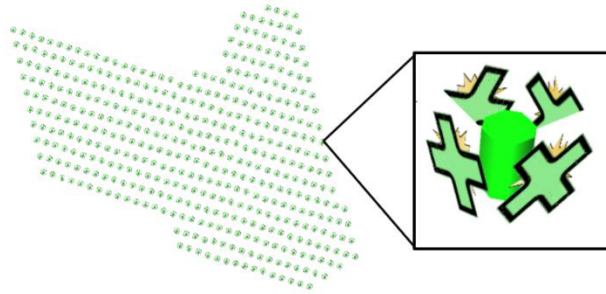


Figura 17. Puntos de inyección en bateas.

- **Nivel de hundimiento:** Para el nivel de hundimiento, se añaden puntos de inyección en los límites de cada bloque. En total, se agregan un total 73 puntos de inyección. Se configuran 100 etapas de inyección, con velocidades de inyección un 20% más altas que las utilizadas en las bateas para cada etapa. Cada zona de hundimiento únicamente cuenta con los puntos de inyección ubicados directamente sobre de ella. Se ilustran los puntos de inyección del nivel de hundimiento en la Figura 18.

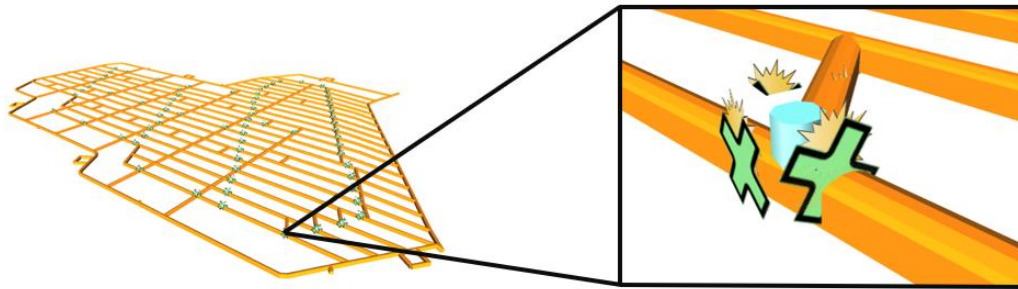


Figura 18. Puntos de inyección de aire en el nivel de hundimiento.

En total se llevan a cabo 700 simulaciones distintas, las cuales corresponden a las 100 distintas etapas de inyección de aire, para cada zona de hundimiento del diseño.

4.4 Puntos de medición y registro de datos

- **Puntos de medición:** Se realizaron mediciones en 9 puntos distintos para un total de 600 simulaciones. Los primeros 7 puntos de medición se localizan en diversas ubicaciones del diseño subterráneo donde existe tránsito de personal, se incluyen 2 puntos en el nivel de producción, 2 puntos en el nivel de transporte, 1 punto en la sala de chancado y, finalmente, 2 puntos en el barrio cívico. Estos puntos se encuentran identificados con estrellas rojas en la Figura 19. Además, se efectuaron mediciones de la velocidad del aire en el inicio del

acceso principal y en la chimenea de inyección del nivel de ventilación, donde estos están conectados con la superficie.



Figura 19. Puntos de medición en el nivel de producción, transporte y barrio cívico.

- **Reporte de todos los conductos en cada etapa de inyección por zona:** Cada medición fue realizada utilizando la herramienta "Scripter estática" en el software Ventsim, realizando un total de 100 mediciones por zona de hundimiento, Esta herramienta genera archivos XLSX del orden de las 6000 filas aproximadamente y 3 columnas de datos.
 - **Primera columna:** Con la etiqueta denominada "Script", no contiene información relevante y se excluye en el proceso de medición.
 - **Segunda columna:** Muestra el "Index" de cada conducto del diseño, teniendo un total de 6000 conductos aproximadamente dentro del diseño. Estos índices son números de identificación asignados a cada conducto creado en Ventsim. Son fundamentales para identificar y registrar los puntos de medición, lo que permite obtener los datos sobre la velocidad del aire generada por el airblast para cada punto del diseño.
 - **Tercera columna:** Con la etiquetada "Velocidad promedio en km/h", contiene los datos de velocidad que se desean medir en el diseño. Estos valores representan las velocidades promedio del aire en km/h para cada conducto del diseño.
- **Medición de los puntos designados en el diseño por zona:** Para llevar a cabo las mediciones en los 9 puntos designados, primero se identificaron manualmente los índices correspondientes a cada uno de estos puntos directamente en el software Ventsim, viendo las propiedades los conductos que corresponde a puntos de medición, registrando sus "Index", para luego ejecutar un código desarrollado en Python para filtrar estos 9 "Index" desde 100 distintos archivos XLSX.

Es importante mencionar que este proceso de identificación y filtrado de índices se realizó de manera individualizada para cada zona de hundimiento en la que se simuló un airblast. Esto se debió a que, al cambiar zona de hundimiento, se cambian los índices de los conductos, por lo que fue necesario ajustar los “Index” deseados en el código para cada una de las 6 zonas.

El código registra los datos mediante un archivo titulado “Datos” en formato CSV para cada zona. Cada archivo CSV contiene un total de 901 filas y tres columnas.

- **Primera columna:** Corresponde a la etapa de inyección con la etiqueta de "Id".
- **Segunda columna:** Entrega el índice del punto de medición con la etiqueta de "Index".
- **Tercera columna:** Registra la velocidad promedio en km/h medida en ese punto con la etiqueta de "Velocidad Promedio en km/h".

Este proceso se aplicó a cada zona de hundimiento de manera individualizada, lo que permitió recopilar un total de 5400 datos de velocidad medida a lo largo de las diferentes etapas de inyección de aire para los distintos puntos y zonas.

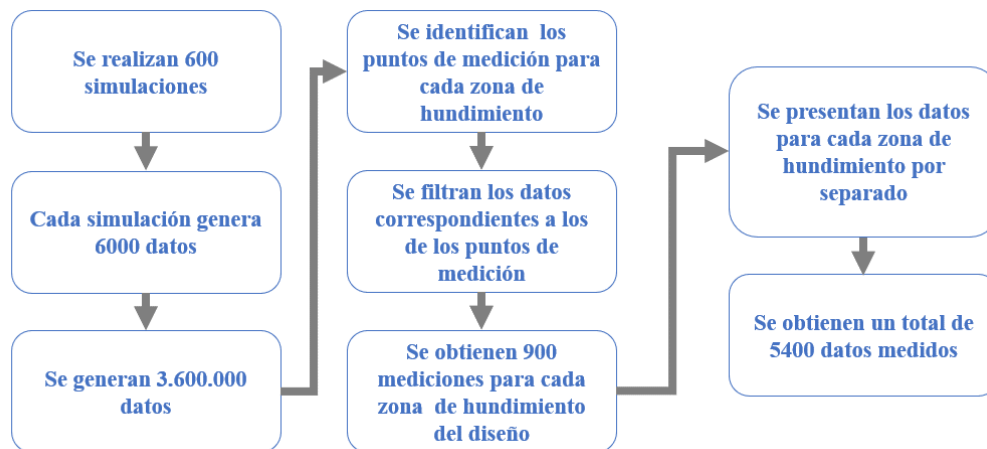


Diagrama 1. Diagrama de manejo de datos generados en el estudio.

5. Resolución numérica de Ventsim

Ventsim cuenta con dos algoritmos para realizar simulaciones de flujos de aire en diseños subterráneos, se tiene el solucionador secuencial y, por otro lado, el matricial [8]. Dado que el solucionador secuencial no converge para todos los

casos de estudio, se utiliza el solucionador matricial, ambos solucionadores se explican a continuación.

- **Solucionador Secuencial:** Este solucionador se basa en el método de Hardy-Cross. El método implica asignar valores iniciales a los caudales de aire en las ramas de la red y luego realizar iteraciones de dicho caudal hasta que cumplan con la ley de continuidad de masas en los nodos y conservación de la energía en los circuitos de redes. Estas ecuaciones aseguran que la suma de los caudales de aire en los nodos sea cero y que la suma de las pérdidas de energía en las ramas de una malla sea cero. El método continúa iterando hasta que los caudales de aire convergen y el error sea lo suficientemente pequeño, o bien, se alcance un número máximo de iteraciones. Esto garantiza que la red de ventilación se equilibre de acuerdo con los principios físicos de la continuidad de masa y la conservación de la energía [9].

- **Ley de continuidad de masa en los nodos:** Según esta ley, la suma algebraica de los caudales en cada nodo debe ser igual a cero. Esto se expresa de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (2)$$

Donde:

- Q_i : representa el caudal en cada nodo y la suma se realiza para todos los nodos en un circuito cerrado de conductos.
 - n : Número total de nodos en un circuito cerrado de tuberías o conductos.
- **Ley de conservación de la energía en los circuitos de redes:** Esta ley establece que la suma algebraica de las pérdidas de energía en los tramos que forman un circuito cerrado debe ser igual a cero. Esto se representa como:

$$\sum_{i=1}^n H_{f_i} = 0 \quad (3)$$

Donde:

- H_{f_i} : Pérdida de carga por fricción en un tramo cerrado, la cual se puede calcular mediante cualquier expresión propuesta por otros autores, por ejemplo, Darcy & Weisbach.
 - n : Número total de nodos en un circuito cerrado de tuberías o conductos.
- **Solucionador matricial:** El método matricial consta en resolver la ecuación de Atkinson en cada nodo de la red de ventilación. Esto implica igualar la presión en todos los conductos que convergen en un mismo nodo. En otras palabras, el método matricial se basa en la aplicación sistemática de la ecuación de Atkinson a cada nodo de la red, considerando cómo se distribuye la presión en función de los conductos que se conectan en ese nodo en particular.
- **Resistencia de Atkinson:** La ecuación de Atkinson establece una relación entre la pérdida de presión en un conducto y varios parámetros, incluyendo el caudal de aire, el coeficiente de fricción, y las dimensiones geométricas del conducto, como su área transversal y longitud. Estos parámetros tienen un impacto significativo en la resistencia experimentada por el flujo de aire mientras se desplaza a lo largo del conducto. Es importante destacar que esta ecuación es válida únicamente para flujos incompresibles, y proporciona una herramienta matemática para calcular con precisión la pérdida de presión en función de estos factores, como se muestra en la Ecuación 4 [9].

$$H_f = \frac{K \cdot O \cdot L \cdot Q^2}{A^3} \quad (4)$$

Donde:

- H_f : Pérdida de presión (Pa)
- K : Factor de fricción (kg/m^3)
- O : Perímetro del conducto (m)
- L : Longitud del conducto (m)
- Q : Caudal circulante (m^3/s)
- A : Área transversal del conducto (m^2)

6. Compresibilidad del aire

La compresibilidad del aire se refiere a la tendencia del aire a cambiar su densidad en respuesta a cambios en la presión y la temperatura. Esta compresibilidad se vuelve relevante cuando la velocidad del flujo de aire es significativa en comparación con la velocidad del sonido en el aire circundante.

Para evaluar la importancia de la compresibilidad en un flujo de aire, se utiliza un parámetro llamado número de Mach. El número de Mach se define como la relación entre la velocidad del flujo de aire y la velocidad del sonido en el aire a una temperatura específica:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (5)$$

Donde:

- Ma: Número de Mach
- V: Velocidad del fluido (m/s)
- c: Velocidad del sonido en el fluido (m/s)

Cuando el número de Mach es menor que 0.3, se considera que el flujo de aire es incompresible. Esto significa que los cambios en la densidad del aire debidos a la compresibilidad son insignificantes y se pueden ignorar en los cálculos y análisis.

Por otro lado, cuando el número de Mach (Ma) es igual o mayor que 0.3, los efectos de la compresibilidad se vuelven más significativos. En estos casos, los cambios en la densidad del aire y la presión se vuelven importantes, y es necesario considerar la compresibilidad al analizar el flujo de aire [10].

7. Resultados

A partir de los 5.400 datos registrados sobre la velocidad medida en los 9 puntos designados, para las distintas zonas de hundimiento donde se simula la inyección de aire, se realiza el siguiente análisis.

Para los 7 puntos de medición en el interior mina, se confecciona un conjunto de gráficos mostrados en Grafico 5, donde se muestra la velocidad medida en los puntos en función de la velocidad inyectada en batea para

velocidades inferiores a 370 km/h. Además de manera ilustrativa, se muestra el layout general con la leyenda de Velocidad (km/h) para la velocidad de inyección en batea de 250 km/h, para cada zona de hundimiento en la Figura 20.

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos para los puntos de medición en el interior mina, destaca que los gráficos correspondientes a las zonas de la 1 a la 6 poseen un comportamiento similar

Además, destaca que los gráficos de las zonas de hundimiento de la 1 a la 6, poseen un cambio en su tendencia a partir aproximadamente de los 370 km/h medidos en los distintos puntos. Cabe destacar que en dicha velocidad el aire deja de comportarse como incompresible, puesto que supera los 0.3 Mach (Considerando una velocidad del sonido de 1235.5 km/h para una temperatura de 20°C).

Por otro lado, en las zonas de hundimiento de la 1 a la 4, se observa un patrón de comportamiento que se puede dividir en dos categorías distintas, en función de las cotas de los puntos de medición. Estas cotas están relacionadas con el nivel de producción y el nivel de transporte. Se evidencia que los puntos de medición Producción 1, Producción 2, Barrio Cívico 1 y Barrio Cívico 2 exhiben pendientes similares. Por su parte, los puntos de medición Transporte 1, Transporte 2 y Sala de chancado igualmente presentan pendientes similares entre sí. Esto sugiere que existe una correlación entre la ubicación en diferentes cotas y el comportamiento de la velocidad medida en estos puntos.

La diferencia observada entre las zonas de la 1 a la 6, con relación a las pendientes registradas hasta los 370 km/h, indica una posible correlación entre el área de la zona de hundimiento y la velocidad medida, así como la distancia desde la zona hasta el punto de medición y las características geométricas de cada gálibo.

Igualmente, cabe destacar que a medida que la zona generadora del airblast se acerca a las conexiones a superficie, se observan conductos que no se ven afectados de manera significativa por el airblast, esto es posible observarlo en la Figura 20, en donde se visualiza que los conductos que se encuentran más lejos de las conexiones a superficie con respecto a la zona de hundimiento generadora del airblast, poseen velocidades inferiores a 50 km/h para un airblast de 250 km/h en batea.

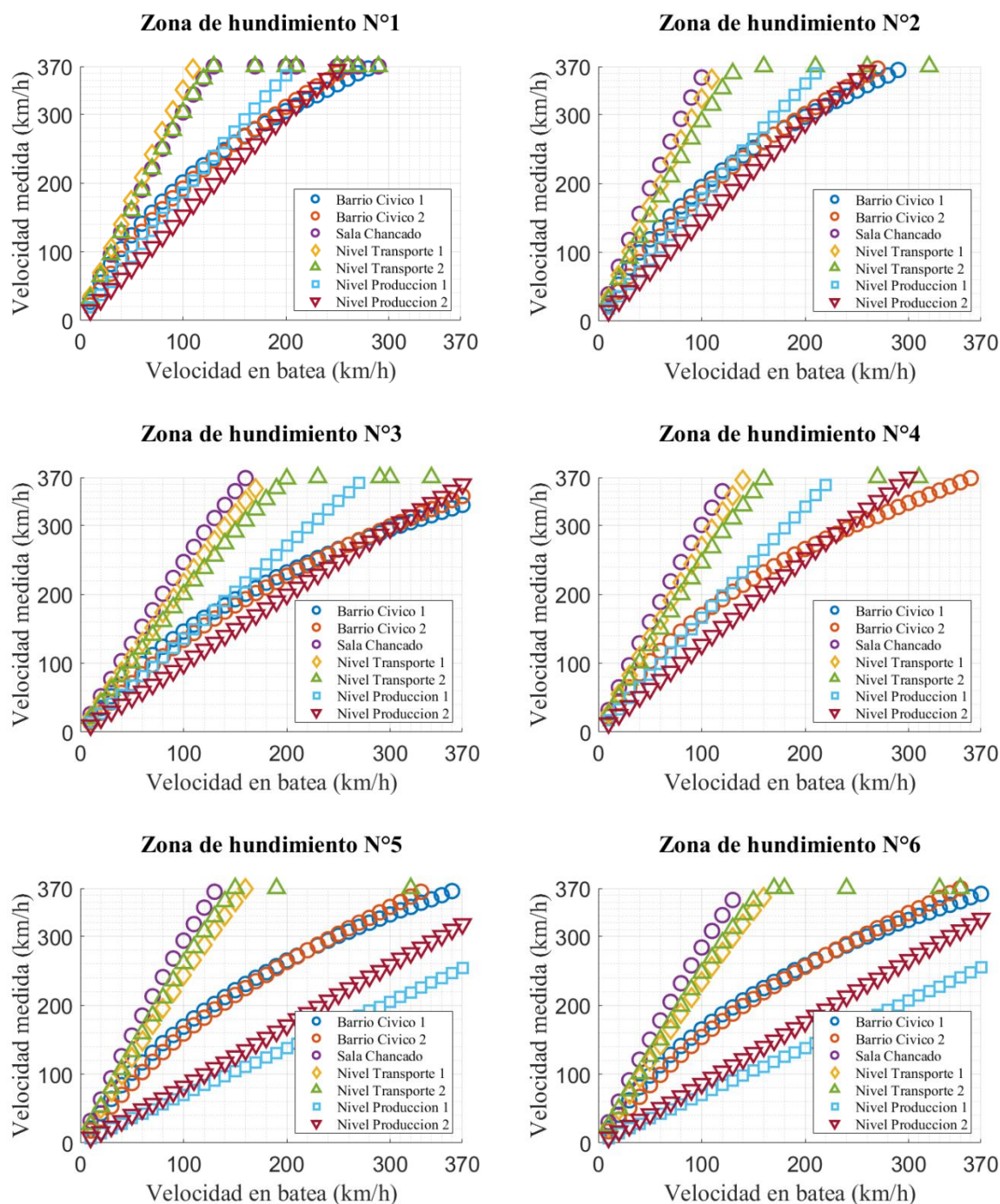


Gráfico 5. Gráficos de velocidad medida en función de la velocidad en batea para cada zona de hundimiento del diseño.

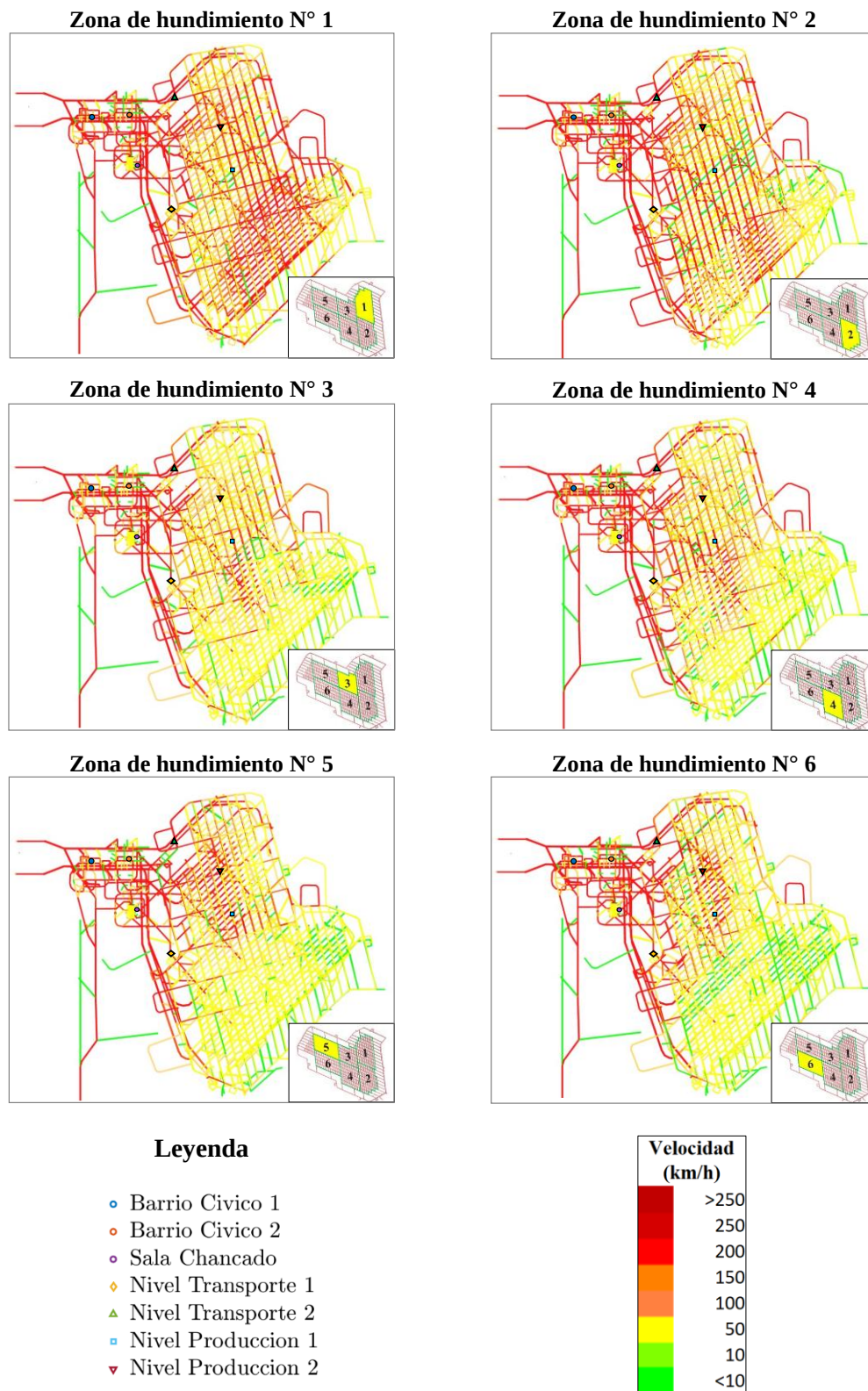


Figura 20. Velocidad provocada por un airblast de 250 km/h.

Para cuantificar esta situación, se registra la velocidad medida en función de la distancia a lo largo de un eje (color verde) en el nivel de producción, para este escenario, tanto para la zona de hundimiento 2 y 6. Como se puede apreciar en las Figuras 21, así como en los Gráficos 6 y 7.

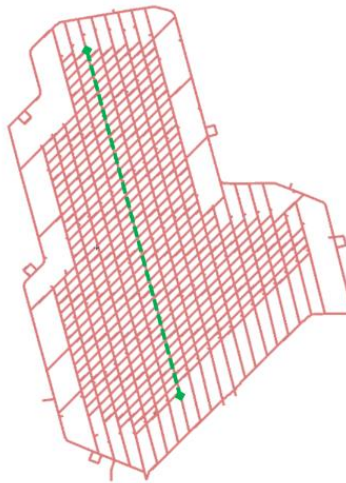


Figura 21. Eje de medición en el nivel de producción.

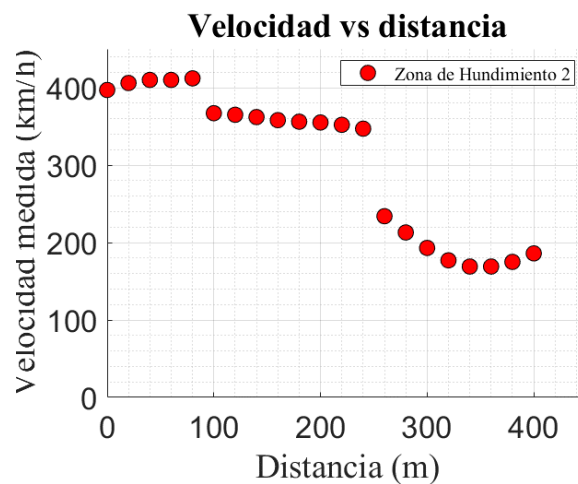


Gráfico 6. Velocidad en función de la distancia al airblast nivel producción para la zona 2.

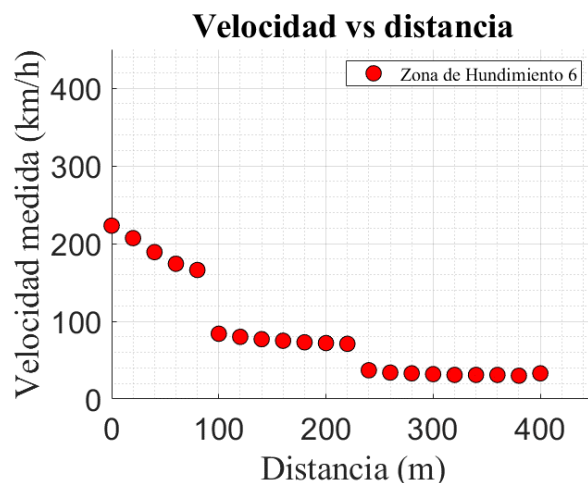


Gráfico 7. Velocidad en función de la distancia al airblast nivel producción para la zona 6.

Se observa que, en el caso de la zona de hundimiento 2, las velocidades disminuyen en función de la distancia, presentando dos puntos de quiebre donde se registran reducciones significativas en la velocidad. Estas reducciones son causadas por dos puntos de cruce con el nivel de ventilación. Sin embargo, es importante destacar que la velocidad se mantiene por encima de los 150 km/h en todo el eje medido.

Por otro lado, en el caso la zona de hundimiento 6, se observa una drástica disminución en la velocidad registrada, también con dos puntos de quiebre. En la cual, posterior a los 200 metros, las velocidades caen por debajo de los 50 km/h.

Es relevante mencionar que los puntos de quiebre en los gráficos se encuentran a distancias diferentes, ya que las mediciones se toman a partir del límite del bloque respectivo.

Por su parte para los 2 puntos de medición en el acceso principal y la chimenea de inyección del sistema de ventilación, se confeccionan gráficos de velocidad medida en función de la velocidad inyectada en batea para todas las zonas de hundimiento los cuales se muestran en Gráficos 8 y 9

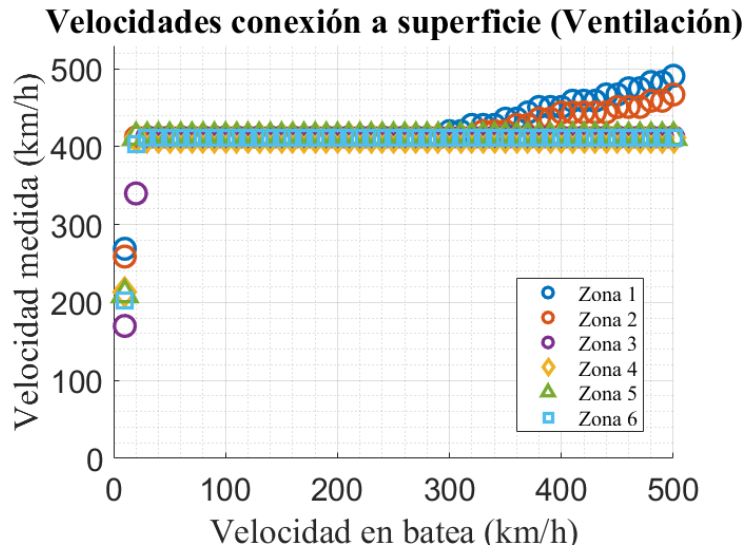


Gráfico 8. Velocidad medida en la conexión con superficie de los conductos de ventilación.

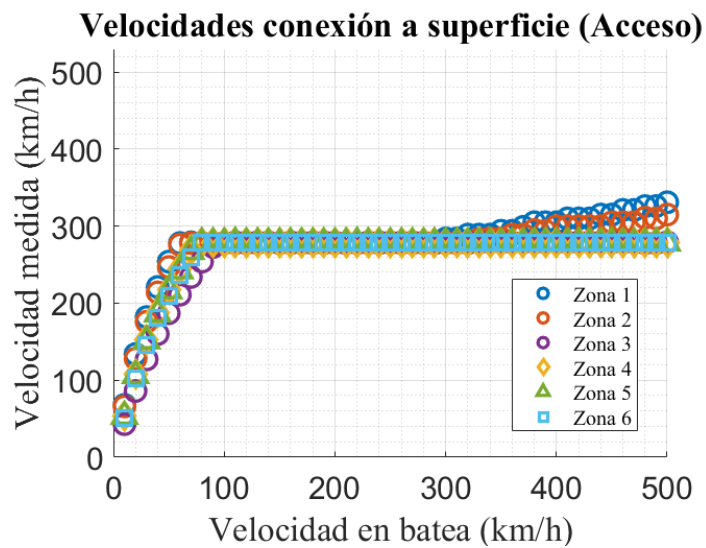


Gráfico 9. Velocidad medida en la conexión con superficie del acceso principal.

Se evidencia que el nivel de ventilación registra mayores velocidades que el acceso principal, esto es a raíz de que el sistema de ventilación presenta una menor resistencia para el flujo de aire en comparación con el acceso principal, como se ilustra en la Figura 22.

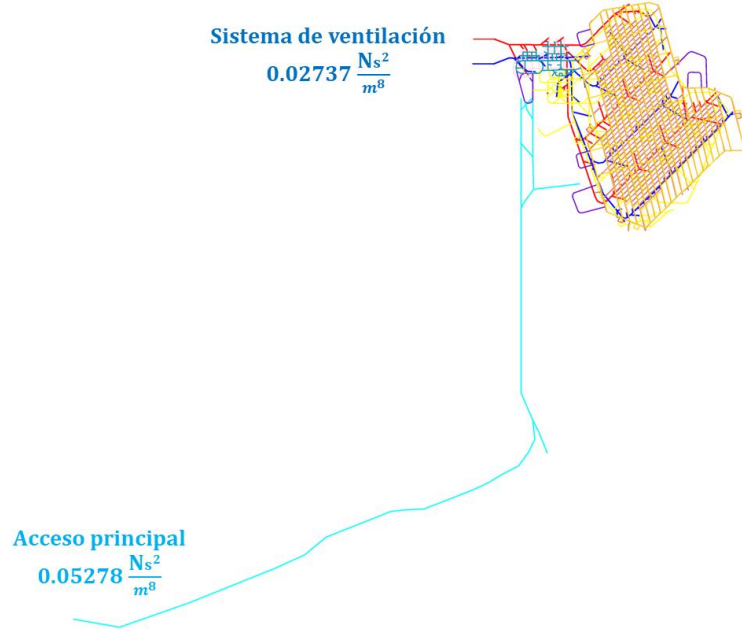


Figura 22. Resistencia de los conductos de acceso principal y chimenea de ventilación, vistas en planta layout general.

8. Modelo matemático

A partir de las posibles correlaciones observadas entre las distintas propiedades geométricas de los puntos de medición, se busca generar un modelo que logre predecir la velocidad producida por un airblast para distintos puntos en el diseño, utilizando teorema de II-Buckingham.

El modelo utiliza la velocidad medida en el punto normalizada por la velocidad de inyección en batea V_0 , la cual puede ser estimada a partir de los modelos propuestos por Palma et al. (2018) [4], Rojas et al. (2023) [5] o Morales (2023) [6].

$$\frac{V_{medida}}{V_0} = f(D_{Vertical}, D_{Punto}, D_{Zona}, A_{Zona}, P_{Gálibo}) \quad (6)$$

Donde:

- V_{medida} : Velocidad medida en los puntos (km/h)
- V_0 : Velocidad generada por el airblast en batea (km/h)
- A_{Zona} : Área de la zona de hundimiento que genera el airblast (m^2)
- D_{Punto} : Distancia hacia la salida a superficie más cercana desde el punto de medición (m)
- D_{Zona} : Distancia hacia la salida a superficie más cercana desde el centro de la zona de hundimiento (m)
- $D_{Vertical}$: Distancia vertical respecto al nivel de producción (m)
- $P_{Gálibo}$: Perímetro del gálibo donde se realiza la medición (m)

Se propone un modelo a partir de los parámetros de la ecuación 6, ajustada por 3 coeficientes k , α_1 y α_2 , que se muestra a continuación:

$$\frac{V_{medida}}{V_0} = k \cdot \left(1 + \frac{D_{Vertical}}{D_{Punto}}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{A_{Zona}}{(D_{Zona} - D_{Punto}) \cdot P_{Gálibo}}\right)^{\alpha_2 \left(\frac{D_{Zona}}{D_{Punto}}\right)} \quad (7)$$

El primer término busca representar una mayor velocidad a los puntos que se encuentran en un nivel distinto al de producción, los que en todo diseño de block caving cuentan con una menor cantidad de galerías, esperando que esta diferencia genere una mayor velocidad en dichos niveles.

El segundo termino relaciona de manera directamente proporcional el área de la zona de hundimiento generadora del airblast e inversamente proporcional la distancia recorrida por el flujo al punto de medición y el perímetro de este, respecto a la velocidad medida en dicho punto.

El tercer termino busca representar una mayor velocidad para los puntos que se encuentren en el trayecto entre la zona de hundimiento generadora del airblast y la conexión a superficie más cercana.

Dado que los datos en los que se observa una posible correlación corresponden a las zonas de hundimiento de la 1 a la 6, y además las velocidades de flujos de aire superiores a 370 km/h dejan de ser incompresibles, el modelo se calibra y valida a partir de los datos de estas zonas y valores registrados inferiores a dicha velocidad, por otro lado, los datos utilizados corresponden a mediciones que se encuentran entre la zona de hundimiento generadora del airblast y una conexión a superficie, por lo que, el modelo solo es válido para predecir velocidades en puntos del diseño que se encuentren entre la zona que genera el evento y una conexión a superficie.

La calibración fue realizada con los datos de las zonas de hundimiento 1, 3, 5 y 6 (567 datos) y por su parte la validación con las zonas 2 y 4 (269 datos), obteniendo los resultados estadísticos mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Estadística de parámetros de ajuste del modelo.

Coeficientes	Estimación	SE	tStats	pValue
K	0.94613	0.045839	20.64	6.254E-71
α_1	24.589	0.74543	32.987	9.75E-134
α_2	0.16682	0.020588	8.1028	3.344E-15

Finalmente se muestra la correlación entre el modelo y las mediciones en el Gráfico 10 y además el comportamiento del modelo respecto a las mediciones en el Gráfico 11.

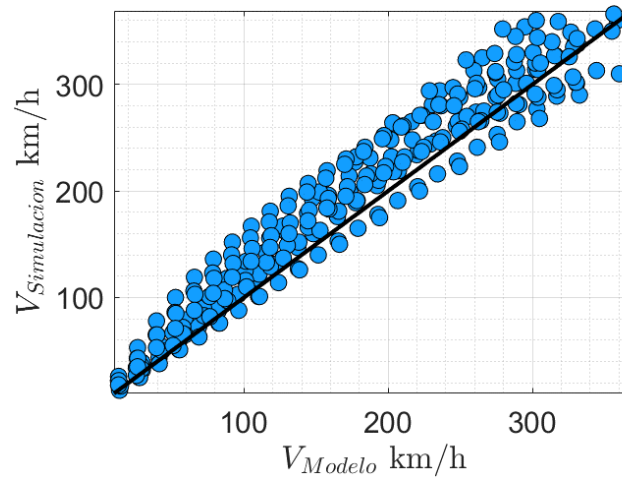


Gráfico 10. Correlación entre el modelo y los datos obtenidos mediante simulación numérica.

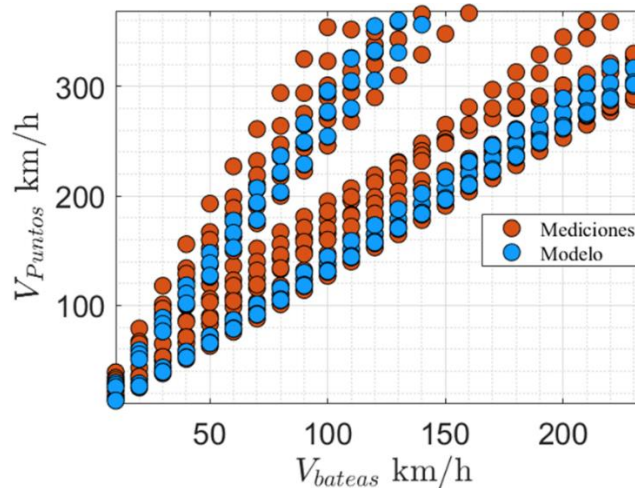


Gráfico 11. Comportamiento del modelo y datos simulados.

Se observa en primer lugar en base a las estadísticas de los coeficientes de ajuste, que todos los términos del modelo son significativos dado que se obtiene un valor de p-Value inferior a 0.05 para cada uno de ellos, además, a partir de los Gráficos 10 y 11 se evidencia una correlación entre el modelo y las mediciones realizadas mediante simulación numérica con el software Ventsim, sin embargo, dado que el caso de estudio se trata de un diseño real, con pocas simplificaciones, el modelo no presenta una gran precisión para realizar predicciones de velocidad producidas por un airblast para distintos puntos del diseño, aun así, es un primer acercamiento para lograr estimar cuan peligroso puede llegar a ser un airblast.

9. Clasificación en escala de Beaufort.

A continuación, se presenta la escala de Beaufort, con la cual se clasifican los datos medidos para cada punto de cada zona de hundimiento.

Tabla 3. Escala de Beaufort.

ESCALA BEAUFORT		
ESCALA	VELOCIDAD DEL VIENTO (KM/H)	EFFECTOS DEL VIENTO EN TIERRA
0	1	HAY CALMA, EL HUMO ASCIENDE VERTICALMENTE.
1	1 – 5	EL HUMO INDICA LA DIRECCION DEL VIENTO.
2	6 – 11	SE MUEVEN LAS HOJAS DE LOS ARBOLES.
3	12 – 19	LAS COPAS DE LOS ARBOLES SE AGITAN Y LAS BANDERAS ONDULAN.
4	20 – 28	ADEMAS DE QUE LAS COPAS DE LOS ARBOLES SE AGITAN, EL POLVO Y LOS PAPELES SE LEVANTAN.
5	29 – 38	SE OBSERVAN PEQUEÑOS MOVIMIENTOS EN LOS ARBOLES Y LA SUPERFICIE DE LOS LAGOS SE ONDULA.
6	39 – 49	LAS RAMAS DE LOS ARBOLES SE MUEVEN Y RESULTA DIFICIL MANTENER ABIERTO UN PARAGUAS.
7	50 – 61	LOS ARBOLES GRANDES SE MUEVEN Y ES DIFICIL CAMINAR CONTRA EL VIENTO.
8	62 – 74	LAS COPAS DE LOS ARBOLES SE QUIEBRAN, ADEMAS DE QUE LA CIRCULACION DE LAS PERSONAS SE DIFICULTA.
9	75 – 88	SE OBSERVAN DAÑOS EN LOS ARBOLES Y ES IMPOSIBLE CAMINAR CONTRA EL VIENTO.
10	89 – 102	LOS ARBOLES SON ARRANCADOS Y LAS ESTRUCTURAS DE LAS CONSTRUCCIONES SUFREN DAÑOS.
11	103 – 117	OCURREN DAÑOS SEVEROS EN LAS CONSTRUCCIONES, TEJADOS Y ARBOLES.
12	> 118	HAY DESTRUCCION TOTAL.

A partir de la escala de Beaufort, se realiza la clasificación para cada punto perteneciente a cada bloque en función de la velocidad de inyección en batea, generando una matriz de riesgo para cada bloque, como se muestra a continuación.

- Zona de hundimiento 1:

Tabla 4. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 1.

Bloque N° 1	Velocidad por punto de medición (km/h)						
Velocidad de inyección (km/h)	Producción 1	Producción 2	Barrio Cívico 1	Barrio Cívico 2	Transporte 1	Transporte 2	Sala Chancado
20	37	30	55	45	70	64	82
40	75	61	104	90	140	128	163
60	112	91	141	129	208	190	237
80	149	122	173	162	275	250	306
100	186	153	201	192	336	303	368
120	222	184	226	220	373	352	373
140	258	214	248	245	373	373	373
160	293	243	269	268	373	373	373
180	326	271	287	290	373	373	373
200	357	299	305	311	373	370	373
220	389	326	321	331	373	373	373
240	410	352	336	350	373	373	373
260	409	378	352	369	373	370	373
280	410	402	367	373	373	373	373
300	418	417	380	380	380	380	380

- Zona de hundimiento 2:

Tabla 5. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 2.

Bloque N° 2	Velocidad por punto de medición (km/h)						
Velocidad de inyección (km/h)	Producción 1	Producción 2	Barrio Cívico 1	Barrio Cívico 2	Transporte 1	Transporte 2	Sala Chancado
20	36	29	53	43	70	67	79
40	72	59	100	86	140	134	156
60	107	88	136	123	208	199	227
80	143	118	167	156	275	264	294
100	179	147	195	186	336	323	354
120	214	176	219	212	373	373	373
140	248	205	241	237	373	373	373
160	281	234	261	260	373	373	373
180	313	261	280	281	373	373	373
200	345	288	297	301	373	373	373
220	375	314	313	321	373	373	373
240	405	339	327	340	373	373	373
260	410	364	343	358	373	373	373
280	410	388	357	373	373	373	373
300	409	410	372	373	380	373	373

- Zona de hundimiento 3:

Tabla 6. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 3

Bloque N° 3	Velocidad por punto de medición (km/h)						
Velocidad de inyección (km/h)	Producción 1	Producción 2	Barrio Cívico 1	Barrio Cívico 2	Transporte 1	Transporte 2	Sala Chancado
20	27	20	35	28	44	41	52
40	54	40	69	57	87	81	103
60	81	59	99	84	130	121	153
80	108	79	124	110	173	161	201
100	136	99	146	134	216	200	247
120	163	120	166	155	258	238	290
140	190	140	184	175	298	274	330
160	217	160	201	193	336	307	369
180	244	180	217	210	372	338	373
200	271	200	232	227	373	368	373
220	297	220	246	242	373	373	373
240	323	239	259	257	373	371	373
260	349	258	272	272	373	373	373
280	374	277	283	285	373	373	373
300	399	296	295	299	373	370	373

- Zona de hundimiento 4:

Tabla 7. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 4.

Bloque N° 4	Velocidad por punto de medición (km/h)						
Velocidad de inyección (km/h)	Producción 1	Producción 2	Barrio Cívico 1	Barrio Cívico 2	Transporte 1	Transporte 2	Sala Chancado
20	33	25	43	35	55	51	65
40	66	51	85	71	110	101	129
60	99	76	118	104	163	150	189
80	133	101	146	134	218	200	247
100	166	127	170	160	270	246	301
120	199	153	193	184	320	290	350
140	232	178	214	206	366	329	373
160	265	204	232	227	373	367	373
180	296	228	250	246	373	373	373
200	328	253	266	265	373	371	373
220	359	277	281	282	373	371	373
240	389	301	295	299	373	373	373
260	410	325	308	315	373	373	373
280	409	347	320	331	373	371	373
300	410	370	333	346	373	371	373

- Zona de hundimiento 5:

Tabla 8. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 5.

Bloque N° 5	Velocidad por punto de medición (km/h)						
Velocidad de inyección (km/h)	Producción 1	Producción 2	Barrio Cívico 1	Barrio Cívico 2	Transporte 1	Transporte 2	Sala Chancado
20	14	16	43	35	50	53	63
40	28	32	84	70	99	107	126
60	42	49	117	103	148	159	185
80	56	65	145	132	196	211	241
100	70	82	169	159	244	261	294
120	84	100	192	182	288	307	342
140	97	117	212	204	330	351	373
160	111	135	231	225	370	371	373
180	124	153	248	244	373	373	373
200	138	171	265	263	373	373	373
220	151	189	280	280	373	373	373
240	165	207	294	296	373	371	373
260	178	225	307	312	373	373	373
280	192	242	320	327	373	373	373
300	205	259	332	343	373	373	373

- Zona de hundimiento 6:

Tabla 9. Matriz de riesgo para la zona de hundimiento 6.

Bloque N° 6	Velocidad por punto de medición (km/h)						
Velocidad de inyección (km/h)	Producción 1	Producción 2	Barrio Cívico 1	Barrio Cívico 2	Transporte 1	Transporte 2	Sala Chancado
20	14	17	41	34	48	50	60
40	28	34	81	67	95	101	121
60	42	51	113	99	142	150	178
80	56	68	141	128	188	199	232
100	70	86	165	154	234	247	284
120	84	104	187	177	277	291	331
140	98	122	207	199	318	332	373
160	111	140	225	219	357	371	373
180	125	158	242	238	373	370	373
200	138	176	258	256	373	371	373
220	152	194	273	273	373	371	373
240	166	213	287	289	373	370	373
260	180	231	300	304	373	371	373
280	193	248	313	319	373	373	373
300	207	266	324	334	373	373	373

Cabe destacar que, dependiendo de la zona de hundimiento generadora del airblast, velocidades en batea bajas (40 km/h), pueden generar daños en diferentes puntos del diseño, alcanzando según la clasificación de Beaufort la escala 12, donde la velocidad supera los 118 km/h y genera una destrucción total.

10. Conclusiones

En el presente estudio, se lleva a cabo la replicación del comportamiento de un airblast en el diseño real de la mina Diamante de CODELCO. Este análisis se realiza mediante el uso del software ampliamente empleado en la planificación de sistemas de ventilación subterránea Ventsim. Se considera la inyección de aire tanto en el nivel de producción como en el nivel de hundimiento de la mina mediante puntos de inyección en bateas y los bordes de la zona de hundimiento generadora del airblast.

Como parte de este trabajo, se propone una nueva expresión matemática que tiene la capacidad de predecir la velocidad generada por un airblast en un punto específico dentro del diseño minero. Este punto se encuentra entre la zona de hundimiento que da origen al airblast y las conexiones que lo conectan con la superficie, válido para velocidades hasta 370 km/h.

Los resultados del análisis revelan que la velocidad generada por un airblast en el interior de la mina sigue un comportamiento no lineal. Esta no linealidad está condicionada por diversos factores geométricos inherentes al diseño de la mina. La predicción precisa se ve dificultada por esta falta simplificaciones en el caso de estudio abordado, ya que está influenciada por la compleja interacción de elementos geométricos específicos que conforman los distintos niveles del diseño minero.

Es esencial destacar que el impacto del airblast se limitan a las áreas de la mina entre el punto de origen del fenómeno y las conexiones que conectan con la superficie. A medida que nos alejamos de la trayectoria de las ráfagas de aire en dirección a la superficie, el efecto del airblast disminuye gradualmente. Lo cual puede ser utilizado en la fase de diseño para mitigar los efectos de un airblast.

Por otro lado, es relevante señalar que el airblast se propaga principalmente hacia la superficie a través del sistema de ventilación de la mina, debido a que presenta una menor resistencia en comparación con otras conexiones que llegan a la superficie.

Finalmente, es importante resaltar que incluso velocidades aparentemente bajas, como 40 km/h, pueden causar daños significativos en el interior de la mina, dependiendo del área y ubicación específica de la zona de hundimiento generadora del airblast, por lo que es relevante en caso de cualquier tipo de colgadura producida en una mina de block caving, tomar todas las medidas posibles de prevención respectivas.

11. Referencias

- [1] V. CODELCO, «Declaracion de impacto ambiental, Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea», Knight Piésold, SA202-00039/32, 2010.
- [2] E. T. Brown, *Block caving geomechanics*. Indooroopilly, Qld.: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 2002.
- [3] J. P. Alegría, «Lecciones aprendidas colapsos MB N01-S01 Chuquicamata subterránea», presentado en Geomecánica Para Una Minería Sostenible, Santiago de Chile, ago. 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=jV8ds3IZlps&t=4439s&ab_channel=SociedadChilenaDeMecanicadeRocas
- [4] S. Palma, S. A. Galindo-Torres, A. Delonca, M. Ruest, A. Scheuermann, y D. Finn, «Universal laws for air velocities in airblast events during block caving», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 113, pp. 303-309, ene. 2019, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.12.007.
- [5] M. Rojas, R. Morales, A. Delonca, E. Rojas, E. Farias, y S. Palma, «A novel model for air velocities in airblast events in block caving mining», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 170, p. 105559, oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijrmms.2023.105559.
- [6] V. Morales, «Evaluación de las velocidades del aire en función del espesor de la capa de material fragmentado en casos de airblast en minería de caving», Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago de Chile, 2023.
- [7] S. A. Galindo-Torres *et al.*, «An airblast hazard simulation engine for block caving sites», *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 107, pp. 31-38, jul. 2018, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.034.
- [8] Howden, *Ventsim Manual del Usuario*, 5.4. 2023.
- [9] H. L. Hartman y J. Mutmanský, *Mine Ventilation and Air Conditioning*, 3°. Wiley-Interscience, 1997.
- [10] D. A. Chin, *Fluid mechanics for engineers*. Boston: Pearson, 2017.

12. Anexos

```
import os
import pandas as pd
import warnings
# Directorio donde se encuentran los archivos Excel
directorio = 'Datos/'
ids_deseados = [5368, 1186, 1409, 940, 2581, 6326, 6492, 3025, 3529]
ignoredfile = 'Archivo Base.xlsx'
dataframes = []
listarchivos = os.listdir(directorio)
C = 0
# Lee todos los archivos Excel en el directorio y crea DataFrames
for archivo in listarchivos:
    if archivo.endswith('.xlsx') and archivo != ignoredfile:
        ruta_archivo = os.path.join(directorio, archivo)
        df = pd.read_excel(ruta_archivo)
        # Borrar columna Script
        df = df.drop("Script", axis=1)
        # Extracion del número de archivo
        numLAr = archivo.split(" ")
        numLAr = numLAr[-1].split(".")
        df = df[df['Index'].isin(ids_deseados)]
        df["id"] = [int(numLAr[0])] * df.shape[0]
        dataframes.append(df)
        # Barra de carga
        os.system('cls')
        por = C*100/len(listarchivos)
        C += 1
        print(int(por)+1, "% ", '[' , '=' * int(por),
              '- '*(int(100-por)-1), ']', sep="", flush=True)
# Concatena los DataFrames en uno solo
datos_combinados = pd.concat(dataframes, ignore_index=True)
# Ordenar
filas_deseadas = datos_combinados.sort_values(by=['id', 'Index'])
filas_deseadas = filas_deseadas.reset_index(drop=True)
filas_deseadas.insert(0, 'id', filas_deseadas.pop('id'))
# Exportar el DataFrame a un archivo CSV
nombre_archivo_csv = 'datos.csv' # Nombre del archivo de salida CSV
# index=False para no incluir el índice en el CSV
filas_deseadas.to_csv(nombre_archivo_csv, index=False)
```

Código 1: Código desarrollado en Python, utilizado para filtrar los datos correspondientes a cada bloque.
Colaboración de Gino Verardi Maturana.