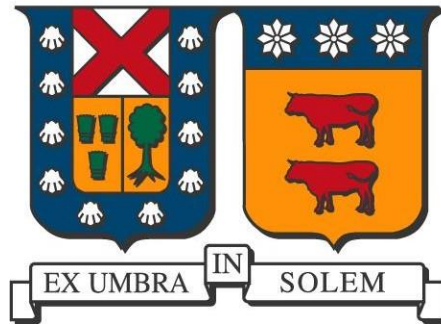


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO - CHILE



**“PROGRAMACIÓN DE MINERÍA Y ACTIVIDADES DE
CONSTRUCCIÓN PARA PROYECTO DE
EXPLOTACIÓN MINERA CON PANEL CAVING”**

NICOLÁS MAURICIO CARMONA ARAYA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA: GONZALO NELIS

INGENIERO SUPERVISOR: PATRICIO LEDDY

Junio, 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron en este proceso, la etapa universitaria pudo haber sido difícil, pero gracias a todos con quienes compartí lograron que fuera una grata experiencia, dejándome muchos y muy buenos recuerdos.

Agradezco a mi familia: mis padres Alex y Paola, mi hermano Alexis, mis abuelos, mis tíos y a los Tosos, por su apoyo incondicional, educación, cariño y motivación que me brindaron en todo momento.

Quiero agradecer a Vanessa, que fue un pilar fundamental en muchos aspectos durante esta etapa y a su familia, que me apoyó en diferentes oportunidades.

A todas las personas que conocí en la universidad, que de alguna u otra forma me ayudaron en este camino, en especial a mi grupo de amigos de Adderall y VIP OPKA. Ustedes eran la motivación para ir a la universidad (a cerrito), sin esas juntas de estudios y carretes, nada de esto habría sido posible. Su compañerismo y amistad son muy destacables.

A los de la Taberna, mis amigos del colegio, que al pasar los años aún nos seguimos viendo y estoy seguro de que eso se mantendrá por mucho más tiempo. Gracias por la inmensa cantidad de anécdotas y risas compartidas.

Al pequeño pero unido grupo de la empresa Ingelenko, que me recibió en el sur con muy buenos desayunos, apoyándome y enseñándome diversos conocimientos a lo largo de mi primera práctica. Sé que algún día lograré ganarles en el Mario Kart.

A la empresa Hatch, por darme la oportunidad de trabajar con ustedes y desarrollar mi memoria. A todos los pesados que componen el equipo minero, quienes me trataron como un ingeniero antes de serlo, fueron un gran apoyo en esta última etapa e inicio de mi etapa profesional. Las reuniones con ustedes en Ichina fueron fundamentales.

A la universidad y los profesores que me entregaron sus enseñanzas y fueron una guía en mi formación académica.

Por último, pero no menos importante, a mis perrunos.

RESUMEN

La preparación minera dentro de un proyecto se encarga de gestionar un conjunto de actividades dedicadas al desarrollo de túneles y la construcción de infraestructura necesaria para el inicio de producción y la continuidad de la explotación. La planificación de estas actividades de manera continua y secuencial durante el ciclo operativo de la mina es fundamental para evitar retrasos en los hitos principales del proyecto y, en consecuencia, no impactar su valor económico.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un programa que integre las actividades de preparación minera y que permita la planificación en un enfoque de mediano/largo plazo para un proyecto de explotación mediante Panel Caving. Para cumplir con dicho objetivo, se utiliza el software Deswik, una herramienta computacional de planificación minera, que permite generar el diseño minero de manera gráfica con sólidos 3D, incorporando las actividades del caso de estudio, con sus correspondientes atributos, recursos y rendimientos, quedando supeditados a los criterios de planificación y lineamientos geomecánicos del proyecto.

Adicionalmente, para representar de manera más precisa los rendimientos que se obtendrán en terreno, en base a un registro histórico de la mina se realiza una estimación de los tiempos del ciclo minero y un análisis estadístico mediante simulaciones de Montecarlo, utilizando el software @Risk. Esto permite determinar el impacto de las interferencias típicas operacionales, obteniendo tres escenarios que determinan el límite de avance mensual por frente para los desarrollos horizontales. En el presente trabajo, se opta por utilizar el escenario conservador para que el programa sirva como base para futuras iteraciones por parte del equipo del proyecto.

Durante el desarrollo del trabajo se elaboró un programa preliminar, para analizar los resultados en conjunto con el trabajo de ingeniería de otras disciplinas. De esta manera, se retroalimenta al diseño minero, determinando la necesidad de facilidades constructivas y obras provisionarias para cumplir con los requerimientos del proyecto.

Posteriormente, al actualizar el programa con el nuevo diseño minero y requerimientos de otras disciplinas, se logra integrar todas las actividades cumpliendo con las fechas estipuladas para los hitos principales, optimizando estas fechas en 18 meses respecto a la programación anterior. En consecuencia, se presentan múltiples rutas críticas con diferencias menores temporalmente. Por lo que se entrega una serie de medidas de mitigación, que el equipo de proyecto deberá implementar en conjunto para reducir el riesgo de incumplimiento del programa.

Finalmente, se recomienda una evaluación de escenarios alternativos a esta iteración del programa, mediante la actualización de los parámetros de entrada preliminares. Esto incluye la precisión de los tiempos del ciclo considerando los tiempos reales que se obtengan durante la construcción de la mina, la asignación de recursos una vez realizada la estimación de flota y la priorización de obras con el objetivo de analizar opciones que potencialmente permitan lograr una optimización y mejora de los hitos de planificación.

ABSTRACT

Mining preparation in a project is responsible of the management of a set of activities dedicated to tunnel development and the construction of the necessary infrastructure for the start of the production process and mining continuity. Continuous and sequential planification in the mine's operational cycle is essential to avoid delays in the main project milestones and, negatively impacting its economic value.

The main objective of this work is to develop a program that integrates the mining preparation activities that allows a mid-term/long-term planification for a Panel Caving mining project. In order to achieve this objective, Deswik Software was used, a mining planning computational tool that allows to generate a graphic 3D solid mine design incorporating the activities of the case of study, with its attributes, resources and performances, leaving them subject to the project planification criteria and geomechanics guidelines.

Additionally, in order to precisely represent operational performance, a time estimation of the mine cycle and statistical analysis is done by Monte Carlo simulations with the @Risk software, based on the mine's historical record. This allows to determinate the impact of typical operational interferences, obtaining three scenarios that define a monthly advance limit by front for the horizontal developments. In this work we used the conservative scenario so the program can work as a base for future iterations by the project's team.

During the development of this work, a preliminary program was elaborated to analyze results and other engineering areas work altogether. Thus, feedback on the mine design was obtained, determining the necessity of works required for construction and temporary works to achieve the project requirements.

Then, updating the program with the new mining design and requirements from other engineering areas, integration of all activities was achieved, fulfilling the stipulated dates for the main milestones, optimizing these dates in 18 months compared to the previous programming. Consequently, multiple critical routes are presented with minimal temporary differences, therefore, a series of mitigation actions were given to the team so that they implement them to reduce the non-completion risk of the program.

Finally, an evaluation of alternative scenarios in this iteration of the program is recommended by changing the preliminary input parameters. This includes the cycle times precision, considering the real times obtained during the mine construction, the resources assignation once the fleet estimation is completed and prioritization of works in order to analyze options that may potentially allow optimization and improvement in the planning milestones.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2. ALCANCES	2
2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	3
2.1. PREPARACIÓN MINERA	3
2.2. PLANIFICACIÓN DE LA PREPARACIÓN MINERA.....	3
2.3. HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN MINERA.....	4
2.3.1. DESWIK.CAD.....	5
2.3.2. DESWIK.SCHED	5
2.3.3. DESWIK.IS	5
2.4. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	5
2.4.1. SIMULACIÓN DE MONTECARLO.....	5
2.4.2. SOFTWARE @RISK	6
3. ANTECEDENTES CASO DE ESTUDIO.....	7
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	7
3.2. ACTIVIDADES DEL PROYECTO.....	10
3.2.1. DESARROLLOS HORIZONTALES.....	10
3.2.2. DESARROLLOS VERTICALES	11
3.2.3. ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y HABILITACIÓN	12
3.2.4. SECUENCIAS CONSTRUCTIVAS	12
3.3. CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN.....	14
3.3.1. INTERFERENCIAS EN LA PREPARACIÓN MINERA	14
3.3.2. RESTRICCIONES DE PLANIFICACIÓN Y GEOMECÁNICAS.....	14
3.3.3. ZONA DE TRANSICIÓN	15
3.3.4. PRIORIZACIÓN DE OBRAS.....	16

4. METODOLOGÍA.....	17
4.1. CÁLCULO DEL CICLO MINERO Y LÍMITES TÉCNICOS.....	17
4.2. PROGRAMACIÓN EN SOFTWARE DESWIK	18
5. RESULTADOS	20
5.1. CICLO MINERO Y LÍMITES TÉCNICOS.....	20
5.1.1. TIEMPO EFECTIVO DE TRABAJO	20
5.1.2. ESTIMACIÓN TIEMPOS DEL CICLO MINERO	21
5.1.3. INTERFERENCIAS TÍPICAS DEL CICLO MINERO	22
5.1.4. AVANCE MENSUAL Y LIMITE TÉCNICO POR FRENTE	24
5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	26
5.2.1. DISEÑO MINERO 3D	26
5.2.2. ACTIVIDADES PROGRAMADAS	27
5.2.3. PRIORIDADES	28
5.2.4. RECURSOS Y RENDIMIENTOS	29
5.2.5. DEPENDENCIAS	32
5.2.6. TARGETS DE PROGRAMACIÓN	33
5.2.7. RESULTADOS DEL PROGRAMA	33
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
5.3.1. RUTAS CRÍTICAS	36
5.3.2. ACTUALIZACIÓN DEL PROGRAMA.....	37
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
7. BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	43
ANEXO 1: CÁLCULO TIEMPOS DEL CICLO MINERO	43
ANEXO 2: INTERFERENCIAS TÍPICAS.....	46
ANEXO 3: DISEÑO MINERO – PROGRAMA PRELIMINAR.....	52
ANEXO 3: DISEÑO MINERO – PROGRAMA FINAL	56
ANEXO 5: CARTA GANTT	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Clasificación de la Preparación Minera (Camhi, 2012).....	3
Ilustración 2: Distribuciones de Probabilidad en @Risk	6
Ilustración 3: Diseño Minero del Caso de Estudio.....	9
Ilustración 4: Esquema del Ciclo Minero (Cortez, 2020)	11
Ilustración 5: Secuencia Constructiva del Sistema de Traspaso NP-NTI	13
Ilustración 6: Vista en Perfil del Cruzamiento con Rotura	14
Ilustración 7: Curvas Zona de Transición – Planificación Minera PAN-NNM (Cortez, 2020)....	16
Ilustración 8: Esquema de la Metodología Aplicada	17
Ilustración 9: Tiempo de las Actividades del Ciclo Minero por Sección.....	21
Ilustración 10: Tiempo Total del Ciclo para Diferentes Escenarios	23
Ilustración 11: Tiempo de las Actividades del Ciclo Minero con Interferencias – Escenario Conservador	24
Ilustración 12: Avance Mensual del Ciclo para Diferentes Escenarios	25
Ilustración 13: Modelo 3D del Diseño Global de la Mina	27
Ilustración 14: Prioridad Desarrollos Horizontales – Nivel de Hundimiento	28
Ilustración 15: Ejemplo Dependencia de Actividades en NP	32
Ilustración 16: Programa Desarrollos Horizontales	34
Ilustración 17: Programa Desarrollos Verticales	34
Ilustración 18: Actividades de Minería y Construcción Desarrolladas en el Mes 0 – NP	35
Ilustración 19: Ajustes del Diseño Minero – Desarenador Provisorio y Ventilación Forzada	38
Ilustración 20: Ajustes del Diseño Minero – Pique Traspaso de Marina y Conexión NTI/SNV .	39
Ilustración 21: Histograma de Interrupción por Coordinación Operativa.....	46
Ilustración 22: Ajuste Distribución de Probabilidad – Interrupción por Coordinación Operativa	47

Ilustración 23: Histograma de Interrupción por Suministro de Agua	48
Ilustración 24: Histograma de Interrupción por Suministro de Agua (Impacto <10 horas)	49
Ilustración 25: Histograma de Interrupción por Suministro de Agua (Impacto $\geq$ 10 horas)	50
Ilustración 26: Ajuste Distribución de Probabilidad – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto <10 horas)	51
Ilustración 27: Ajuste Distribución de Probabilidad – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto $\geq$ 10 horas)	51
Ilustración 34: Modelo 3D del Nivel de Hundimiento – Programa Preliminar	52
Ilustración 35: Modelo 3D del Nivel de Producción – Programa Preliminar	53
Ilustración 36: Modelo 3D del Nivel de Transporte Intermedio – Programa Preliminar	54
Ilustración 37: Modelo 3D del Sub-Nivel de Ventilación – Programa Prelimi	55
Ilustración 28: Modelo 3D del Nivel de Hundimiento – Programa Final	56
Ilustración 29: Modelo 3D del Nivel de Producción – Programa Final	57
Ilustración 30: Modelo 3D del Nivel de Transporte Intermedio – Programa Final	58
Ilustración 31: Modelo 3D del Sub-Nivel de Ventilación – Programa Final	59
Ilustración 32: Detalle del Modelo 3D en los Niveles NH y NP	60
Ilustración 33: Detalle del Modelo 3D en los Niveles NTI y SNV	61
Ilustración 38: Carta Gantt Resumen – Programa Actividades de Minería y Construcción del Caso de Estudio	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los Tipos de Pilares Presentes en el Proyecto	13
Tabla 2: Hitos Principales de la Mina	16
Tabla 3: Tiempo Efectivo del Turno	20
Tabla 4: Resumen del Análisis Estadístico de Interferencias Típicas Operacionales	22
Tabla 5: Límite de Avance Mensual por Nivel	25

Tabla 6: Cuantificación Desarrollos Mineros – Detalle por Alcance de Financiamiento.....	26
Tabla 7: Cantidad de Actividades Programadas – Por Categoría	27
Tabla 8: Equipos Cuadrilla Desarrollo Horizontal y Excavaciones.....	29
Tabla 9: Asignación de Recursos – Desarrollos Horizontales	29
Tabla 10: Asignación de Recursos – Desarrollos Verticales	30
Tabla 11: Asignación de Recursos – Actividades Programadas	31
Tabla 12: Ejemplos Precedencia de Actividades	32
Tabla 13: Cálculo de Tiempos - Actividad de Perforación.....	43
Tabla 14: Cálculo de Tiempos - Actividad de Tronadura.....	43
Tabla 15: Cálculo de Tiempos - Actividad de Carguío y Extracción de Marinas	44
Tabla 16: Cálculo de Tiempos - Actividad de Acuñadura y Saneamiento	44
Tabla 17: Cálculo de Tiempos - Actividad de Fortificación Primaria	45
Tabla 18: Cálculo de Tiempos - Actividad de Scanner y Avance de Servicios.....	45
Tabla 19: Estadística Descriptiva de los Datos de Interrupción por Coordinación Operativa.....	46
Tabla 20: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Coordinación Operativa.....	47
Tabla 21: Estadística Descriptiva de los Datos de Interrupción por Suministro de Agua	48
Tabla 22: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Suministro de Agua	49
Tabla 23: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto <10 horas) .	49
Tabla 24: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto $\geq$ 10 horas) .	50

1. INTRODUCCIÓN

La industria minera es uno de los sectores productivos más importantes de Chile, aportando en los últimos años aproximadamente un 11% del PIB del país (Consejo Minero, 2024). Sin embargo, detrás de este éxito económico se presenta una complejidad considerable, en las actividades necesarias para el desarrollo de un proyecto minero, las cuales requieren del trabajo en conjunto de una diversidad de disciplinas que constituyen esta industria.

En la minería subterránea, la preparación minera considera la ejecución de actividades de desarrollo, construcción, montaje y habilitación de infraestructura, que permiten la incorporación de un área para el inicio o la continuidad de explotación del proyecto. Estas actividades se deben llevar a cabo de manera continua y secuencial durante el ciclo operativo de la mina, ya que cualquier detención, retraso o interferencia en estas tareas tiene un impacto directo en las metas productivas de la operación minera y, en consecuencia, en el valor económico del proyecto.

Durante el desarrollo de estas actividades se pueden presentar diferentes interferencias las cuales son comunes en todos los proyectos mineros, pero la cantidad y el tipo de interferencias pueden variar significativamente entre una y otra, dependiendo de las condiciones de operación y las estrategias de gestión y planificación de cada empresa. Por lo tanto, al momento de planificar las diferentes actividades es importante considerar estas interferencias para representar de mejor manera los rendimientos que se obtendrán en terreno.

En la minería, actualmente se presenta una tasa de mortalidad equivalente a 8.6 muertes por cada 100 mil trabajadores, cuyo valor es elevado, considerando que el promedio por actividad económica del país es de 2.6 (Consejo Minero, 2024). Reducir estas cifras es muy importante para la industria, por lo que se busca constantemente reducir la exposición de personas a riesgos laborales. En el caso de estudio, debido a que la faena minera ha sido impactada por fatalidades, se incorporan factores de seguridad muy elevados, mediante restricciones geomecánicas más severas, las cuales se deben considerar en la planificación minera.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un programa de actividades de minería, construcción y montaje para un proyecto de explotación minera con Panel Caving, para obtener una planificación en el mediano/largo plazo de las actividades. Este programa se llevará a cabo mediante el software minero Deswik, el cual permite integrar los criterios de planificación y lineamientos geomecánicos.

Además, a partir de un análisis estadístico aplicado a un registro histórico de interferencias muestreadas en la faena minera, se pretende determinar el impacto de las interferencias típicas operacionales en los rendimientos del ciclo minero, con el objetivo de incorporar dichas interferencias en el programa y así, disminuir la brecha que existe entre el trabajo planificado y lo ejecutado en terreno.

Con este programa se busca determinar la ruta crítica para el inicio de producción, la secuencia constructiva de las obras interior mina y sus correspondientes plazos, la necesidad de obras provisionales y evaluar el aporte de la implementación del software Deswik para la planificación de la preparación minera.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un programa de actividades mineras y de construcción para un proyecto de explotación minera con Panel Caving mediante el uso del software Deswik, con la finalidad de obtener una planificación en el mediano/largo plazo de las actividades relacionadas.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar mediante revisión bibliográfica y cálculos de ingeniería, las bases para la programación, estableciendo los parámetros de entrada, restricciones y criterios de planificación correspondientes al caso de estudio.
- Crear un programa que integre las actividades de minería y construcción de acuerdo con las bases y criterios de programación, con un modelo 3D del diseño minero que permita visualizar la secuencia constructiva de la mina.
- Planificar la totalidad de actividades para dar cumplimiento a los hitos principales del caso de estudio, analizando la ruta crítica y requerimientos de otras disciplinas.
- Evaluar el aporte que significa la creación del programa y la implementación del software Deswik para la planificación de obras en un proyecto de explotación minera.

1.2. ALCANCES

Los alcances del presente trabajo de título son los siguientes:

- Para desarrollar el programa se establece la utilización del software minero Deswik en la versión 2023.2.
- El caso de estudio corresponde a un proyecto de explotación de minería subterránea con Panel Caving, considerando para la programación la totalidad de desarrollos mineros (horizontales, verticales y excavaciones mayores) y actividades de construcción, montaje y habilitación, que se encuentren comprendidos en la etapa de inversión inicial hasta el término del proyecto.
- Los hitos principales del caso de estudio son el inicio de hundimiento y producción de la mina, por lo tanto, la secuencia de actividades para dar cumplimiento a estos hitos corresponderá a la ruta crítica.
- La planificación del programa se desarrolla con un enfoque de mediano/largo plazo, lo que permite obtener planes mensuales o trimestrales.
- La planificación del programa se enfoca con mayor detalle en las obras correspondientes a la etapa de inversión inicial, mientras que aborda de manera general las obras con gastos diferidos.

2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. PREPARACIÓN MINERA

La preparación minera se encarga de gestionar un conjunto de actividades dedicadas al desarrollo de túneles, excavaciones, montaje, habilitación y construcción de infraestructuras mineras, mecánicas, civiles, eléctricas e instrumentación, en los distintos niveles o sectores de una mina, que permiten la incorporación de un área para el inicio o la continuidad de explotación del proyecto (Contreras, 2016).

Estas actividades se deben llevar a cabo de manera continua y secuencial durante el ciclo operativo de la mina. Cualquier detención, retraso o interferencia en estas tareas tiene un impacto directo en todas las metas productivas de la operación minera y, en consecuencia, en el valor económico del proyecto.

La preparación minera se puede subdividir en 3 grupos.

Excavaciones Mineras	Obras Civiles	Montaje de Infraestructura
Corresponde a los desarrollos horizontales, verticales y excavaciones mayores, además de incluir todas las actividades de fortificación, saneamiento y estabilización que estén asociados a estos.	Son las obras cuya materialización principal es el hormigón armado o simple. Algunos ejemplos de estas actividades son la carpeta de rodado, marcos, muros de confinamiento, entre otros.	Corresponde a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto. Normalmente, se ejecutan posterior a las obras civiles y culminan con la habilitación local o remota de un elemento determinado. Ejemplos de esta actividad son el montaje y habilitación de buzones de carguío, puntos de vaciado, salas eléctricas, ventiladores, entre otros.

Ilustración 1: Clasificación de la Preparación Minera (Camhi, 2012).

2.2. PLANIFICACIÓN DE LA PREPARACIÓN MINERA

La planificación de la preparación minera establece la ruta crítica para el inicio y crecimiento de explotación del proyecto, la cual se realiza mediante una secuencia de actividades programadas en función de las necesidades futuras y actuales del proyecto. A continuación, se resumen las etapas que componen la preparación minera para una explotación mediante Panel Caving (Alegría, 2010).

1. Definición del programa de obras necesarias para el inicio o continuidad de explotación del sector.
2. Planificación de la logística para la preparación del área, de acuerdo con las características del proyecto.
3. Definición del programa de adquisiciones necesarias para la operación.
4. Estimación de la flota de equipos y personal para cumplir con el programa de obras.
5. Definición de las actividades críticas para establecer las rutas prioritarias de cada sector.
6. Inicio de obras programadas, mediante personal propio o externo.
7. Recepción de las obras realizadas y entrega de la zona preparada al área de producción.

Esta planificación, considera durante la ejecución del proyecto diferentes factores y criterios como la estrategia de crecimiento del sector, zonas de transición, la geología del sector, el diseño de la mina, lineamientos geomecánicos, restricciones operacionales, reglamentos de seguridad, entre otros, los cuales se detallarán en las siguientes secciones. Estos factores y criterios condicionan los rendimientos y secuencias constructivas de las obras, afectando los tiempos empleados de cada actividad.

Actualmente, la planificación tradicional de la preparación minera se sustenta mayormente en la experiencia de los planificadores, basándose en rendimientos empíricos de proyectos preexistentes o en datos históricos de la mina y no consideran variabilidad en sus cálculos, generando un único escenario del sistema. Además, las principales herramientas del método tradicional son planillas de cálculo, softwares de diseño como el AutoCAD, para presentar de manera gráfica los planes y softwares de gestión como el Primavera P6, para presentar Cartas Gantt, lo que genera planes pocos flexibles. (Contreras, 2016)

En la planificación de esta área es común enfrentarse a modificaciones constantes de las condiciones o parámetros de entrada, debido a las múltiples disciplinas involucradas, falta de información al inicio o durante el desarrollo del proyecto, contratiempos o interferencias operacionales en las labores de terreno, entre otros desafíos, que generan cambios en la programación de las actividades mineras y de construcción. Por estos motivos, considerar una planificación con el método tradicional puede resultar en una visión limitada y poco representativa de la realidad.

2.3. HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN MINERA

En los últimos años, se ha presentado un notable aumento en la oferta de softwares especializados para la planificación minera, reflejado por la necesidad de herramientas más avanzadas y eficientes en la industria. En este mercado destacan softwares como Deswik (Deswik), MineSight (Hexagon Mining), Surpac (Dassault Systèmes), Datamine (Datamine), Vulcan (Maptek), entre otros.

Para el presente trabajo se establece la utilización del software Deswik, el cual corresponde a una herramienta computacional ampliamente utilizada en la industria para la planificación y diseño de operaciones mineras, tanto para proyectos de explotación subterránea como a rajo abierto. Esta herramienta incluye una variedad de módulos con funciones especificadas para la industria minera, como la creación de modelos geológicos, modelamiento y diseño minero, gestión de datos, planificación y control de operaciones mineras, modelado de flujo de material, entre otros.

A continuación, se detalla el conjunto de módulos utilizados para la programación del presente trabajo, indicando sus principales características (Quezada, 2023).

2.3.1. DESWIK.CAD

Deswik.CAD presenta herramientas avanzadas de diseño y modelado de sólidos 3D, permitiendo la creación o edición de diseños mineros de manera precisa y detallada. Además, presenta compatibilidad con otros softwares permitiendo importar trabajos desde otros softwares, como AutoCAD.

Adicionalmente, en este módulo se generan todas las entidades correspondientes a las actividades por programar y permite una gestión integrada de datos, facilitando la caracterización de cada labor mediante atributos.

2.3.2. DESWIK.SCHED

Este módulo, ofrece una funcionalidad avanzada de planificación que permite la asignación óptima de recursos, la programación de actividades y la gestión de tiempos en el diseño minero. Esta herramienta presenta una interfaz de diagramas de Gantt diseñada para grandes conjuntos de datos, con la funcionalidad de generar reportes de manera eficiente según la necesidad del usuario, mediante filtros de los atributos generados previamente.

2.3.3. DESWIK.IS

Deswik.IS, por su parte, proporciona una interfaz que vincula el diseño creado en Deswik.CAD y la planificación minera generada en Deswik.Sched, el cual permite la coordinación entre las diferentes actividades programadas, tanto de las áreas de minería como de construcción, asegurando una planificación integral y eficiente de todas las etapas del proyecto.

2.4. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En la preparación minera se presentan diferentes interferencias las cuales son impredecibles y no pueden ser programadas con certeza, por lo que es necesario realizar un análisis estadístico de un registro histórico de interferencias para determinar su impacto en la programación. A continuación, se detallan las herramientas necesarias para este análisis.

2.4.1. SIMULACIÓN DE MONTECARLO

La simulación de Montecarlo es una técnica estadística que utiliza números aleatorios para modelar y analizar sistemas complejos. Implica la ejecución repetida de un modelo matemático con diferentes valores aleatorios a partir de una distribución de probabilidad predefinida. Este enfoque ayuda a comprender y gestionar la incertidumbre, proporcionando resultados probabilísticos que permiten tomar decisiones informadas en áreas como ingeniería y planificación de proyectos (Leddy, 2014).

2.4.2. SOFTWARE @RISK

Para realizar el análisis estadístico se dispone del software @Risk (Paladise Tools), el cual corresponde a un complemento de estadística avanzada del software Excel®, cuyas principales funciones permiten modelar variables de entrada mediante distribuciones de probabilidad, generar valores de salida mediante muestreos de Montecarlo, simular múltiples escenarios posibles indicando la probabilidad y riesgos de que estos ocurran y realizar posteriores análisis de sensibilidad.

A continuación, se presentan algunas distribuciones de probabilidad que el software es capaz de modelar a partir de variables aleatorias.

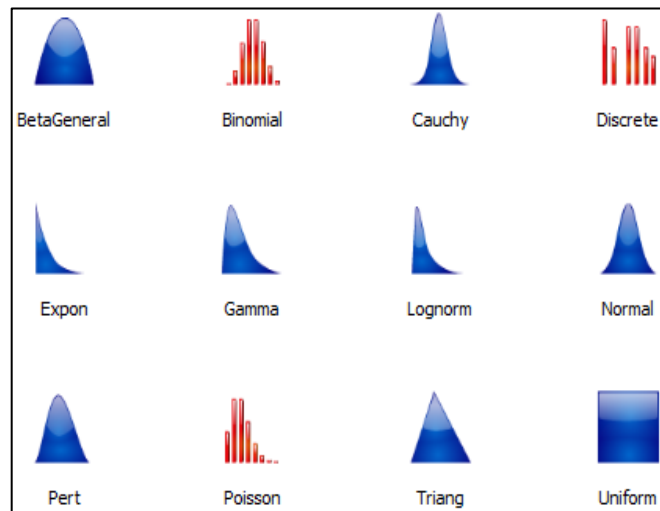


Ilustración 2: Distribuciones de Probabilidad en @Risk

3. ANTECEDENTES CASO DE ESTUDIO

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Por temas de confidencialidad el nombre de la empresa y del proyecto, no serán revelados. Sin embargo, se detallarán las principales características de la mina para entender el caso de estudio.

El proyecto corresponde a una mina subterránea con un método de explotación mediante Panel Caving Convencional, que consiste en el hundimiento masivo utilizando la gravedad para fragmentar una porción del macizo rocoso inducida por una socavación basal, esta fragmentación se propaga principalmente de manera vertical generando una columna de material fragmentado, que será extraído continuamente desde los puntos de extracción (Lobiano, 2016).

El proyecto considera un polígono de explotación con un área equivalente a 280,000 m² y una reserva aproximada de 150 Mt. Actualmente, se encuentra en su etapa de construcción, planificando su inicio de producción para dentro de 2 años, con una vida útil de 20 años y una capacidad productiva que aumenta gradualmente hasta alcanzar un régimen de 30.000 t/d en el séptimo año.

El sector de la mina se encuentra sometido a condiciones de altos esfuerzos, por lo que se utiliza una técnica de pre-acondicionamiento mediante fracturamiento hidráulico ascendente desde los niveles de Hundimiento y Producción. El proceso de hidrofracturamiento consiste en perforar extensos barrenos para luego introducir sondas especiales que inyectan agua a gran presión, provocando la propagación de fracturas en el macizo rocoso circundante (Ritter, 2018).

Para llevar a cabo el proyecto se dispone de un diseño minero compuesto por diferentes niveles con las siguientes funciones y características.

- **Nivel de Hundimiento (NH):**

Se compone de calles paralelas espaciadas cada 32 m con orientación N30°E, interceptadas por cruzados ubicados cada 165 m con orientación E-W y cabeceras que circunvalan las labores mencionadas.

Las principales actividades que se desarrollan en este nivel es la Perforación & Tronadura del Hundimiento y el pre-acondicionamiento de la roca, mediante fracturamiento hidráulico ascendente.

- **Nivel de Producción (NP):**

Se encuentra ubicado 22 metros bajo el Nivel de Hundimiento (gradiente-gradiente), compuesto por una malla tipo Teniente de 16x20 m, es decir, calles paralelas espaciadas cada 32 m con orientación N30°E y zanjas ubicadas cada 20 m con orientación E-W, incluyendo las cabeceras que circunvalan las labores mencionadas.

Las principales actividades que se desarrollan en este nivel es la Perforación & Tronadura de Bateas, la operación de carguío y transporte de mineral, mediante equipos LHD autónomos de 13 yd³, desde los puntos de extracción hacia los puntos de vaciado y el pre-acondicionamiento de la roca, mediante fracturamiento hidráulico descendente.

Adicionalmente, en este nivel se encuentra el acceso principal de la mina, talleres para la mantención de equipos, zona de almacenamiento y distribución de petróleo, planta de hormigón y el barrio cívico para el personal de operación de la mina.

- **Nivel de Transporte Intermedio (NTI):**

Se encuentra ubicado 38 metros bajo el Nivel de Producción (gradiente-gradiente), compuesto por conexiones espaciados cada 147 m con orientación N30°E y cruzados cada 157 m con orientación E-W.

La principal función es la operación de carguío mediante camiones autónomos de 60 t, que reciben el material desde buzones electrohidráulicos telecomandados y lo transportan hacia las tolvas del sistema de manejo de materiales principal. Además, en este nivel se presenta el sistema eléctrico principal de la mina, mediante salas eléctricas que alimentan al resto de los niveles.

- **Sub-Nivel de Ventilación (SNV):**

Se compone de cruzados intercalados de inyección y extracción situados a 5 metros aproximadamente bajo el Nivel de Transporte Intermedio (gradiente-gradiente), los cuales presentan salas de ventilación con chimeneas hacia los diferentes niveles.

Si bien la función principal de este nivel es garantizar la correcta ventilación de la mina, el sub-nivel de extracción también cuenta con el sistema de drenaje principal, el cual se compone de canaletas ubicadas en los desarrollos horizontales, que están direccionados con pendiente hacia los desarenadores.

- **Nivel de Transporte Principal:**

Por último, el proyecto cuenta con un nivel de transporte principal que ya se encuentra completamente construido, ubicado a 14 metros bajo el Sub-Nivel de Ventilación, compuesto por diferentes cruzados que conectan con el exterior de la mina.

En este nivel, se recibe mediante buzones el material proveniente de las tolvas del Nivel de Transporte Intermedio y se transporta a través de un sistema de ferrocarril hacia una planta concentradora.

A continuación, en la Ilustración 3, se presenta de manera gráfica los niveles que componen el diseño minero del caso de estudio, indicando en color gris las obras construidas al momento de recibir el diseño minero (Diciembre de 2023).

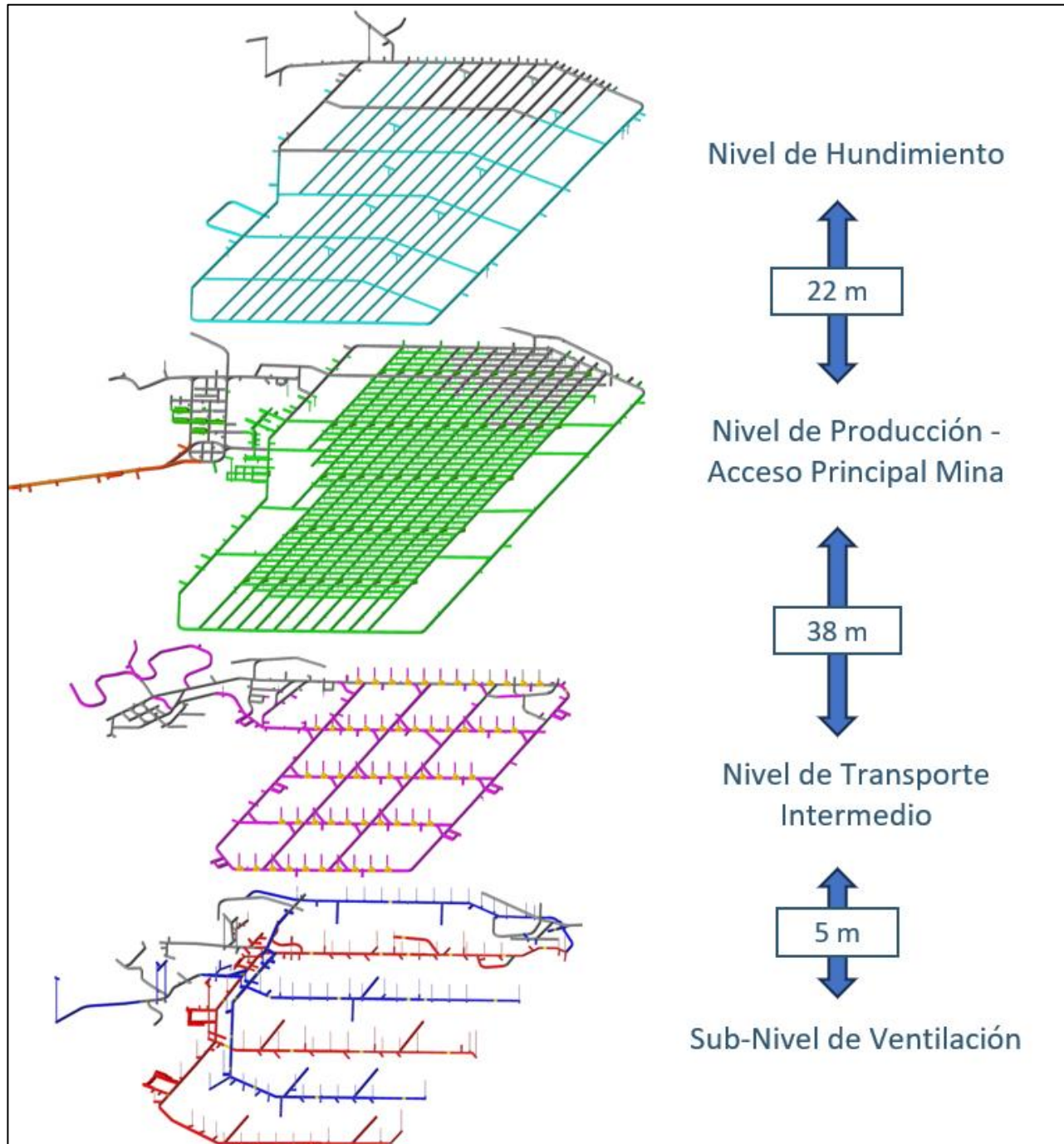


Ilustración 3: Diseño Minero del Caso de Estudio

3.2. ACTIVIDADES DEL PROYECTO

3.2.1. DESARROLLOS HORIZONTALES

Corresponden a la excavación y fortificación de toda labor subterránea con inclinación horizontal, las cuales son obras relevantes en la preparación minera debido a que se ejecutan en mayor cantidad y es la actividad inicial que permite el acceso para las operaciones del personal y los equipos, además, presentan sistemas de transmisión de energía, agua, comunicaciones, etc.

Para dar avance a los desarrollos horizontales, los cuales se pueden presentar en una o múltiples frentes, se considera un método de excavación convencional mediante perforación y tronadura, que son parte de un conjunto de operaciones unitarias que componen el ciclo minero.

El proyecto del caso de estudio establece un avance efectivo por disparo equivalente a 3.4 m, cuya ejecución se realizará de manera mecanizada, con una secuencia constructiva que considera las siguientes actividades principales:

1. Perforación de Avance:
 - Marcación de Frente
 - Perforación del Disparo
2. Carguío de Explosivos y Tronadura
 - Limpieza y Carguío de Tiros
 - Armada de Tronadura
3. Aislación Post-Tronadura
 - Ventilación Gases de Tronadura
4. Carguío y Extracción de Marinas
 - Carguío y Extracción de Marinas
 - Limpieza Post Carguío de Marinas
5. Acuñadura
6. Fortificación Primaria
 - Proyección Pre-Shotcrete
 - Perforación de Pernos
 - Lechado de Pernos
 - Colocación de Splitset
 - Instalación de Malla
 - Acondicionamiento de Malla
 - Proyección Shotcrete
7. Levantamiento Topográfico y Avance de Servicios
 - Levantamiento Topográfico
 - Instalación de Servicios (Ventilación, Agua, Electricidad)



Ilustración 4: Esquema del Ciclo Minero (Cortez, 2020)

3.2.2. DESAROLLOS VERTICALES

Corresponden a excavaciones con inclinación vertical las cuales cumplen distintos objetivos, como la conexión entre niveles para ventilación, vaciadero de marina, salidas de emergencia, pasacables, traspaso de material, drenaje, entre otros.

La metodología de construcción para los desarrollos verticales depende de su ubicación, diámetro y longitud, lo cual determina el equipo principal a utilizar. Las metodologías presentes en el caso de estudio son los siguientes.

- **Raise Borer:** El equipo se instala en el nivel superior para perforar una chimenea piloto hacia el nivel inferior, donde se conecta el escariador, el cual realiza la excavación con el diámetro deseado de manera ascendente. (Diámetro: 2.1 – 3.6 m)
- **Blind Hole:** El equipo se instala en el nivel inferior realizando la excavación de forma ascendente sin necesidad de que el nivel superior se encuentre construido. (Diámetro: 1.5 – 1.8 m)
- **VCR:** El equipo principal corresponde a un jumbo que se instala en el nivel superior para realizar la perforación y posteriormente la tronadura ascendente del desarrollo. Este método solo se utiliza para chimeneas con una longitud menor a 10 m. (Diámetro: 1.5 m)

3.2.3. ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y HABILITACIÓN

Las actividades de construcción corresponden principalmente a los trabajos que involucran el uso de hormigón armado o simple, encontrándose en mayor medida en el Nivel de Producción, utilizados para brindar seguridad y sostenimiento a la excavación.

Adicionalmente, se presentan actividades de montaje y habilitación de infraestructura, las cuales en conjunto permiten la puesta en marcha de los diferentes sistemas que componen el proyecto.

Las principales actividades de construcción, montaje y habilitación presentes en el caso de estudio son los siguientes:

- Carpeta de Rodado y Radier
- Muros de Confinamiento
- Puntos de Extracción
- Puntos de Vaciado
- Blindaje de Piques
- Fortificación de Chimeneas
- Salas y Subestaciones Eléctricas
- Dispositivos de Ventilación (Puertas, Tapados y Ventiladores)
- Construcción, Montaje y Habilitación en Infraestructuras (Talleres, Desarenador, Sistema de Traspaso, etc.)

3.2.4. SECUENCIAS CONSTRUCTIVAS

La preparación minera de un proyecto debe seguir una secuencia lógica constructiva en la que se determina la dependencia de cada actividad. Esto implica que las diferentes actividades deben llevarse a cabo en un orden específico y coordinado, en donde cada actividad depende de la finalización exitosa de las anteriores.

Para ejemplificar, en la Ilustración 5 se presenta la secuencia constructiva del sistema de manejo de materiales ubicado entre el nivel de producción y el nivel de transporte intermedio, que está compuesto principalmente por un punto de vaciado en el nivel superior, un pique de traspaso y un buzón en el nivel inferior.

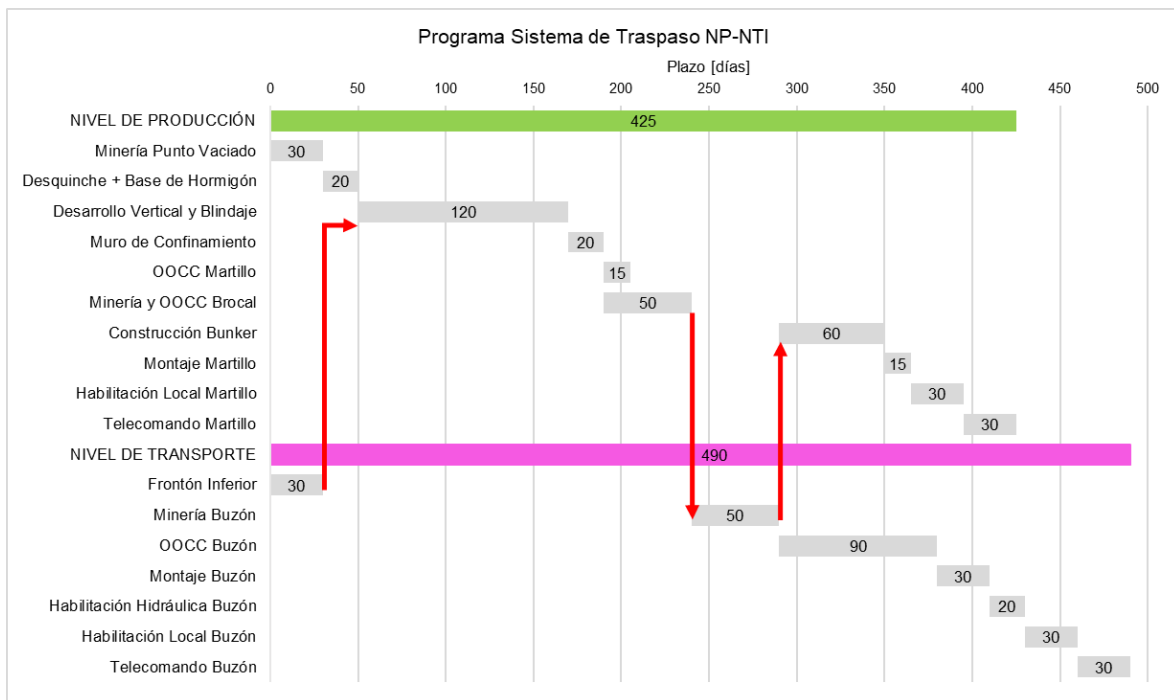


Ilustración 5: Secuencia Constructiva del Sistema de Traspaso NP-NTI

Cabe mencionar, que uno de los desafíos de este proyecto, es que, entre los niveles de transporte intermedio y ventilación, se presentan 32 cruzamientos con pilares reducidos (altura menor a 14 metros), que deben ser desarrollados y fortificados de manera que no comprometan la estabilidad de las labores y futura operación de los equipos de transporte.

Para este caso, la metodología constructiva considera un avance efectivo de 2.5 m por disparo en la zona del cruce y en 20 m previos y posterior a este. El rendimiento de avance y el tipo de fortificación dependerá de la altura del pilar en el cruzamiento.

Tabla 1: Clasificación de los Tipos de Pilares Presentes en el Proyecto

Tipo de Pilar	Altura Pilar	Fortificación Adicional	Rendimiento
A	≤ 3.4 m	Rotura del pilar, restituir mediante obras civiles con puente y marcos de refuerzo (Ver Ilustración 6)	15 m/mes
B	3.4 - 5 m	Fortificar con marcos de refuerzos tipo 1	15 m/mes
C	5 - 8 m	Fortificar con marcos de refuerzos tipo 2	15 m/mes
D	8 - 10 m	Proyección de shotcrete, malla electrosoldada y cables	Según avance del desarrollo
E	10 - 14 m	Cables	Según avance del desarrollo

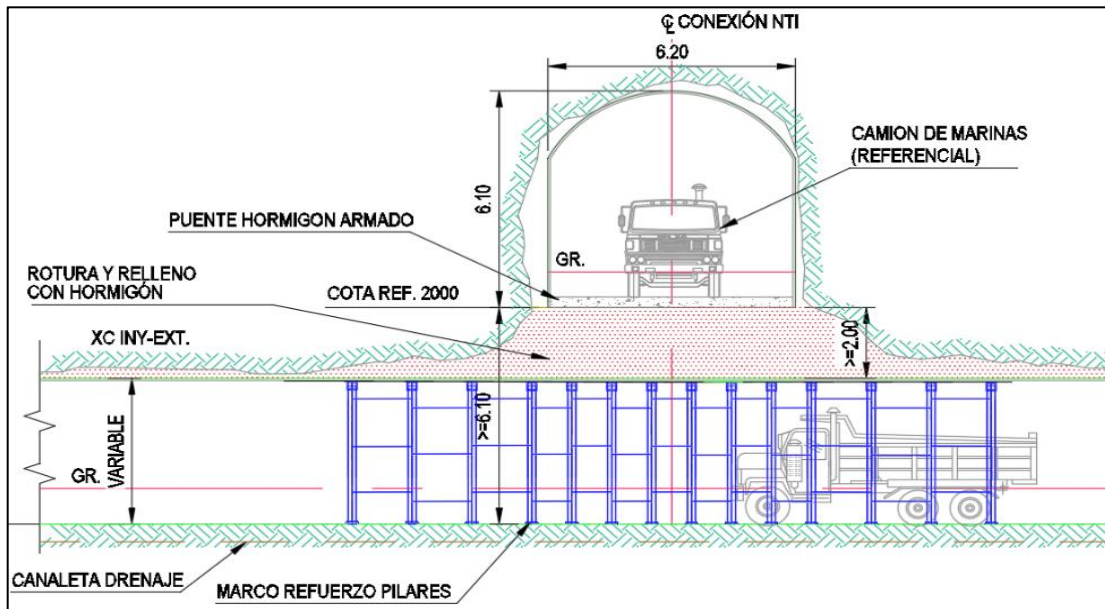


Ilustración 6: Vista en Perfil del Cruzamiento con Rotura

3.3. CRITERIOS DE PLANIFICACIÓN

3.3.1. INTERFERENCIAS EN LA PREPARACIÓN MINERA

Se entiende por interferencia a toda situación que genera demoras o pérdidas de tiempo y que afecta el normal desarrollo de una actividad, estas pueden ser programadas o no programadas y afectarán el tiempo de trabajo efectivo (Contreras, 2016)

Aunque las interferencias son comunes en todas las faenas mineras, la cantidad y el tipo de interferencias pueden variar significativamente entre una y otra, dependiendo de las condiciones de operación y las estrategias de gestión y planificación de cada empresa.

En la planificación de la preparación minera es importante considerar estas interferencias para representar de manera más cercana a la realidad los rendimientos que se obtendrán en terreno. Para el caso de estudio, se considera un registro histórico de las interferencias muestreadas durante la construcción de las obras tempranas, en un periodo de tiempo de 560 días.

3.3.2. RESTRICCIONES DE PLANIFICACIÓN Y GEOMECÁNICAS

Debido a que la faena minera ha sido impactada por fatalidades, la empresa ha determinado implementar factores de seguridad más elevados, mediante restricciones de planificación y geomecánicas más severas para prevenir los accidentes interior mina.

En este contexto, a partir de estudios geomecánicos y una investigación asociada a eventos sísmicos registrados en el sector del proyecto, surgieron restricciones y lineamientos que afectan la planificación de desarrollos. A continuación, se detallan los que se deben incorporar al programa.

En todos los niveles de la mina se deben aplicar los siguientes criterios asociados a las distancias mínimas de desfase de tronaduras, roturas y secuencias entre labores y niveles del sector footprint.

- En cabeceras y slot se debe adelantar 20 m antes de generar la apertura de una calle.
- Para ejecutar la armada de una nueva labor paralela o perpendicular, la frente debe estar distante un mínimo de 25 m, considerando un cilindro con altura de 25 m para los niveles adyacentes.
- No se debe realizar tronadura en el mismo turno con una distancia mínima de 30 m entre labores desde el eje y entre niveles.
- Para trabajar en frentes convergentes se debe tener un pilar mínimo de 15 m. Posteriormente, se debe aplicar rotura desde un solo sentido.
- Se debe considerar una aislación con una distancia mínima de 60 m desde el punto donde se esté realizando el fracturamiento hidráulico, considerando un cilindro con altura de 60 m para los niveles adyacentes.
- Para desarrollar los puntos de vaciado en el nivel de producción, se deben completar las labores mineras adyacentes en donde esté emplazado dicho punto.

Respecto a la fortificación se consideran los siguientes lineamientos:

- Se debe asegurar la instalación de fortificación primaria (perno-malla-shotcrete) dentro de un halo de 15 m, para realizar tronadura.
- La instalación de cables de intersecciones puede tener un desfase máximo de 30 m.
- Para pilares con altura mayor a 3.4 m y menor a 10 m se debe fortificar con marcos el nivel inferior, por lo tanto, se debe tener una aislación en ese punto para ambos niveles hasta finalizar la fortificación
- Para pilares con altura menor a 3.4 m se debe romper el pilar y restituir con obras civiles, por lo tanto, se debe tener una aislación en ese punto para ambos niveles hasta finalizar la construcción.

3.3.3. ZONA DE TRANSICIÓN

Los métodos de explotación tipo Caving presentan zonas de transición, en donde el estado tensional se encuentra aumentado y bajo continuos cambios, generando condiciones de esfuerzo considerablemente mayores a la condición *in-situ* (Cortez, 2020). En consecuencia, en todos los niveles se presentan las siguientes zonas de acuerdo con los estándares de seguridad.

- **“Zona Full Construida”**: Implica que todas las actividades de infraestructura y fortificación de esa área deben estar finalizadas para ese periodo.
- **“Zona Full Desarrollada”**: Implica que todas las actividades de minería de esa área deben estar finalizadas para ese periodo.

Cabe mencionar, que estas zonas están en constante crecimiento de acuerdo con la estrategia de explotación que establece un avance perpendicular al sistema de fallas, con una zona de transición de 80 m de distancia delante de la frente.

A continuación, en la Ilustración 7, se presenta un ejemplo de las zonas de transición mostrando su avance en el tiempo con los colores de verde a rojo, junto con los polígonos de la zona “full construida” y “full desarrollada”, correspondientes al periodo de la última zona de transición mostrada (Nov/23), indicadas en color magenta y azul, respectivamente.

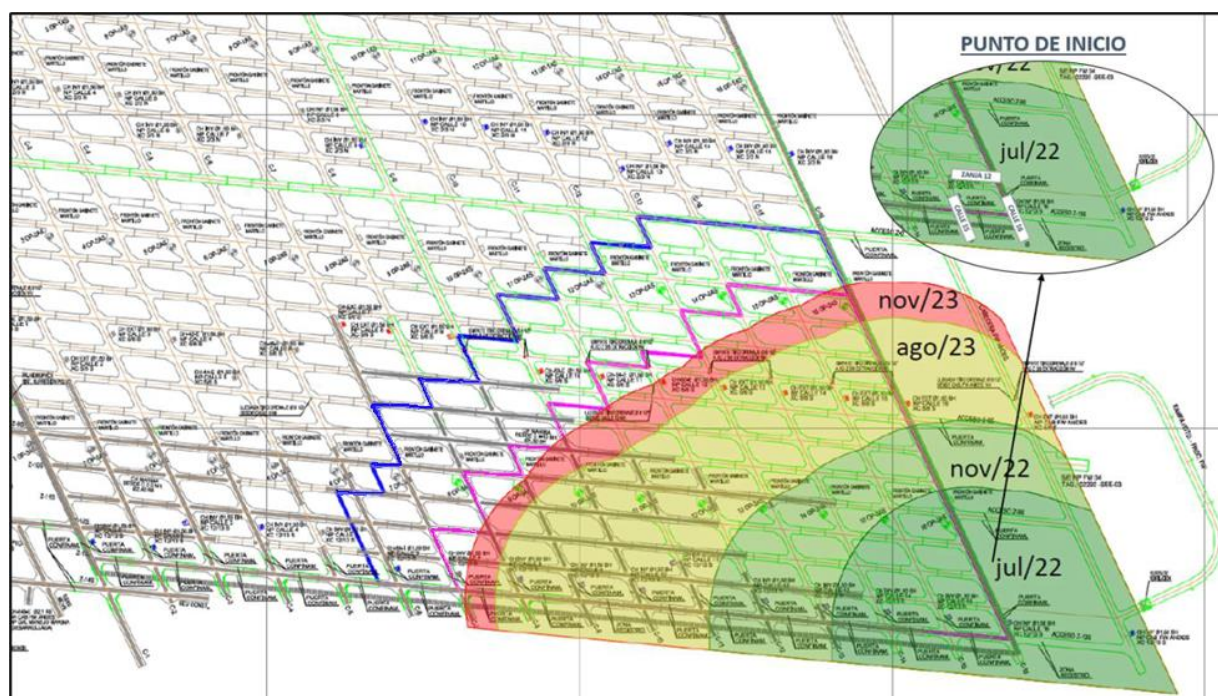


Ilustración 7: Curvas Zona de Transición – Planificación Minera PAN-NNM (Cortez, 2020)

3.3.4. PRIORIZACIÓN DE OBRAS

El avance de los desarrollos horizontales y verticales, junto con las actividades programadas mencionadas anteriormente, deben seguir una secuencia lógica de construcción según las necesidades de cada sector. Estas prioridades pueden depender, por ejemplo, de la ruta crítica, las obras requeridas para el inicio de producción, desarrollar labores para generar accesos o conectar sectores, labores necesarias para la ventilación, el transporte de material, el drenaje, entre otros.

Los hitos principales de acuerdo con la planificación minera se detallan en la Tabla 2, cuyos alcances serán los objetivos para la programación, considerando cumplir con las áreas “full desarrolladas” y “full construidas” establecidas para cada hito.

Tabla 2: Hitos Principales de la Mina

Hitos Principales	Alcance Bateas
Mes -4: Inicio de Hundimiento	1° Batea Tronada
Mes 0: Inicio de Producción	1° Batea Incorporada
Mes +4: Continuidad de Producción	11° Batea Incorporada
Mes +196: Término Proyecto	Última Batea Incorporada

4.2. PROGRAMACIÓN EN SOFTWARE DESWIK

A continuación, se explica de manera secuencial el procedimiento aplicado para desarrollar el programa de actividades de minería y construcción, agrupando las actividades principales en cada módulo del software.

- **DESWIK.CAD**

1) DISEÑO MINERO

El diseño minero puede ser importado o creado directamente en la plataforma Deswik.CAD. Para este caso, se recibe como input líneas con los ejes de los desarrollos horizontales y verticales, los cuales se deben unir, separar o redireccionar de acuerdo con el sentido lógico de construcción.

Además, como input se reciben los sólidos 3D de las excavaciones mayores. Sin embargo, las actividades de construcción, montaje y habilitación se deben diseñar directamente en el software, para mostrar visualmente su desarrollo.

2) ATRIBUTOS

A cada una de las entidades que compone el diseño minero, se le asignan atributos para indicar información respecto a ellas, que permiten identificar de manera única a la entidad (ID), con sus respectivas características. Algunos ejemplos de estos atributos pueden ser el nombre, nivel, sección, tipo de desarrollo, alcance, entre otros.

- **DESWIK.IS**

3) ACTIVIDADES Y TAREAS

La importancia de este módulo es que permite conectar de manera dinámica cada entidad del diseño minero, mediante la creación de actividades y tareas que puedan ser planificadas en un diagrama Gantt. En esta etapa, a partir de los ejes, se crean los túneles considerando su respectiva sección y con una longitud equivalente al avance efectivo por disparo.

Cabe mencionar, que con los túneles creados se deben asignar los atributos que requerían los ejes segmentados por el avance del disparo. Un ejemplo de este caso es la asignación de la prioridad.

- **DESWIK.SCHED**

4) DEPENDENCIAS

Las dependencias se crean para generar las restricciones entre actividades de acuerdo con los criterios de planificación, estableciendo el orden en que se realizan las tareas. Estas se pueden generar de manera automática, indicando el criterio espacialmente o por agrupamientos, y/o de manera manual, seleccionando cada actividad con su precedencia o sucesor.

5) RECURSOS Y RENDIMIENTOS

Cada actividad debe tener asignado un recurso para su desarrollo, estos pueden ser recursos exclusivos, asignado a tareas específicas o recursos compartidos, asignado a más de un grupo de actividades, que el programa distribuye según la priorización de obras. Además, se presenta la siguiente clasificación de recursos:

- Driving: Asignado a tareas con una duración determinada por una tasa de producción y la cantidad de recursos disponibles.
- Required: Asignado a tareas que requieren del recurso por un tiempo determinado.
- Effort: Asignado a tareas con una duración determinada por una tasa de producción, la cual determina la cantidad de recursos necesarios.

Los rendimientos pueden estar definidos por tasas de producción o duraciones fijas, los cuales se incorporan directamente en la actividad o en el recurso.

6) TARGETS DE PROGRAMACIÓN

En este apartado se agregan los límites de cantidad aplicados en un periodo de tiempo definido. Donde se incorporan los límites de avance mensual por frente y por nivel, los límites de actividad para cumplir con el plan de producción y los límites temporales para restringir actividades en un cierto periodo de tiempo. Un ejemplo de este último caso son los alcances de financiamiento que tienen fechas establecidas.

7) NIVELACIÓN

La nivelación de recursos es la forma de optimización del software, que consiste en distribuir los recursos en las diferentes actividades siguiendo un orden en base a las prioridades asignadas, mientras cumple con las restricciones y targets de programación.

Luego de nivelar se deben revisar que todos los objetivos se hayan cumplido. Si no es el caso, se deben realizar iteraciones, analizando las rutas críticas y ajustando los parámetros de las etapas anteriores hasta obtener la planificación deseada.

8) PARÁMETROS DE SALIDA

Finalmente, se deben configurar los parámetros de salida que indican los resultados de la programación. Esto implica la exportación de un visualizador interactivo del programa en un entorno 3D, exportación del Diagrama Gantt que indica de forma gráfica la planificación de las actividades y la generación de reportes, mediante filtros, sobre las cantidades físicas asociadas a las actividades planificadas (metros, volúmenes, unidades, etc.)

5. RESULTADOS

5.1. CICLO MINERO Y LÍMITES TÉCNICOS

5.1.1. TIEMPO EFECTIVO DE TRABAJO

El tiempo efectivo de trabajo corresponde a la fracción del tiempo cronológico diario que se dedica efectivamente para ejecutar labores comprendidas en los ciclos de avance de los desarrollos mineros, actividades de construcción, o cualquier otra actividad que se requiera en el marco de la ejecución del proyecto.

Para calcular el tiempo efectivo se descuenta del tiempo cronológico la totalidad de las demoras programadas como parte del ciclo de trabajo de cada turno, tal como se muestra en la tabla.

Tabla 3: Tiempo Efectivo del Turno

Desglose Horas Turno	Tiempo	Unidad
Tiempo Cronológico Turno	12	hrs
Tiempo Cronológico Día	24	hrs
Nº Turnos	2	un
Demoras Programadas	5.7	hrs
Tiempo en Sala de Cambio	15	min
Traslado Sala de Cambio – Barrio Cívico Interior Mina	20	min
Traslado Barrio Cívico Interior Mina – Instalación Faena	15	min
Charlas y Reunión Preoperacional	25	min
Retiro de Materiales/Herramientas	25	min
Traslado Instalación Faena – Postura	20	min
Traslado Postura – Casino	20	min
Casino	60	min
Tiempo de Espera en Casino	10	min
Traslado Casino – Postura	20	min
Traslado Postura – Instalación Faena	20	min
Reunión Postoperacional y Entrega de Materiales/Herramientas	30	min
Traslado Instalación Faena – Barrio Cívico Interior Mina	15	min
Traslado Barrio Cívico Interior Mina – Sala de Cambio	20	min
Tiempo en Sala de Cambio	15	min
Interferencias por Simulacro de Incendio	5	min
Tiempo Espera Buses	10	min
Tiempo Efectivo del Turno	6.3	hrs

Las actividades de demoras programadas y sus respectivos tiempos se asignaron en base a la data disponible sobre la etapa de construcción de las obras tempranas del proyecto. Ajustando el valor del “tiempo de traslado a la postura” considerando que con el avance de los desarrollos horizontales se incrementarán las distancias. Además, se excluyen algunas interferencias, ya que se considerarán posteriormente de manera específica en los tiempos del ciclo minero.

5.1.2. ESTIMACIÓN TIEMPOS DEL CICLO MINERO

En base a lo ejecutado en terreno y considerando como criterio de planificación un avance efectivo por disparo equivalente a 3.4 m, se estiman los tiempos de las actividades principales que componen el ciclo de avance para las diferentes secciones de los desarrollos horizontales presentes en el diseño minero, obteniendo los resultados que se muestran en la Ilustración 9. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 1.

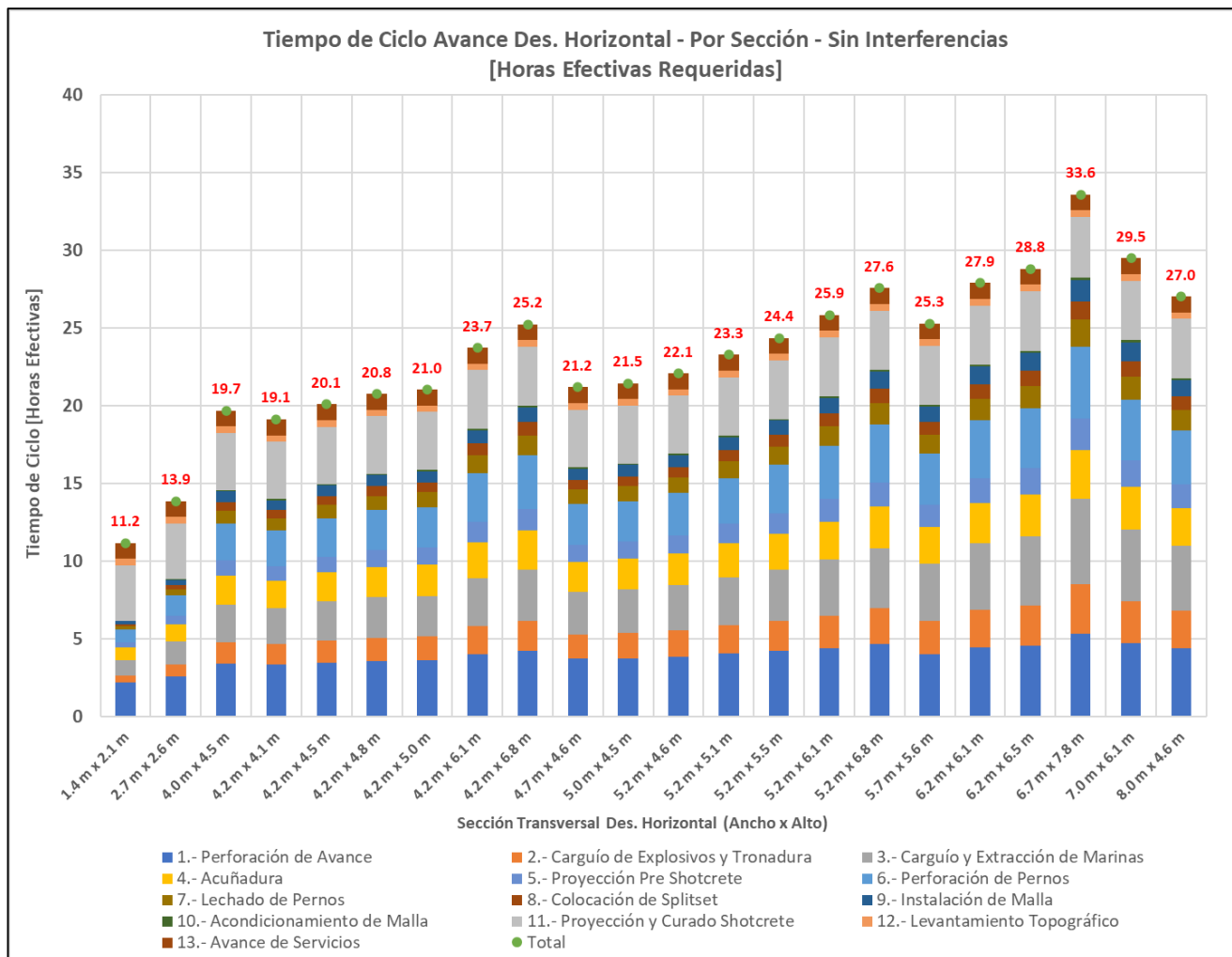


Ilustración 9: Tiempo de las Actividades del Ciclo Minero por Sección

Dentro de las actividades principales que integran el ciclo minero, especificado en la Ilustración 4, para la estimación del tiempo se excluye la ventilación de gases por tronadura, ya que la ejecución de esta actividad se considera durante los tiempos de demoras programadas, por ejemplo, mientras el personal se encuentra en el casino se está realizando la ventilación de la frente, con la finalidad de optimizar los tiempos de trabajo.

Cabe mencionar, que la actividad de fortificación secundaria, correspondiente a la fortificación de intersecciones con pernos cables se incluyen en el programa como una actividad unitaria.

5.1.3. INTERFERENCIAS TÍPICAS DEL CICLO MINERO

A partir de una base de datos con 15,782 interferencias muestreadas durante los trabajos de las obras tempranas, en un periodo de tiempo de 560 días, se realiza un análisis estadístico de las interferencias típicas para determinar su impacto en los tiempos del ciclo minero.

De la totalidad de interferencias muestreadas se seleccionan las interferencias típicas operacionales, que presenten mayor frecuencia e impacto y que afecten directamente a las actividades del ciclo minero independiente de la ubicación del desarrollo horizontal. Además, se excluyen las interferencias extraordinarias que no se pueden extrapolar a trabajos futuros, por ejemplo, las demoras atribuibles a la pandemia del COVID-19, y las interferencias cuya incidencia ya estén incorporadas en las demoras programadas, por ejemplo, las charlas o simulacros.

De esta manera, se seleccionaron 8 grupos de interferencias típicas, cuyo análisis estadístico fue aplicado a cada grupo. Para algunas interferencias fue necesaria una segregación de los datos, separando los tiempos de impacto para ajustar de manera más representativa los valores mediante una distribución de probabilidad. A continuación, en la Tabla 4 se presenta un resumen del análisis estadístico. El detalle de los cálculos y la metodología aplicada se indican en el Anexo 2.

Tabla 4: Resumen del Análisis Estadístico de Interferencias Típicas Operacionales

Interferencia Típica	Distribución de Probabilidad	Mínimo (hora)	Media (hora)	Máximo (hora)	Factor de Ocurrencia (%)	Factor de Simultaneidad (un)
Coordinación Operativa	Log Normal	0.3	3.4	11.0	48.2	1.9
Falta de Recurso/Material (impacto < 9 horas)	PERT	0.3	3.6	9.6	39.6	1.4
Falta de Recurso/Material (impacto ≥ 9 horas)	Frechet	9.5	10.5	12.7	29.8	1.5
Suministro de Energía	Gamma	0.2	2.7	11.0	22.0	1.5
Disponibilidad Planta de Hormigón	PERT	0.4	4.9	11.5	19.5	1.6
Disponibilidad de Pique (impacto < 10 horas)	PERT	0.4	3.7	9.0	16.2	1.2
Disponibilidad de Pique (impacto ≥ 10 horas)	Log Normal	10.0	10.6	12.5	11.2	1.3
Suministro de Agua (impacto < 10 horas)	PERT	0.5	3.3	9.0	14.5	1.2
Suministro de Agua (impacto ≥ 10 horas)	Log Normal	9.8	11.4	12.0	4.2	1.1
Evento Sísmico	Uniforme	0.5	5.8	11.0	9.4	1.1
Comunicación Radial	Cauchy	0.7	10.1	12.0	7.9	1.3

A partir de los valores obtenidos por las simulaciones de Montecarlo según la distribución de probabilidad de cada interferencia y aplicando su respectivo factor de ocurrencia y factor de simultaneidad, se obtiene el tiempo de impacto mínimo, medio y máximo que pueden afectar las interferencias al tiempo del ciclo minero. De esta manera, agregando estos tiempos de impacto al ciclo minero, se generan tres escenarios posibles (optimista, estándar y conservador), tal como se presenta en la Ilustración 10.

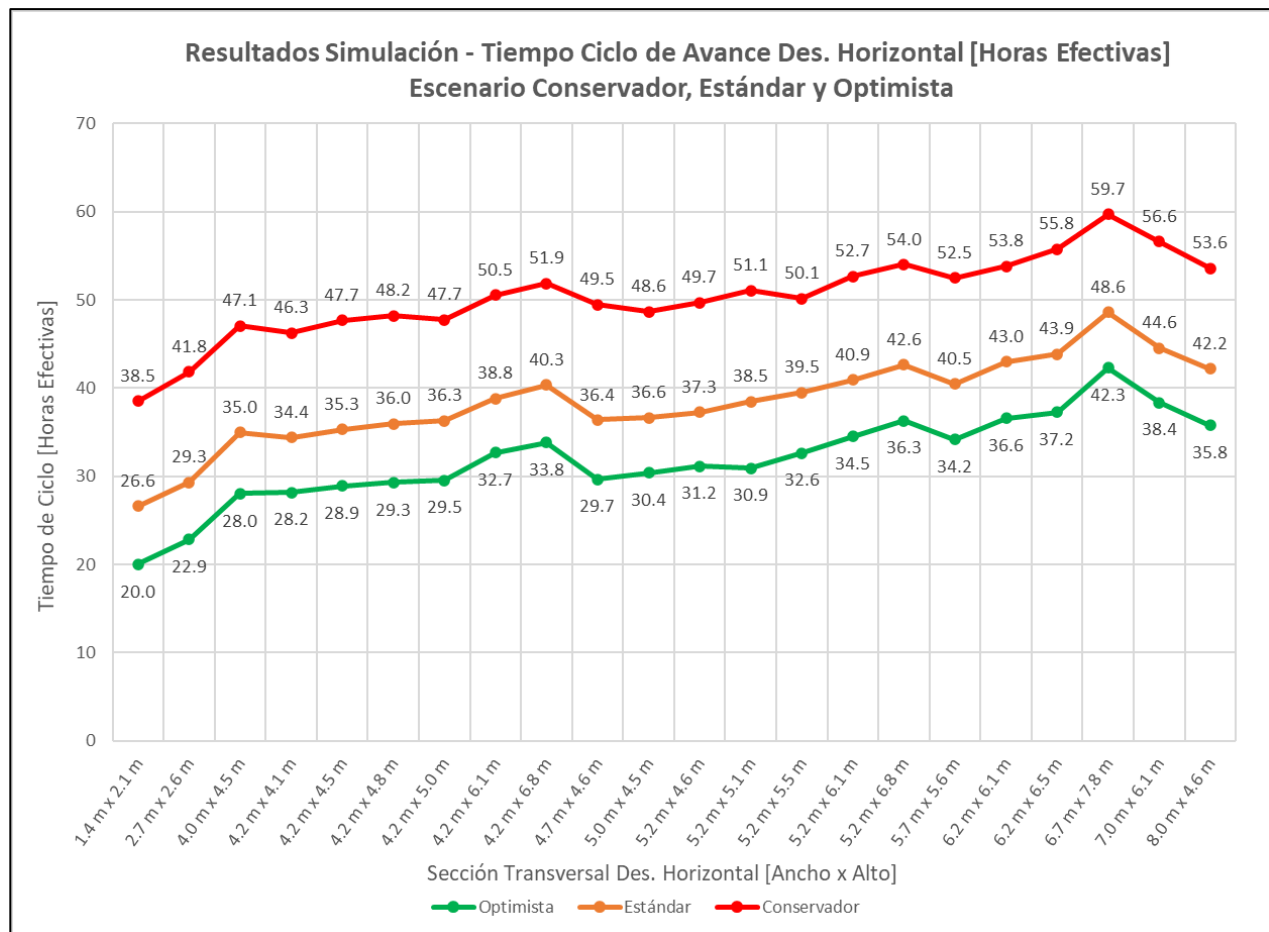


Ilustración 10: Tiempo Total del Ciclo para Diferentes Escenarios

Como es la primera programación y de acuerdo con el alcance de este trabajo, se establece programar el escenario conservador, para que el programa del caso de estudio sirva como base para futuros análisis de escenarios con mayor potencial. Para detallar los tiempos del escenario conservador, en la Ilustración 11, se presenta los tiempos del ciclo considerando las interferencias operacionales máximas.

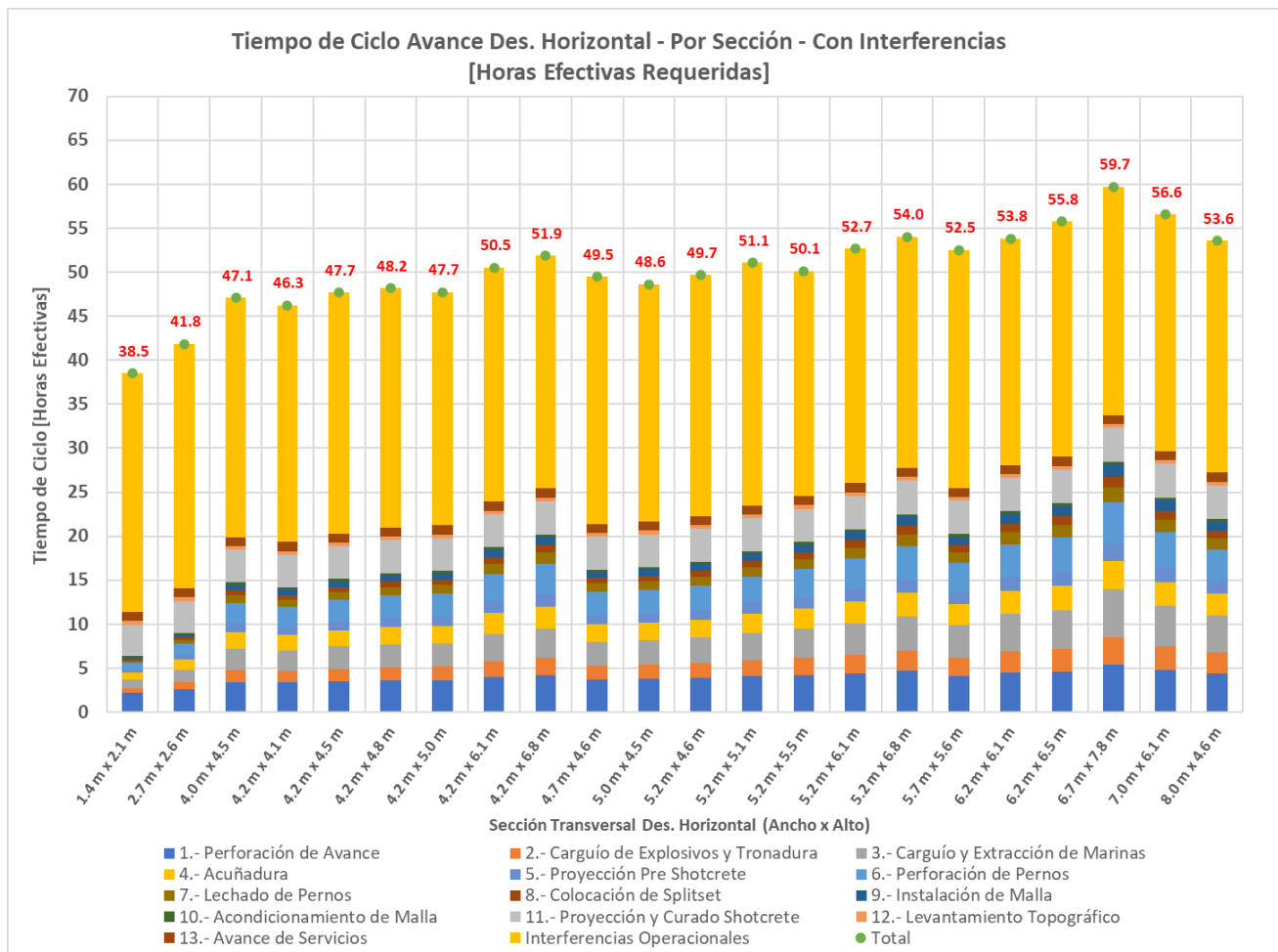


Ilustración 11: Tiempo de las Actividades del Ciclo Minero con Interferencias – Escenario Conservador

Como se puede observar, las interferencias presentan un gran impacto en los tiempos del ciclo, representando en promedio el 52% del tiempo total del ciclo minero, equivalentes a 26.8 horas. Esto refleja la gran cantidad de interferencias que afectan al caso de estudio y esto se debe principalmente a que en la faena minera se presentan diversos proyectos en construcción y operación al mismo tiempo.

5.1.4. AVANCE MENSUAL Y LIMITE TÉCNICO POR FRENTE

Aplicando el tiempo efectivo por turno de 6.3 horas, equivalente a 375 horas al mes, a los tiempos presentados en la Ilustración 10, se determina el número de ciclos posibles al mes para cada sección y multiplicando por el avance efectivo por disparo de 3.4 m, se puede determinar el avance mensual por frente. Los resultados se presentan en la Ilustración 12, indicando el avance mensual por frente para los 3 escenarios y la sección típica de cada nivel.

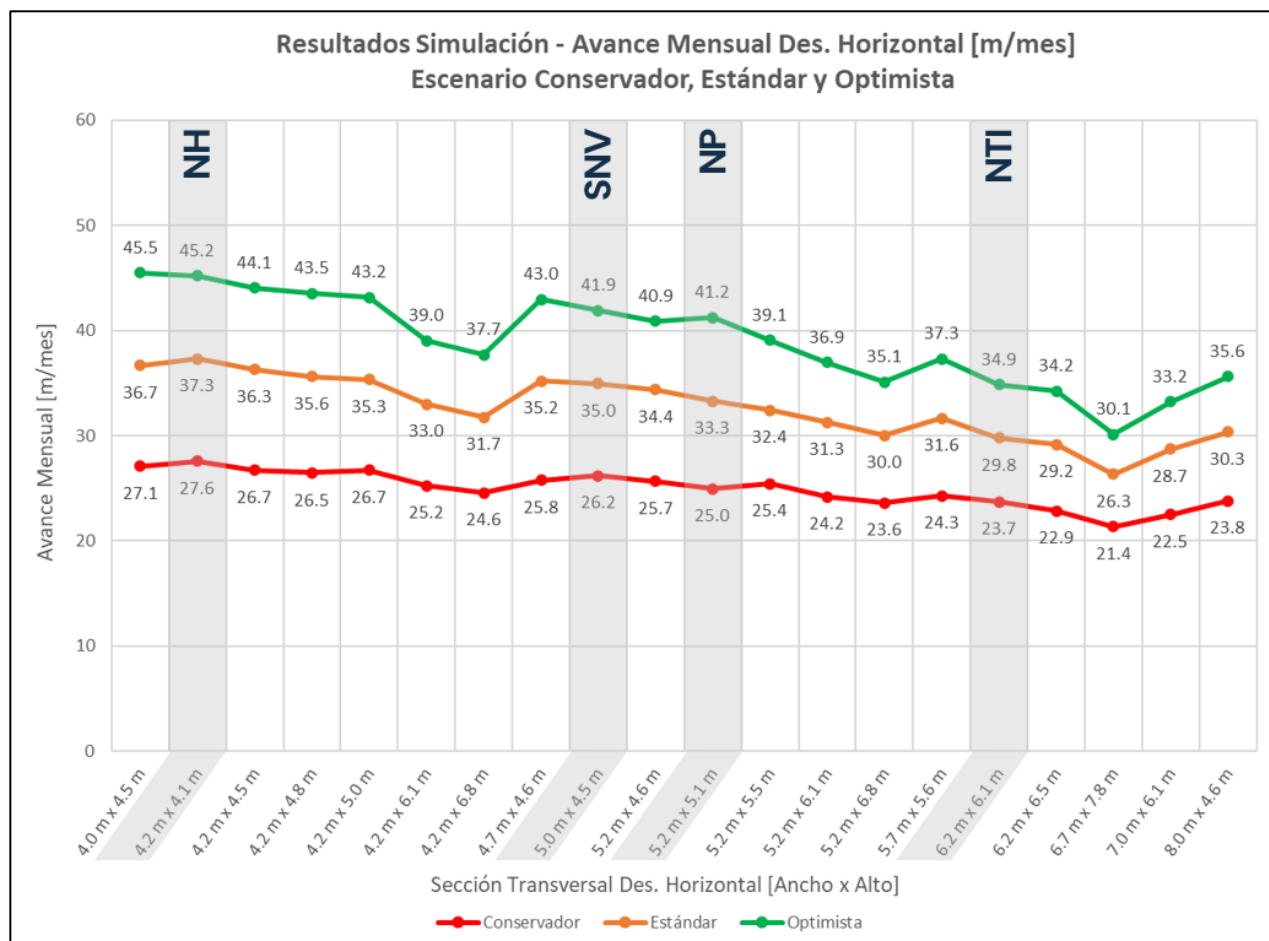


Ilustración 12: Avance Mensual del Ciclo para Diferentes Escenarios

A partir de los valores obtenidos en el escenario conservador, se ajusta el avance mensual a un número entero de disparos al mes, es decir, a un múltiplo de la distancia de avance efectivo por disparo, para determinar los límites de avance mensual por frente para cada nivel, de acuerdo con su sección típica. Estos límites se aplicarán posteriormente en la programación de los desarrollos horizontales.

Tabla 5: Límite de Avance Mensual por Nivel

Nivel	Sección Típica (m x m)	Cantidad de Disparos (un)	Límite de Avance Mensual (m/mes)
Nivel de Hundimiento	4.2 x 4.1	9	30.6
Nivel de Producción	5.2 x 5.1	8	27.2
Nivel Transporte Intermedio	6.2 x 6.1	7	23.8
Sub-Nivel de Ventilación	5.0 x 4.5	8	27.2

5.2. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Siguiendo la metodología explicada anteriormente, se desarrolla un modelo preliminar, el cual es analizado por otras disciplinas para retroalimentar el diseño minero en base a los requerimientos del proyecto. De esta manera, el modelo final del programa integra las actualizaciones necesarias de acuerdo con los resultados del primer modelo.

Para no extender el presente informe, en la descripción del programa solo se detalla el último modelo obtenido, pero se analizan los resultados de ambos. En el Anexo 3 se pueden observar la disposición general por nivel del diseño minero utilizado en el programa preliminar.

5.2.1. DISEÑO MINERO 3D

A partir de los ejes del diseño minero actualizados hasta esa fecha, se crean los sólidos de los desarrollos horizontales y verticales, los cuales presentan un total de 75,156 metros lineales que se incorporaron en el programa. La siguiente tabla indica la cuantificación de metros por nivel, comprendidos en los alcances de las Obras de Inversión Inicial y las Obras Diferidas.

Tabla 6: Cuantificación Desarrollos Mineros – Detalle por Alcance de Financiamiento

Nivel / Área	Desarrollos Horizontales [m]		Desarrollos Verticales [m]	
	Obras Inversión Inicial	Obras Diferidas	Obras Inversión Inicial	Obras Diferidas
Nivel Hundimiento	1,216	12,746	201	201
Nivel Producción	4,614	24,220	566	4,972
Nivel Transporte Intermedio	3,856	5,292	372	1,547
Subnivel Ventilación de Extracción	2,229	2,335	1,055	1,563
Subnivel Ventilación de Inyección	2,239	2,610	838	1,486
Total	15,104	47,203	3,064	9,785
	62,307		12,849	

Para mostrar gráficamente las demás actividades, se generaron sólidos 3D que indican de manera representativa cuando se completa dicha actividad. Para el caso en que un sólido presente múltiples actividades, se crean tareas derivadas las cuales se indican con diferentes colores, por ejemplo, en el sólido de las bateas, la actividad de perforación se representa en color naranja, la tronadura en color rojo y la incorporación de batea en color magenta.

Cabe mencionar, que solo se presenta el diseño del fracturamiento hidráulico para las obras de inversión inicial, ya que no se encontraba definido el diseño para los gastos diferidos. Sin embargo, esto no presenta un inconveniente, ya que el avance de las obras diferidas es más rápido que el fracturamiento hidráulico. De todas formas, en trabajos futuros se deben planificar de manera que no impacten en la continuidad de la preparación minera y explotación del proyecto.

En la Ilustración 13 se muestra el diseño global de la mina con la totalidad de actividades que se generaron como sólidos. En el Anexo 4 se puede observar la disposición general del diseño 3D para cada nivel y el detalle de los sólidos generados.

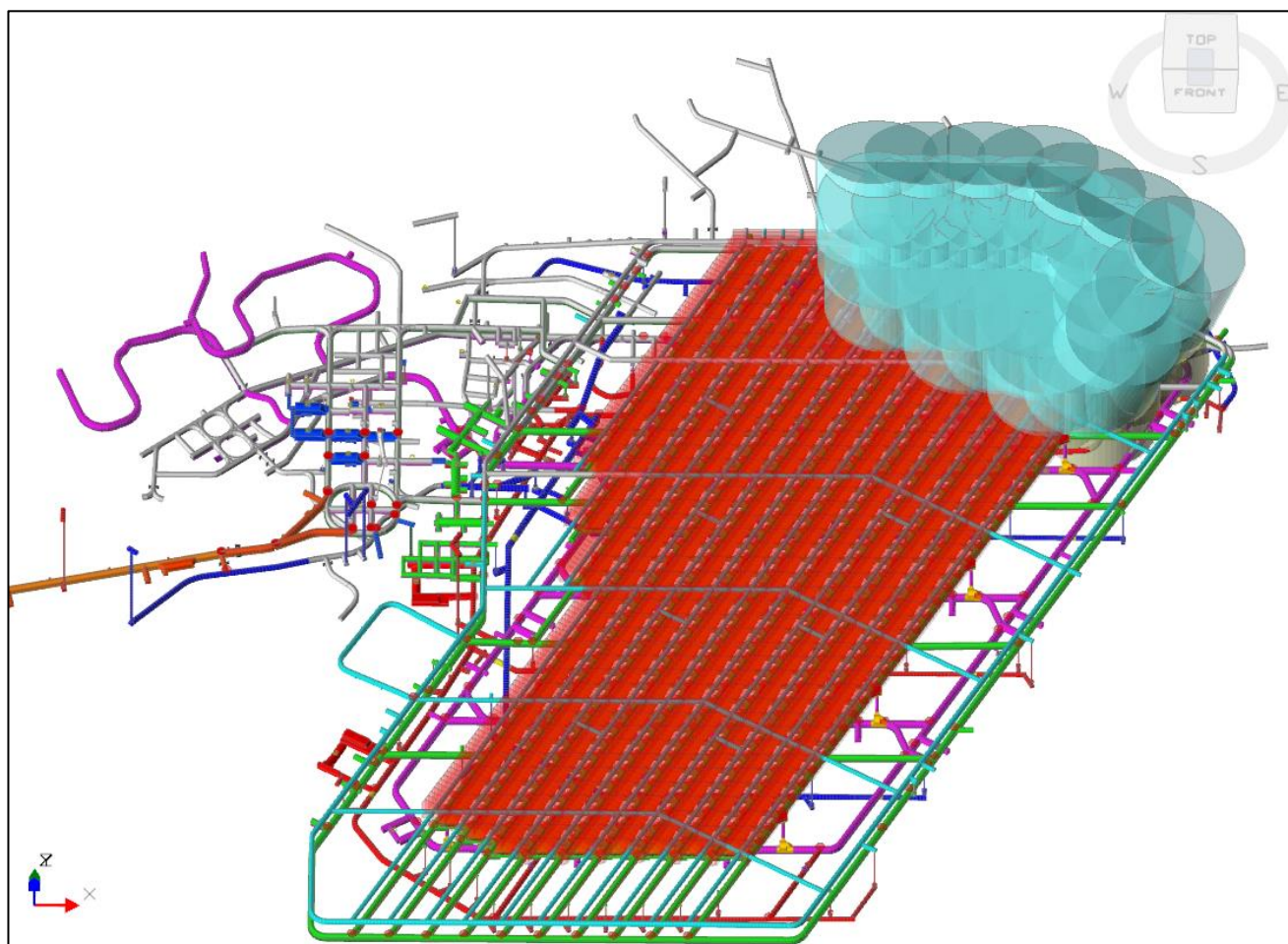


Ilustración 13: Modelo 3D del Diseño Global de la Mina

5.2.2. ACTIVIDADES PROGRAMADAS

En el programa se incorporaron un total de 39,886 actividades, donde gran parte de estas corresponden a la categoría de minería, debido a que la totalidad de desarrollos horizontales se discretizan utilizando como unidad el largo de un disparo de avance.

Tabla 7: Cantidad de Actividades Programadas – Por Categoría

Tipo de Actividad	Cantidad Actividades Obras Inversión Inicial	Cantidad Actividades Obras Diferidas
Minería	8,791	17,753
Construcción	3,147	9,630
Montaje y Habilitación	248	317
Total	12,186	27,700

5.2.3. PRIORIDADES

En la programación, a cada actividad se otorga un atributo cuantitativo de prioridad, que se determina al ordenar todas las labores que se desarrollen mediante la misma cuadrilla, según la secuencia constructiva más favorable de cada labor. De esta manera, el programa seguirá un secuenciamiento lógico para desarrollar las actividades en base a este atributo de prioridades que se encuentra supeditado a las restricciones y dependencias.

A continuación, se presenta un ejemplo de las prioridades asignadas en los desarrollos horizontales del Nivel de Hundimiento, el cual prioriza las obras requeridas para el inicio de producción, el alcance de la etapa inicial, liberar cuadrantes para el desarrollo del fracturamiento hidráulico, conectar los cruzados con las cabeceras y habilitar los puntos de vaciado de marina.

Cabe mencionar, que las primeras prioridades asignadas son preliminares y se pueden ajustar durante las iteraciones del programa, hasta cumplir con los requerimientos del proyecto.

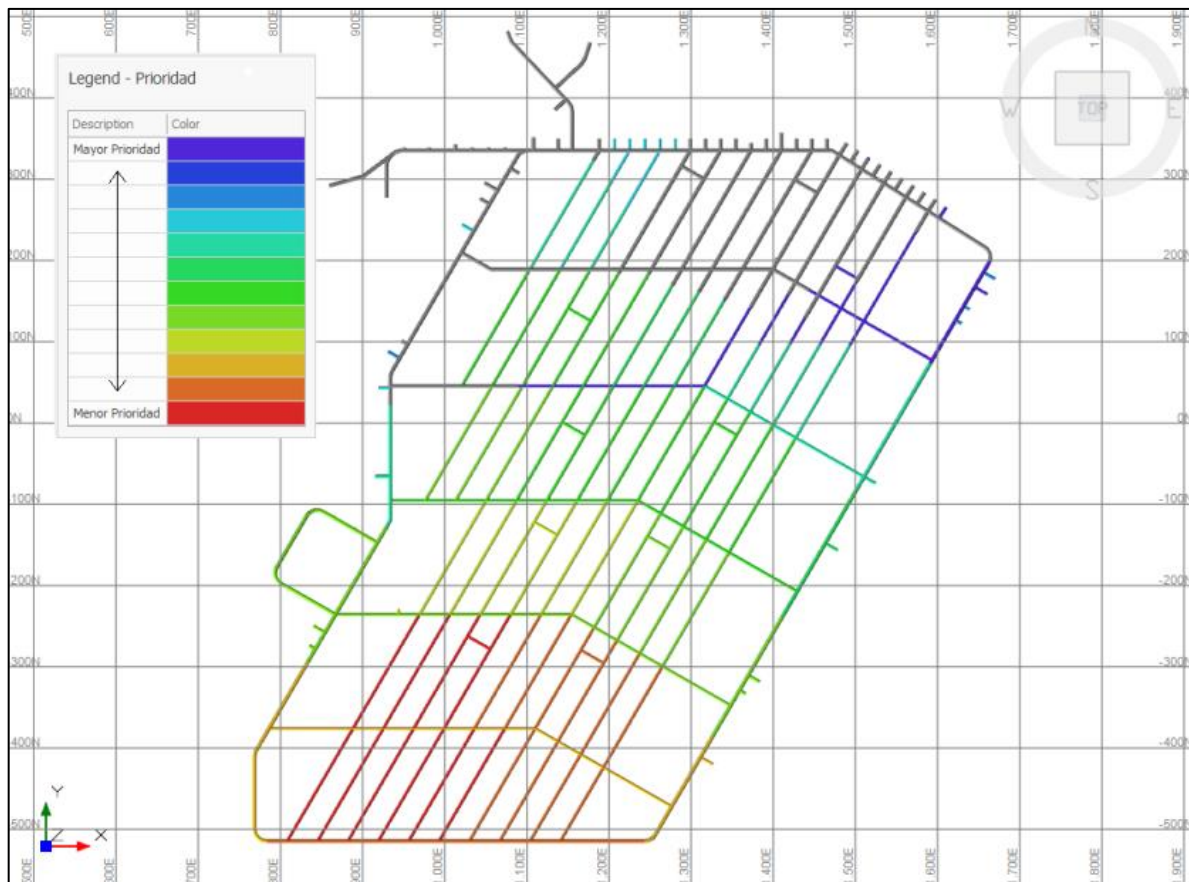


Ilustración 14: Prioridad Desarrollos Horizontales – Nivel de Hundimiento

5.2.4. RECURSOS Y RENDIMIENTOS

La estimación de flota de equipos y personal está fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, como primera instancia se asignan recursos de manera preliminar dependiendo de la cantidad de actividades. En el programa los recursos se representan mediante cuadrillas.

- **Desarrollos Horizontales:**

Para llevar a cabo las actividades del ciclo minero de los desarrollos horizontales, en la programación se consideran cuadrillas que realizan la totalidad de actividades con un rendimiento de un disparo al día, es decir, un avance de 3.4 m/día. Cabe destacar, que este rendimiento está supeditado a los límites de avance mensual por frente y por nivel, que se incorporan como targets de programación.

Estas cuadrillas en la realidad se componen por los equipos mencionados en la Tabla 8, los cuales fueron considerados para la estimación de tiempo del ciclo minero, pero en el programa no se incorporan de manera unitaria.

Tabla 8: Equipos Cuadrilla Desarrollo Horizontal y Excavaciones

Sistema	Equipos
Preparación Mina	Jumbo Frontal
	Jumbo Empernador
	Equipo Acuñaador
	LHD de Marina
	Cargador Frontal
	Camión de Marina
	Camión Mixer
	Robot Shotcrete
Apoyo Preparación	Camioneta de Explosivos
	Cargador de Explosivos
	Plataforma Carga de Explosivos
	Plataforma Instalación de Pernos
	Camión de Suministros y Materiales

A continuación, se presenta la asignación de las cuadrillas, las cuales se asignaron en base a los metros lineales de cada nivel, indicados en la Tabla 6, y al promedio de frentes disponibles al mes.

Tabla 9: Asignación de Recursos – Desarrollos Horizontales

Nivel	Área	Promedio Frentes Disponibles al Mes	Nº de Cuadrillas
NH	Nivel Completo	7	2
NP	Acceso Mina	2	1
	Talleres y Barrio Cívico	4	1
	Footprint	15	2
NTI	Nivel Completo	10	3
SNVE	Nivel Completo	4	1
SNVI	Nivel Completo	4	1

- **Desarrollos Verticales:**

La construcción de los desarrollos verticales se realiza mediante diferentes cuadrillas, compuestas por un equipo principal, equipo de cilindro (dependiendo de las características del equipo principal), equipo de levante, equipo LHD, camión mixer y camión utilitario, con una tasa de rendimiento que se determinó en base al avance nominal usualmente obtenido para dicha metodología en otros proyectos similares.

En el programa las cuadrillas de los desarrollos verticales están definidas según el equipo principal, sin considerar todos los equipos de manera unitaria y la asignación de recursos considera que estos se comparten en todos los niveles dependiendo de la metodología constructiva de cada desarrollo. Cabe mencionar, que se incorporan las perforaciones piloto de las Raise Borer y que los desarrollos verticales se reportan en el nivel desde donde se construye, es decir, en donde se posiciona el equipo principal.

Tabla 10: Asignación de Recursos – Desarrollos Verticales

Recurso	Desarrollo Vertical	Diámetro	Rendimiento
4 Blind Hole	Chimenea Slot	1.5 m	6 m/d
	Chimenea Piloto Batea	1.5 m	
	Chimenea Ventilación (Altura > a 10 m)	1.5 m	
	Chimenea Pasacables	1.8 m	
	Chimenea Ventilación	1.8 m	
3 Raise Borer	Chimenea Ventilación	2.1 m	15 m/d (Piloto) 6 m/d (Escariado)
	Chimenea Escalera	2.2 m	
	Chimenea Traspaso Combustible	2.2 m	
	Chimenea Ventilación	2.2 m	
	Pique Vaciado Marina	3.0 m	
	Chimenea Ventilación	3.0 m	
1 Raise Borer	Pique de Traspaso	3.6 m	120 d (Excavación y Blindaje)
1 VCR	Chimenea Ventilación (Altura ≤ a 10 m)	1.5 m	5 m/d

- **Actividades de Construcción, Montaje y Habilitación:**

Para el resto de las actividades, que involucran construcción, montaje y habilitación de infraestructuras y minería para algunas excavaciones, se presenta la siguiente asignación de recursos, tanto exclusivos como compartidos para diferentes actividades, con sus correspondientes rendimientos.

Tabla 11: Asignación de Recursos – Actividades Programadas

Recursos	Cantidad Recurso	Actividad Asignada	Rendimiento
Diferentes Niveles			
Sonda Perforación FH	2	Perforaciones FH (NH-NP)	16 m/día
Bomba FH	2	Hidrofracturamiento FH (NH-NP)	6 un/día
Cuadrilla Carpeta y Radier	3	Carpeta y Radier (NP – NTI)	140 m/mes
Cuadrilla Construcción, Montaje y Habilitación (Sistema de Traspaso)	2	Sistema de Traspaso (NP-NTI)	Según secuencia constructiva
Cuadrilla Fortificación Intersección	4	Fortificación de Intersecciones	3 días/un
Cuadrilla Corrugado Chimeneas	5	Fortificación de Chimeneas (Corrugado)	2 m/día
Perforadora ITH	2	Perforación Tiros de Drenaje (Ø 6 ½‘)	15 m/día
		Perforación Tiros Elec. e Instr. (Ø 6 ½‘)	15 m/día
		Perforación Tiros Pasacable (Ø 6 ½‘)	15 m/día
Cuadrillas Construcción, Montaje y Habilitación (Dispositivos de Ventilación)	2	Puertas de Ventilación y Contra Incendio	45 días
		Tapados de Ventilación	30 días
		Ventiladores Secundarios y Booster	22 días
		Sala de Ventilación	15 días
Nivel de Hundimiento			
Cuadrilla Perforación Hundimiento	1	Perforación y Tronadura Hundimiento (Cajón con 3 Paradas)	10 un/mes
Nivel de Producción			
Cuadrilla Excavación PVAC	1	Sistema de Traspaso NP-NTI	30 días
Cuadrilla Perforación y Voladura Batea	1	Perforación y Voladura Batea	3 un/mes
Cuadrilla Sistema Eléctrico	1	Fr. Equipos Eléctricos e Instrumentación	30 días
Cuadrilla OOC (NP)	2	Puntos de Extracción	5 un/mes
		Muros de Confinamiento	5 un/mes
Cuadrillas Construcción, Montaje y Habilitación (BC y TM)	3	Barrio Cívico NP	187 días
		Taller de Mantenión NP	222 días
		Taller de Avanzada	120 días
		Planta de Hormigón	180 días
Nivel de Transporte Intermedio			
Cuadrilla Excavación Buzón	2	Sistema de Traspaso NP-NTI	50 días
Cuadrillas Sistema Eléctrico	2	SEE	60 días (OOC) 180 días (Habil.)
		SEU	60 días
		Fr. Tica	30 días
Sub-Nivel de Ventilación			
Cuadrilla Construcción, Montaje y Habilitación (Desarenador)	1	Desarenador Provisorio	200 días
		Desarenador Permanente y Futuro	306 días
Cuadrilla OOC (Pilar Reducido)	1	Construcciones Cruzamiento Pilar Reducido	Según secuencia constructiva

5.2.5. DEPENDENCIAS

La mayor parte de las restricciones de planificación y geomecánicas se incorporaron mediante criterios espaciales y por agrupamientos con los atributos, generándose las dependencias de manera automática lo que permite una mayor flexibilidad al momento de actualizar el programa.

De igual manera, se crean las precedencias de actividades, de acuerdo con los secuenciamientos lógicos de construcción de la mina.

Tabla 12: Ejemplos Precedencia de Actividades

Actividad Precedente	Actividad Sucesora
Desarrollo Horizontal	Desarrollo Horizontal
Desarrollo Horizontal	Desarrollo Vertical
Desarrollo Horizontal	Punto de Extracción
Punto de Extracción	Muro Confinamiento
Muro Confinamiento	Carpeta (NP Footprint)
Chimenea Piloto	Perforación Batea
Perforación Batea	Tronadura Batea

En la interfaz gráfica del software las dependencias se representan con flechas desde una actividad a otra, las cuales se pueden mover y asignar de manera manual, proceso que fue necesario para algunas dependencias más específicas. Este proceso manual no se guarda para futuras actualizaciones del programa, por esta razón, este método se utilizó en una menor medida y se priorizó el método automático.

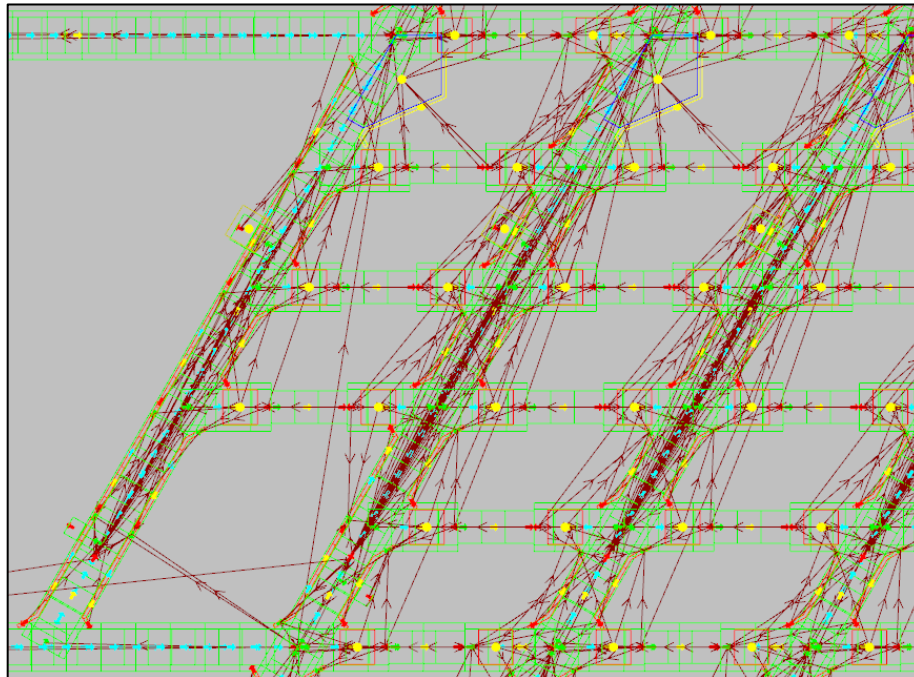


Ilustración 15: Ejemplo Dependencia de Actividades en NP

5.2.6. TARGETS DE PROGRAMACIÓN

En base a lo expuesto anteriormente, respecto a las actividades de minería, el límite técnico de avance máximo por frente para cada nivel, la asignación de recursos y las restricciones de secuencia, se realiza un trabajo iterativo de nivelación mediante el software Deswik, con la finalidad de obtener un régimen de avance mensual por nivel. Este análisis aplica para la totalidad de los desarrollos horizontales, obteniendo los siguientes límites mensuales de avance por nivel.

• Acceso Mina:	50 m/mes
• Nivel de Hundimiento:	120 m/mes
• Nivel de Producción:	190 m/mes
• Nivel de Transporte Intermedio:	140 m/mes
• Sub-Nivel de Ventilación de Extracción:	80 m/mes
• Sub-Nivel de Ventilación de Inyección:	80 m/mes

Además, basado en la ejecución de otros proyectos vigentes en etapa de preparación minera, se considera una curva de aprendizaje (ramp up) del contratista en los primeros 7 meses para modelar la mejora de productividad debido a la experiencia acumulada en el tiempo por los trabajadores, que se aplicará a los límites mensuales de avance por nivel.

Por otra parte, en el programa se agrega un target temporal, de acuerdo con los horizontes temporales de los contratos que desarrollan las obras iniciales del proyecto, el cual establece en el primer año un contrato de enlace y luego, un periodo de 2 meses de movilización por el cambio de contrato, en donde se incorporan los contratos principales de las obras de inversión inicial, en el cual no se desarrollan actividades, con excepción del fracturamiento hidráulico.

5.2.7. RESULTADOS DEL PROGRAMA

Una vez que están todos los parámetros de entradas incorporados en el programa, se procede a una etapa de iteraciones donde se realiza la nivelación de los recursos y se analizan las rutas críticas para optimizar el programa. En estas iteraciones se realizan ajustes de los parámetros que inicialmente eran preliminares, como la prioridad, dependencias o recursos, hasta determinar si es factible cumplir con los objetivos de los hitos principales.

Finalmente, con el programa terminado se configuran los parámetros de salida para analizar los resultados del programa de acuerdo con los requerimientos de otras disciplinas y trabajos de ingeniería del proyecto. Algunos de estos trabajos son las simulaciones de ventilación, simulaciones del sistema de transporte de materiales, estimación de flota de equipos, dotación de personal e insumos, cubicaciones, entre otros.

Estos parámetros de salida consideran la exportación de un visualizador interactivo del programa en un entorno 3D, exportación del Diagrama Gantt que indica de forma gráfica la planificación de las actividades y la generación de reportes sobre las cantidades físicas asociadas a las actividades planificadas.

Dentro de los reportes generados del programa, se encuentran los reportes de avance mensual, los cuales pueden detallar la secuencia constructiva de las diferentes actividades. A continuación, se representa de manera gráfica el avance mensual por nivel de los desarrollos horizontales y verticales del caso de estudio.

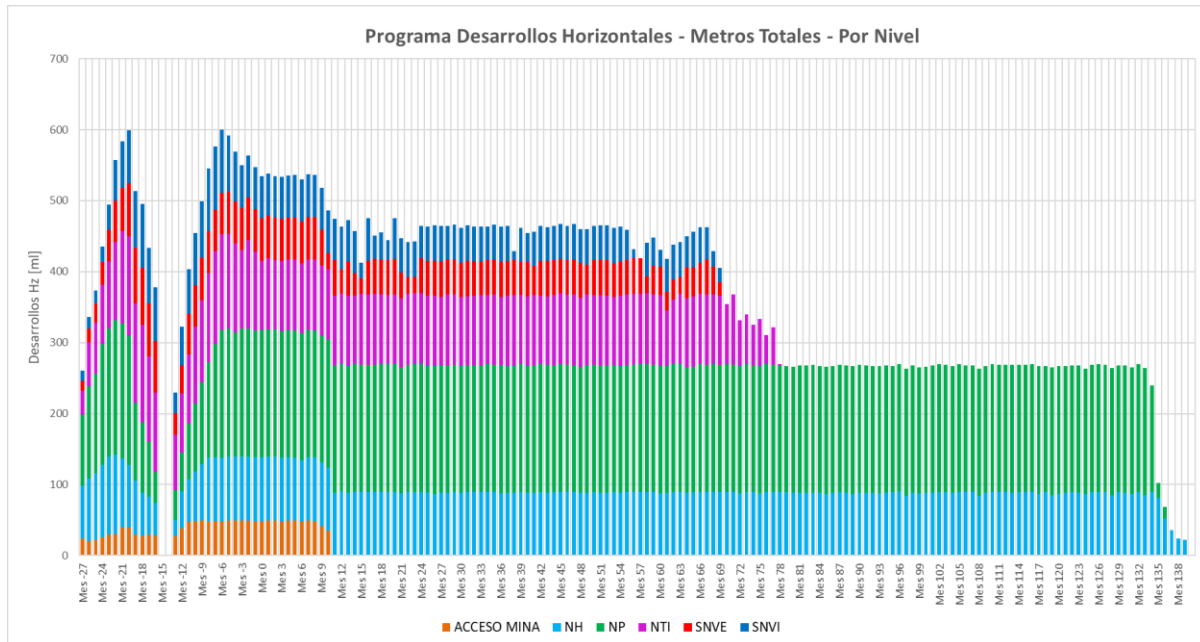


Ilustración 16: Programa Desarrollos Horizontales

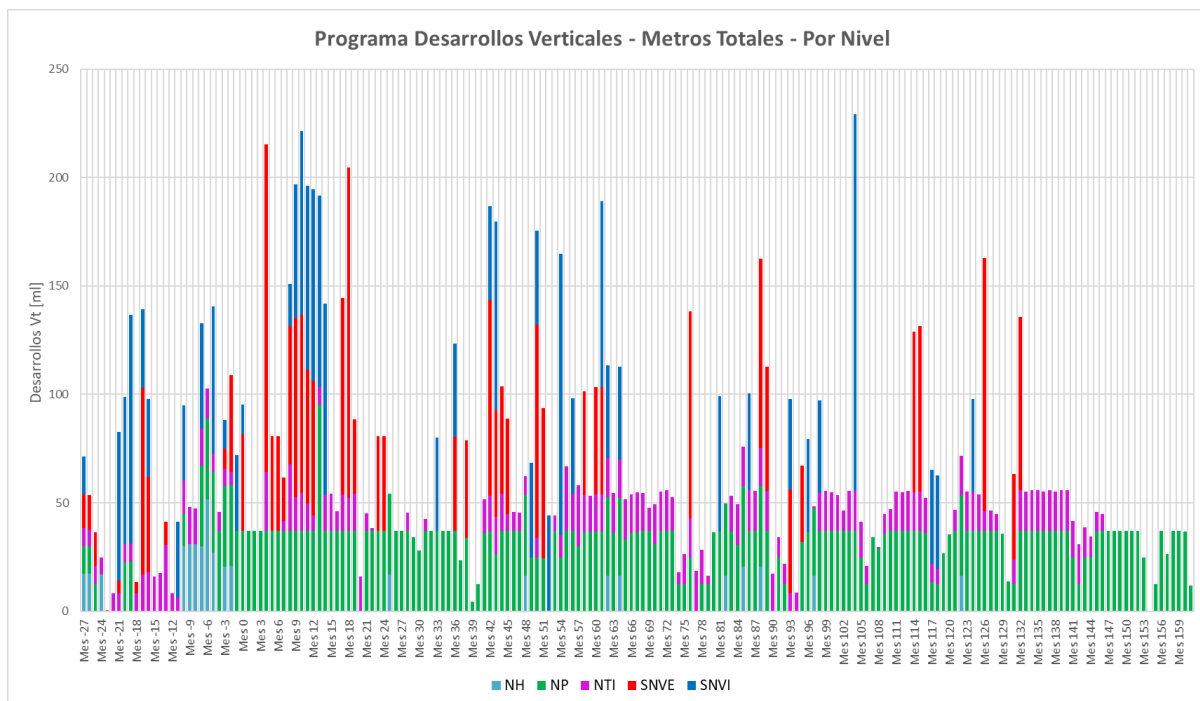


Ilustración 17: Programa Desarrollos Verticales

Como se puede observar en la Ilustración 16, se presenta un máximo de 600 m/mes de avance global para los desarrollos horizontales, el cual disminuye a medida que se completan los desarrollos de cada nivel, finalizando con un total de 167 meses.

En la Ilustración 17 se puede observar que, para los desarrollos verticales, se presenta un avance más variable en el tiempo con un máximo de 230 m/mes de avance global y finaliza con un total de 189 meses, debido a las chimeneas piloto de las bateas.

Como se mencionó, otro parámetro de salida es la visualización gráfica de las actividades, lo cual se ejemplifica en la Ilustración 18, donde se muestra el Nivel de Producción en el Sector Footprint, con las actividades de minería y construcción que se encuentran desarrolladas en el Mes 0 (Inicio de Producción), en este periodo se establecen las áreas “full construida” y “full desarrollada”, a lo cual se da cumplimiento y se realizan un total de 25 bateas perforadas, 14 bateas tronadas y 2 bateas incorporadas.

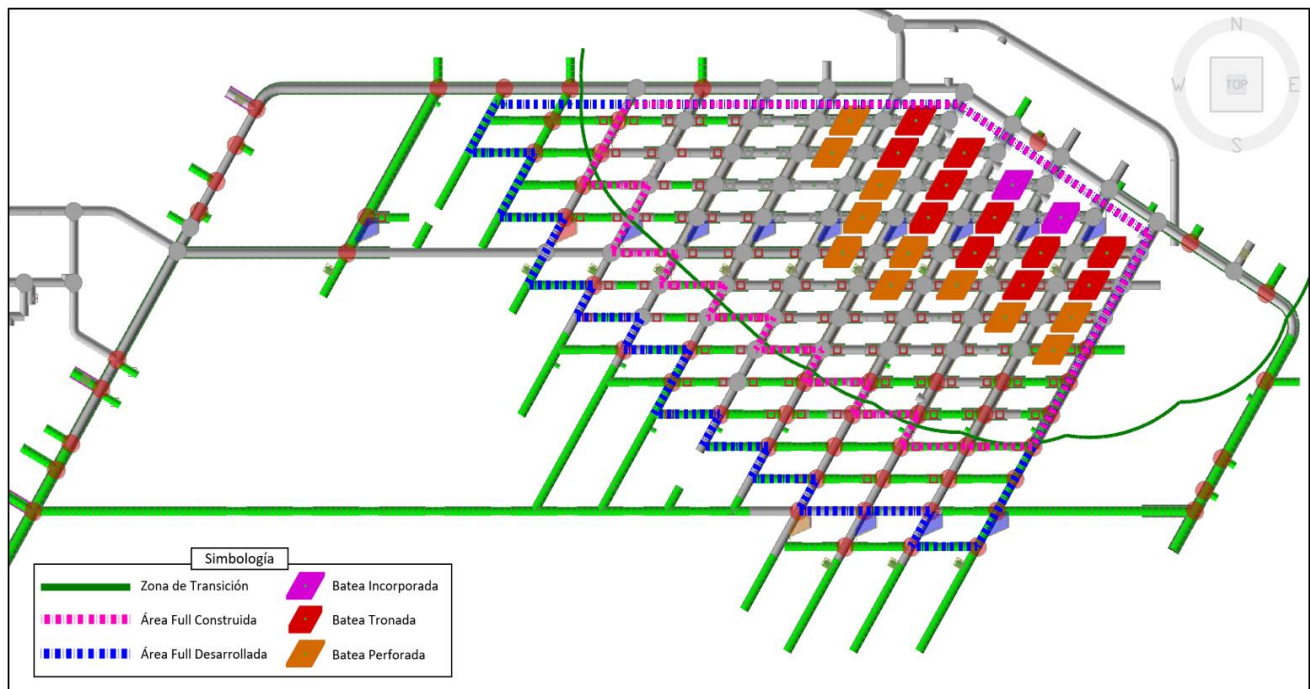


Ilustración 18: Actividades de Minería y Construcción Desarrolladas en el Mes 0 – NP

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.1. RUTAS CRÍTICAS

La ruta crítica del programa de minería y construcción del caso de estudio queda determinada por aquellas actividades que se consideran requisito para cumplir con los hitos de Inicio de Hundimiento (Mes -4), Inicio de Producción (Mes 0) e Incorporación de 11 bateas (Mes +4). Lo anterior implica que cualquier retraso en alguna de la serie de actividades que componen la ruta crítica del proyecto afectará directamente en los hitos de producción antes mencionados.

Dado que este ejercicio de programación ha integrado del orden de 12,000 actividades para la etapa de inversión inicial, existen múltiples rutas o secuencias de actividades necesarias para facilitar los hitos de producción y cuya criticidad, en términos de holgura mínima, es distinta. En base a lo anterior, en este capítulo se listan sólo aquellas rutas o secuencias de actividades de menor holgura total que se presentaron en el programa preliminar y en el programa final, es decir, las rutas críticas exclusivas de estas iteraciones del programa.

• PROGRAMA PRELIMINAR

A partir del análisis independiente de rutas críticas para los tres hitos principales, en el primer programa desarrollado se determina que los tres elementos de menor holgura temporal son los siguientes:

1. Construcción, Montaje y Habilitación del Desarenador (Sin holgura)
2. Conexión del Primer Cruzado del SNVE para habilitar la ventilación (14 meses de holgura)
3. Habilitación del Sistema de Traspaso para el Inicio de Hundimiento (16 meses de holgura)

En base a la secuencia de actividades que compone cada una de las rutas críticas, se establecen las siguientes opciones de gestión para mitigar su potencial impacto sobre los tiempos de ejecución del proyecto:

1. Requerimiento de un desarenador provisorio considerando la gran diferencia de holgura con el resto de las rutas críticas.
2. Considerar un mayor número de conexiones entre el NTI y el SNV para generar una mayor cantidad de frentes disponibles en los cruzados de ventilación. Otra opción es evaluar la necesidad de ventilación forzada.
3. Resequenciar el FH, priorizando los pozos que interceptan la Sala Eléctrica N°6 para adelantar su habilitación y en consecuencia la habilitación de los Sistemas de Traspaso.

Cualquier ajuste que dé cuenta de una gestión factible para reducir la criticidad de estas rutas (dar mayor holgura), tendrá un impacto en el resto de las actividades dadas las características de este programa, dinámico y variable, lo cual hace necesario evaluar los ajustes mediante nuevas iteraciones del programa.

• PROGRAMA FINAL

Considerando los resultados del programa preliminar y la retroalimentación obtenida por otras disciplinas, se realizan algunas actualizaciones de los parámetros de entrada, los cuales se detallan en la sección siguiente.

De esta manera, a partir de la Carta Gantt mostrada en la Ilustración 38 (Ver Anexo 4), se presentan nuevas rutas críticas, las cuales quedan definidas por las siguientes actividades:

1. Habilitación de Sistemas de Traspaso para el Inicio de Hundimiento (Sin holgura)
2. Habilitación Ruta Inicio de Producción NTI (10 días de holgura)
3. Habilitación Desarenador Provisorio (15 días de holgura)

En estas rutas críticas se presentan diferencias mínimas de holgura, en comparación al programa preliminar, lo que significa que hay una mayor secuencia de actividades que impactan en las fechas de los hitos principales, dificultando obtener fechas más próximas. De igual manera, se presentan las siguientes medidas de mitigación, para prevenir retrasos en los hitos principales.

1. Priorizar minería y construcción de carpeta de rodado, tanto para la ruta requerida para iniciar las labores del sistema de traspaso en NP, como para la ruta de inicio de producción en NTI mediante la integración de recursos exclusivos en conexiones y las rutas propiamente tal.
2. Priorizar construcción, montaje y habilitación de las salas eléctricas principales y unitarias para habilitar los buzones del sistema de traspaso.
3. Priorizar minería de la ruta hacia el Desarenador Provisorio del SNVE mediante el adelantamiento de las rampas de conexión NTI/SNVE, las cuales actualmente cuentan con restricción de inicio producto de permisos vigente.

Como resultado principal del último programa son las fechas de los hitos principales, las cuales presentan una mejora de 18 meses respecto a lo obtenido en el programa preliminar.

5.3.2. ACTUALIZACIÓN DEL PROGRAMA

Durante el desarrollo entre el programa preliminar y el programa final se presentaron una serie de actualizaciones debido al avance continuo de la ingeniería del proyecto. Adicionalmente, como el programa preliminar se utilizó en el trabajo de otras disciplinas asociadas al proyecto, se recibieron retroalimentaciones respecto a sus requerimientos.

A partir de lo anterior, en el software Deswik se realizan las actualizaciones al programa preliminar considerando la misma metodología expuesta. Sin embargo, el tiempo empleado para obtener el programa final se redujo considerablemente en comparación al primer programa, ya que la mayoría de los parámetros ya se encontraban incorporados, como por ejemplo, las dependencias que están configuradas de manera automática permitiendo actualizar el diseño sin la necesidad de volver a crearlas.

En este contexto, considerando los requerimientos del proyecto, se presentan las siguientes actualizaciones asociadas al diseño minero, priorización de obras, secuenciamientos constructivos y criterios de planificación.

Comenzando con el análisis de las rutas críticas y sus medidas de mitigación, se determinó la necesidad de un desarenador provisorio (Ver Ilustración 19), ya que el desarenador permanente se habilita muy tarde. Además, se determina el desarrollo del FH durante el periodo de movilización del cambio de contrato, con el objetivo de evitar interferencias con el resto de las actividades.

La disciplina de ventilación, por su parte, realizó simulaciones en la etapa de construcción de acuerdo con las obras desarrolladas en ciertos periodos establecidas por el programa preliminar, determinando la necesidad de ventilación forzada para la extracción del NP (Ver Ilustración 19), lo cual concuerda con lo determinado en las rutas críticas.

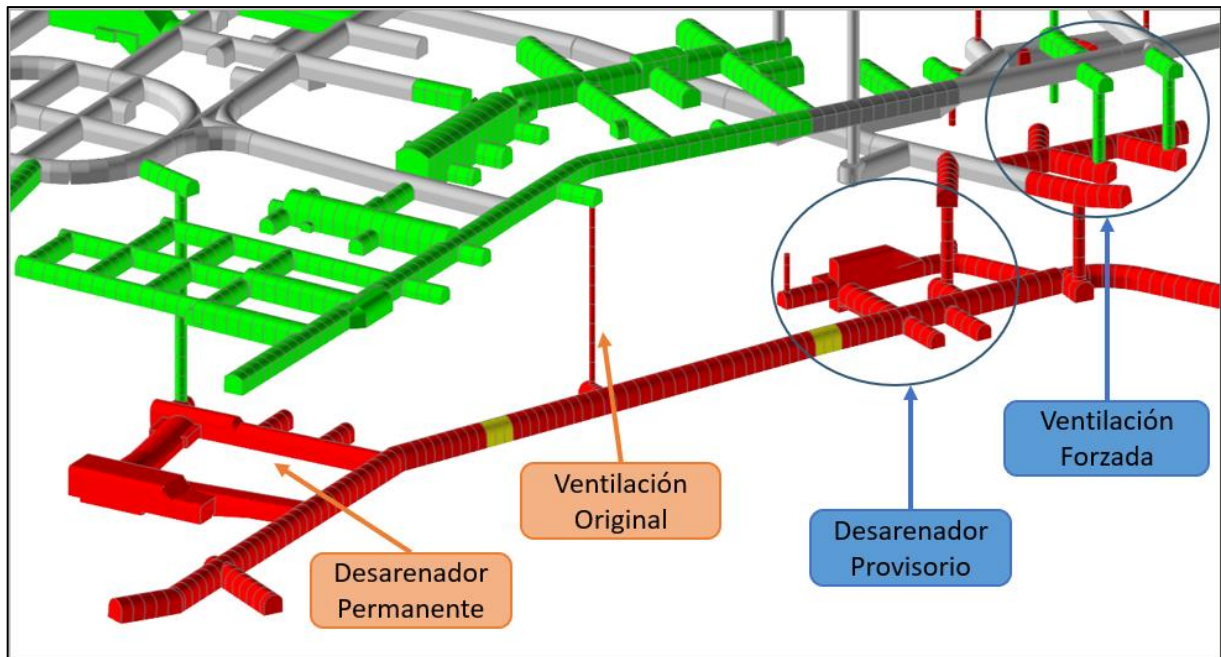


Ilustración 19: Ajustes del Diseño Minero – Desarenador Provisorio y Ventilación Forzada

Continuando con las medidas de mitigación para las rutas críticas, se incorporan en el diseño minero conexiones entre el NTI y SNV para generar una mayor cantidad de frentes disponibles en los cruzados de ventilación (Ver Ilustración 20)

Adicionalmente, se realizó un análisis del manejo de marina, notando interferencias con otras actividades, como por ejemplo con el FH en ciertos periodos, lo cual fue considerado en la nueva secuencia de esta actividad, y solicitan un requerimiento de frontones y piques de traspaso de marina, los cuales se incorporaron al diseño minero (Ver Ilustración 20) y deben estar habilitados en periodos específicos.

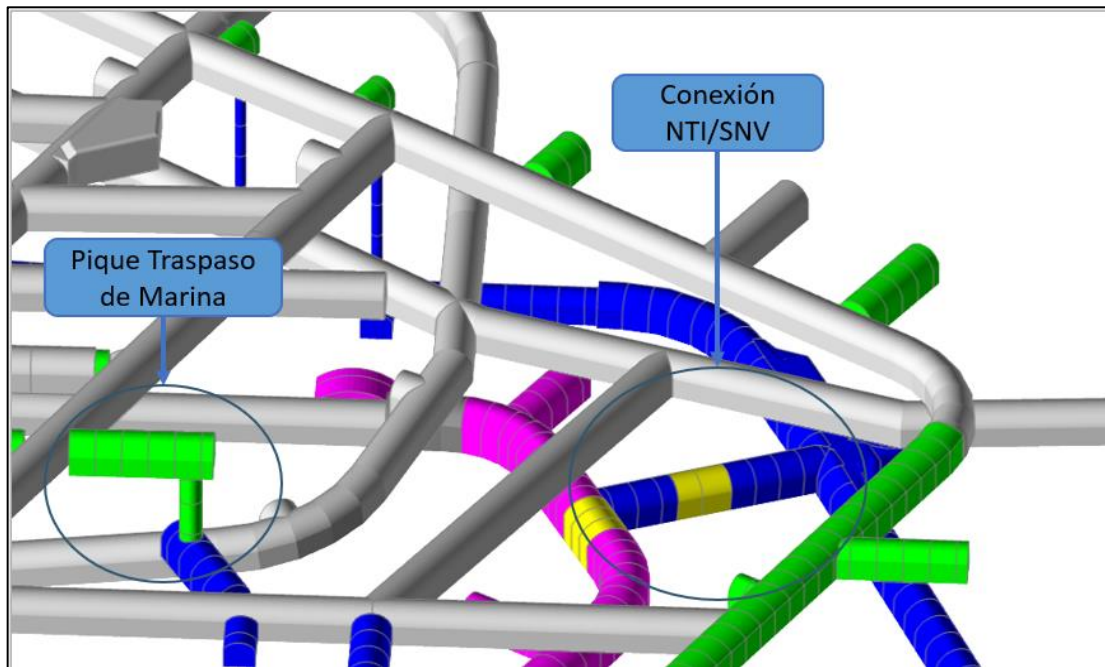


Ilustración 20: Ajustes del Diseño Minero – Pique Traspaso de Marina y Conexión NTI/SNV

Por otra parte, se realizaron simulaciones del transporte y carguío de material relacionado a los equipos LHD y camiones en los niveles de NP y NTI, solicitando una redefinición de prioridades en algunos desarrollos ya que se presentaban interferencias entre la etapa de construcción y la de producción. Esto resulto en una mayor prioridad para la conexión de cuadrantes y así, habilitar rutas alternas para el transporte de material.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo del trabajo, se han detallado las bases y criterios para la planificación de la preparación minera de un proyecto de explotación mediante panel Caving, logrando desarrollar un programa de actividades mineras y de construcción, que incorpora la totalidad de parámetros de entrada y planificados de tal manera que dieron cumplimiento con los hitos principales del proyecto.

Adicionalmente, mediante el cálculo de los tiempos del ciclo minero y un análisis estadístico de las interferencias típicas operacionales, se obtienen tres escenarios teóricos del avance mensual por frente, de los cuales, para el presente trabajo se decide utilizar el escenario conservador, que cuenta con interferencias que representan aproximadamente un 50% del tiempo total del ciclo minero. De esta manera, se obtienen límites de avance por frente de acuerdo con la sección típica de cada nivel.

En relación con la herramienta de planificación Deswik, esta ha permitido una planificación integrada entre actividades de minería y construcción en una misma interfaz gráfica y de planificación, facilitando la incorporación de las restricciones y dependencias, de manera que se valida el cumplimiento de los lineamientos de planificación y geomecánicos. Además, es importante destacar la flexibilidad del software en cuanto a la actualización del programa, permitiendo agregar modificaciones o generar escenarios alternativos ante contingencias operacionales con mayor rapidez, en comparación con la metodología tradicional.

A partir del análisis de los resultados del primer programa y el trabajo de ingeniería de otras disciplinas del proyecto, se pudo determinar la necesidad de facilidades constructivas y obras provisionarias para cumplir con los requerimientos del proyecto, optimizando la fecha de inicio de producción en 18 meses.

Dada la existencia de múltiples rutas críticas con diferencias menores en la holgura temporal a los hitos principales de inicio de producción, el equipo de proyecto deberá implementar una serie de medidas de mitigación que permitan en conjunto reducir el riesgo de no cumplimiento del programa. Adicionalmente, y como se ha mencionado con anterioridad, este programa es dinámico con un nivel de interdependencia alto entre actividades (múltiples restricciones, variables, recursos, targets, etc.), lo que implica que cualquier medida de mitigación puede no necesariamente tener el efecto deseado. Es por ello, que se recomienda realizar iteraciones continuas cada vez que se actualicen los criterios y parámetros de entrada para verificar los nuevos resultados.

Por último, se debe considerar que estas iteraciones del programa se desarrollaron bajo un escenario conservador, y que, dado el análisis probabilístico podrían ser sustancialmente mejores en la medida que la gestión de ejecución del proyecto pueda reducir el nivel de interferencias con una excelente planificación de corto plazo, actividad para la cual este plan de mediano/largo plazo se considera de importante utilidad. En este contexto, se recomienda una evaluación de escenarios alternativos a esta iteración del programa, mediante la modificación de los parámetros de entrada preliminares. Esto incluye la precisión de los tiempos del ciclo considerando los tiempos reales que se obtengan durante la construcción de la mina, la asignación de recursos una vez realizada la estimación de flota, la priorización de obras con el objetivo de analizar opciones que permitan lograr una optimización de los hitos de planificación, entre otros.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alegría, J. (2010). Evaluación Técnica de la Preparación Minera para el Proyecto Nuevo Nivel Mina (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas). Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

Camhi, J. (2012). Optimización de los Procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de Block Caving – Caso de Estudio Mina El Teniente Codelco Chile (Tesis para optar al grado de Magíster en Minería). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Consejo Minero. (2024). Cifras Actualizadas de la Minería, Enero 2024 (Informe). Recuperado de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2024/01/CAM-01-2024.pdf>

Contreras, C. (2016). Simulación como Herramienta para la Planificación de la Preparación Minera en Minería Tipo Block/Panel Caving (Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Cortez, J. (2020). Planificación Integrada de Mediano/Largo Plazo para Obras Interior Mina En Proyecto Andes Norte – Nuevo Nivel Mina (Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Garrido, L. (2013). Diseño de la Planificación Diaria de operaciones en Minera Escondida Ltda. (Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Hinojosa, M. (2022). Planificación de Corto Plazo Considerando Incertidumbre Geológica y Restricciones Operacionales en Minería de Cielo Abierto (Tesis para optar al grado de Magíster en Minería). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Leddy, P. (2014). Análisis del Riesgo de Inversión de un Proyecto de Exploración de Vetas Angostas de Oro. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Lobiano, C. (2016). Inclusión de Interferencias Operacionales de Origen Geotécnico en Planificación de Panel Caving (Tesis para optar al grado de Magíster en Minería). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Pizarro, J. (2023). Heurística de Gestión de Desarrollo para Laboreos subterráneos Bajo Condiciones de Múltiples Frentes (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas). Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.

Quezada, S. (2023). Estudio Comparativo de Software Minesight 15.7 y Deswik 2021.2 en Planificación Minera a Largo Plazo (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas). Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.

Ritter, C. (2018). Efecto de la Constructibilidad en Minería Subterránea Bajo Condiciones de Altos Esfuerzos, Caso Proyecto Andes Norte – Nuevo Nivel Mina (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Vera, P. (2019). Implementación de Prácticas Productivas en Contratos de Preparación Minera (Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ANEXOS

ANEXO 1: CÁLCULO TIEMPOS DEL CICLO MINERO

A continuación, se indica el detalle de los cálculos y consideraciones para la estimación de tiempo de las actividades unitarias que componen el ciclo minero.

Tabla 13: Cálculo de Tiempos - Actividad de Perforación

1.- Perforación	Unidad	Valor
Preparación - Perforación de Avance	hrs	0.7
Marcación Frente	min	42
Ciclo de Trabajo Efectivo - Perforación de Avance	hrs	3.4
Marcación Frente	min	42
Penetración Efectiva de Perforación	m/min	1.3
Eficiencia de Perforación	%	90%
# de Brazos Jumbo	un	2
Tiempo Movimiento Brazos Jumbo	min	0.7
Penetración Tiros Cara Libre	m/min	1.1
Eficiencia de Perforación	%	90%
# de Brazos Jumbo Tiros Cara Libre	un	1
Tiempo Movimiento Brazos Jumbo	min	0.75
Tiempo Total de Perforación	min	179
Tiempo Total de Perforación Tiros Cara Libre	min	22
Tiempo Perforación	hrs	4.1

Tabla 14: Cálculo de Tiempos - Actividad de Tronadura

2.- Carguío de Explosivos y Tronadura	Unidad	Valor
Ciclo de Trabajo Efectivo - Carguío de Explosivos	hrs	0.9
Número de Tiros	un	68.0
Limpieza de Tiros	min/un	0.3
Carguío de Tiros	min/un	0.5
Tiempo Total de Carguío de Explosivos por Tronadura de Avance	min	57
Ciclo de Trabajo Efectivo - Armada de Tronadura	hrs	0.9
Tiempo de Armada por m ²	min	2
Tiempo Total de Armada	min	53
Ciclo de Trabajo - Ventilación Frente	hrs	2.0
Tiempo Ventilación Gases Tronadura (No considerado en el tiempo del ciclo)	hrs	2.0
Tiempo Carguío de Explosivos y Tronadura	hrs	1.8

Tabla 15: Cálculo de Tiempos - Actividad de Carguío y Extracción de Marinas

3.- Carguío y Extracción de Marinas	Unidad	Valor
Preparación	hrs	0.7
Lavado de Marina	min	42
Ciclo de Trabajo Efectivo - Carguío y Extracción de Marinas	hrs	2.3
Tamaño Balde	yd	8
Factor de Esponjamiento	-	1.35
Factor de Llenado Balde	%	90%
Numero de Baldadas por Tronadura	un	24
Tiempo de Llenado Balde	min	0.8
Tiempo de Vaciado Balde	min	0.3
Tiempo Maniobras Carga	min	0.3
Tiempo Maniobras Descarga	min	0.3
Velocidad Media de Acarreo - Vacío	kmph	5
Velocidad Media de Acarreo - Lleno	kmph	4
Distancia Media de Acarreo	m	150
Tiempo Total por Baldada	min	5.8
Tiempo Total por Carguío y Extracción de Marinas	min	138
Ciclo de Trabajo Efectivo - Limpieza Postura Post Carguío de Marinas	hrs	0.1
Tiempo Limpieza por m ² de Piso	min	0.5
Tiempo Total Limpieza Postura Post Carguío de Marinas	min	6
Tiempo Carguío y Extracción de Marinas	hrs	3.1

Tabla 16: Cálculo de Tiempos - Actividad de Acuñaadura y Saneamiento

4.- Acuñaadura y Saneamiento	Unidad	Valor
Área de Acuñaadura y Saneamiento de Frente	m2	52.4
Acuñaadura	hrs	1.3
Tiempo Acuñaadura por m ²	min	1.5
Tiempo Total de Acuñaadura	min	78.5
Saneamiento de frente	hrs	0.4
Tiempo Saneamiento de Frente por m ²	min	0.5
Tiempo Total Saneamiento de frente	min	26.2
Tiempo Total de Acuñaadura	hrs	1.7

Tabla 17: Cálculo de Tiempos - Actividad de Fortificación Primaria

5.- Fortificación Primaria (Perno/Malla/Shotcrete) - Techo/Cajas/Frente	Unidad	Valor
Ciclo de Trabajo Efectivo - Perforación e Instalación Pernos y Malla	hrs	5.9
Tiempo Marcación Pernos Fortificación	min	15
Tiempo Perforación Pernos Fortificación	min	161
Tiempo Lechado Pernos Fortificación	min	65
Tiempo Colocación Splitset	min	43
Tiempo Instalación Malla - Strap	min	3
Tiempo Total Instalación Malla	min	57
Cambio Dollies - Elementos de Fortificación	min	10
Tiempo Total Instalación Pernos y Malla	min	351
Ciclo de Trabajo Efectivo - Proyección Shotcrete	hrs	5.0
Tasa de Proyección	m3/hr	6.0
Tiempo Total Proyección Pre-Shotcrete (5 cm de espesor)	hrs	1.2
Tiempo Total Proyección Shotcrete (1 cm de espesor)	hrs	0.2
Tiempo de Curado	hrs	3.5
Tiempo Fortificación Primaria	hrs	10.8

Tabla 18: Cálculo de Tiempos - Actividad de Scanner y Avance de Servicios

6.- Scanner y Avance Servicios Desarrollo	Unidad	Valor
Scanner Topográfico	hrs	0.4
Levantamiento Topográfico Scanner	hrs	0.4
Agua Industrial/Drenaje/Ventilación	hrs	0.8
Frecuencia de Requerimiento de Avance de Servicios (Num. Avances)	un	5
Tiempo Instalación Agua Industrial / Drenaje	hrs	2
Tiempo Instalación Agua Industrial / Drenaje - Por Avance	hrs	0.4
Tiempo Instalación Manga Ventilación	hrs	2
Tiempo Instalación Manga Ventilación - Por Avance	hrs	0.4
Cable Energía Eléctrica/ Unidad de Poder Desarrollos	hrs	0.2
Frecuencia de Requerimiento de Avance de Servicios (Num. Avances)	un	45
Tiempo Instalación Cable - Reubicación Unidad de Poder	hrs	10
Tiempo Instalación Cable - Reubicación Unidad de Poder - Por Avance	hrs	0.2
Tiempo Avance Servicios Desarrollo	hrs	1.4

ANEXO 2: INTERFERENCIAS TÍPICAS

A continuación, con el objetivo de no extender el informe, se detalla el análisis estadístico realizado solo a dos grupos de las interferencias típicas muestreadas en terreno.

- **Interferencia por Coordinación Operativa**

La interferencia en la coordinación operativa se puede generar debido a ineficiencias en la asignación de recursos, retrasos en entrega de equipos desde mantención, ineficiencias de coordinación de trabajos, entre otros. Esta interferencia puede afectar cualquier actividad del ciclo minero, cuyo impacto se analiza estadísticamente mediante los datos muestreados en la siguiente tabla y en el histograma que se presenta.

Tabla 19: Estadística Descriptiva de los Datos de Interrupción por Coordinación Operativa

Estadística	Valores	Unidad
Media	3.34	Horas
Error Estándar	0.13	Horas
Mediana	2.33	Horas
Moda	1.50	Horas
Desviación Estándar	2.90	Horas
Varianza Muestral	8.42	Horas ²
Kurtosis	0.98	-
Asimetría	1.41	-
Rango	10.75	Horas
Mínimo	0.25	Horas
Máximo	11	Horas
Suma	1,745	Horas
Conteo	523	Un

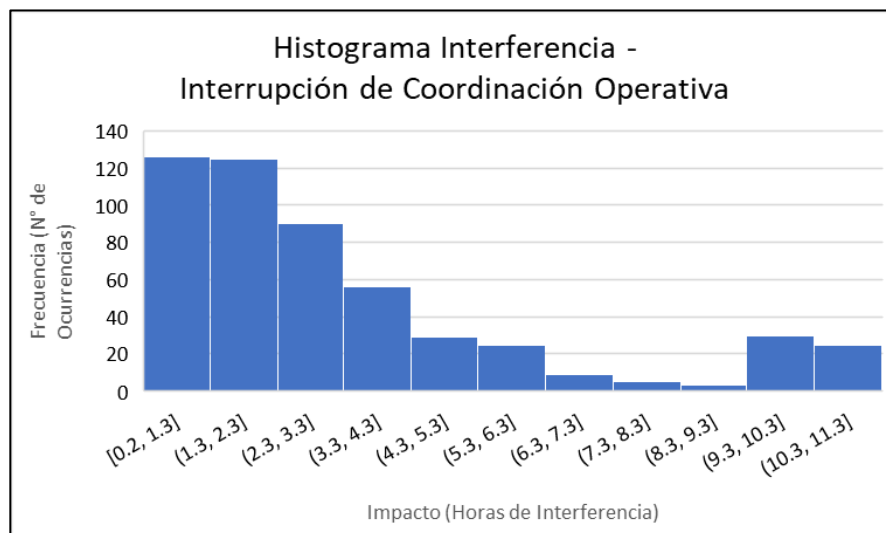


Ilustración 21: Histograma de Interrupción por Coordinación Operativa

En la siguiente tabla se presenta la probabilidad de ocurrencia dentro del rango del periodo muestreado y la simultaneidad de los eventos ocurridos durante el mismo día.

Tabla 20: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Coordinación Operativa

Período Total (días)	556
Días con Interferencias (días)	268
Probabilidad de Ocurrencia (%)	48
Nº de Interferencias (un)	523
Factor de Simultaneidad (un)	1.95

A partir de la frecuencia de cada impacto, se realiza un ajuste de distribución de probabilidad obteniendo una distribución Log-normal, al cual se aplica una simulación de Montecarlo obteniendo los siguientes resultados.

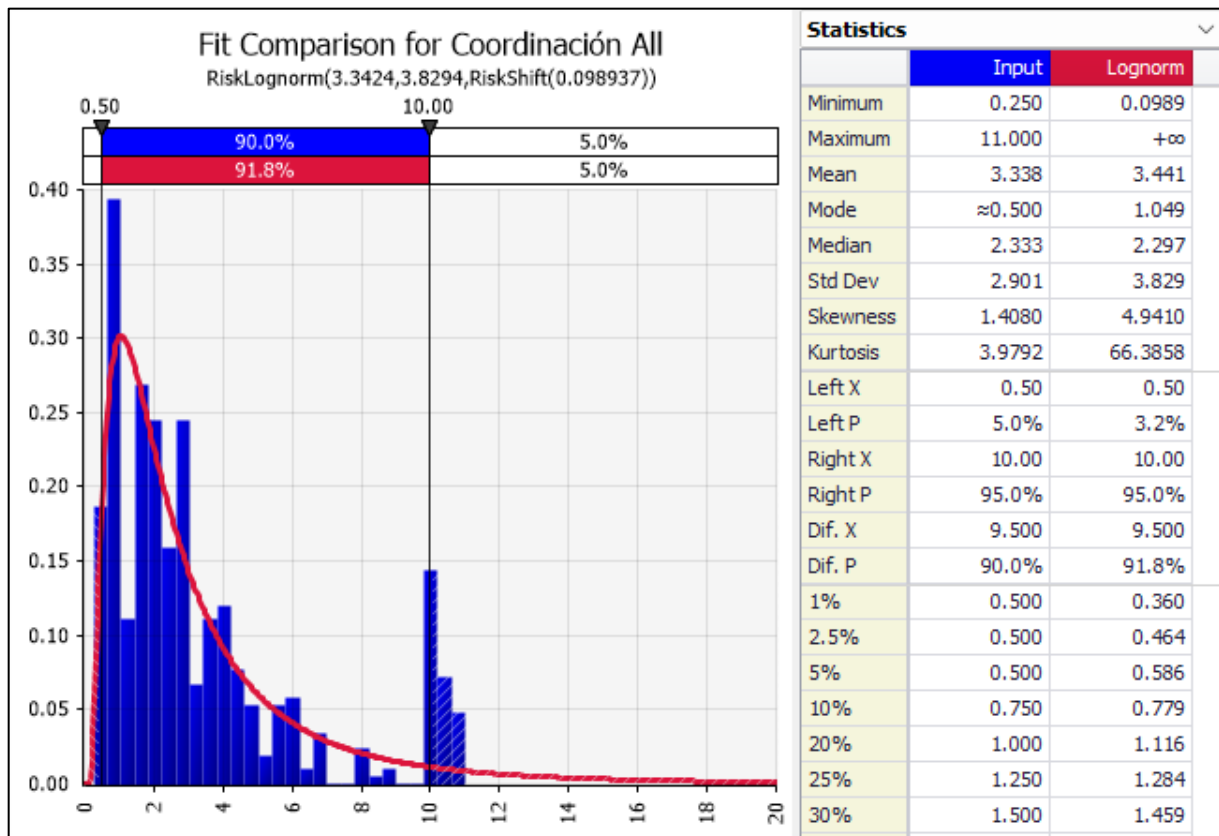


Ilustración 22: Ajuste Distribución de Probabilidad – Interrupción por Coordinación Operativa

- **Interferencia por Suministro de Agua**

La interrupción por el suministro de agua es una interferencia que se puede generar debido a problemas de presión, problemas de abastecimientos de agua y por filtraciones. Esta interferencia afecta las actividades que requieren de un control de temperatura o del polvo, cuyo impacto se analiza estadísticamente mediante los datos muestreados en la siguiente tabla y en el histograma que se presenta.

Tabla 21: Estadística Descriptiva de los Datos de Interrupción por Suministro de Agua

Estadística	Valores	Unidad
Media	4.77	Horas
Error Estándar	0.35	Horas
Mediana	3.67	Horas
Moda	10.50	Horas
Desviación Estándar	3.53	Horas
Varianza Muestral	12.46	Horas ²
Kurtosis	-0.59	-
Asimetría	0.75	-
Rango	14.0	Horas
Mínimo	0.5	Horas
Máximo	14.5	Horas
Suma	491	Horas
Conteo	103	Un

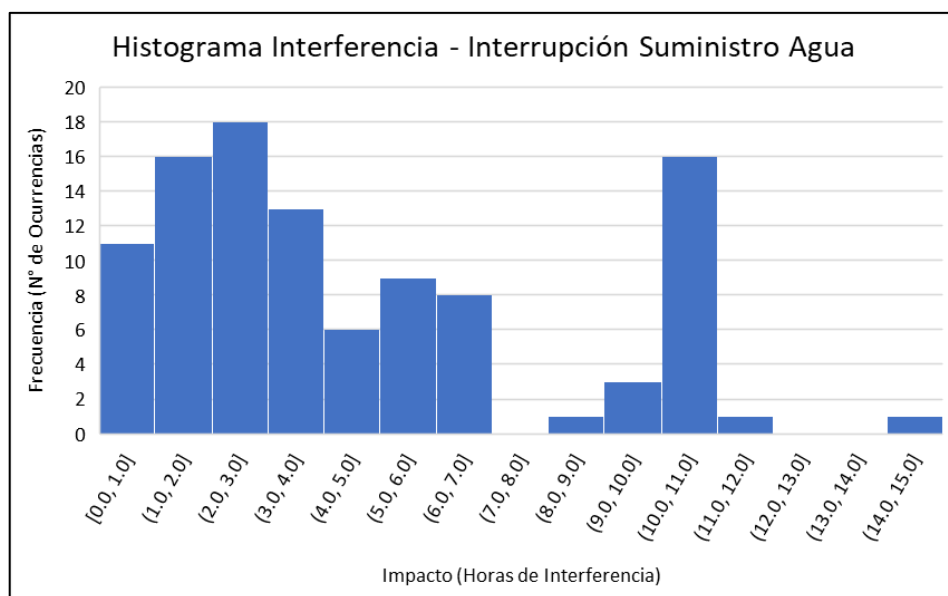


Ilustración 23: Histograma de Interrupción por Suministro de Agua

En la siguiente tabla se presenta la probabilidad de ocurrencia dentro del rango del periodo muestreado y la simultaneidad de los eventos ocurridos durante el mismo día.

Tabla 22: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Suministro de Agua

Período Total (días)	512
Días con Interferencias (días)	78
Probabilidad de Ocurrencia (%)	15
N° de Interferencias (un)	103
Factor de Simultaneidad (un)	1.32

Para ajustar los valores del histograma presentado anteriormente mediante una distribución de probabilidad, es necesario separar los datos de impacto mayor o igual a 10 horas, generando 2 agrupaciones que presentan nuevas probabilidades de ocurrencia y factores de simultaneidad.

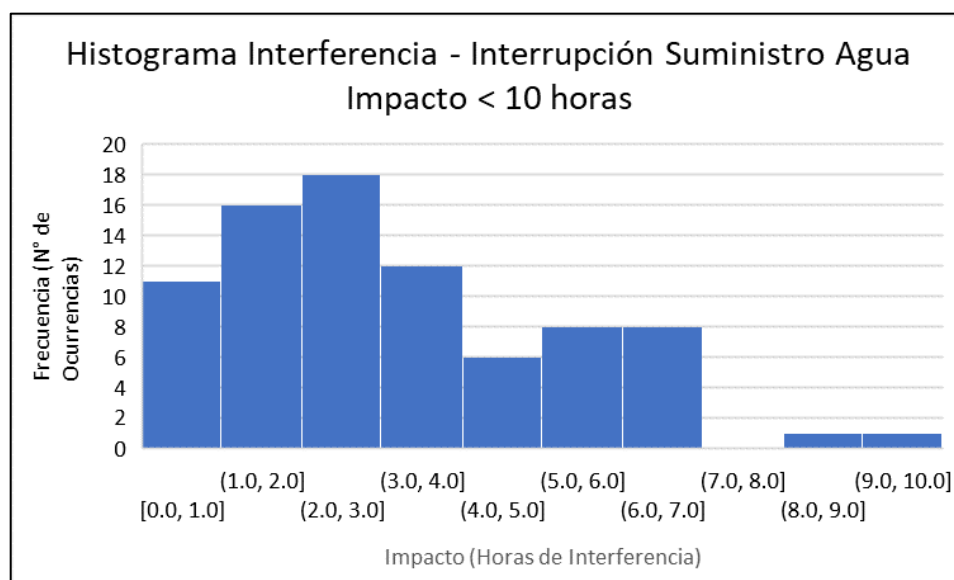


Ilustración 24: Histograma de Interrupción por Suministro de Agua (Impacto <10 horas)

Tabla 23: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto <10 horas)

Período Total (días)	454
Días con Interferencias (días)	66
Probabilidad de Ocurrencia (%)	15
N° de Interferencias (un)	81
Factor de Simultaneidad (un)	1.23

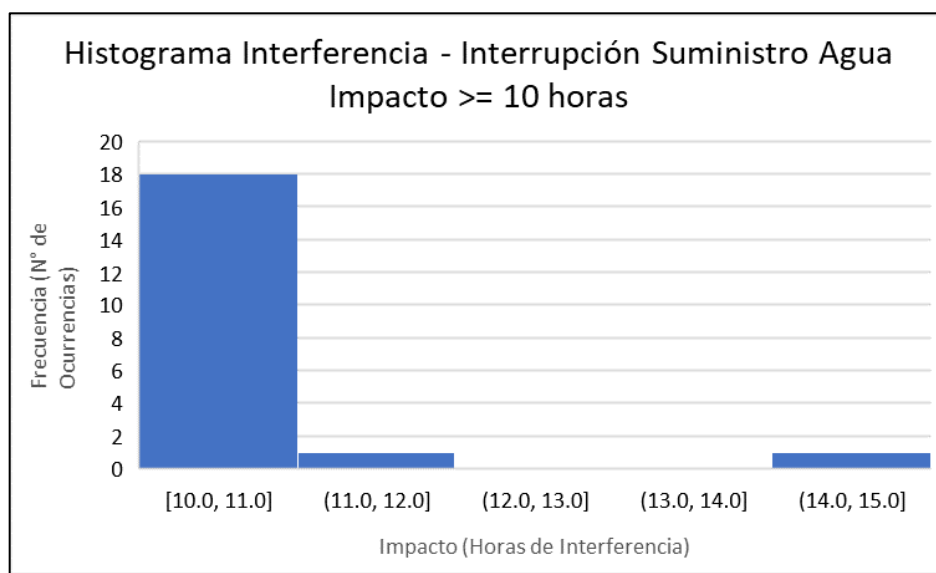


Ilustración 25: Histograma de Interrupción por Suministro de Agua (Impacto ≥ 10 horas)

Tabla 24: Ocurrencia de Eventos – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto ≥ 10 horas)

Período Total (días)	449
Días con Interferencias (días)	19
Probabilidad de Ocurrencia (%)	4
N° de Interferencias (un)	20
Factor de Simultaneidad (un)	1.05

A partir de las frecuencias de los impactos agrupados anteriormente, se realiza un ajuste de distribución de probabilidad obteniendo una distribución PERT para los impactos menor a 10 horas y una distribución Log-normal para los impactos mayor o igual a 10 horas, a los cuales se aplica una simulación de Montecarlo obteniendo los siguientes resultados.

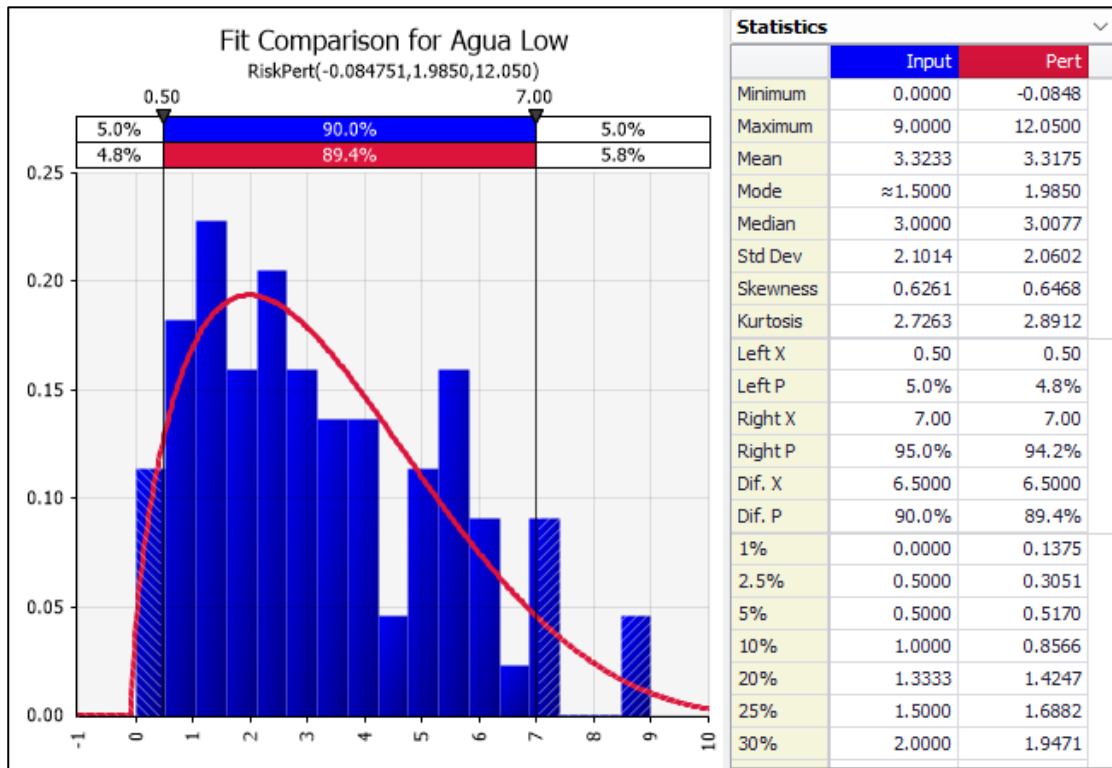


Ilustración 26: Ajuste Distribución de Probabilidad – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto <10 horas)

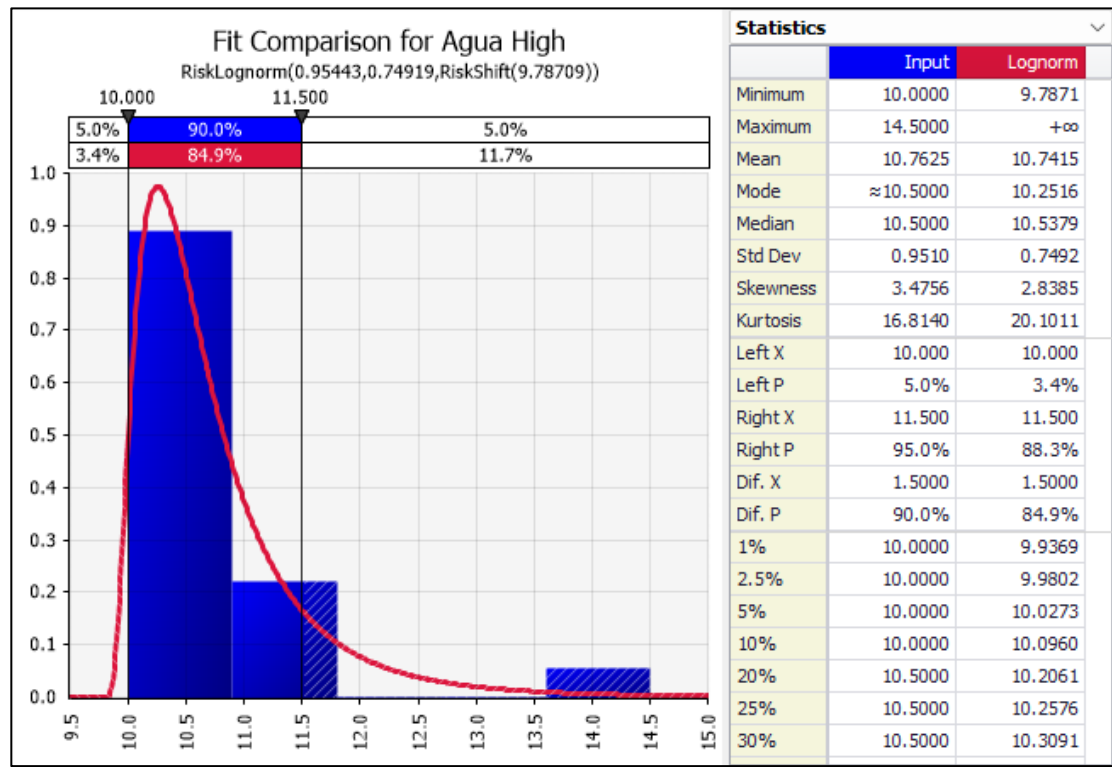


Ilustración 27: Ajuste Distribución de Probabilidad – Interrupción por Suministro de Agua (Impacto ≥10 horas)

ANEXO 3: DISEÑO MINERO – PROGRAMA PRELIMINAR

A continuación, en base al diseño minero utilizado para el programa preliminar, se presenta la disposición general de los diferentes niveles del proyecto, con sus correspondientes actividades generadas como sólidos 3D. De esta manera, se pueden observar las modificaciones del diseño minero que se actualizaron en el programa final.

- **Disposición General – Nivel de Hundimiento:**

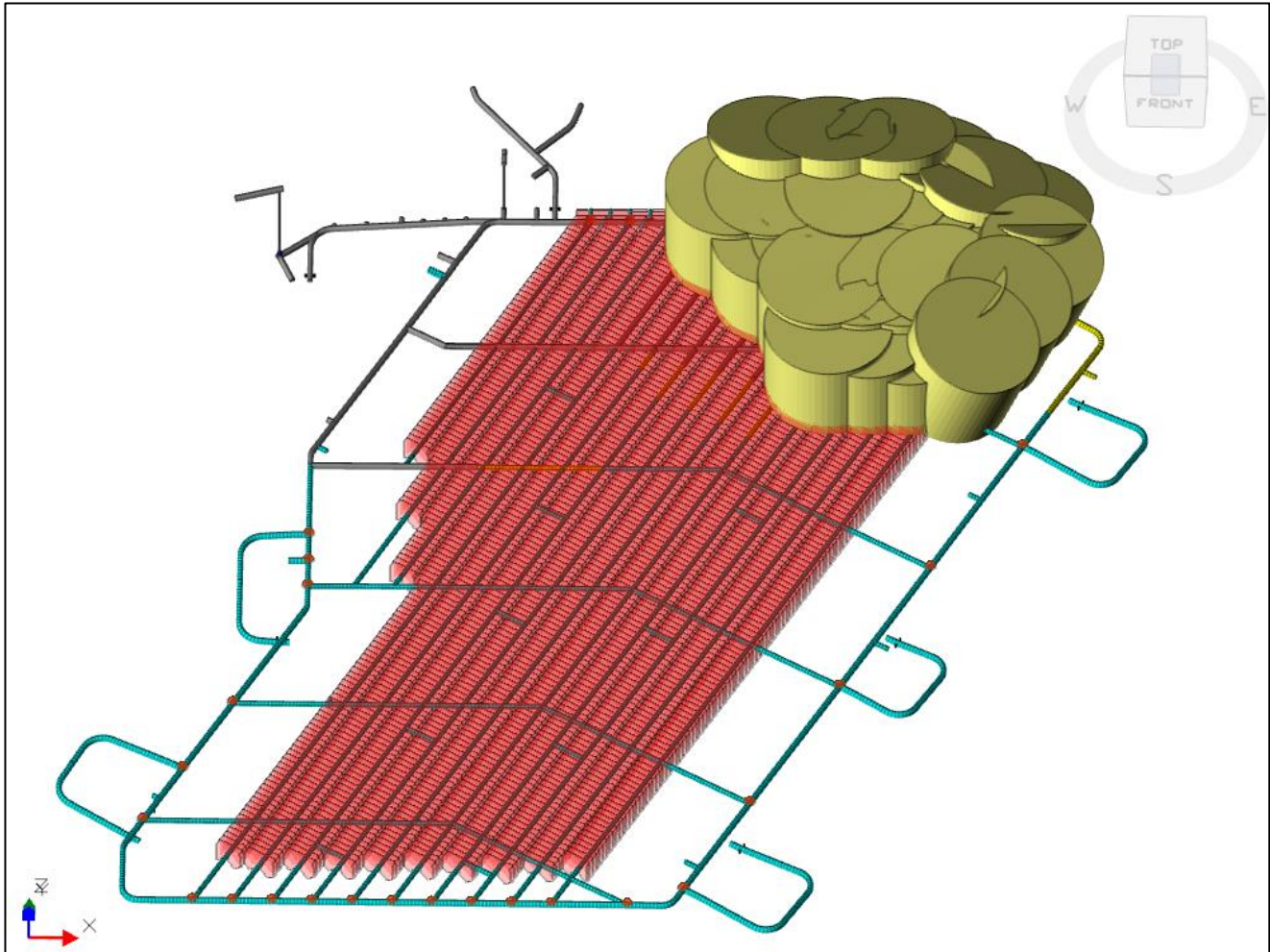


Ilustración 28: Modelo 3D del Nivel de Hundimiento – Programa Preliminar

- **Disposición General – Nivel de Producción:**

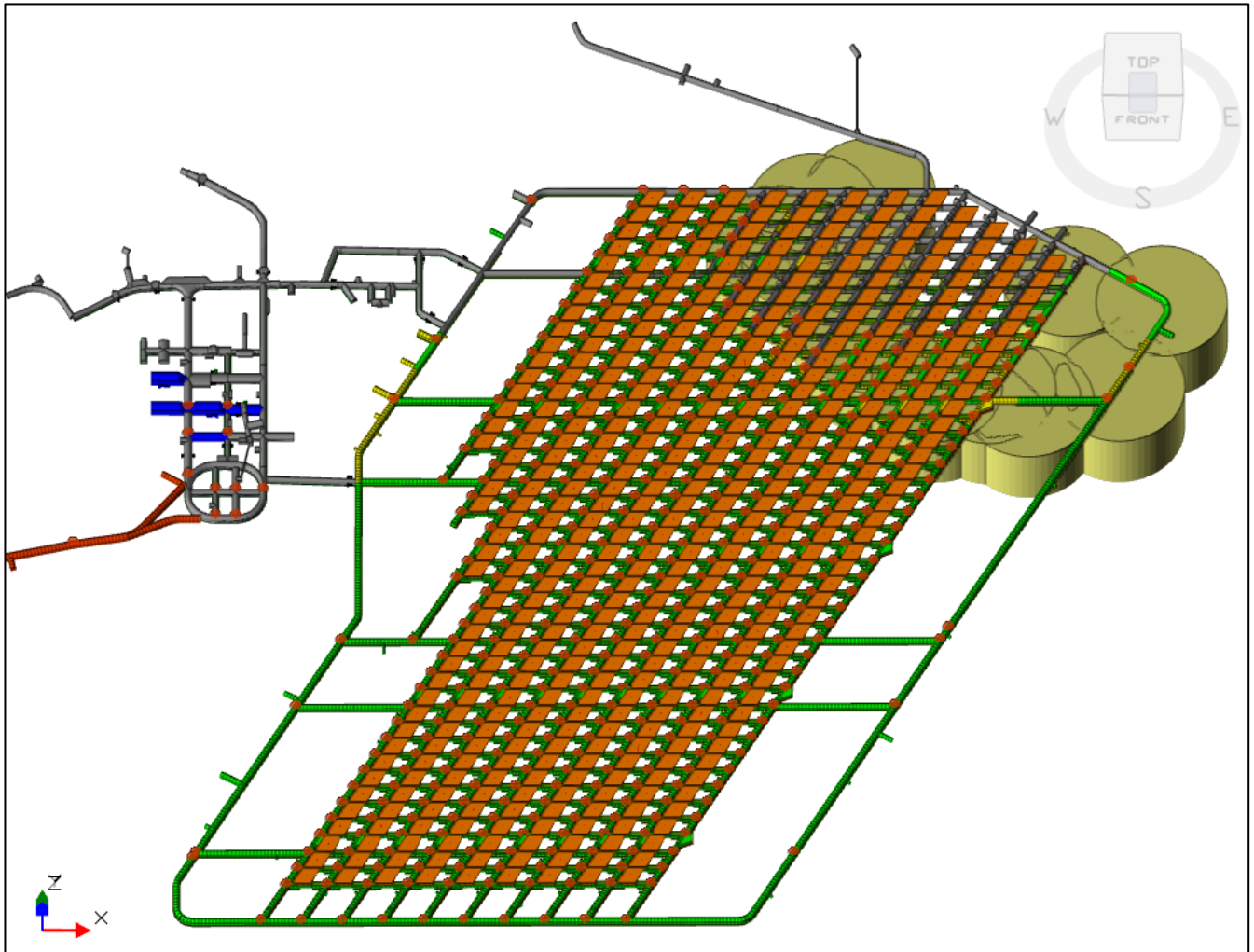


Ilustración 29: Modelo 3D del Nivel de Producción – Programa Preliminar

- **Disposición General – Nivel de Transporte Intermedio:**

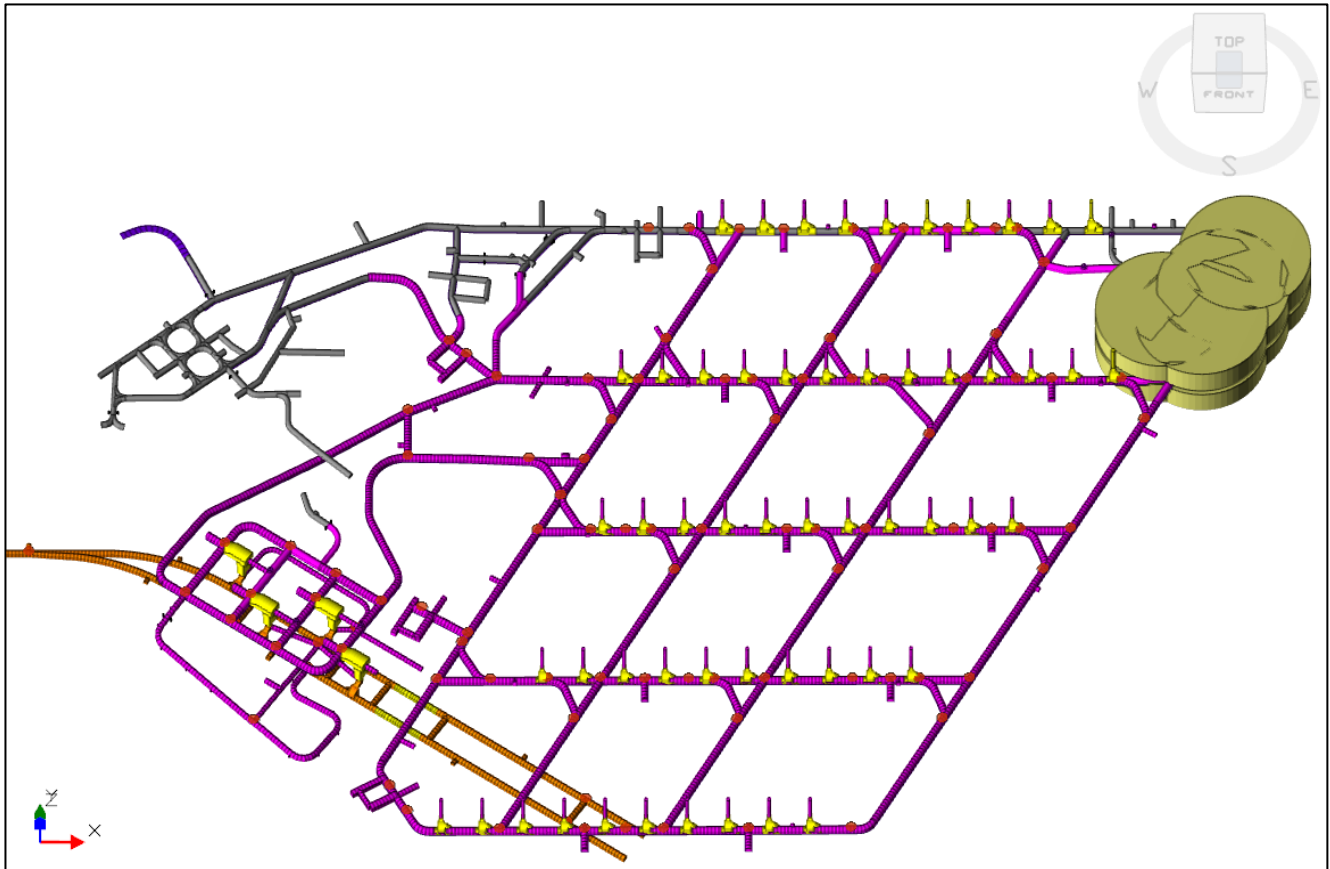


Ilustración 30: Modelo 3D del Nivel de Transporte Intermedio – Programa Preliminar

- **Disposición General – Sub-Nivel de Ventilación:**

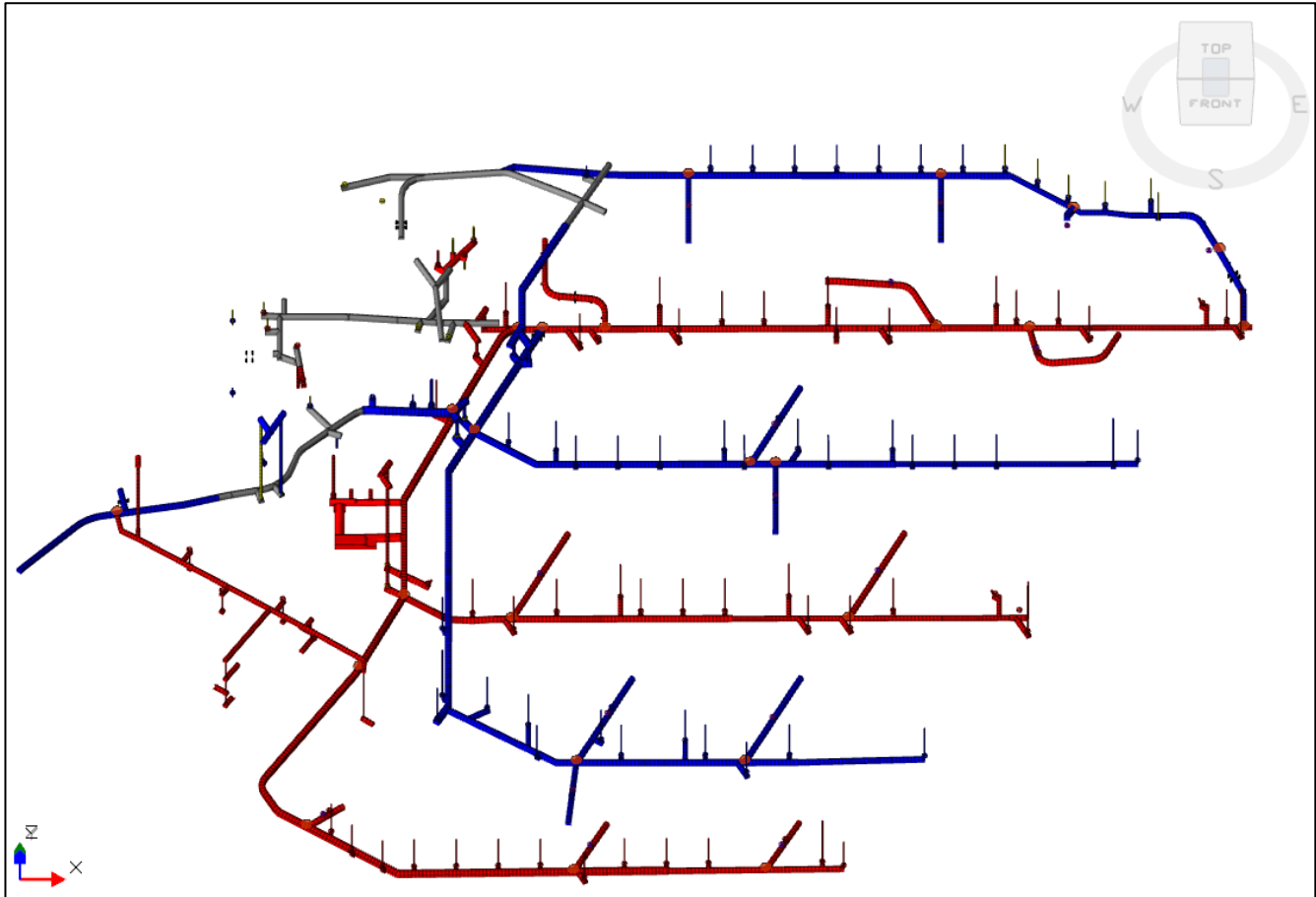


Ilustración 31: Modelo 3D del Sub-Nivel de Ventilación – Programa Prelimi

ANEXO 3: DISEÑO MINERO – PROGRAMA FINAL

A continuación, en base al diseño minero utilizado para el programa final, se presenta la disposición general de los diferentes niveles del proyecto, con sus correspondientes actividades generadas como sólidos 3D.

- **Disposición General – Nivel de Hundimiento:**

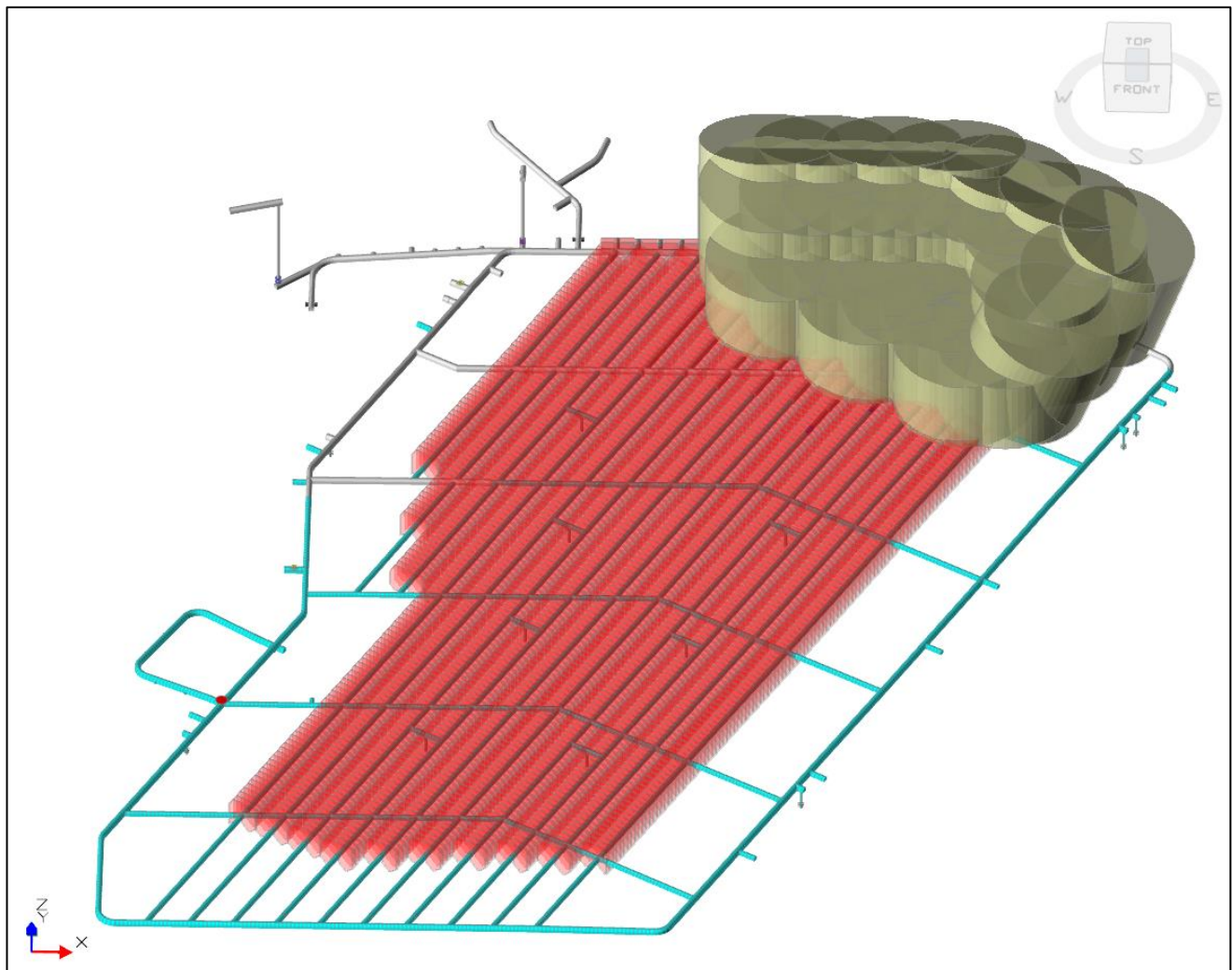


Ilustración 32: Modelo 3D del Nivel de Hundimiento – Programa Final

- **Disposición General – Nivel de Producción:**

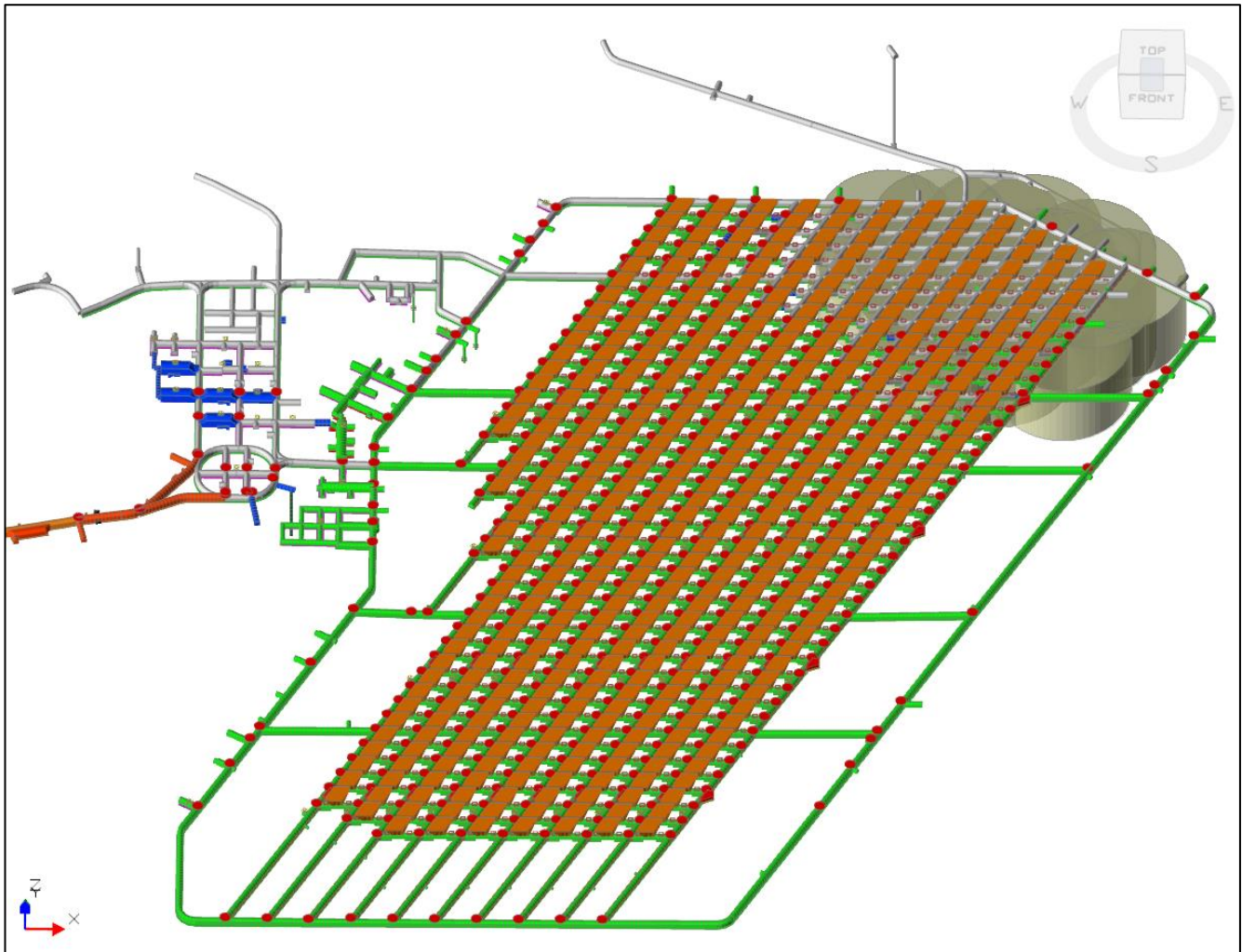


Ilustración 33: Modelo 3D del Nivel de Producción – Programa Final

- **Disposición General – Nivel de Transporte Intermedio:**

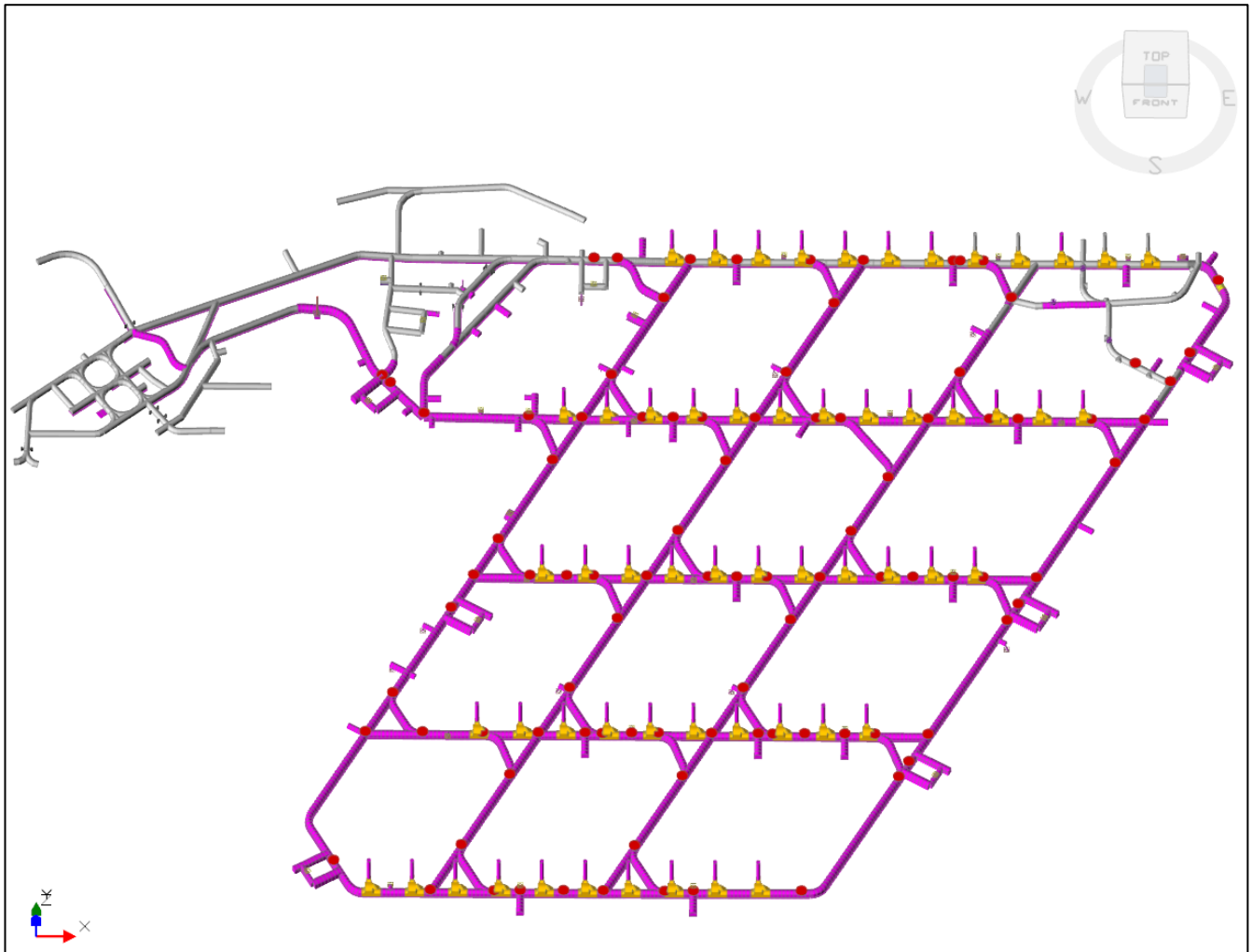


Ilustración 34: Modelo 3D del Nivel de Transporte Intermedio – Programa Final

- **Disposición General – Sub-Nivel de Ventilación:**

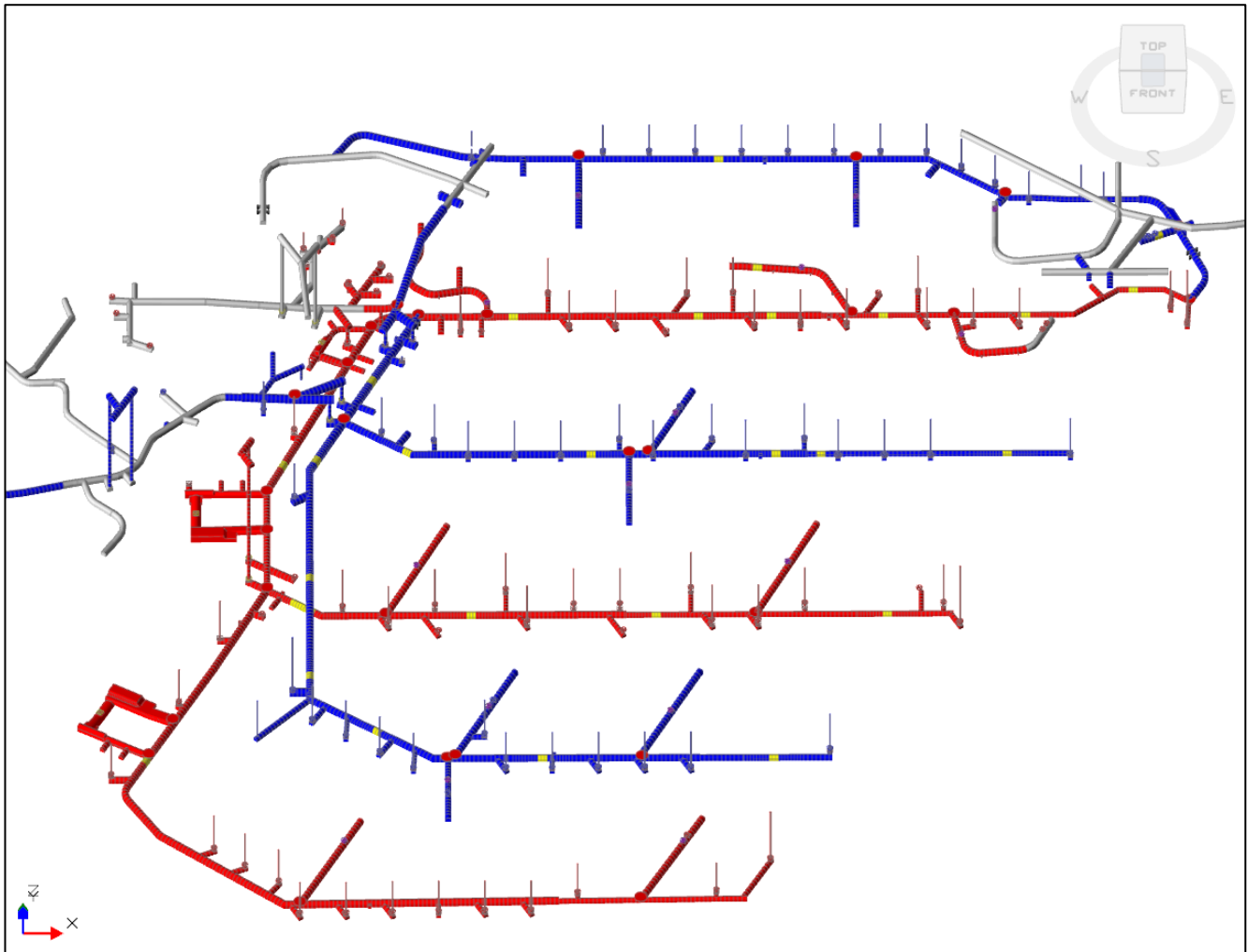


Ilustración 35: Modelo 3D del Sub-Nivel de Ventilación – Programa Final

Adicionalmente, en las siguientes figuras se presenta el detalle de las actividades representadas como sólidos 3D.

- **Detalle – Nivel de Hundimiento y Producción**

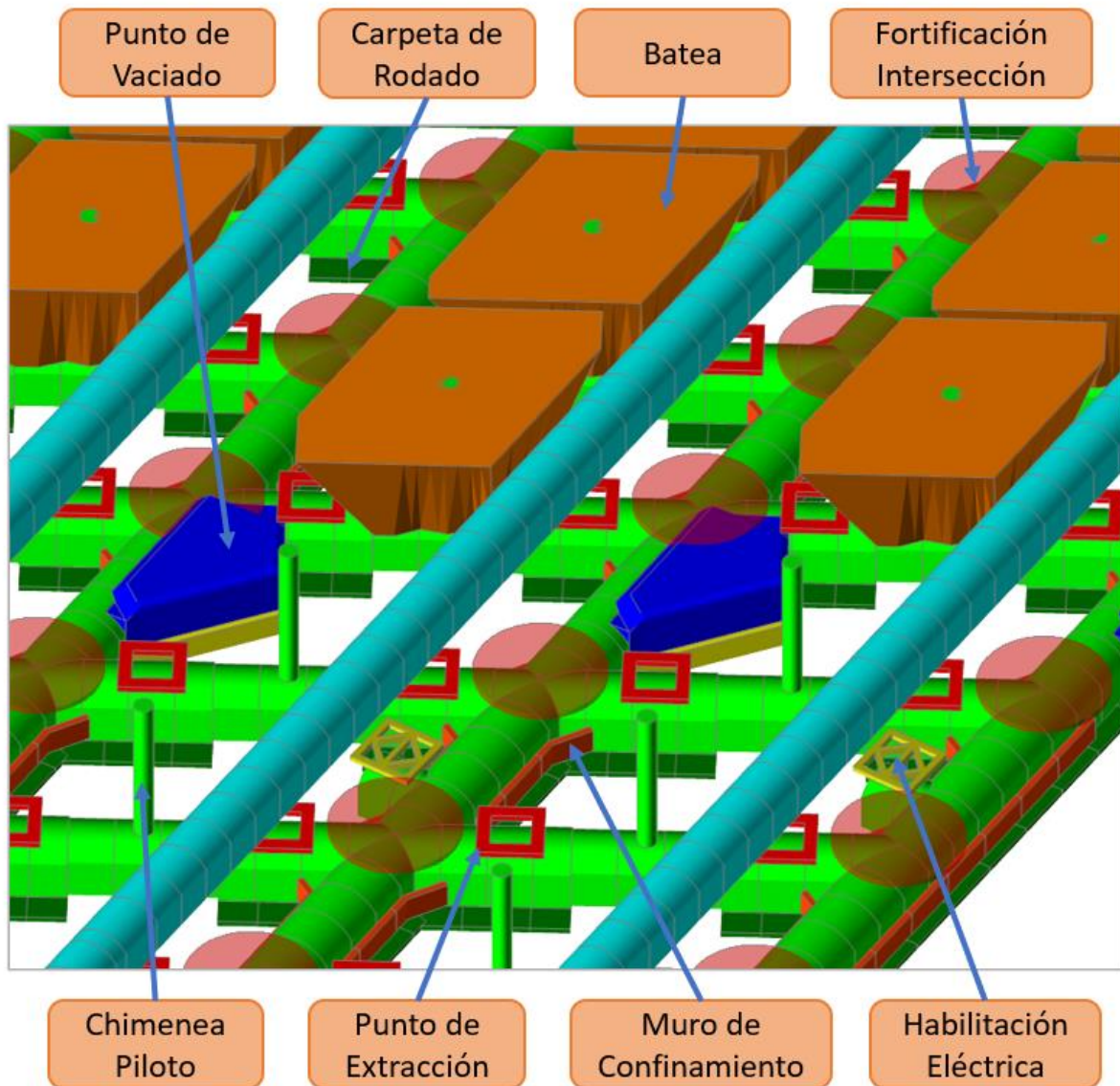


Ilustración 36: Detalle del Modelo 3D en los Niveles NH y NP

- **Detalle – Nivel de Transporte Intermedio y Ventilación**

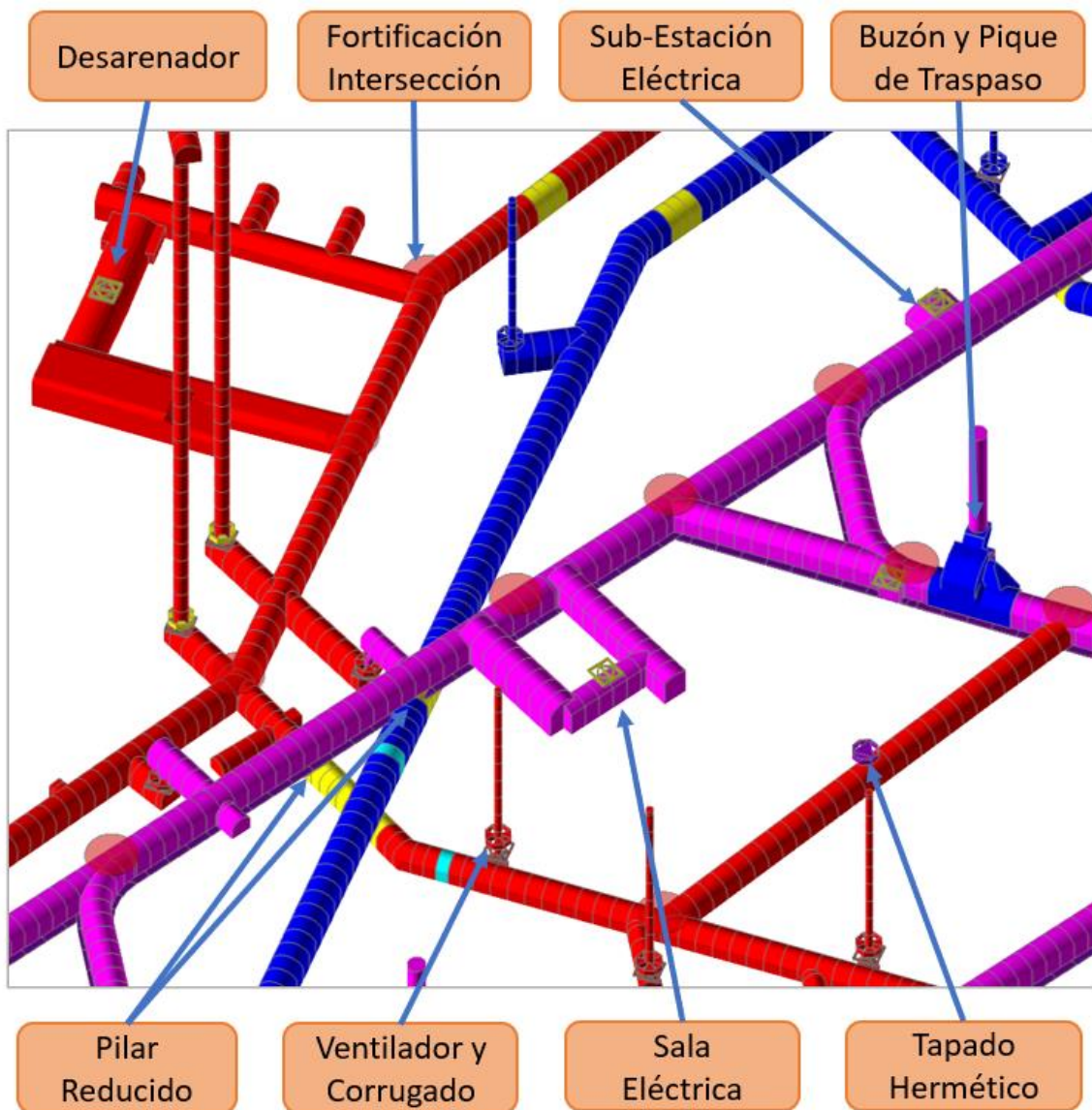


Ilustración 37: Detalle del Modelo 3D en los Niveles NTI y SNV

ANEXO 5: CARTA GANTT

A continuación, se presenta de manera resumida la carta Gantt obtenida de la programación, indicando los requerimientos para los hitos principales del proyecto, lo que permite determinar las rutas críticas.

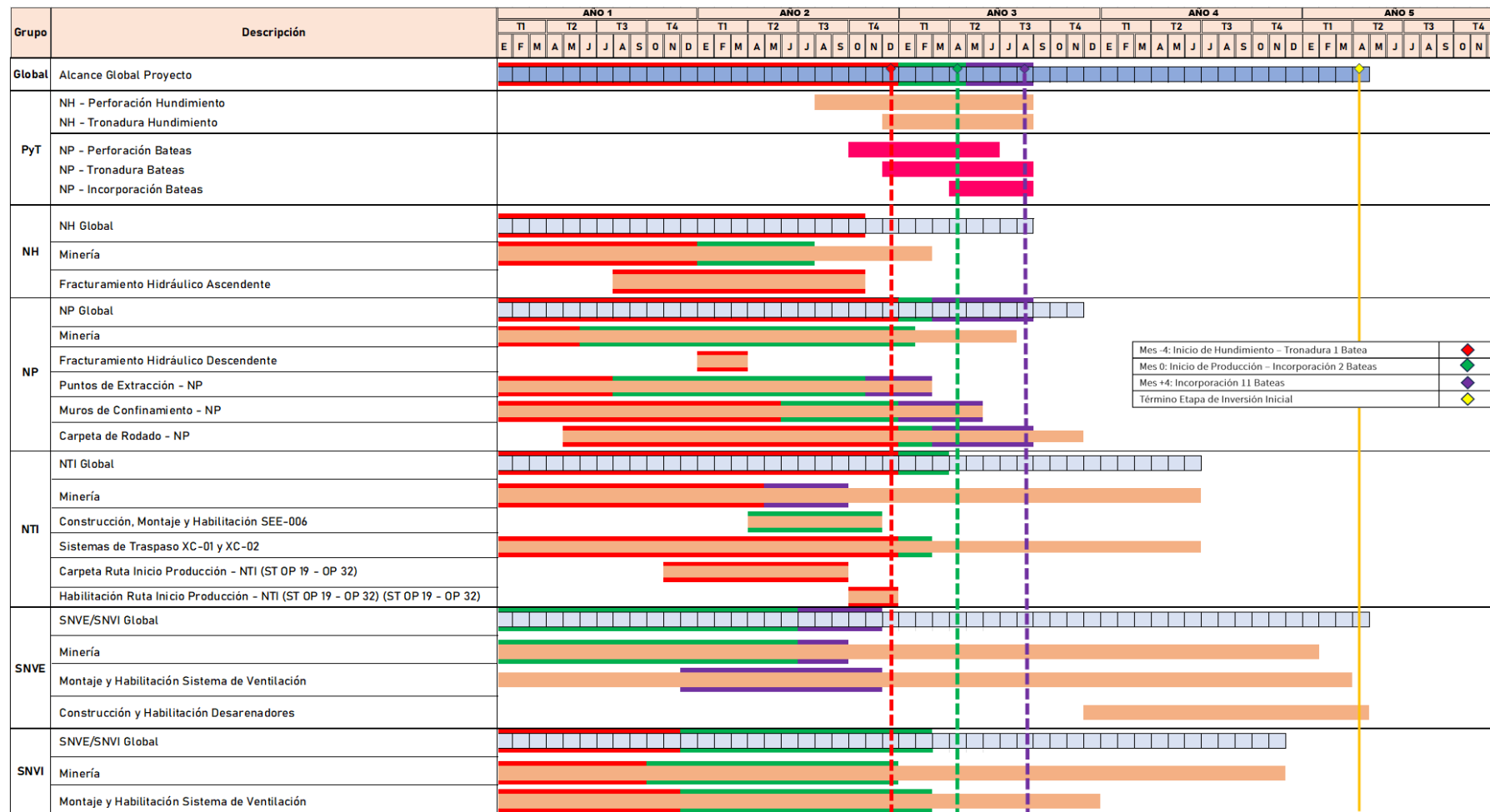


Ilustración 38: Carta Gantt Resumen – Programa Actividades de Minería y Construcción del Caso de Estudio