



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

METODOLOGÍAS DE AGENDAMIENTO ÓPTIMO EN LABORES DE PREPARACIÓN
MINERA DE PANEL CAVING PARA HORIZONTE DE MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE
MODELAMIENTO EN UDESS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN MINERÍA

PIETRO FERNANDO CAYO VARGAS

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ASIEH HEKMAT

FELIPE ORELLANA ESPINOZA

JAVIER PÉREZ BASTÍAS

MANUEL REYES JARA

SANTIAGO DE CHILE

2021

PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PREPARACIÓN MINA A TRAVÉS DE ALGORITMOS MATEMATICOS MEDIANTE UDESS PARA ESCALA DE TIEMPO TRIMESTRAL/SEMANAL

La minería en Chile enfrenta una serie de objetivos estratégicos, uno de ellos es la minimización de los costos, por ende, es preciso plantearse un problema de carácter complejo propio de la preparación mina, cuyas variables provendrán del negocio minero y de sus inversiones (construcción de obras). En la actualidad, Microsoft Project o Primavera, han sido los agendadores de actividades usados tradicionalmente por los planificadores, cuyos resultados podrían ser más eficientes en términos de costos para horizontes temporales de corto-mediano plazo. El desarrollo y avance tecnológico actual (Inteligencia en el manejo de datos) permitirían generar un plan de preparación mina más eficiente, capaz de integrar e interpretar una gran cantidad de datos y variables propias del problema, esto con miras a reducir tiempos y costos dentro de un margen de acción de corto-mediano plazo. Por ende, surge la motivación de proponer una metodología de planificación de preparación minera más allá de lo tradicional, esto es, que sea capaz de obtener resultados ágiles, más confiables y con un mayor grado de certeza.

El planteamiento del siguiente estudio en concreto es, modelar un agendamiento optimizado de las actividades de la preparación minera bajo un contexto de minería subterránea, explotada por Panel Caving, para un horizonte temporal de corto-mediano plazo, el que correctamente aplicado, permitirá minimizar los tiempos de construcción y por ende, aportar a la minimización de los costos. La metodología de este trabajo se focaliza en mejorar los planes de la preparación minera usando un agendador inteligente, el cual tras el modelamiento y optimización del problema permitiría direccionar la toma de decisiones aportando una mayor amplitud de escenarios posibles en forma ágil.

Este estudio contempló como información base el sector de mina Esmeralda de la división El Teniente. Los datos contemplan los planos de cada subnivel, los criterios geomecánicos y de construcción de obras para la preparación minera. Dichos datos serán las variables que alimentarán y delimitarán el modelo de planificación y optimización, incorporando también condiciones particulares o singularidades propias de una operación minera. El estudio fue desarrollado considerando el primer trimestre del año y se espera pueda ser replicado en otras operaciones logrando optimizar los planes de preparación minera convencional.

Como resultado del estudio, el análisis del modelamiento de la preparación mina permitió concluir que, a partir del segundo mes, el modelo exhibe una brecha de tiempo entre las actividades de la planificación convencional y las obtenidas a partir del modelamiento de la optimización propuesta, luego se infiere lo siguiente:

- 1) La metodología propuesta para la construcción de planes de preparación mina, muestran a nivel semanal (corto-mediano plazo) el cumplimiento de hitos y restricciones de un plan de convencional, e inclusive reduce los tiempos.
- 2) En el modelamiento de mina Esmeralda con secuenciamiento de actividades de forma versátil, permitió un nuevo escenario para la planificación de preparación mina, sirviendo de base referencial como solución optimizada para un plan de largo plazo.

Los beneficios del presente trabajo apuntan a la reducción de los tiempos para la confección de planes, generación de nuevos escenarios bajo la incorporación de herramientas cuantitativas y tecnológicas. Fundamentalmente, obtener una visión integral que permita al planificador enfocarse en los criterios expertos de la planificación dejando atrás el tiempo invertido en la parte metódica de la construcción de los planes.

PLANNING AND OPTIMIZATION OF MINE PREPARATION THROUGH MATHEMATICAL ALGORITHMS USING UDESS FOR QUARTERLY / WEEKLY TIMESCALE

Mining in Chile faces a series of strategic objectives, one of them is the minimization of costs, therefore, it is necessary to consider a complex problem typical of mine preparation, which variables will come from the mining business and its investments. Currently, Microsoft Project or Primavera, have been the current schedulers traditionally used by planners, whose results could be more efficient in terms of costs for short-medium-term time horizons. The development and current technological advance (Intelligence in data management) will allow to generate a more efficient mine preparation plans, capable of integrating and interpreting a large amount of data and variables of the problem, reaching the goal of reducing times and costs within a short-medium-term margin of action.

The approach of the following study will go through an optimized model scheduling the mining preparation activities under a context of underground mining, exploited by Panel Caving, in a short-medium-term time horizon, which correctly applied, allows minimizing the construction times and therefore, contribute to the minimization of costs. The methodology of this work is focused on improving mine preparation plans using an intelligent scheduler, which after modeling and optimizing the problem would direct decision-making by providing a greater range of possible scenarios in an agile way.

This study considered as base information the Esmeralda mine sector of the El Teniente division. The data includes the plans of each sublevel, the geomechanical criteria and the construction of works for mining preparation. This data will feed and delimit the planning and optimization model, also incorporating conditions or singularities typical of a mining operation. The study was developed considering the first quarter of the year and it is expected that it can be replicated in other operations, optimizing the conventional mine preparation plans.

As a result of the study, the model in the second month exhibits a time gap between the activities of conventional planning and those obtained from the modeling of the proposed optimization, then the following is inferred:

- 1) The proposed methodology for the construction of mine preparation plans shows at a weekly level (short-medium term) the fulfillment of milestones and restrictions of a conventional plan, and even reduces times.
- 2) In modeling the Esmeralda mine with sequencing of activities in a versatile way, it allowed a new scenario for mine preparation planning, serving as a reference base as an optimized solution for a long-term plan.

The benefits of this work point to the reduction of the times for the preparation of plans, generation of new scenarios under the incorporation of quantitative and technological tools. Fundamentally, to obtain a comprehensive vision that allows the planner to focus on the expert criteria of planning, leaving behind the time invested in the methodical part of the construction of the plans.

Tabla de Contenido

Índice de Ilustraciones	iv
Índice de Tablas	v
Índice de Gráficos	vi
1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo General.....	3
1.3 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Alcances.....	3
2 Antecedentes y estado del Arte	4
2.1 Método de explotación Panel Caving	4
2.2.1 Preparación Minera	5
2.2 Planificación minera	6
2.2.1 Concepto.....	6
2.2.2 Revisión bibliográfica:	8
2.2.3 Herramientas computacionales en preparación minera.....	11
2.3 Análisis crítico del estado del arte	15
3 Caso de Estudio Esmeralda DET.....	18
3.1 Sector de explotación mina Esmeralda, El Teniente	18
3.2 Contexto de Esmeralda Sur (Bloque 1 y 2)	20
3.3 Planificación minera DET.....	21
3.4 Preparación Minera Mina Esmeralda.....	23
3.5 Estrategia y consideraciones de modelamiento	24
3.6 Esmeralda UCL.....	25
3.7 Consideraciones operacionales Caso de Estudio	29
4 Modelamiento de preparación minera corto plazo mediante UDESS.....	32
4.1 Modelo Conceptual.....	32
4.2 Estrategia de Modelamiento	34
4.3 Datos de Entrada.....	35
4.2.1 Actividades.....	35
4.2.2 Precedencias	38
4.2.3 Restricciones	40

4.3 Modelamiento trimestral.....	44
4.3.1 Observaciones y Datos de entrada	44
4.3.2 Datos de entrada por Subnivel, modelo trimestral mina Esmeralda	54
5 Análisis y Resultados.....	60
5.2 Discusión y análisis de resultados Caso de Estudio	60
5.2 Resultados y análisis Modelo Trimestral	73
5.3 Análisis del proceso Workflow	102
5 Conclusiones, Recomendaciones y medidas de mitigación	107
6 Bibliografía.....	110

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1:Esquema de disposición de niveles típico de panel Caving	5
Ilustración 2: Proceso genérico de planificación minera por etapas (Elaboración propia)	7
Ilustración 3: Disposición de sectores mina El Teniente, vista en planta.....	19
Ilustración 4: Distinció de bloques 1 y 2 de ESM.	20
Ilustración 5: Layout general de crecimiento caing para bloque 1 ESM.....	21
Ilustración 6: Layout UCL ESM, Desarrollos horizontales	25
Ilustración 7: Simbología de colores por mes, UCL ESM, desarrollos Horizontales	26
Ilustración 8: Secciones típicas UCL ESM	26
Ilustración 9: Layout UCL ESM, Desarrollos Verticales.....	27
Ilustración 10: Layout UCL ESM, Fortificaciones especiales	27
Ilustración 11: Layout UCL ESM, Pozos de Hidrofractura	28
Ilustración 12: Secuencia constructiva nivel de Hundimiento Esmeralda	30
Ilustración 13: Ajuste de Periodos en UDESS	31
Ilustración 14: Flujo de un modelo de optimización para secuenciamiento de actividades en planificación mina.....	32
Ilustración 15: Metodología conceptual de modelamiento.....	34
Ilustración 16: Esquema de modelamiento ESM	35
Ilustración 17: Esquema de incorporación de secuencia constructiva como precedencias, caso de estudio	39
Ilustración 18: Esquema de estrategia para tratamiento de restricciones	51
Ilustración 19: Layout y simbología Nivel de Producción ESM, Desarrollos horizontales.....	55
Ilustración 20: Secuencia constructiva Nivel de Producción Esmeralda	56
Ilustración 21: Layout Nivel de Acarreo ESM.....	57

Ilustración 22: Secuencia constructiva Nivel de Acarreo Esmeralda.....	58
Ilustración 23: Layout Sub-Nivel de Ventilación ESM.....	59
Ilustración 24: Secuencia constructiva Sub-Nivel de Ventilación Esmeralda	60
Ilustración 25: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Anual	62
Ilustración 26: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Trimensual, Semana 1	63
Ilustración 27: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Trimensual, Semana 4	64
Ilustración 28: Nivel de Hundimiento, periodo de Abril, Modelo Anual.....	65
Ilustración 29: Nivel de Hundimiento, periodo de Marzo, Modelo Trimensual, Semana 1	66
Ilustración 30: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Trimensual, Semana 4	67
Ilustración 31: Agendamiento inicio mes de Enero, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda	78
Ilustración 32: Agendamiento mes de Enero, Modelo Anual, NP, Esmeralda	79
Ilustración 33: Agendamiento inicio mes de Febrero, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda.....	80
Ilustración 34: Agendamiento mes de Febrero, Modelo Anual, NP, Esmeralda.....	80
Ilustración 35: Agendamiento inicio mes de Marzo, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda.....	81
Ilustración 36: Agendamiento mes de Marzo, Modelo Anual, NP, Esmeralda.....	81
Ilustración 37: Agendamiento fin mes de Marzo, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda	82
Ilustración 38: Metodología de modelación mediano plazo en UDESS	106

Índice de Tablas

Tabla 1: Discretización de tramos horizontales Esmeralda.....	28
Tabla 2: Actividades NH, rev B 2017	37
Tabla 3: Fragmento de archivo de actividades UDESS, caso de estudio.	38
Tabla 4: Criterio de ponderación de rendimientos, planificación Anual.....	41
Tabla 5: Hitos caso de estudio.....	42
Tabla 6: Actividades Esmeralda, rev B 2017	47
Tabla 7: Ejemplo archivo de Actividades (ACT.txt) Esmeralda.....	49
Tabla 8: Ejemplo archivo de Precedencias (PREC.txt) Esmeralda	50
Tabla 9: Estadísticas básicas caso de estudio, modelo de largo y mediano plazo.....	61
Tabla 10: Vista ampliada, plan de largo plazo, caso de estudio	68
Tabla 11: Vista ampliada, plan de mediano plazo, caso de estudio	68
Tabla 12: Distribución de restricciones, Caso de estudio.....	70
Tabla 13: Datos de entrada modelo Trimensual Esmeralda	73
Tabla 14: Comparación de Precedencias, Modelo Anual-Trimensual	76
Tabla 15: Cuadro resumen de restricciones modelo Trimensual	76
Tabla 16: Avance de actividad NADHXC58CN1338, Modelo Anual	91
Tabla 17: Avance de actividad NADHXC58CN1338, Modelo Trimensual	92
Tabla 18: Avance de actividad NADHXC58CN1338, Modelo Trimensual, cambio de precedencias.	94
Tabla 19: Avance de actividad NPDHZ52, Modelo Anual.....	95
Tabla 20: Avance de actividad NPDHZ52, Modelo Trimensual	95

Tabla 21: Avance de actividad NPDHZ52, Modelo Trimensual, cambio de precedencias	96
Tabla 22: Iteración sobre periodos del modelo	100

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Distribución de restricciones, Caso de estudio.....	70
Gráfico 2: Comparación de actividades, Modelo Anual-Trimensual.....	74
Gráfico 3: Distribución de precedencias por tipo	75
Gráfico 4: Distribución de restricciones por tipo y subnivel , modelo trimensual Esmeralda	77
Gráfico 5: Comparación de rendimiento de obras en avance porcentual, Modelo Trimestral v/s Modelo Anual.....	83
Gráfico 6: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Acarreo, ESM	85
Gráfico 7: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Hundimiento, ESM .	85
Gráfico 8: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Producción, ESM....	86
Gráfico 9: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Subnivel Nivel de Ventilación, ESM.....	86
Gráfico 10: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Acarreo, ESM	87
Gráfico 11: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Hundimiento, ESM ...	87
Gráfico 12: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Producción, ESM.....	88
Gráfico 13: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Sub-Nivel de Ventilación, ESM	88
Gráfico 14: Comparación modelos Trimensual/Anual, Carpetas de Rodado NP	89
Gráfico 15: Comparación modelos Trimensual/Anual, Construcción vía férrea, NA	89
Gráfico 16: Comparación modelos Trimensual/Anual, Construcción Trolley, NA.....	90
Gráfico 17: Comparación modelos Trimensual/Anual, PA y HF, NH.....	90
Gráfico 18: Periodos vs actividades fuera de trimestre de evaluación	100

1 Introducción

Cumplir con los proyectos de preparación minera asegura la continuidad operacional de los procesos de extracción de mineral, por lo tanto, la gestión de los recursos y el control de las actividades programadas son clave para obtener los resultados esperados y asegurar la producción. (Carrasco, 2016). Dicho lo anterior, el presente trabajo se hace cargo de una planificación de preparación minera a través de una metodología propuesta que utiliza como herramienta modelos matemáticos orientados al modelamiento de un problema de optimización, cuyas actividades, restricciones y condiciones particulares son enfrentadas en el proceso de construcción de la planificación de preparación mina. Se propone a partir de lo anterior, minimizar los tiempos de construcción de las obras involucradas, así como también la reducción de plazos en cuanto a la confección del plan de preparación mina.

Respecto del método en el cual será evaluada la metodología, según Cavieres (1999), el método Panel Caving, ha tomado mayor relevancia en la producción de cobre. En particular, Block Caving, debido a la profundización de las operaciones por el envejecimiento de los yacimientos, las reservas de mineral secundario se han ido agotando, por lo tanto, las explotaciones se han ido internando continuamente en mineral primario, cuya característica principal es la fragmentación gruesa y alta dureza (Vásquez, 2018).

La tendencia a futuro indica que la minería subterránea masiva (Block/Panel Caving) competirá a la par con la minería a rajo abierto. En el Block Caving existe un proceso continuo de ruptura del macizo (fragmentación). La fragmentación secundaria (última etapa de la fragmentación) es crucial de predecir para el diseño de mallas de extracción minero (Dorador, 2012).

Uno de los aspectos más importantes de la planificación en minería subterránea de métodos por hundimiento es la definición del orden de extracción de las columnas de mineral buscando, esto es, siempre extraer las mayores leyes al inicio para maximizar el Valor Presente Neto (VPN). (J Vásquez, 2007). Sin embargo, es necesario coordinar el plan de extracción y de construcción de la mina, para que cuente con todo lo necesario para llevar a cabo dicha labor, por ende, se planifica paralelamente, de forma complementaria obteniéndose así el plan de preparación minera.

La confección del plan de preparación mina se podrá efectuar de diferentes formas, pues existen diversas herramientas para llevarlos a cabo. En la metodología convencional se utiliza Microsoft Project o Primavera, los cuales son agendadores de actividades conocidos y utilizados frecuentemente por los planificadores. No obstante, el desarrollo de la computación y el manejo de datos cada vez más avanzado ha generado nuevas alternativas que buscan interpretar una mayor cantidad de variables del problema minero contemplando una mejor parametrización, a fin de entregar resultados en forma ágil y confiable, con cierto grado de certeza.

Dada la magnitud de reservas que posee la mina, es de importancia para los mineros encontrar la forma de aminorar costos y aumentar la producción, dado que la explotación enfrenta mayores distancias de acarreo y menores leyes de Cobre conforme se desarrolla la profundidad del yacimiento. Es por esto que, la metodología propuesta viene a generar un aporte dentro del ámbito de la preparación minera, y concretamente la disminución de los tiempos empleados para la confección de un plan de obras mina.

El sector Esmeralda de la mina El Teniente será el laboratorio para construir la metodología propuesta, principalmente por su representatividad como mina panel caving y, porque incorpora contingencias y consideraciones propias circunscritas en un problema de optimización en este ámbito. Con ello, la idea fundamental es generar un aporte para la planificación minera, un modelo capaz de ejecutar todas las actividades de un plan de preparación mina, bajo la mejor condición de uso para los recursos involucrados. Actualmente, el plan se desarrolla bajo una metodología tradicional en MS Project, Primavera. Cualquiera de los dos generan una carta Gantt de actividades, sin embargo, el tiempo de confección puede optimizarse y el horizonte de tiempo límite hacia adelante que posee esta planificación tradicional está alcanza como máximo a anteponerse a solo un mes cuando se habla de un detalle más fino de las obras, es decir, a nivel semanal. Dicho lo anterior, la razón de implementar esta metodología viene siendo optimizar los planes, generar nuevos escenarios para horizontes de tiempo superior a un mes y por último lograr disminuir el tiempo que incurre la tarea de confeccionar un plan de preparación mina.

El objetivo general es construir una metodología de planificación para la preparación mina, en el contexto de minería subterránea, explotada mediante Panel Caving, para un horizonte temporal de corto-mediano plazo donde para el modelamiento se utilizaron las herramientas, Gurobi y UDESS. El modelo contemplará una cantidad significativa de restricciones, recursos y horizonte temporal del problema, permitiendo tecnológicamente la obtención de diferentes planes de preparación mina de forma ágil. Con lo anterior, se buscará un secuenciamiento optimizado de las actividades de construcción, es decir, aquella secuencia que permita disminuir los tiempos planificados en la preparación minera. Para efectos de este trabajo, se ha fijado el mediano-corto plazo como horizonte de tiempo, lo que particularmente involucrará los tres primeros meses de un año de operación en el sector Esmeralda de la mina El Teniente.

El desafío más importante del problema de optimización será la correcta interpretación de las variables involucradas desde la construcción en minería subterránea. Esto se logra a través del código que requiere el agendador, es decir, la interacción entre la interface y el planificador. La incorporación de tal magnitud de datos no se ha probado en UDESS anteriormente, por lo que inclusive la herramienta está a prueba en su funcionamiento ante este problema de optimización. Con todo, el presente documento buscará dejar un registro de la metodología de planificación propuesta, sus mejoras respecto a la planificación convencional y por último entregar como resultado un escenario de preparación mina, tal que sirva de base para futuros planes.

Por último, cabe destacar que el siguiente trabajo presenta una oportunidad de desarrollo de conocimiento en esta materia, el cual quedará plasmado en este trabajo de tesis. Como fin último se buscará generar valor al implementar este tipo de herramientas en la industria contribuyendo adicionalmente al desarrollo profesional de quien suscribe.

1.2 Objetivo General

Construir una metodología de planificación de preparación minera incorporando modelamiento de optimización a nivel de mediano-corto plazo orientada a la minimización de tiempos de construcción.

1.3 Objetivos Específicos

Para cumplir el objetivo general se han establecido los siguientes objetivos específicos que encausan la investigación

- 1) Concebir un método de trabajo orientado a la construcción del resultado final, es decir, la metodología de planificación de preparación mina
- 2) Formular un caso de estudio representativo a partir de los datos de la mina Esmeralda de la Mina El Teniente que permita calibrar y evaluar el modelo a fin de determinar el comportamiento del plan de preparación mina generado, es decir, la Carta Gantt de obras.
- 3) Validar los resultados obtenidos del modelo Trimestral y Anual para identificar las ventajas del modelamiento a una escala de tiempo menor, con la incorporación de mayor detalle de las obras de construcción de la preparación mina.
- 4) Elaborar una metodología de planificación de preparación minera a partir de los resultados obtenidos en el modelamiento y el análisis de ventajas comparativas del plan obtenido tal que sea replicable y de uso para el planificador minero.

1.4 Alcances

- 1) El trabajo expuesto está delimitado por la información que entrega la DET y Delphos lab. Se respetará la confidencialidad de las partes involucradas.
- 2) La aplicación y validación se restringirá a la preparación minera del sector Esmeralda, bloques 1 y 2 de la DET con data del año 2017.
- 3) Se considerará un horizonte temporal de evaluación para el plan de preparación minera de los tres primeros meses del año 2017. Lo anterior de acuerdo a la información disponible y la representatividad de los datos endicho periodo.
- 4) No se consideran las incertidumbres dentro del modelo de optimización
- 5) La investigación se limita específicamente a la preparación minera, por tanto las consideraciones y restricciones del problema girarán en torno a dicho proceso.

2 Antecedentes y estado del Arte

2.1 Método de explotación Panel Caving

Dentro de la minería subterránea, se han desarrollado múltiples métodos de explotación, los cuales son aplicables según las condiciones propias de cada yacimiento (Introductory Mining Engineering, 1987). Una forma de clasificar los métodos subterráneos es la presentada por (B. Brady, 2004), donde la clasificación se realiza por tipo de soporte, definiendo tres categorías de métodos: soportado por pilares, artificialmente soportado y sin soporte o por hundimiento.

Particularmente, dentro de los métodos por hundimiento la extracción tipo Caving consisten de varios niveles operativos que permiten extraer mineral en los puntos de extracción. Las infraestructuras más importantes de una mina explotada por Panel Caving en orden desde la cota más alta a la más profunda se describen a continuación:

1. Nivel de Hundimiento: Es un conjunto de galerías horizontales que permiten generar el fracturamiento de la roca a través de perforación y tronadura.

2. Nivel de Producción: Es un conjunto de desarrollos mineros, obras civiles y montaje que permite la recuperación de mineral quebrado a través de puntos de extracción. Las bateas permiten conectar el nivel de hundimiento con este nivel y aunque hay una variedad de posibles layout de extracción, existen dos mallas mayormente empleadas: Malla Henderson y Malla El Teniente. Esta última dispone de galerías zanjas desarrolladas con respecto a las galerías de producción.

3. Nivel de Ventilación: Conjunto de desarrollos horizontales y verticales que permiten inyectar aire fresco e eyectar aire contaminado a/de los demás niveles.

4. Nivel de Acarreo: Conjunto de desarrollos, montajes y obras civiles que permite el manejo de material (camiones, LHD, correas transportadoras, trenes o una combinación de estos).

Esquemáticamente la imagen a continuación muestra una disposición de los niveles de panel caving descritos.

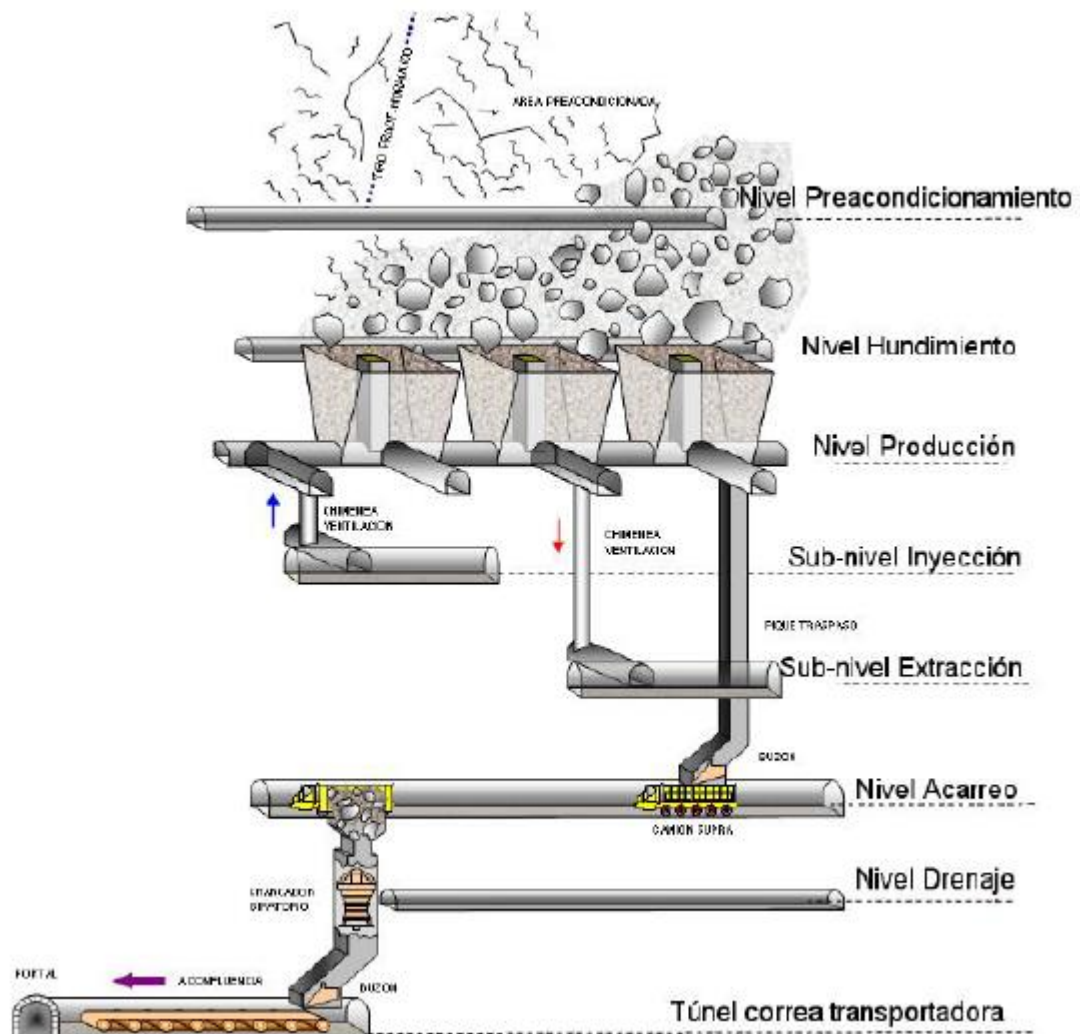


Ilustración 1: Esquema de disposición de niveles típico de panel Caving (J Vásquez, 2007)

Posteriormente en la sección 3 Caso de Estudio, se detallan los documentos y datos utilizados en la construcción del modelo de optimización del presente trabajo de tesis.

2.2.1 Preparación Minera

Preparación Minera puede ser entendida y definida como un conjunto de actividades de desarrollo de túneles y construcción de infraestructura minera, obras civiles, mecánica y eléctrica, y de instrumentación, de ingeniería y montaje de diferentes niveles o sectores, que serán usados para incorporar un área que permite la continuidad de la explotación (Díaz. G, 2008).

Uno de los problemas planteados en la preparación mina es definir el tipo de labores de acceso al cuerpo mineralizado, estos pueden variar y ser de diferentes tipos, horizontales, verticales, entre otras. Antes de tomar una decisión se deben considerar cuatro factores: La profundidad del cuerpo mineral, el tiempo disponible para la preparación, el costo y el tipo de transporte a utilizar

(Universidad Politécnica de Madrid, 2017). La preparación de la mina para su explotación consiste en desarrollar o ejecutar labores mineras para arrancar y extraer el mineral económico de los depósitos minerales de forma sistemática y con la mayor productividad (Rodríguez C, 2013).

La preparación minera se puede llevar a cabo mediante galerías utilizadas para el transporte y acceso, mientras que las chimeneas, se utilizan para la ventilación y/o conexiones, como también las rampas utilizadas para acceso y/o complemento a alguna labor en cuestión (García, 2018).

La preparación de un área a hundir requiere de un gran volumen de desarrollos previos al inicio de la explotación de un panel caving. Significa presentar mayores plazos de puesta en marcha y fuertes inversiones antes de producir (Ortiz, 2013).

La necesidad de realizar la preparación minera nace de los compromisos del plan de construcción, lo que anualmente, define la cantidad y el tiempo necesario para cumplir con el objetivo, lo cual se diseña en su mayoría pensando en seguir la mejor distribución de la ley del mineral (Barrios, 2017).

Por su parte el proceso de planificación minera proveerá el foco y dirección necesaria para alinear a los miembros de las organizaciones en pos de las metas comunes y la generación de valor. Permite identificar estrategias, tácticas, tareas que ayudaran a la organización en su intención estratégica y a alcanzar sus objetivos. Y permite buscar el mayor valor agregado sujeto a un nivel gestionable de los riesgos (Comisión calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras, 2015).

La planificación minera es la herramienta que permite definir la mejor opción respecto de la forma y tiempo en que las reservas deben extraerse para obtener mayor retorno económico de un proyecto, tomando como base el mejor conocimiento que se tenga del cuerpo mineralizado (Fundación tecnológica, 2012).

La minería actual se encuentra enfrentada a la progresiva disminución de las leyes minerales a extraer, lo que obliga a aumentar la capacidad productiva y disminuir los costos operacionales de manera de lograr competitividad bajo estas nuevas condiciones respecto a aquellas en que las leyes son más favorables (Vergara, 2014).

2.2 Planificación minera

2.2.1 Concepto

La planificación minera surge como una disciplina que ordena de manera estratégica la minería para transformar los recursos minerales en reservas mineras. Al igual que la planificación en minera superficial, la subterránea es un proceso iterativo que requiere mirar muchas opciones y determinar cuáles, en el largo plazo, proveerán resultados óptimos (Bullock, 2011).

En forma general, el proceso de planificación para la minería subterránea sentará sus bases en un proceso sustentado a partir definiciones perseguidas por una compañía minera, es decir, por volúmenes de extracción, maximización de beneficio, durabilidad de un yacimiento, entre otras. Luego se deberá proveer la factibilidad del plan bajo requerimientos técnicos asociados al como extraer el mineral de tal manera que el diseño minero, el agendamiento de la producción y de la

preparación mina sean capaces de generar el valor esperado. Esquemáticamente este proceso general puede verse como sigue:

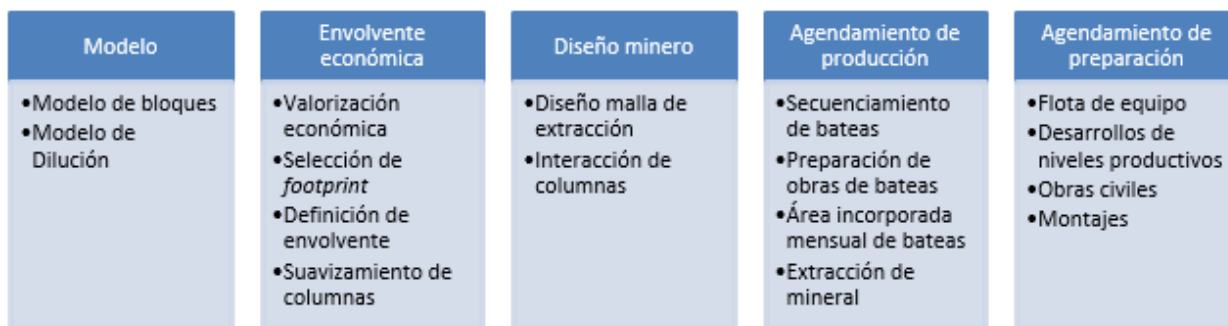


Ilustración 2: Proceso genérico de planificación minera por etapas (Elaboración propia)

Luego, los resultados económicos derivados de la planificación minera interactúan con las definiciones técnicas y económicas generando un proceso de retroalimentación cíclico a través del tiempo de tal manera de comprender cuál será la mejor respuesta ante los cambios y replanificación.

Debido a la cantidad de distintas fuentes de información que requiere interrelacionar una planificación exitosa, en general se hacen simplificaciones que no llegan a un plan de producción óptimo. Por lo tanto, se lleva a cabo un proceso iterativo que adapta el plan dependiendo del horizonte de tiempo al que se quiera apuntar. Este último factor temporal definirá el grado de incertidumbre dentro del proceso minero. En general, se distinguen 3 tipos de horizontes (Hartman, 1992):

1. Planificación de Largo Plazo (mayor a 5 años): Se dimensiona el sector yacimiento de estudio, donde se establecen los límites espaciales del mismo. Respecto a la vida de la mina, se realizan aproximaciones respecto a la duración de la explotación del proyecto minero. Se cuantifican las reservas extraíbles, a partir de los recursos disponibles en el sector de la futura explotación. Un ejemplo de esto es el plan PND que ocupa Codelco, el cual muestra la interacción entre todos los sectores de explotación de la mina incluido Esmeralda buscando una sinergia entre aquellas minas pre-existentes y los nuevos proyectos tal que se mantenga la producción estable a través del tiempo
2. Planificación de Mediano Plazo (3 a 5 años): Se depuran los parámetros determinados en la planificación de largo plazo y se incorporan nuevos antecedentes. Se evalúa el presupuesto necesario para la operación y puesta en marcha de la mina, generalmente se evalúa en periodos anuales. Un ejemplo de esto sería el plan PQ de Codelco donde igualmente que PND es capaz de mostrar una sinergia con un poco más de detalle mostrando por ejemplo la cantidad de área incorporada por mes de los distintos sectores productivos tal que se cumpla la producción buscada, pero respetando los factores geomecánicos presentes y aspectos de preparación minera en temas de constructibilidad.
3. Planificación de Corto Plazo (meses): Se depuran los parámetros determinados en la planificación de mediano plazo y se incorporan nuevos antecedentes. Se definen los equipos y logística para cumplir con la meta definida en el presupuesto de operaciones de la mina.

Los planes generados son de carácter mensual y hasta diario. Un ejemplo es el plan PAM que utiliza Codelco, el cual se actualiza regularmente, pues va adaptando el comportamiento real de la mina, tal que exista un consenso entre lo planificado y lo producido por un sector específico como ESM. Los aspectos geomecánicos como fallas, calidad de roca presente y napas subterráneas son algunas de las variables que modifican el plan de corto plazo, al igual que los aspectos de logística como las mantenciones no programadas de equipos.

2.2.2 Revisión bibliográfica:

Para planificar la extracción de una mina panel caving en forma optimizada, se requieren modelamientos que faciliten el secuenciamiento de sus actividades (condiciones de flota de equipos, tipos de roca para la infraestructura, geología local de la zona, logística de materiales, entre otros).

A continuación, se presentan algunas herramientas tecnológicas usadas tradicionalmente en la planificación minera que ayudan a comprender los diferentes contextos en los que se utilizan los datos provenientes de los registros de actividad en minería subterránea en pos de una mejoría en los procesos de planificación

2.2.2.1 EVM (*Earned Value Management*) (Moya, 2018)

Es una herramienta que permite evaluar el desempeño de un proyecto durante su ejecución, utilizada para los procesos de monitoreo y control. Se centra en controlar la gestión integrada del alcance, la agenda y los costos (Lledó, 2013), generando la línea base de medición del desempeño, que facilita la evaluación y el avance del proyecto. Los principios del EVM son aplicables a proyectos de diversas industrias. Para llevar a cabo la gestión del valor ganado es necesario contemplar:

Valor planificado (PV): Corresponde al presupuesto autorizado y asignado al trabajo programado para la ejecución de las actividades, no contempla las reservas de gestión.

Valor ganado (EV): Es la medida de cumplimiento del presupuesto autorizado para para el trabajo programado.

Costo real (AC): Es el costo incurrido por el trabajo programado llevado a cabo en una actividad durante un periodo de tiempo específico. También, puede ser el costo total en que se ha incurrido para llevar a cabo el trabajo medido por el valor ganado (EV). El costo real (AC) debe responder a lo presupuestado para el valor planificado (PV), medido por el valor ganado (EV).

Definido EVM (PV, EV y AC) se representan gráficamente las tendencias y se proyecta un rango de resultados finales posibles para el proyecto. Algunos de los softwares usados para estos efectos son: Microsoft Project, primavera, SAP, entre otros. Sus resultados apuntan a determinar:

Variaciones del cronograma (SV): Medida de desempeño, expresada como la diferencia entre el valor ganado y el valor planificado (EV - PV). Determinando en qué medida el proyecto está adelantado o retrasado en relación a la programación.

Variaciones del costo (CV): Corresponde a la diferencia entre el valor ganado y el costo real (EV - AC) asociada al desempeño de los costos del proyecto. La variación del costo al finalizar el proyecto corresponde a la diferencia entre el presupuesto asignado y lo realmente gastado (BAC).

Los resultados son expresado en indicadores claves de rendimiento o *Key Performance Indicators* (KPI) (Luu, 2008), vinculados a la planificación financiera presupuestaria, la gestión orientada a la consecución de objetivos, habitualmente alcanzados por las actividades definidas en una planificación

2.2.3.2 Software Primavera Oracle (Capterra, 2021)

El paquete de software Oracle Primavera ofrece aplicaciones potentes, robustas y fáciles de usar, en la nube y de manera local, para priorizar, planificar, administrar y entregar a escala global carteras, proyectos y programas con éxito.

Desde la programación de proyectos, los controles de costos y proyectos, la gestión de carteras, la gestión de documentos y las analíticas hasta el análisis de riesgos, Oracle Primavera permite que constructores, ingenieros y directores de proyectos en sectores con gran cantidad de activos mejoren los resultados en todo el ciclo de vida del proyecto.

Ventajas: Tiene todo lo necesario para la programación del proyecto utilizando el método de ruta crítica (WBS, actividades, costo y carga de recursos), Es una solución poderosa para cambiar miles de actividades sobre la marcha. Permite manejar horarios amplios que incluyen decenas de miles de actividades. Utiliza bases de datos, en lugar de archivos de proyecto, haciéndolo adecuado para trabajar en muchos proyectos (Oracle, SQL Server, SQLite). Admite usuarios únicos o múltiples, tiene una versión EPPM en la nube.

Desventajas: Útil en proyectos grandes y complejos, en horarios más pequeños y simples tiende a ser engorroso. Requiere de una muy buena comprensión de cómo funcionan el software y del CPM al analizar los resultados. Se comenten errores con facilidad.

Si bien es potente, la función de informes de la versión Pro (independiente) es anticuada en comparación con la versión en la nube de EPPM. La versión independiente no presenta actualizaciones en sus funciones importantes durante años. Carece de la perfecta integración con MS Office que tiene MS Project. Requiere asistencia de TI para migrar la base de datos de una computadora a otra.

2.2.3.3 Microsoft Project

Es una solución flexible in situ para la gestión de la cartera de proyectos (PPM). Parte de SharePoint 2019 (con licencia independiente), Project Server 2019 permite a los miembros del equipo, a los

participantes del proyecto y a los responsables de la toma de decisiones ponerse en marcha rápidamente, priorizar las inversiones de la cartera de proyectos y ofrecer el valor empresarial deseado desde prácticamente cualquier lugar. Tiene una interfaz basada en un navegador que permite a los directores de proyectos, miembros de los equipos y los administradores de carteras trabajar con la información de Project Server 2019 e informar sobre ella.

Ventajas: Al ser de Microsoft, se integra con Office 365, con Skype y Sharepoint, tiene una interfaz similar a la de otros productos de MS. Ha existido por mucho tiempo, y sus características se han desarrollado con el tiempo. Al ser parte de Microsoft tiene confiabilidad y soporte. Contempla una herramienta de gestión financiera que ayuda a los directores de proyectos a estimar los presupuestos. Puede ser licenciado como también ser una solución en la nube.

Desventajas: Es una aplicación de escritorio, aunque MS Project tiene una solución basada en la nube, no es ágil. Incluso con Sharepoint, que está diseñado para aprovechar la nube, MS Project tiene grandes limitaciones. Se requiere de una inversión en tiempo significativa para los directores del proyecto y sus equipos. Esto añade tiempo al proyecto durante la etapa de implementación. Es costoso y no se puede compartir, los archivos se guardan como MPP, un formato propietario, de modo que, si no se usa MS Project, no se pueden leer los archivos. Esto crea obstáculos innecesarios cuando se comparten archivos de proyectos.

A continuación, se presentan una serie de software son usados en diversos problemas propios de la industria minera, varios de ellos aún no tienen aplicabilidad directa en problemas de modelamiento de preparación mina, sin embargo, se presume su potencialidad para llevar a cabo la optimización de dicho proceso.

2.2.3.4 Systems, Applications, Products in Data Processing (SAP)

Software de gestión de cartera y proyectos, gestiona el ciclo de vida de un proyecto de manera centralizada y completa. Se centra en la gestión y control de la cartera de gastos, desde los pronósticos y la planificación hasta la contabilidad y el cierre. Identifica anomalías y riesgos del proyecto, genera informes de rendimiento de los proyectos basados en datos in-situ. Reducción el costo total de la propiedad del software mediante una integración pre-configurada.

Gestiona proyectos, tareas y líneas de tiempo, identificando caminos críticos, asigna recursos y realiza seguimiento del progreso. Optimiza la utilización de recursos, comprobando su disponibilidad y evitando cuellos de botella del proyecto.

2.2.3 Herramientas computacionales en preparación minera

A continuación, se presentan otras herramientas tecnológicas usadas en la industria minera, con potencial de ser aplicadas en una metodología de planificación de preparación minera.

Los softwares presentados carecen de una integralidad y la robustez técnica para enfrentar un problema complejo para un modelamiento de preparación mina. Estos softwares sólo se concentran en la gestión de las operaciones, aspectos financieros, control de procesos y en ocasiones cumplimiento de la carta Gantt. Sin embargo, son útiles sólo en la medida que exista un proceso de optimización previo, para luego implantar sistemas de control de gestión.

Dichos softwares son usados en diversos problemas de la industria minera, varios de ellos aún no tienen aplicabilidad directa en problemas complejos de modelamiento de preparación mina, sin embargo, se presume su potencialidad.

2.2.3.1 GEOVIA MineSched

Es el planificador de extracción táctico más avanzado para minas subterráneas y de superficie de todos los tamaños y tipos, proporciona la capacidad de planificación para mejorar la productividad y maximizar las utilidades (DASSAULT SYSTEMES, 2020).

Este planificador, permite programar directamente a partir de una variedad de modelos geológicos originados a partir de diferentes sistemas de planificación minada. Minesched produce programas a largo y corto plazo cumpliendo con los objetivos de capacidad y calidad del material. (PARAMINA, 2020). Esta herramienta cuenta con una librería de interface diseñada para un sistema de planificación, es capaz de comparar diversos escenarios de los modelos de planificación. (PARAMINA, 2020). Minesched no se ha usado en metodologías de preparación minera, existiendo un probable potencial.

2.2.3.2 GEOVIA Surpac

Es un software de planificación para la extracción y geología enfocado tanto a minería subterránea como a cielo abierto. Ejecuta la automatización de tareas para la coherencia de resultados, dedicado ventajosamente a las herramientas de planificar las actividades para la extracción final (DASSAULT SYSTEMES, 2020).

Geovia Surpac incorpora un trabajo en modelo 3D, en él se pueden capturar imágenes y videos y exportarlos para su utilización en programas de presentación. Ha sido diseñado para intercambiar fácilmente datos con otros sistemas de planificación geológica y minera, bases de datos con formatos comunes y muchos tipos de aplicaciones para la minería (PDFSLIDE, 2020). Permite iniciar la interfaz de usuario que se relaciona al Geovia MineSched para dar inicio al proceso de planificación de actividades, tanto en minería a cielo abierto como subterránea.

Actualmente, este software es aplicado en labores de desarrollo, preparación y explotación, estableciéndose ciclos de avances de corto, mediano y largo plazo (Delgado, 2017).

2.2.3.3 MineLink

Es una librería de estructura de datos para planificación minera, problemas de agendamiento y algoritmos para resolverlos. Centrado en problemas de agendamiento o modelamiento, MineLink, implementado en (DELPHOS Mine Planning Laboratory, 2020).

FinalPitInstance: Abstrae el problema de determinar el pit final, es decir, determinar el conjunto de bloques que respeta cierta restricción de talud y cuya suma de una valorización económica sea la máxima

SchedulingInstance: Abstrae una formulación muy general de agendamiento de bloques en un pit, con múltiples destinos por bloque y un número arbitrario de restricciones de precedencia, capacidad y mezcla.

Permite el desarrollo de algoritmos para la planificación minera proveyendo de un conjunto de herramientas y problemas definidos sobre los cuales trabajar. El objetivo de la librería es la facilidad de uso, y de manera secundaria, la flexibilidad, capacidad de expansión y eficiencia. (DELPHOS Mine Planning Laboratory, 2020). Está desarrollado en C++, también disponibles en wrappers en Python, de forma que, sea posible interactuar y expandir la librería en forma simple para experimentar. Se ha implementado el cálculo de footprint óptimo para minería de Block/Panel Caving, junto con el cálculo de su envolvente económica (DELPHOS Mine Planning Laboratory, 2020).

2.2.3.4 Mine 24D

El software fue desarrollado originalmente como una solución innovadora de soluciones a través de agendamientos para la minería a fin de complementar lo mejor posible la disciplina del Datamine que incorporan los productos de planificación minera. A lo largo del tiempo ha evolucionado y al día de hoy se comercializa como un sistema para planificación de minas subterráneas y de rajo abierto con funciones para todo tipo de commodities y métodos de explotación mina.

Mine2-4D v15 es la última versión del programa, la cual ofrece una experiencia de usuario más lógica, estandarizada y satisfactoria al reemplazar la tecnología obsoleta, refinar y mejorar la funcionalidad clave e incorporar una amplia retroalimentación global de los clientes. Sin embargo, MineRP Planner, es la nueva y última plataforma a la que ha evolucionado el programa en términos de la parametrización para soluciones de planificación.

La función principal del programa en preparación minera será entonces la de agendar las distintas actividades de construcción, encadenando su secuenciamiento y parametrizando de cada variable de acuerdo a los datos de entrada que el usuario provea en las distintas fases de construcción. Esto es, el modelo tridimensional de la mina con sus respectivas obras, rendimientos y secuenciamiento. La principal ventaja del software será la visualización de los agendamientos realizados en la interfaz, dado que se familiariza con otras herramientas como AutoCAD y el uso de planillas al estilo Excel para mostrar los detalles del modelo. Por otro lado, una de sus debilidades vendrá a ser la flexibilidad que presenta para crear nuevos escenarios, es decir, nuevos planes a partir de uno

ya previamente construido. Adicionalmente, el programa no optimiza los escenarios que uno construya, pues no incorpora herramientas de análisis matemático.

2.2.3.5 UDESS

UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) se concibe bajo la idea inicial de desarrollar una herramienta en la que fuese posible planificar y agendar en forma simultánea actividades de construcción y producción para métodos de explotación minera como Block/Panel Caving (DELPHOS Mine Planning Laboratory, 2020).

El software UDESS es una robusta herramienta de planificación y agendamiento, muy versátil respecto de la naturaleza de los problemas que pueden ser abordados, además de ser eficiente en la resolución de problema de corto, mediano y largo plazo, tanto para minería cielo abierto como subterránea, entregando parámetros económicos, tales como el VAN, permitiendo evaluar los resultados obtenidos.

UDESS requiere de tres componentes claves que deben ser entregados, antes de su ejecución en *solver* Gurobi, esto para un determinado problema:

1) Actividades:

Las actividades dentro de UDESS corresponden a todas las actividades u obras que se deseen incorporar dentro de un secuenciamiento, por ejemplo, considerando el ciclo de la actividad de fortificación mecanizada simplificada que aparece en la Tabla iii, se puede apreciar que la actividad global de fortificación mecanizada está compuesta de 4 subactividades que la componen, las cuales serían las actividades que aparecen en la tabla.

A cada actividad, se pueden asignar diversos atributos que la identifiquen, como por ejemplo, un costo por realizarla, un beneficio por completarla, el consumo de múltiples recursos por su desarrollo, entre otras. Además, y de forma obligatoria, todas las actividades deben incorporar un “Max rate”, parámetro que se entiende como “cuantas veces se debe realizar la actividad dentro de un periodo” el cual está directamente relacionado con los rendimientos de cada actividad. Por ejemplo, en la tabla presentada, para la actividad N° 4 se ve que la actividad tiene un *max rate* de 1.5, esto significa que la actividad se puede realizar 1.5 veces dentro del periodo en que se defina en el modelo.

2) Precedencias:

UDESS tiene la capacidad de trabajar con dos tipos de precedencias, las del tipo “o” y las del tipo “y”. Softwares comerciales para el agendamiento de actividades como Primavera o Microsoft Project, solo utilizan precedencias del tipo “y”, por lo tanto, la utilización de UDESS posee una ventaja al incorporar este tipo de variable de decisión.

- Precedencias tipo “y”

Las precedencias del tipo “y” son todas aquellas que, al conectar dos o más actividades, las antecesoras deben completarse en su totalidad para dar acceso a la actividad sucesora.

las precedencias que sean del tipo “y” significaran que para una actividad X esta solo podrá comenzar una vez que todas las actividades concatenadas por este tipo de precedencia terminen de ejecutarse.

- Precedencias tipo “o”

Las precedencias del tipo “o” son todas aquellas que, al conectar dos o más actividades, al menos una de las actividades predecesoras se debe completar para dar acceso a la actividad sucesora.

las precedencias que sean del tipo “o” significaran que para una actividad X esta podrá comenzar una vez que alguna de las actividades concatenadas por este tipo de precedencia termine de ejecutarse.

3) Restricciones

UDESS dispone de 6 tipos de restricciones para realizar los modelos las cuales se describen a continuación:

- Restricción de recurso operacional: restricción que limita el consumo de un recurso dado para todas las actividades del modelo.
- Restricción de capacidad de recurso inicial: restricción que limita el consumo de un recurso dado, al iniciar las actividades.
- Restricción de progreso límite: Restricción que obliga realizar un cierto progreso de una actividad en un rango de tiempo determinado.
- Restricción de rango de recursos: restricción que limita el consumo de un grupo de actividades, de un recurso determinado.
- Restricción de incompatibilidad de actividades: Restricción que limita el desarrollo simultaneo de un grupo de actividades en un intervalo de tiempo dado.
- Restricción de periodo de inicio: Restricción que limita el intervalo de tiempo en el que un grupo de actividades debe comenzar.

2.3 Análisis crítico del estado del arte

Diversas herramientas pueden ser usadas como referencia para el agendamiento de actividades, tanto para minería a cielo abierto como para minería subterránea, esto permite analizar todas las opciones disponibles, logrando comprender los puntos fuertes y débiles de cada herramienta, así como también, identificar las condiciones y detalles metodológicos de su aplicación. (Urbano, 2001)

La optimización de la planificación minera ha sido desarrollada y ampliamente utilizada en minería a cielo abierto, dado que, para este tipo de operaciones, la dirección en que se desarrolla la mina es fija, descendente y hacia el exterior de los límites del pit. Sin embargo, la minería subterránea es mucho más compleja, puesto que, a lo largo del ciclo de vida de la mina, pueden existir diferentes direcciones de crecimiento, las que dependerán entre otros factores, del método de explotación utilizado (Alford C., 2006). Además de esto, cada mina subterránea tiene un diseño único y su operación también se ajusta a las características específicas de cada depósito mineral, haciendo difícil la creación de algoritmos de optimización genéricos (Newman A., 2010).

A continuación, se presentan algunas referencias teóricas utilizadas en materia de preparación mina y planificación, que permitieron direccionar este trabajo de tesis. Cada una, fue motivo de inspiración para el desarrollo y construcción de este documento, algunos precursores de temas similares y en otros casos de forma complementarias a este trabajo:

(Winston R., 2012): Esta investigación tiene por objetivo presentar un modelo de programación matemática para el tratamiento del secuenciamiento y agendamiento de una mina subterránea, tomando en cuenta la producción, los recursos disponibles y la constructibilidad de manera integrada, siendo una herramienta de análisis rápido para el planificador minero. La función objetivo del modelo presentado es la maximización del valor presente neto de un conjunto de actividades, sujeto a varias restricciones. La implementación final resulta en una herramienta llamada UDESS. Los resultados muestran que, el programa de producción cambia cuando se considera la constructibilidad de un diseño minero, más aún, tiene influencia en el resultado y, si bien, no se asegura obtener un valor superior para el negocio, sí se tiene un mayor grado de robustez por considerar más información y evaluarla en poco tiempo de manera conjunta.

(Jammet N., 2014): Este trabajo muestra distintas estrategias de crecimiento que se adoptaron en la Mina Esmeralda de Codelco División El Teniente para llevar a cabo la explotación de los bloques 1 y 2.

(Oyaneder J., 2016): Este trabajo propone una metodología de análisis de constructibilidad con el objetivo de representar los desafíos de la preparación minera en un Panel Caving. Se incluye los rendimientos promedios, de la preparación y desarrollo minero, restricciones operacionales y de interacción entre niveles, construcciones y zonas de altos esfuerzos.

(Rubio E., 2002): Desarrolla una metodología de agendamiento que permite vincular objetivos estratégicos, como la maximización del valor neto descontado y la maximización de la vida útil de la mina con el agendamiento de la producción, obteniendo así la integración de estimación de reservas con las tasas de desarrollo como resultado del agendamiento de la producción.

(Newman A., 2007): Mediante un modelo de programación entera mixta para agendar una producción multiperíodo. Este respeta parámetros de una secuencia operativa factible minimizando la desviación de los tonelajes planificados. Implementan una heurística de agregación de periodos para luego resolver el modelo original con información proveniente del modelo agregado.

(Kazakidis V., 2001): Demuestra como los problemas del comportamiento del macizo rocoso afectan en forma significativa la operación, determinando así una metodología para cuantificar y evaluar la interacción entre la planificación y la geomecánica. La probabilidad en los eventos permite hacer un análisis de confiabilidad, el cual, determina los valores iniciales para el plan de producción. La flexibilidad necesaria en el diseño y planificación con respecto a estos eventos, fue determinada mediante análisis de flujos descontados, opciones reales, simulación de la producción y simulaciones de MonteCarlo. Finalmente, desarrolla una metodología que permite evaluar el proyecto considerando las flexibilidades necesarias y los riesgos presentes en el proceso de planificación y diseño.

(Rocher W., 2011): Busca integrar dos bloques del proceso de planificación generando un modelo optimización y agendamiento de actividades, el cual hiciera posible considerar en forma simultánea el desarrollo de la preparación minera y la producción, de manera tal que se genere un agendamiento factible y robusto.

(Martinez M., 2011): Mediante un modelo de programación entera mixta se busca conciliar los planes de largo plazo, con aproximaciones mensuales a un plan de corto plazo, minimizando la desviación de éstos, respetando las restricciones operacionales.

(Gonzales, 2018): Impulsa este trabajo desde una de las conclusiones en los trabajos previos de planificación de preparación minera a largo plazo donde el Programa Anual Rev. B, como insumo principal, fue utilizado en 12 periodos de un mes; sin embargo de acuerdo al autor, en futuros estudios sería interesante utilizar periodos de menor duración, tales como semanas o días, para mejorar la resolución y precisión del resultado. Esto es, con actividades que pudieran ser subdivididas en actividades más pequeñas y con ello mejorar la resolución de la solución.

Considerando los aspectos teóricos y la motivación del presente trabajo, a continuación se exhiben fundamentos principales que sustentan la base para la construcción de la metodología de planificación de preparación minera del presente documento.

Un primer aspecto a considerar es método de explotación, se uso del método panel caving en minería subterránea bajo un horizonte temporal de corto-mediano plazo, para la construcción de la propuesta - metodología de planificación para la preparación mina – esto se fundamenta principalmente en la accesibilidad a la data histórica del proyecto Esmeralda perteneciente a la

mina El Teniente en los diferentes aspectos relevantes que se desean evaluar dentro de la metodología propuesta dentro de ellos: los rendimientos de avance, hitos de obras, geología local, datos de planificación minera tradicional, entre otros. Lo anterior, permitirá construir un modelamiento para la preparación mina, para luego ir probando distintas configuraciones acordes a las necesidades del problema o bien para el análisis de sensibilidad de los planes construidos.

Por otro lado, en una mirada comparativa el uso de la metodología tradicional con los softwares clásicos contempla la creación de un agentamiento de actividades en Primavera, luego será operativizado y visualizado en Autocad y Vulcan. Dichos softwares deben ser utilizados en conjunto para la creación de un plan de preparación mina y se podrán complementar con otros, como Mine24D, sin embargo, dentro de las debilidades detectadas para la confección de planes a través de éstas herramientas, destaca el hecho, que son realizados por una única vez, si bien, cuentan con alternativas, son cerradas para un plan, sin mucha cabida a la generación de otros escenarios diferentes, principalmente por el tiempo que toma la construcción bajo esta modalidad. Otro factor relevante para la planificación tradicional es la carencia de flexibilidad para cambios en el grado de detalle de un plan, por ejemplo, el cambio de visión de un plan, es decir, de anual a uno semanal. Justamente, lo anterior revelará inexactitudes en un plan de largo plazo en su iteración, esto en la búsqueda de un caso mejor (óptimo) que el anterior, lo que devela la falta de manejo de datos y velocidad para su procesamiento, la metodología de planificación a presentar para el plan de preparación mira es precisamente su ventaja. Por último, en el agendamiento convencional es típico ver que las precedencias de actividades serán registradas por concatenación directa, es decir, una precedencia de tipo “y”, será más ineficiente, que un caso donde se pueda otorgar flexibilidad con precedencias de tipo “o”, esta es justamente, una de las bondades del agendador UDESS utilizado para este modelamiento. Particularmente, los desarrollos horizontales de construcción son las que más gozarán de esta flexibilidad en cuanto al tipo de precedencia.

Dado el contexto y objetivo principal de este trabajo, se elegirá el programa que mejor se adapte a las necesidades para la metodología de planificación de preparación mina a construir, es decir, UDESS. Principalmente, por su versatilidad para el ingreso de los datos, además por su capacidad de agendamiento de actividades, permite optimizar con el uso de Gurobi. El programa está diseñado precisamente para modelar y entregar cartas Gantt que superen el agendamiento realizado a través de planificación convencional, esto es, las actividades ordenadas de tal forma que, al ejecutar el plan se construya bajo la premisa de optimizar la ganancia del valor presente neto del proyecto. Dado que el programa está desarrollado para el fin de la optimización de agendamientos, su interfaz está bien relacionada con lo que corresponde a la data de entrada disponible para un manejo de alto volumen de datos. Adicionalmente el programa podrá ser manipulado desde su interior a través de script en “Json” permitiendo una mayor versatilidad a la hora de modelar el problema. Esto último, gracias a que la confección del software proviene del laboratorio Delphos de la Universidad de Chile, por tanto, se tiene acceso de manera profunda al sistema operativo de UDESS.

El software ha sido aplicado en agendamientos de preparación mina en un horizonte temporal de largo plazo, no obstante, el desarrollo de su potencial puede seguir avanzando, es por esto que, se utilizará en esta oportunidad en el modelamiento de un plan bajo una mirada de mediano corto

plazo. Lo anterior, agrega una dificultad al problema, al configurar y construir un modelo que emplea periodos de tiempo más acotados, incluye nuevas variables que previamente no fueron consideradas, o bien, si estuvieron contempladas de una manera diferente en un plan de largo plazo, dada su naturaleza. Ejemplos de lo anterior son; los rendimientos de avance, construcciones de obras civiles, áreas de socavación, puntos de extracción, zonas de transición entre otros.

Cada variable se discretizará para observar su comportamiento a nivel de semanas, en lugar de, meses. Este cambio, desde largo a mediano-corto plazo, conllevará un aumento en el número de variables a soportar por el problema, por ende, también se podrá a prueba el manejo de datos que es capaz de ejecutar el software. Desde el punto de vista minero, confeccionar un plan de preparación mina para mediano-corto plazo permitirá al planificador en la siguiente escala tomar mejores decisiones, por lo general, el plan de largo plazo al contemplar una mirada demasiado global pierde detalles que podrán ser importantes a la hora de la operación. Dichos detalles se muestran y analizan más adelante con profundidad.

3 Caso de Estudio Esmeralda DET

3.1 Sector de explotación mina Esmeralda, El Teniente

La mina Esmeralda corresponde a una de las nueve minas de la División El Teniente. A su vez, esta mina tiene 4 sectores productivos: Esmeralda Sur, Bloque 2 Extensión Norte, Bloque 2 Extensión Fw y Panel 2. Su cota de profundidad es la 2200 (NH) y particularmente cuenta con gran extensión de área debido a que Esmeralda está compuesta por 2 bloques en el área Sur-este de la pipa de acuerdo a la imagen a continuación

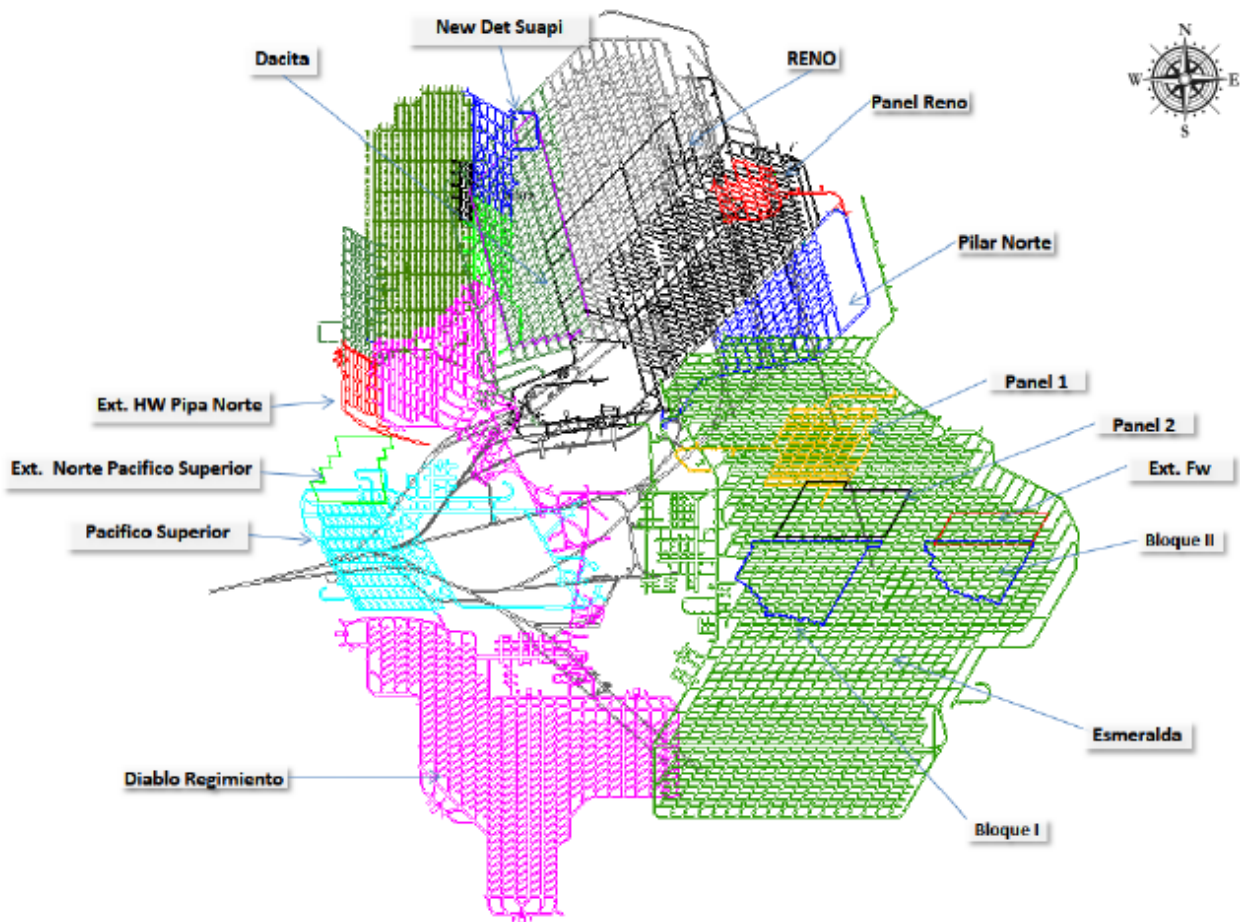


Ilustración 3: Disposición de sectores mina El Teniente, vista en planta (Codelco División El Teniente, 2017)

En verde se aprecia Esmeralda (ESM) y particularmente los 2 bloques que lo componen creciendo en misma dirección, sin embargo con un desfase temporal de tiempo entre ellos.

La explotación del sector se realiza mediante el método de Panel Caving con variante de Hundimiento Convencional, además de un pre-acondicionamiento completo mediante perforaciones ascendentes desde el Nivel de Hundimiento y pozos descendentes en el Nivel de Producción, orientados al control sísmico entorno a fallas y contactos litológicos.

La variante de hundimiento convencional aplicada a este sector presenta una zona de transición definida por el avance del frente de socavación, de aproximadamente 70 m para todos los niveles.

Las obras civiles deben realizarse en zona de pre-minería, por lo que, los puntos de extracción, muros de confinamiento, y los sistemas de traspaso deben estar construidos y terminados, fuera de la zona de transición.

3.2 Contexto de Esmeralda Sur (Bloque 1 y 2)

Con respecto al Nuevo Nivel Mina, el atraso en su puesta en marcha ha llevado a la necesidad de implementar los proyectos PDA (Proyectos de Desarrollo Alternativo) los cuales permitirán solventar el agotamiento de los actuales proyectos que están en ejecución, pero cercanos al fin de su vida útil. Dentro de dichos proyectos se encuentran el proyecto Diamante, Bajo Diablo, Andesita, Recursos Norte, entre otros.

Esmeralda Sur es uno de los 4 sectores productivos de la Mina Esmeralda, presenta una producción promedio de 35.407 tpd, con una ley media de cobre 0.93% y una ley media de molibdeno de 0.021%. Dicha producción corresponde a aproximadamente un 24.9% de la producción total de la División. Las zonas demarcadas en amarillo y rojo indican categorización de leyes siendo las más (en rojo) concentradas en el sector del bloque 1 (ilustración 4).

El crecimiento se realiza a través de una macrosecuencia de dos bloques (Bloque 1 y Bloque 2) desde la Zanja 29 (Z-29) hacia el sur, estando el Bloque 1 comprendido entre la Calle 21 (C-21) y la C-37, mientras que el Bloque 2 desde la C-43 a la C-61, tal como se puede ver en la imagen a continuación.

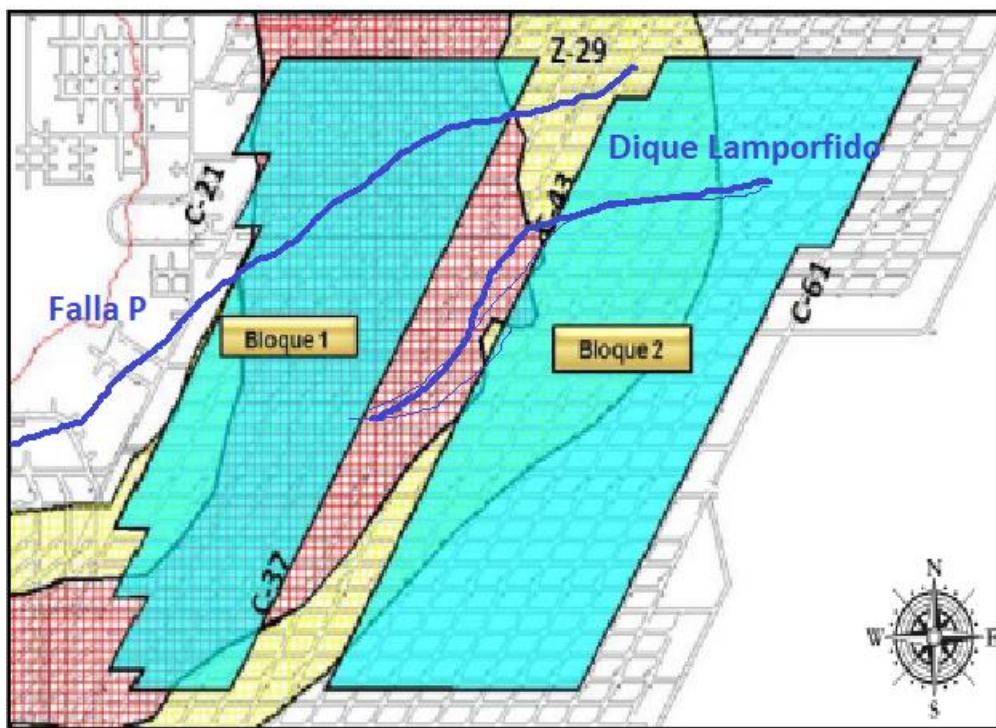


Ilustración 4: Distinción de bloques 1 y 2 de ESM. (Codelco, Programa de preparación mina 2017 Rev B, 2017)

La secuencia considera un avance perpendicular a las estructuras principales del sector, Falla P para el caso del Bloque 1 y Dique de Lamprófido para el caso del Bloque 2.

Centrándose en lo que son las obras y el avance en la construcción de los bloques 1 y 2, se sitúa el estudio en la situación que describen los planos rev B 2017. Este avance puede ser visto en la siguiente imagen

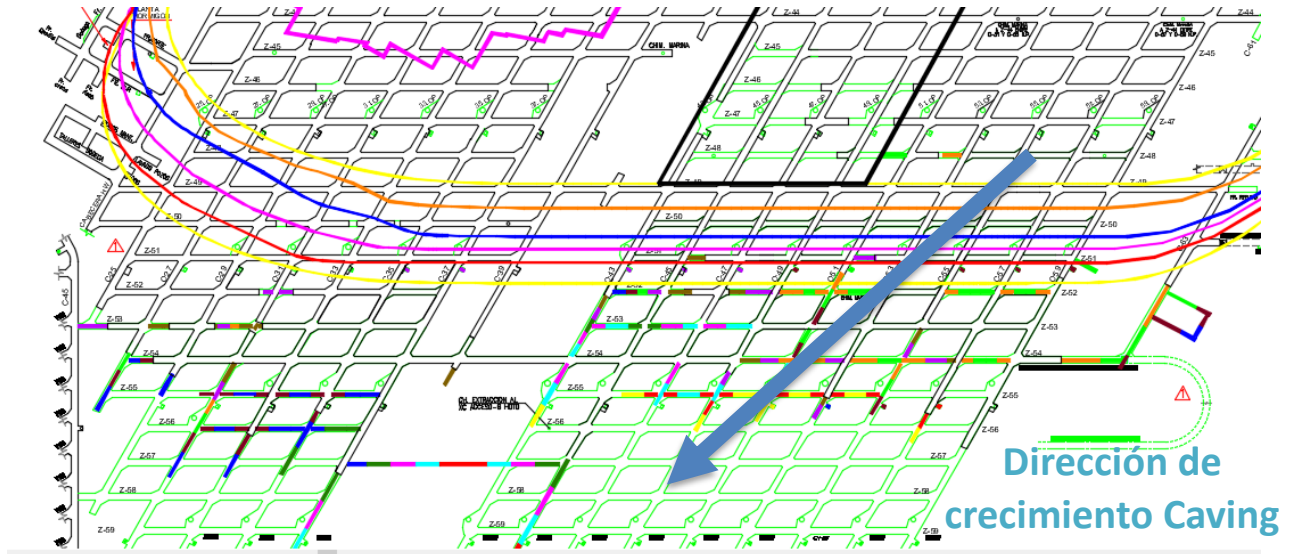


Ilustración 5: Layout general de crecimiento caving para bloque 1 ESM (Elaboración propia (Elaboración propia)

De la ilustración anterior se aprecia en color Verde, las obras que aun quedan por realizar para tener el sector completamente construido. Vale decir que, la explotación sigue el curso de crecimiento de caving mostrado por la flecha azul y las franjas horizontales de colores denotan como se va moviendo en el tiempo la zona de transición, criterio geomecánico para mantener la seguridad en la construcción y avance de los desarrollos. El color de cada franja indica el mes donde el amarillo es diciembre y por ende se tiene un año de avance mostrado en la figura.

3.3 Planificación minera DET

La preparación minera comprende todas las actividades necesarias para habilitar la infraestructura necesaria para la explotación de un sector productivo.

En forma general, la preparación minera se puede dividir en dos etapas:

- i. Infraestructura de pre-producción, en la cual, se habilita la infraestructura para la producción de un sector. Las actividades que se consideran en esta etapa son las siguientes: accesos principales, barrio cívico, infraestructura eléctrica y de ventilación.
- ii. Infraestructura de explotación, la cual incorpora el resto de las actividades de preparación minera en todos los niveles involucrados en el proyecto.

Acorde a la escala de tiempo en que se mide la planificación, existen distintas herramientas utilizadas por la DET para agrupar los distintos acontecimientos y variables que reflejan la planificación de largo, mediano y corto plazo.

Con esto en mente se debe tener un plan de preparación minera que tome en consideración estas distintas etapas y sus criterios generales, a saber:

- Plan de Negocios Divisional (PND)

El Plan de Negocios Divisional es un plan de largo plazo desarrollado en la División El Teniente, su horizonte temporal va de los 6 a los 50 años y en relación con la preparación minera, entrega cifras globales de las obras requeridas para poder dar cumplimiento a los planes de producción. Se toma en consideración la visión global del negocio contabilizando expansiones de planta, nuevos proyectos y proyectos de desarrollo alternativo.

- Programa Quinquenal (PQ)

Este programa tiene un horizonte temporal de mediano plazo, de 1 a 5 años. El programa entrega los volúmenes anuales de obras que serán requeridos para dar cumplimiento a los planes de producción. Incorpora los sectores en operación como también los sectores que iniciarán su explotación dentro del periodo de 5 años.

- Programa Cero (P0)

Se trata del programa de planificación minera con horizonte anual de 1 año. Se entregan los volúmenes de material distribuidos en el tiempo incorporando las condiciones críticas de cada sector como el área incorporada mes a mes, y la variación de la extracción punto a punto de extracción.

- Programa Actualizado Mensual (PAM)

Programa de corto plazo, con un horizonte temporal de 1 mes. En este programa se actualiza la programación realizada en el Rev. B según los avances de obras y rendimientos obtenidos el mes anterior.

Por su parte los planes de preparación minera se distinguen a continuación:

- Programa de preparación minera Revisión A

Este programa de corto plazo tiene un horizonte temporal de 1 año, su principal función es entregar los volúmenes de obras que serán considerados durante el periodo anual en el Presupuesto de Preparación y sobre el cual se tendrán las Autorizaciones de Gastos Diferidos (AGD's).

- Programa de preparación minera Revisión B

El Programa Rev. B es emitido por la GRMD y tiene un horizonte temporal de 1 año. El plan entrega los lineamientos de crecimiento para cada sector y los requerimientos mensuales de incorporación de área, además, incorpora todos los hitos de preparación minera que deben ser realizados para dar sustento y continuidad a la producción.

El Programa Rev. B, a diferencia del Rev. A, es mensualizado, por lo tanto, define el programa de obras que deberán realizarse mes a mes. Este programa que es entregado por la GRMD no cuenta

con un detalle para todas las actividades de preparación que se deben realizar, sino que solo indica en que fechas se deben desarrollar algunas de las principales (hitos).

Finalmente, los principales insumos a utilizar para la confección de un plan de preparación minera son:

- Programa Rev. B (GRMD)
- Informe de lineamientos geomecánicos P0
- Plan de preacondicionamiento
- Planos de Ingeniería
- Recursos y rendimientos históricos
- Rutas de acceso
- Contratos

El objetivo principal del caso de estudio será plantear construir y revisar los resultados de un sector específico de la mina, previo a realizar el modelo completo, a fin de conocer prematuramente los comportamientos del modelo y verificar que el agendamiento de la preparación mina desarrollada en forma optimizada. Se describen a continuación, los antecedentes específicos de la mina Esmeralda sector de la Mina El Teniente, en donde se aplica el caso de Estudio.

3.4 Preparación Minera Mina Esmeralda

La preparación minera es el conjunto de actividades de desarrollo de túneles y construcción de infraestructura minera, obras civiles, mecánica y eléctrica, y de instrumentación, de ingeniería y montaje de diferentes niveles o sectores, que serán usados para incorporar un área que permite la continuidad de la explotación. En ese sentido las actividades de la Preparación Mina en el sector Esmeralda pueden agruparse en tres tipos principales de tareas:

- Excavaciones Mineras: también llamadas Obras Mineras, corresponden a los desarrollos horizontales y verticales que se deben realizar en todos los niveles productivos. Esta categoría incluye la fortificación (perno, malla y shotcrete), saneamientos de galerías y la estabilización de sectores. Sin embargo, esta fortificación no es definitiva en el nivel de producción.
- Obras Civiles: Son las obras basadas principalmente en hormigón armado y la armadura. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento (éste último es una fortificación definitiva de una zona en producción).
- Montaje de Infraestructura: también llamadas Obras de Infraestructura, son tareas correspondientes a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto determinado. Normalmente, se ejecutan posterior a las obras civiles y culminan con la habilitación, de manera local o remota de un elemento determinado. Ejemplos de estas actividades son el montaje y habilitación de buzones de carguío y *Plate Feeders*, elementos de infraestructura necesarios para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

De manera secuencial, la Preparación Minera en una mina subterránea como el sector Esmeralda comienza con el desarrollo y fortificación de las galerías, piques y chimeneas, luego se realiza las instalaciones de infraestructura de obras civiles (carpeta de rodado, fortificación de punto de extracción, etc.). Finalmente se montan los equipos tales como martillo picadores, alimentadores, entre otros.

3.5 Estrategia y consideraciones de modelamiento

Se plantea la construcción de un primer caso de estudio compuesto solo por una sub sección del nivel de hundimiento del sector Esmeralda.

Se tomarán los primeros 3 meses de construcción enero, febrero y marzo del programa Rev B 2017. Esto principalmente, porque el modelo se construirá a partir de las actividades contenidas en un plan de largo plazo, en donde, se debe considerar la ampliación del número de actividades por cada punto, producto del mayor nivel de detalle desde la perspectiva semanal.

Cabe recordar que se ha testeado el software UDESS con modelos de largo plazo previamente (Gonzales, 2018), sin embargo, es parte del objetivo secundario de este trabajo comprobar los límites del programa, lo cual se irá testeando al aumentar la complejidad y el número de variables para efectos del caso de estudio.

Por otra parte, desde la información base del proyecto Esmeralda (disponible), se analiza el programa Rev B 2017 y el tipo de restricciones a considerar, donde se tomará en cuenta que, el mejor caso de estudio es aquel que es capaz de incorporar el mayor número de tipo de restricciones, siendo a la vez un ejemplo integrado de las operaciones mina que se incorporan en la preparación minera de panel caving.

En el capítulo 4.2.2 se detalla el uso y procedimiento para incorporar las restricciones según la categorización que posee UDESS, no obstante, se presentan a continuación los tipos de restricciones a nivel general a partir de la operación de panel Caving que son considerados en un modelo a largo plazo y que incorpora el caso de estudio a mediano plazo:

- Rump-up de rendimientos: Debido a condiciones operacionales, en los meses de verano (enero y febrero) y post cambio de contrato (agosto y septiembre), el rendimiento cambia para los avances dentro de la mina. Dicho lo anterior, un ejemplo de esto es el mes de diciembre donde produce un efecto administrativo en que el mes se cierra el día 10 de enero del año siguiente, generando así un efecto en que enero reduce su rendimiento y en diciembre aumenta con respecto a los otros meses. Para efectos de las restricciones en UDESS, se realizó un traspaso del 20% de enero hacia diciembre.
- Hitos: Durante el horizonte temporal de un año en que el plan Rev. B incorpora todas las obras de preparación minera que se realizarán en la mina, se establecen una serie de hitos de construcción de obras que se deben cumplir, cada hito incorpora una o más obras que deberán estar completadas en una determinada fecha.
- Zona de transición: La mina Esmeralda es explotada mediante el método de Panel Caving con variante convencional, esto significa que las obras de preparación minera se deben realizar antes de que el avance de la zona de transición las alcance. Para lograr esto, las actividades cercanas a la zona de transición se deben finalizar por adelantado, esto se realizará en UDESS utilizando restricciones de progreso límite

- **Recursos:** Cada actividad tiene un rendimiento máximo establecido a nivel mensual de acuerdo a los registros de actividad consignados en el plan de preparación mina RevB 2017. Dicho lo anterior, cada actividad en la planilla de actividades a entregar a UDESS queda delimitada con su recurso de manera única reconocida como restricción para el problema de optimización.

Los parámetros de entrada para la construcción del modelo quedarán escritos en la sección 3.2.7 *Datos de Entrada*

3.6 Esmeralda UCL

Se muestra y describen brevemente los planos de ESM, en particular, su Nivel de Hundimiento con las componentes que enmarcan el problema de optimización y secuenciamiento de actividades.

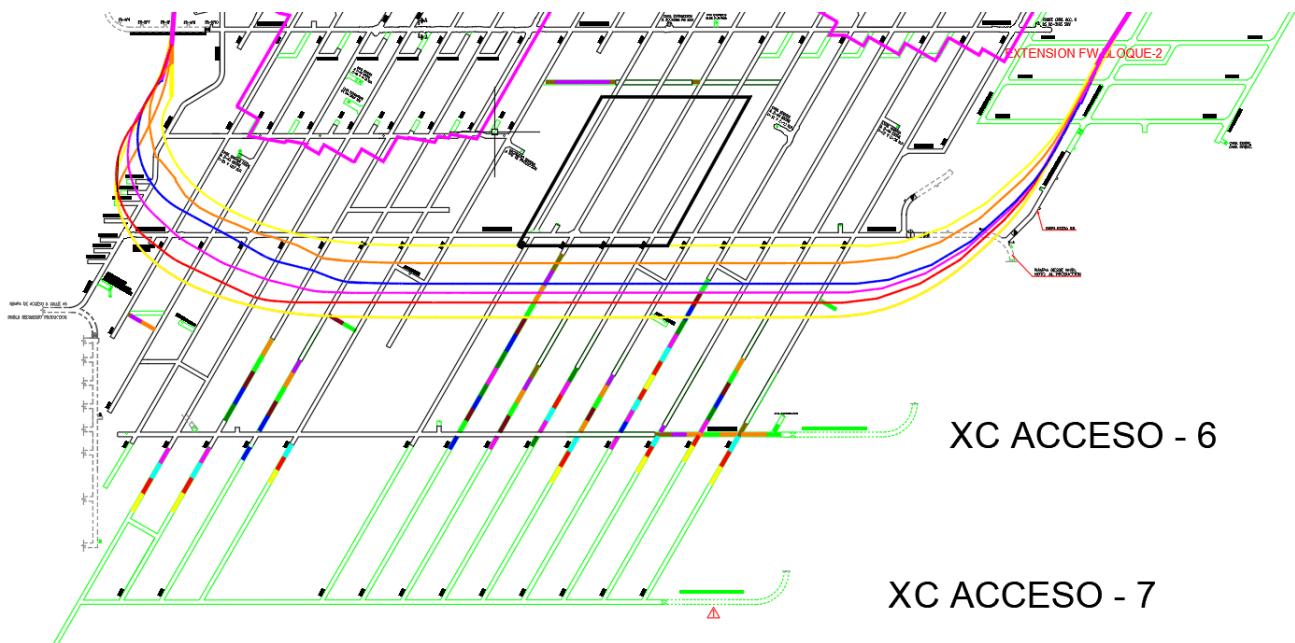


Ilustración 6: Layout UCL ESM, Desarrollos horizontales (Gerencia de obras mina, 2019)

De la figura anterior, se aprecia lo ya construido a la fecha del plano (2017) en negro, en gama de colores las franjas (amarillo, verde, azul, rojo) muestran las zonas de transición proyectadas para cada mes del. Por último, los desarrollos horizontales que aún faltan por construir son aquellos en color Verde, el cual será mayoritariamente el sector de trabajo y aplicación de la metodología, es decir, aquel sector sur de toda el área comprendida por Esmeralda. Adicionalmente, los tramos coloreados según la gama que se muestra en la figura representan lo que se ha planificado para avanzar en cada mes del año acorde a las zonas de transición y a lo decretado por el programa Rev B 2017.

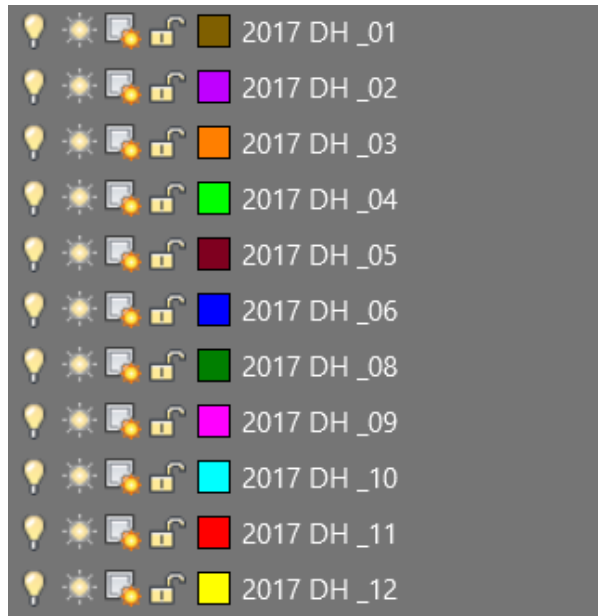


Ilustración 7: Simbología de colores por mes, UCL ESM, desarrollos Horizontales (Gerencia de obras mina, 2019)

Dada la simbología de colores, se puede apreciar para el caso de estudio lo que representan para los primeros 3 meses del año 2017, es decir, enero en café, febrero en morado y marzo en color Naranja. Lógicamente, los colores van contiguos según la simbología y el avance físico de las frentes. Además, es importante identificar que los desarrollos de un mismo color y por tanto mismo periodo temporal, pueden aparecer en distintos puntos del layout de manera simultánea, acorde a las necesidades y restricciones de los hitos por completar.

Por último, se presentan las secciones típicas de los desarrollos horizontales a secuenciar

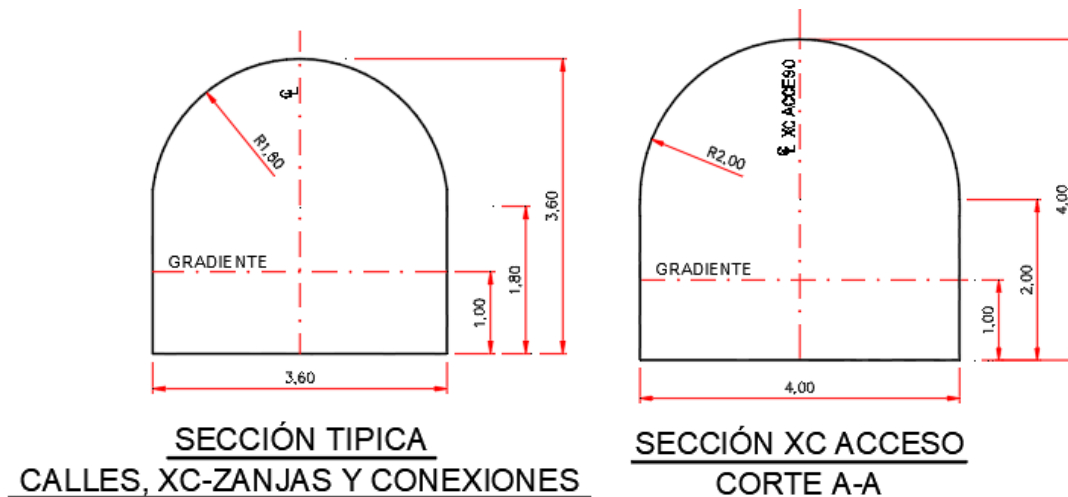


Ilustración 8: Secciones típicas UCL ESM (Gerencia de obras mina, 2019)

A continuación, se deja un layout para mostrar esquemáticamente cada una las actividades de desarrollo horizontal, fortificaciones especiales y pozos de hidrofracturamiento respectivamente, los cuales siguen la misma lógica de colores y simbología presentada para los desarrollos horizontales. Considerando la ubicación de todas las componentes, se construye entonces el set de actividades para el caso de estudio

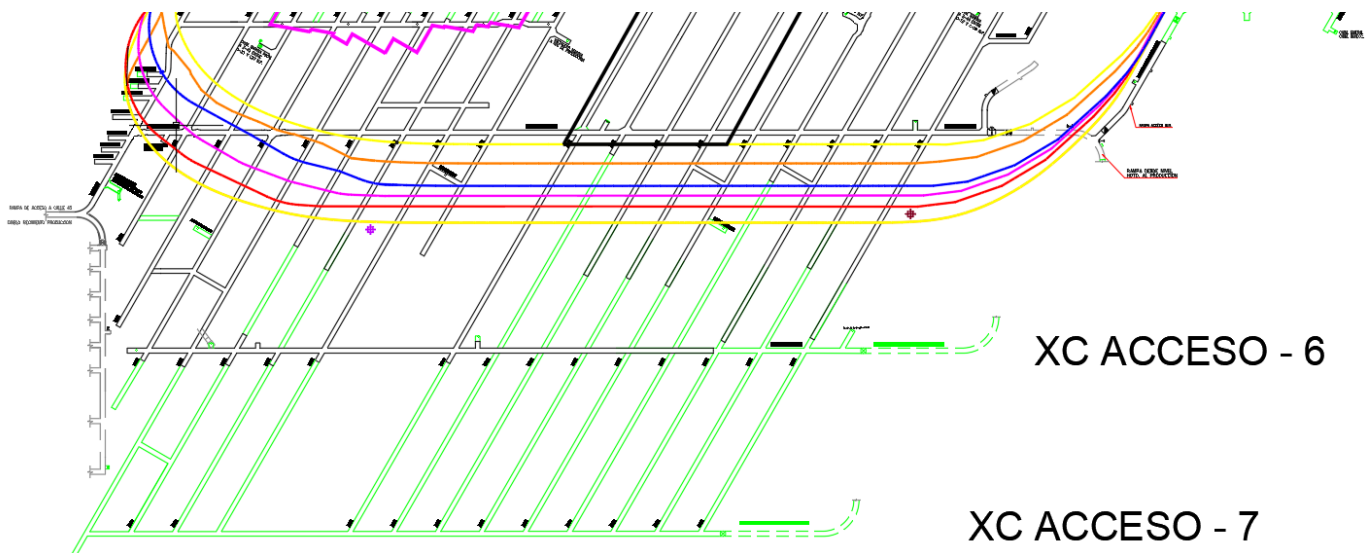


Ilustración 9: Layout UCL ESM, Desarrollos Verticales (Gerencia de obras mina, 2019)

Los desarrollos verticales son muy pocos (2) en el periodo que impone el caso de estudio denotándose por los pequeños puntos en morado y café a los lados izquierdo de la Calle 37 y 59.

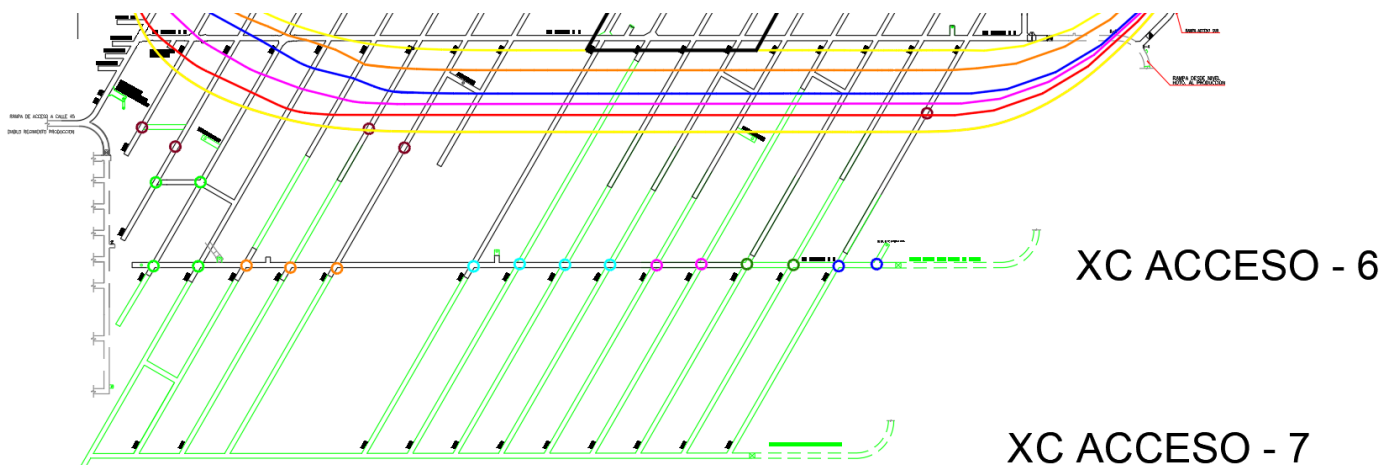


Ilustración 10: Layout UCL ESM, Fortificaciones especiales (Gerencia de obras mina, 2019)

Acorde a la figura anterior, las fortificaciones de intersección son denotadas con un círculo con el color correspondiente según la simbología.

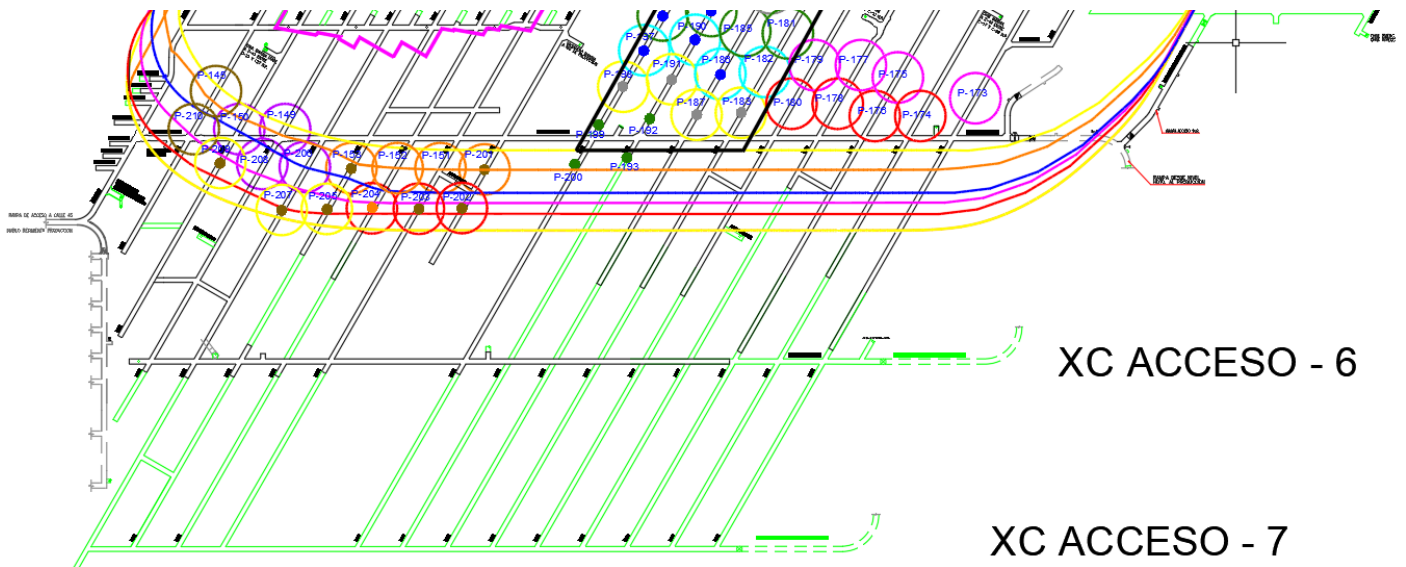


Ilustración 11: Layout UCL ESM, Pozos de Hidrofractura (Gerencia de obras mina, 2019)

Acorde a la figura anterior, las hidrofracturas programadas son denotadas con un círculo que circunscribe un punto con el color correspondiente según la simbología.

Discretización de variables a nivel semanal:

Al observar los planos de Esmeralda, se puede apreciar que la planificación de todas las actividades, esquemáticamente están representadas por distintos colores, según al mes del año en que se llevará a cabo su desarrollo. En virtud de que la escala temporal para un modelo a “mediano plazo” es de semanas, en lugar de meses, se considera la fragmentación de los distintos tramos horizontales que existen como actividades del modelo. Esquemáticamente, esto se detalla a continuación:

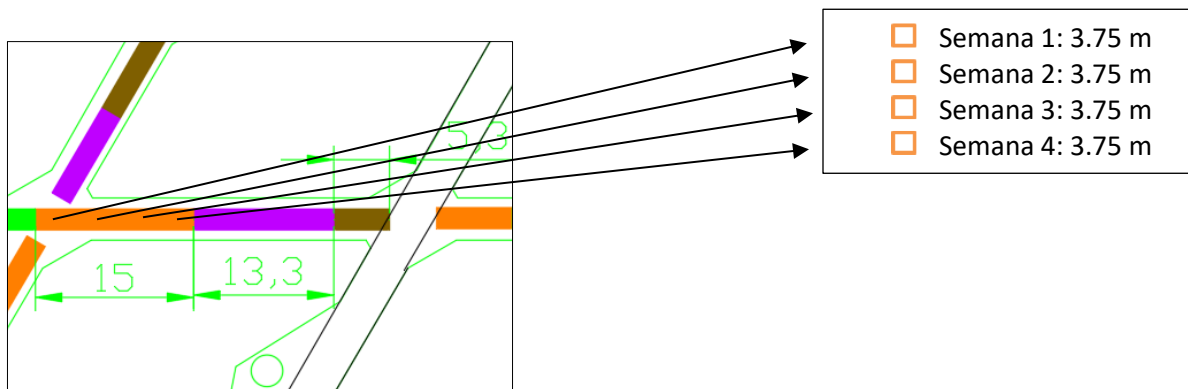


Tabla 1: Discretización de tramos horizontales Esmeralda (Elaboración propia)

De la ilustración anterior, se aprecia que el tramo de color naranja, representando el mes de marzo, muestra un avance horizontal de 15 metros/mes, el cual se subdividirá en cuatro sub-tramos de 3.75 metros cada uno como actividades del modelo que ajustan a una escala de tiempo semanal. Así se obtiene que desde un tramo obtenemos 4 segmentos de tramo y por tanto se utilizará un subíndice de 1 a 4 que indicará exactamente el segmento para su correcta ubicación en el espacio del plano ESM acorde con la forma de codificación descrita en 3.2.1.

3.7 Consideraciones operacionales Caso de Estudio

Para el caso de estudio se resumen a continuación las consideraciones de obras y aspectos operacionales que fueron transcritas a actividades, precedencias y restricciones del modelo:

1. Hitos comprometidos en el periodo:
 - Término de galería especial al sur de XC Acceso 4 a UCL (Febrero)
 - Conexión C-25/C-27 UCL (Marzo)
 - Conexión XC Acceso 6 UCL con rampa lado Fw (Marzo)
2. El periodo definido restringe a:
 - 92 DH (a partir de 23 DH mensuales)
 - 1 DV en Febrero
 - 1 FI en Marzo
 - 7 FH en Enero y 3 en Marzo
3. Restricciones por precedencias
 - Acorde a los tramos físicamente posibles por la preparación minera
 - Acorde al pre-ordenamiento que entrega el MSPrimavera en el revB2017
4. Restricciones operacionales
 - Fortificación de intersecciones: Luego de completados los tramos a su alrededor
 - Rendimientos de avance ponderados según criterio de ingeniería para los periodos del año (Enero 60%, Febrero 80%, Marzo 100%)

En relación a las precedencias, estas siguieron la secuencia constructiva de Esmeralda considerando que ahora se han discretizado las actividades de acuerdo al detalle que solicita un plan semanal. Particularmente, los desarrollos horizontales han de dividirse en 4 tramos para representar el avance en 4 semanas por mes, mientras que las otras actividades se discretizaron en base a cuantas veces eran necesarias para terminarse dentro de un periodo, es decir, su *max rate*. Gráficamente, se puede ver la secuencia constructiva en el esquema a continuación:

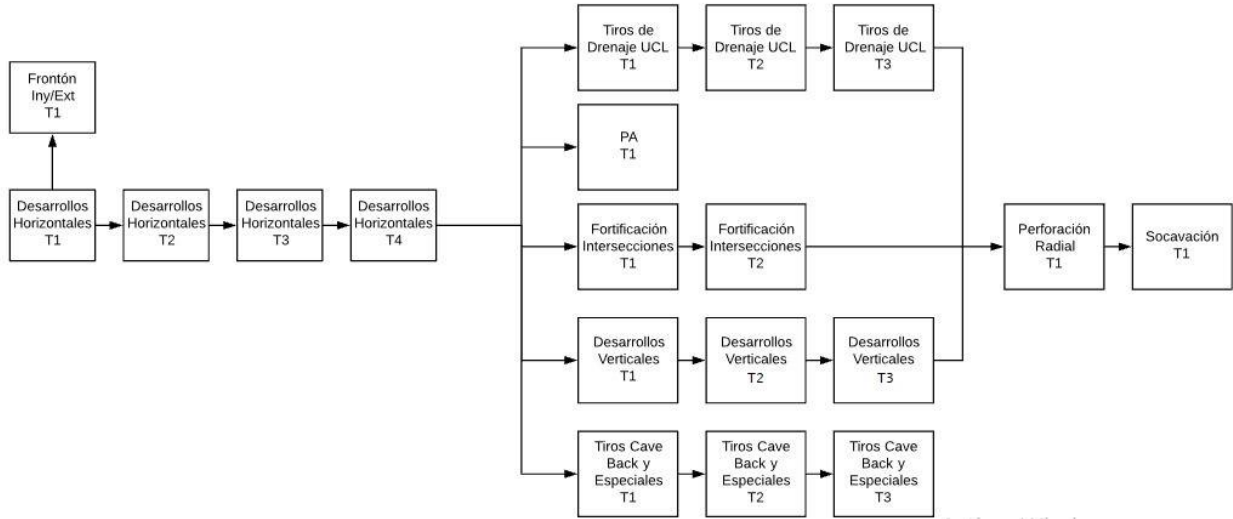


Ilustración 12: Secuencia constructiva nivel de Hundimiento Esmeralda (Elaboración propia)

Dado las actividades presentes en el esquema, se respeta el modelo anual, sin embargo incrementado el número de variables, por ejemplo, para cada tramo de desarrollo horizontal queda en 4 sub-tramos con sufijos a llamar T1, T2, T3 y T4. En el archivo de actividades ACT.txt (anexos), se refleja para todas las actividades con el prefijo NHDH. A pesar que, el número de actividades aumenta considerablemente tras la discretización, el modelo sólo abarca un periodo trimensual, por lo que, esto reduce considerablemente el número de variables a imputar al archivo ACT.txt. En relación al *Max rate* de cada variable, este se mantuvo en su valor, dado que UDESS considera el cambio en forma implícita al extender un análisis trimensual en su propia interface.

En términos de la data, el nivel de hundimiento entrega un total de 214 actividades asociadas a los desarrollos y obras de construcción que operativizan el sector. En tanto que, las precedencias del subnivel obtienen un total de 693 actividades con algún sucesor, y las restricciones asociadas a dicho subnivel alcanzan 190 en total.

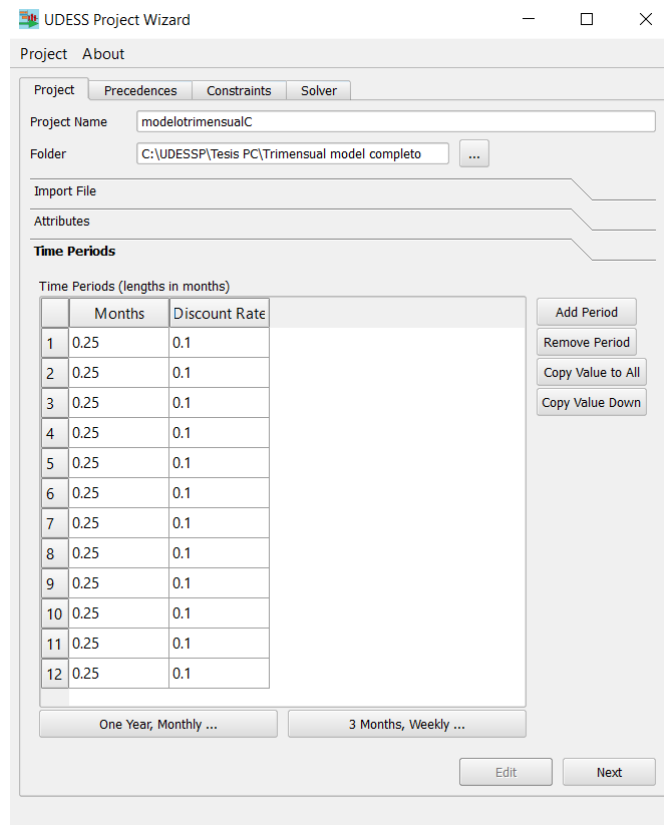


Ilustración 13: Ajuste de Periodos en UDESS

La ilustración anterior muestra que, la configuración utilizada para el caso de estudio en UDESS en relación a los periodos es la de *3 Months Weekly* la que automáticamente arroja 12 periodos al igual que en la opción *One year, Monthly*, no obstante, cada periodo queda con un valor 0.25 en lugar de 1 en la tasa de descuento y con ello el programa sub-entenderá el trabajo en semanas en vez de meses.

Por otra parte, en relación a las precedencias, al igual que en el caso de las actividades del modelo, estas se incrementan en número bajo la misma proporción que la discretización aumenta el número de actividades. Dado que, estas nuevas sub-actividades poseen un secuenciamiento lineal, tal como lo muestra el esquema de secuenciamiento constructivo, se tiene entonces que este encadenamiento actividades debe ser representado por precedencias de tipo “y” denotada con un valor -1 en el archivo respectivo *PREC.txt*.

Por último, en términos de las restricciones del modelo anual al respecto del modelo trimensual, se realizó un análisis para filtrar solo aquellas restricciones que aplican al periodo que compete al modelo trimensual, esto es:

- Periodo 1 modelo anual = Periodos del 1 al 4 en modelo trimensual
- Periodo 2 modelo anual = Periodos del 4 al 8 en modelo trimensual
- Periodo 3 modelo anual = Periodos del 9 al 12 en modelo trimensual

4 Modelamiento de preparación minera corto plazo mediante UDESS

4.1 Modelo Conceptual

Previo a la construcción de los códigos para el programa, se iniciará explicando cómo opera la optimización detrás de las herramientas que se utilizarán, es decir, UESS y Gurobi. Para ello, se hará referencia del modelo matemático de optimización y sus restricciones generales a partir del trabajo realizado por los investigadores AMTC (Rojas V., 2019). Este modelo sienta la base para comprender como luego se procederá a la incorporación de más restricciones y en definitiva la construcción del modelo y plan trimestral de la preparación mina en Esmeralda.

El modelo matemático de optimización toma un plan base con sus respectivos datos de entrada para correr una optimización que generará una versión optimizada del plan base. El cual deberá incorporar los aspectos básicos, que en este caso, corresponderán a los de preparación mina, es decir, infraestructura desarrollos horizontales y verticales, obras civiles, entre otros. Todas estas actividades tendrán asignaciones de precedencias y restricciones sobre las variables que serán luego interpretadas por el modelo de optimización en la búsqueda de un óptimo. El resultado de lo anterior, quedará reflejado en una carta Gantt de actividades, la cual para efectos de análisis podrá ser comparada entre las diferentes versiones del plan que se obtengan. En forma esquemática lo anterior se puede ver como sigue:

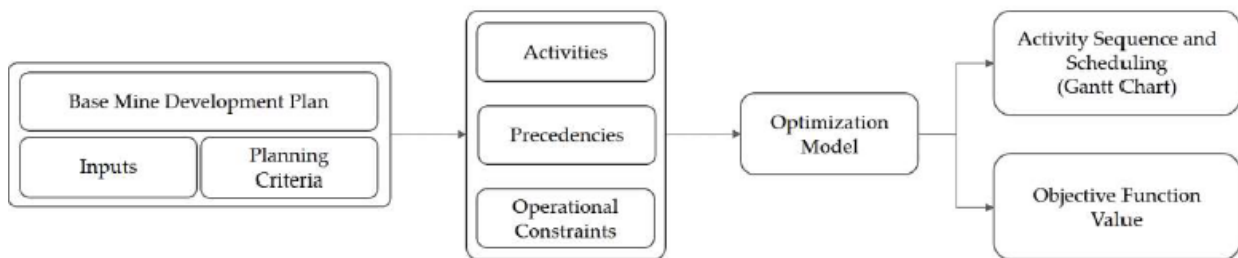


Ilustración 14: Flujo de un modelo de optimización para secuenciación de actividades en planificación mina (Rojas V., 2019)

El detalle del modelo en sí mismo, es decir, su función objetivo y restricciones pueden ser encontradas en las referencias de este trabajo. Allí se podrá apreciar que el modelo presenta un set de restricciones generales, sin embargo, existen más de estas en términos operacionales cuando se trata de trabajar e indagar en un plan de mediano corto-plazo. En la sección de restricciones, se describen aquellas que son nuevas producto del modelo de plan de preparación mina trimestral en términos de su codificación de acuerdo a su interpretación desde la preparación mina y también su sintaxis en relación al agendador utilizado para la construcción y optimización de estos modelos.

De manera general, la forma de abordar el problema se llevará a cabo a partir de los siguientes pasos:

- Se deja un subnivel aislado para su construcción y se prueba este por sí solo. En orden se construye primero hundimiento (NH), luego producción (NP), seguido de acarreo (NA) y finalmente ventilación (SNV)
- Cuando todos los subniveles están construidos se evalúa la interacción de estos en un solo modelo integrado.
- Ocurre la modificación de alguna o más condiciones o restricciones al modelo de tal manera de ir iterando hacia la mejor representación global del problema.

A saber, enumerando y entregando mayor detalle de la metodología se tiene lo siguiente:

1) Antecedentes de recopilación de información y bibliografía: esto incluye la revisión de la literatura sobre planificación, preparación minera, modelamiento en UDESS y búsqueda de datos reales de la mina Esmeralda para construir el caso de estudio, es decir, planos de ESM, criterios geomecánicos, de planificación, de constructibilidad y factores que afectan la operación de la mina para la escala a la que se quiere modelar el problema.

2) Definición del caso de estudio: Se define como caso de estudio el nivel de hundimiento (NH) para luego replicar el trabajo realizado hacia los demás niveles de acuerdo con el nivel de complejidad en cada uno. Particularmente dentro del mismo nivel de hundimiento se realizarán pruebas internas con menor volumen de obras a construir para entender si efectivamente el software funciona con un modelo más básico que incorpore las restricciones asociadas a la escala de tiempo trimestral/semanal. Una vez se compruebe que el caso de estudio cumple satisfactoriamente, es robusto y representativo para las labores de preparación minera se podrá extender a distintos periodos de tiempo y realizar la integración que muestre la preparación de la mina completa.

3) Modelado numérico en UDESS sigue su propia sub-metodología en una forma cíclica que se muestra a continuación:

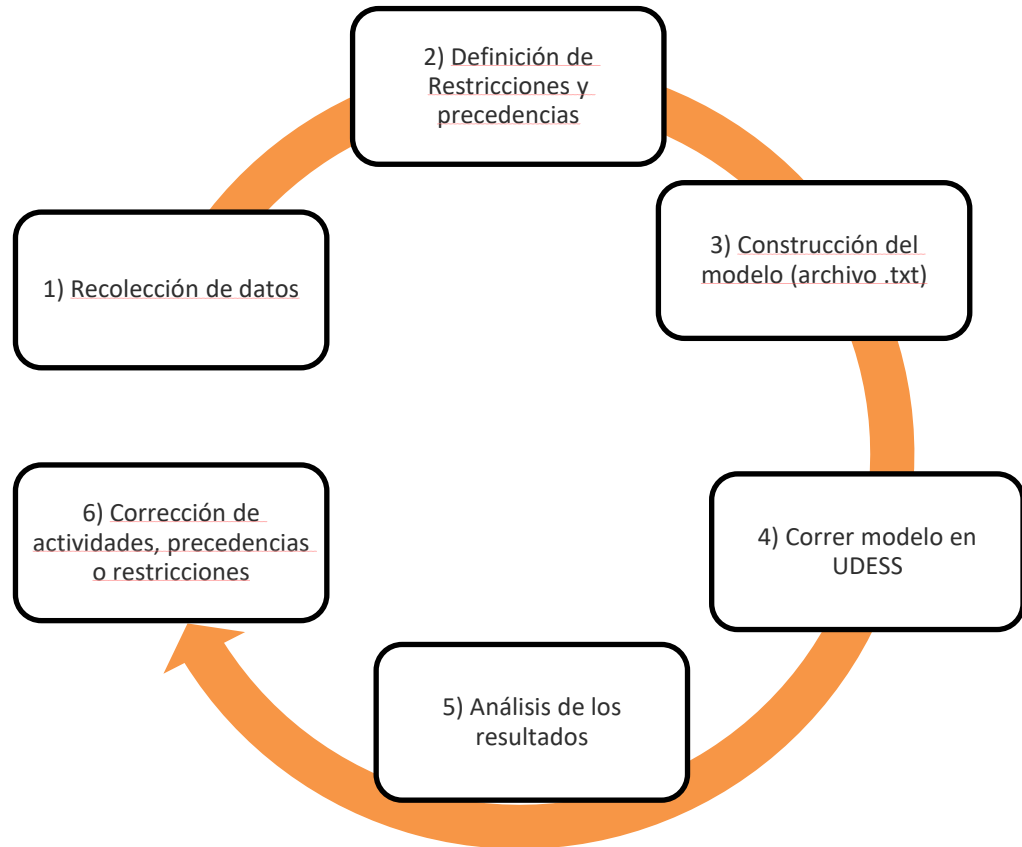


Ilustración 15: Metodología conceptual de modelamiento. (Elaboración propia)

4) Análisis de resultados y propuestas de mejora: Una vez que se ha concluido el ciclo en 3 se debe realizar un análisis general de los resultados entre la interacción de los niveles y de cómo se cumple el plan de preparación minera con respecto al plan construido de manera tradicional en MS Project o Primavera. Adicionalmente se complementa con un análisis sobre las restricciones que son adecuadas a este

5) Discusión y conclusiones: este paso final considera la retroalimentación del análisis anterior para del paso 3) y evalúa cuáles son las mejores condiciones para el modelo optimizado. Los resultados finales del análisis se enumeran y se redactan como conclusiones a modo de colaborar con sugerencias para una futura investigación en la línea del tema.

4.2 Estrategia de Modelamiento

Persiguiendo una metodología de modelamiento para mediano plazo se distingue la siguiente fragmentación que de manera jerárquica va a entregar la construcción del modelo completo de la mina Esmeralda.

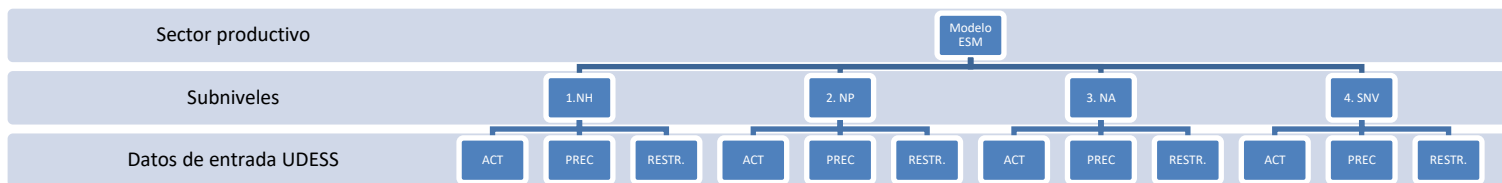


Ilustración 16: Esquema de modelamiento ESM (Elaboración propia)

Como se puede apreciar en el esquema anterior, el primer nivel del sector a modelar corresponde al Nivel de Hundimiento, seguido por el Nivel de Producción, el Nivel de Acarreo y finalmente el Subnivel de Ventilación.

El orden de incorporación de los niveles no fue definido aleatoriamente, sino que responde a los volúmenes de actividades y precedencias involucrados en cada uno de ellos considerando el método de explotación panel caving.

Como se verá posteriormente, dentro del sector en estudio, el nivel con mayor volumen de actividades y precedencias corresponde al Nivel de Producción, mientras que el Nivel de Acarreo y Subnivel de Ventilación son los de menor volumen de información y menores restricciones operacionales. Es importante mencionar que tanto el tiempo de modelamiento, como la dificultad del mismo, tienen relación directa con los volúmenes de información sobre todo en lo que respecta a las restricciones del problema, dado que UDESS facilita la incorporación de actividades y precedencias a través de archivos importables (.txt), no obstante, la interfaz solo permite el ingreso manual de restricciones. Este inconveniente se comenta posteriormente como parte de los factores a mejorar en esta metodología.

El modelo a mediano plazo incorpora sus restricciones, tanto de criterios utilizados en largo como corto plazo. La idea de esto, es medir y cuantificar el impacto de estas sobre la construcción de los códigos y la interfaz del software UDESS mismo.

4.3 Datos de Entrada

Se describe a continuación en forma genérica los componentes que constituyen cualquiera de los modelos de optimización y secuenciamiento de actividades a presentar en este trabajo.

4.2.1 Actividades

La estructura base de todo modelo serán las actividades que se contempla realizar, para ello se debe organizar y realizar un planteamiento de la preparación minera de forma estructurada, siendo afín al software que articulará la información de las actividades. Aspectos que deben ser indicados para cada acción son: los recursos, valor presente de la actividad, rendimiento de operación y/o atribuciones dado el problema que se busque resolver. Particularmente, para este modelamiento se

utilizó UDESS, software que solicita la siguiente información básica a través de las siguientes etiquetas:

- ID: Nombre de la actividad
- ING: Ingreso o costo percibido por la actividad
- Max Rate: Tasa máxima de actividad realizable por mes

El ID de actividad será uno que estratégicamente permita identificar un sector, lugar que en muchas ocasiones se repite a lo largo de la infraestructura minera, Esmeralda requiere de numerosos piques, galerías, zanjas, las cuales son ejemplos de obras que se repiten en los distintos subniveles de Hundimiento, producción, acarreo y ventilación), por tanto, se ayuda esta nomenclatura a través de la organización que le dan los planos a las obras de construcción de la mina Esmeralda.

El ingreso o costo de una actividad, es decir su beneficio, es un parámetro determinante en la planificación minera del sector, pues otorgará el grado de prioridad para la ejecución de una actividad específica. Teniendo un valor de para cada actividad en términos de beneficio económico se puede otorgar la tarea al software de maximizar los recursos, por tanto, el valor presente del proyecto, que en este caso sería la preparación minera del sector Esmeralda. Al encontrar un flujo de caja determinado, a su vez el programa como agendador entregará la secuencia de las actividades en el orden específico por medio de una carta Gantt. Adicionalmente a lo anterior, se puede desplazar la variable económica de la función objetivo para dar mayor relevancia a la velocidad de construcción del plan de preparación minera. Esto en la práctica, se realiza equiparando los valores de beneficio de todas las actividades e incorporando una variable auxiliar que tenga un valor muy superior de Beneficio tal que el software persiga la búsqueda más expedita de dicho valor. Más detalle sobre este factor se detalla en el capítulo 4 de modelamiento.

Por último, cabe notar que cada actividad tiene un límite físico de velocidad de construcción de acuerdo a la complejidad de la obra. Por ejemplo, en minería subterránea se conoce un rendimiento de avance por disparo de 6m de acuerdo al programa de construcción rev B. El valor en sí guarda relación específica con el largo de perforación admisible tal que no haya desviación en los tiros que conforman el diagrama de disparo. Dicho esto, con 6 m de avance se logra mantener la dirección deseada de la galería en construcción, sin embargo, se limita inmediatamente el número de veces que puede ocurrir un ciclo minero en ESM, y en definitiva el método *Drill and Blast*. Esto queda parametrizado en el problema a través de la variable *máx rate*, la cual, particularmente, está concebida como la cantidad de veces que alcanza a realizarse una acción en un mes.

A modo de ejemplo se muestran a continuación las actividades y rendimientos contemplados en el documento de revisión B de la planificación 2017, los cuales fueron la utilizados en el modelo para el Nivel de hundimiento

Actividad	Unidad	Rev. B 2017	Rendimiento mes
Desarrollos horizontales	m	1,345	140
Desarrollos verticales	m	42	21
Fortificación de intersecciones	un	22	4
Construcción de vaciaderos de marina	un	2	1.5
Construcción de chimeneas de emergencia	gl	1	1.5
Tiros de Drenaje	m	950	200
Perforación pre-acondicionamiento	m	3,772	345
Perforación de pozos cave back y especiales	m	150	200
Hidrofracturamiento	un	40	2.5
Perforación radial	mb	91,443	-
Socavación	m2	23,715	-

Tabla 2: Actividades NH, rev B 2017 (Codelco, Programa de preparación mina 2017 Rev B, 2017)

Dada la estructura anteriormente descrita y tomando el plan de rev B2017 como guía, el planificador deberá construir y entregar un conjunto de información ordenado en filas y etiquetado con sus características (recursos, max, rate, Beneficio) en columnas. Esto en la práctica se realiza a través de un documento de texto (.txt) cuidando la sintaxis propia del software. En el caso de UDESS hay detalles minuciosos como por ejemplo que no se pueden utilizar espacios entre caracteres, mayúsculas, ni ciertos caracteres para el nombre de los archivos.

Discretización de variables a nivel semanal:

En los planos de Esmeralda, tal como se muestra en la figura a continuación, se puede apreciar que la planificación está presentada esquemáticamente con un color distinto para cada mes del año. Sin embargo, para otorgar un grado mayor de detalle temporal en una planificación de mediano-corto plazo se utilizará como base semanas en vez de meses, entonces considerará una discretización de las variables que están a nivel mensual. Como ejemplo de esto se tiene que, en el caso de los desarrollos horizontales, 1 tramo pre-definido por la planificación tradicional anual se transforma en 4 sub tramos para cada segmento. Esto se describe con mayor detalle en la sección de modelamiento más adelante en 4.1.

Por su parte, la variable *max rate* que es mensual y los periodos definidos para el problema se ajustan a la escala descrita, teniéndose por ejemplo 4 periodos (semanas) por cada mes considerado en el modelo.

Codificación

Las actividades se introducirán al modelo bajo un código que permita identificar todos los aspectos relevantes de ubicación, orientación y tipo de obra, tal que, de manera única una quede determinada una acción en el plano de Esmeralda. Como ejemplo, se muestra a continuación una actividad del modelo representativa de un desarrollo horizontal.

ID Actividad: NHDHAC6C59FWT11

Este código se interpretará en forma descompuesta como sigue:

- NH: Nivel de Hundimiento;
- DH: Desarrollo Horizontal;
- AC6: Acceso 6;
- C59: Calle59;
- FW: Patilla;
- T11: tramo 1, segmento1

De esta manera la actividad queda determinada e identificada en una fila del archivo de actividades “ACT.txt”. Dicho archivo tendrá encabezado indicando la codificación, beneficio, *maxrate* y recurso de cada actividad tal como se muestra a continuación

Codigo	Beneficio	max rate	NH DH metros	NH DV metros	NH FI unidad	NH PA Y HF
BENEFICIO	1.00E+14	1	0	0	0	0
INICIAL	1.00E+14	10000	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT11	9846547	9.66183575	3.6225	0	0	0
NHDHAC6C55FWT12	9607581	9.66183575	3.6225	0	0	0
NHDHAC6C55FWT13	9462501	9.66183575	3.6225	0	0	0

Tabla 3: Fragmento de archivo de actividades UDESS, caso de estudio. (Elaboración propia)

El archivo respeta la sintaxis de UDESS en este caso y cumple el objetivo de entregar una interpretación donde el programa comprenda que al resolver el problema de optimización debe ir por la ruta más rápida para llegar a su máximo valor de Beneficio, la cual tiene designada intencionalmente la magnitud más alta de su respectiva columna. La actividad BENEFICIO no existe como tal en el plano físico, y se utiliza únicamente como un facilitador para la resolución del problema de optimización, dado que, al maximizar la función objetivo respecto del valor presente del proyecto, entonces se induce al agendador a buscar la ruta más eficiente para obtener el mayor Beneficio lo antes posible, por tanto, indicar la secuencia de actividades que cumple con lo anterior. Esto último, considera por supuesto las limitantes del problema y condiciones de borde impuestas tanto por, las Precedencia de actividades y Restricciones operacionales de la preparación minera, las cuales se describen en los apartados siguientes.

4.2.2 Precedencias

El factor principal que determina el orden de ejecución de las actividades, es decir, el predecesor y sucesor, estará dado por los criterios de construcción, en la jerga de proyectos se encuentra en la secuencia constructiva definida por la ingeniería y reflejada en los planos de construcción.

En minería subterránea es sabido desde el ciclo minero de operación que para un correcto avance en la construcción de un desarrollo horizontal se debe respetar la seguridad de los trabajadores como valor primordial y es por ello que la geomecánica es una disciplina muy relevante a la hora

del diseño, pues entrega la cantidad de fortificación requerida para instalación que permite asegurar las condiciones de trabajo y continuidad del ciclo. Dicho lo anterior, la fortificación jamás podrá obviarse en el ciclo, así como tampoco puede concebirse una fortificación que secuencialmente esté antes de a una tronadura. De igual manera, se van conectando las demás actividades, en términos del modelo quedan explicados en la figura a continuación. En ella, se muestra a la izquierda esquemáticamente el orden de actividades ,y a la derecha como estas quedan traducidas a código indicando si pueden ejecutarse en paralelo o en serie, o sea, respetando que otra actividad se complete previamente.

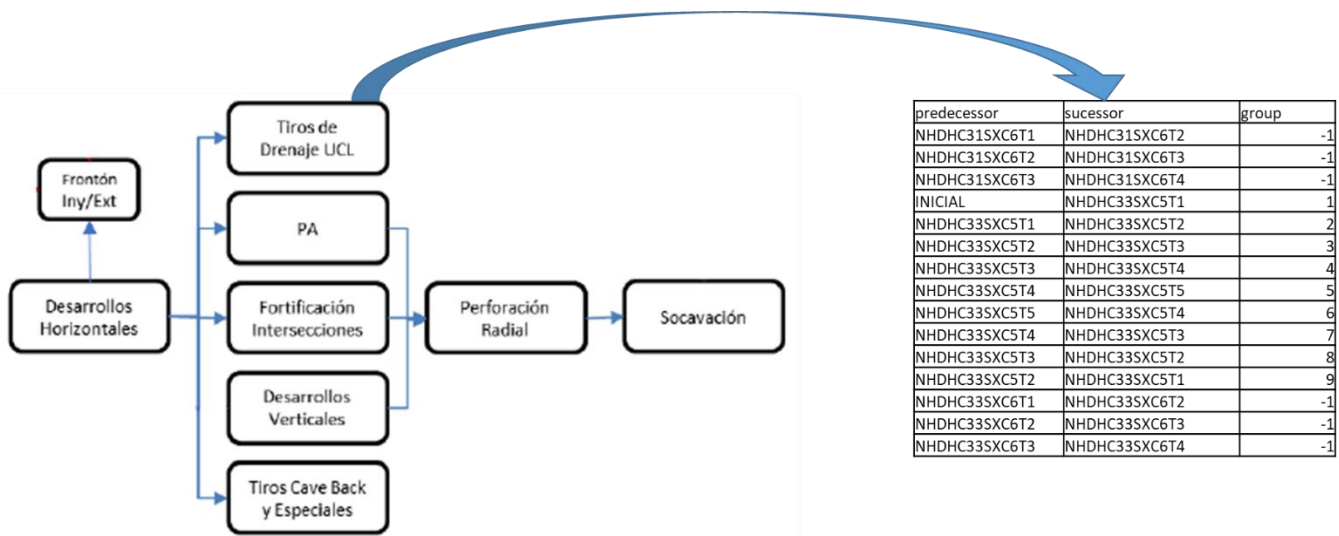


Ilustración 17: Esquema de incorporación de secuencia constructiva como precedencias, caso de estudio (Elaboración propia)

De acuerdo a la idea anterior, cada actividad seguirá un orden específico y tendrá una precedencia en que para efectos de UDESS será tipo “y” u “o”. Según indica la tabla a la derecha, aquellas precedencias de concatenación en serie (tipo y) son denotadas con un número negativo (-1) en la columna “grupo” mientras que aquellas precedencias para actividades que pueden realizarse en paralelo (tipo o) se identifican con un valor entero positivo. A modo de ejemplo, se aprecia que la actividad NDDHC33SXC5T2 tiene en la columna “grupo” el valor 2 y el valor 8 más abajo, pues puede ser precedida tanto por NDDHC33SXC5T1 como NDDHC33SXC5T3.

Finalmente, el planificador entrega un archivo de precedencias “PREC.txt” con la sintaxis anteriormente descrita considerando que cada una de las actividades en el archivo mencionado tiene al menos una precedencia para cada caso. En caso que, una actividad fuese precedida por el valor ficticio “INICIAL” significa que no tiene precedencia y allí inicia su ejecución, mientras que si el sucesor es “BENEFICIO” significa que solo hasta ese punto se extiende la actividad en los periodos disponibles del modelo.

Para el caso de la Mina Esmeralda en particular, los planificadores han adoptado considerar los siguientes aspectos propios de la minería que influyen y actúan como externalidades que en muchas ocasiones pueden alterar la secuencia constructiva de ingeniería. Con ello en cuenta, se define construir una secuencia genérica que incorpora lo siguiente:

- Variante del método de explotación: Es un factor que determina desde cero la manera de construcción, puesto que la preparación minera de un Panel Caving con variante convencional difiere constructivamente con la de un Panel Caving con Hundimiento previo. En el caso de la Mina Esmeralda, se utiliza la variante convencional que necesariamente prioriza la realización total de las obras por delante de la zona de transición previo a la socavación del bloque.
- Procedimientos constructivos propios de las empresas contratistas: En ocasiones pueden cambiar la secuencia constructiva. Esto se puede ver reflejado en los distintos procedimientos que se obtienen para minas de similar condición como lo son todos los sectores de El Teniente, sin embargo, con distintos profesionales y constructores a cargo, implicando a los criterios de ingeniería que puede diferir. Al tener distintos contratistas, existirán entonces, diferencias claves en el orden en que se construyen obras de distintos niveles, obras que se construyen en paralelo, e incluso en algunos protocolos que sigue un determinado contratista, pues sigue su propia fórmula. Esto último en muchos casos otorga reconocimiento en la industria, por lo mismo lo diferencia en el mercado sobre los demás, por tanto, difícilmente se igualará totalmente la forma de construcción.
- Requerimientos de ingeniería: Existen aquellos que obligan a cambiar la secuencia constructiva de determinadas obras o inclusive sancionan la no realización de algunas. Un caso de esto corresponde a la construcción de Muros de Confinamiento, antes de realizar la Carpeta de Rodado previa, o directamente realizar el Muro de Confinamiento sin Carpeta. En general, este tipo de requerimientos se toman en honor a los tiempos de construcción o recursos de materiales que son gestionados en terreno. Este tipo de cambios pueden ejecutarse en última instancia modificando incluso lo ya construido a través de planos conocidos como “As Built”
- Restricciones no planificadas: En este punto se contemplan las medidas de contingencia que pueden cambiar la secuencia constructiva, y que no estaban previstas de ninguna manera como la mantención de equipos por falla operacional, el retraso en la logística de los materiales de construcción o bien el reacomodo y actualización de la matriz rocosa debido a la sismicidad inducida por la actividad minera. Estas aplicarían en casos especiales y solo cuando se incorpore data nueva al modelo.

En términos de prioridades el modelo en primera instancia incorporará la secuencia constructiva como mandataria a través de las precedencias, para luego hacer uso de los demás criterios mencionados.

4.2.3 Restricciones

Las actividades interactúan en el modelo de optimización cumpliendo la definición y asignación de restricciones al problema. Para la utilización del agendador cada una de estas limitaciones y condiciones de borde se ingresará a través de la interfaz del programa, la cual permite el ingreso “manual” (una a una) de estas y pueden ser clasificadas bajo las siguientes categorías:

1. *Operational Resource Constraint* o Restricciones de Recursos Operacionales: Limita el consumo de un determinado recurso para un determinado periodo de tiempo, para todas las actividades que lo requieran.

Un ejemplo, en el modelo es el criterio experto aplicado sobre los rendimientos de operación debido a circunstancias especiales en el cambio de contratistas. En los meses de verano (enero y febrero) ocurre el efecto de *ramp-up* sobre el rendimiento de construcción de los desarrollos, lo cual se traducirá a restricción limitando el consumo de recursos desde su 100% a, por ejemplo, en el mes de enero, solo un 60% de rendimiento. Esto se verá reflejado en los periodos del 1 al 4 respectivamente. Análogamente, esto se puede aplicará a los demás meses del año acorde a su propio rendimiento obedeciendo la condición particular de alteración. En términos de, su codificación en la interfaz del software, este tipo de restricción es útil y de rápida aplicación en, pues se ejecutará sobre los periodos que son solo 12 y no sobre las actividades que sobrepasan las 1000 en cantidad. Más detalle al respecto se describe en la sección de caso de Estudio 4.1 posterior

En el siguiente recuadro se ven los rendimientos de avance para cada mes del año según el criterio de planificación de largo plazo (Gonzales, 2018)

Periodo	Ponderador	Rendimiento/mes
Enero	0.6	84 m
Febrero	0.8	112 m
Marzo	1	140 m
Julio	0	0 m
Agosto	0.5	70 m
Septiembre	0.9	126 m
Diciembre	1.2	168 m

Tabla 4: Criterio de ponderación de rendimientos, planificación Anual (Elaboración propia)

Pese a que no están dentro del periodo para evaluación del modelo, al observar otros meses del año se encuentran otras particulares especiales, como por ejemplo, en Julio donde no ocurre actividad minera debido a la nevada considerada en la DET. Luego, de una detención nuevamente vuelve a ocurrir un periodo de *rump-up* reflejado en los ponderadores de Agosto y Septiembre respectivamente. Diciembre es considerado un mes de entrega y rendición de cuentas por lo que trata de reponer y cumplir las metas de avance.

2. *Starting Resource Capacity* o Restricción de Recurso de Inicio: Limita el consumo de un recurso dado al iniciar las actividades.

La forma de introducir en UDESS este tipo de restricción es análoga a las de tipo recurso operacional. Ejemplos de este tipo de restricción son aquellas actividades que por programa de cumplimiento de Hitos deben partir en una fecha determinada. Sin embargo, dentro de las opciones para restricciones es más específica la de progreso límite, opción que fue elegida para el modelamiento de los Hitos de construcción. Más detalle al respecto se describe en la sección de caso de Estudio 4.1 posterior

3. *Progress Limit Constraint* o Restricción Límite de Desarrollo: Obliga el cumplimiento de un progreso mínimo y máximo de una actividad en un intervalo de tiempo.

El ejemplo típico del uso de esta restricción estará dado por los Hitos de cumplimiento. Para el caso de estudio se tiene que entre enero y marzo se deben terminar las siguientes obras

N°	Hito	Descripción
1	Febrero	Término galería especial al sur de XC Acceso 4 UCL
5	Marzo	Conexión C-25/C-27 UCL
6	Marzo	Conexión XC Acceso 6 UCL con rampa lado Fw

Tabla 5: Hitos caso de estudio. (Elaboración propia)

Luego, para traducir lo anterior entonces se define que, por ejemplo, para la actividad N°1 que debe ocurrir en febrero, el periodo de inicio es el número 5 (semana en la cual inicia el periodo de febrero) y de término debe ser el número 8 (semana en la cual finaliza el periodo de febrero). Además, se indicará en el porcentaje de cumplimiento mínimo y máximo que deberá tener la actividad, lo cual en este caso será de 100% para ambos casos en el lapso de tiempo mencionado, lo cual implica que el progreso mínimo y máximo es de valor 1 para efectos de la restricción.

4. *Range Resource Constraint* o Restricción de Rango de Recursos: Limita el consumo de las actividades para un recurso dado. Esta limita el total del recurso en el rango de tiempo dado y no una tasa por cada periodo.

Un ejemplo del uso de esta restricción son todas las actividades “on/off” que se necesiten para un determinado periodo. Para ello, se utilizará un recurso unitario ficticio adicional otorgado a cualquier actividad que se le quiera dar carácter de “on/off”. Luego, con esto se debe indicar que para el recurso creado con característica binaria, en la restricción se pone el número de periodos en que esta será inactiva (valor 0) o activa (valor 1) permitiendo el agote del recurso según la necesidad del modelo. Este tipo de restricción sirve para el modelamiento de condiciones operacionales del nivel de producción.

Otra aplicación de este tipo de restricción se aplica para el avance en múltiples frentes. Considerando un desarrollo horizontal, dividido en segmentos equivalentes en metraje de acuerdo a la discretización anunciada anteriormente. A cada segmento se le asigna un nombre identificador, por ejemplo: S1, S2, S3, S4...Si con i = número de segmentos

Los segmentos pueden ser divididos en grupos de actividades, donde las actividades dentro de cada grupo deben ser consecutivas. Por ejemplo, teniendo un Grupo 1 (G1) conteniendo las actividades S1, S2 y S3, y un Grupo 2 (G2) conteniendo las actividades S4, S5 y S6, entonces para cada uno de estos 2 grupos de segmentos se deberán crear 12 restricciones de rango de recursos, una por cada periodo en el modelo. Con lo anterior, para cada grupo se tendrá que el periodo inicial y final

será el mismo al igual que el tipo de recurso. Por otro lado, el límite del recurso se asigna 0 como límite inferior y 1 al límite superior. Con esto se permite solo una de las actividades del grupo ejecutarse en un periodo determinado.

5. *Activity Incompability Constraint* o Restricción de Incompatibilidad de Actividad: Limita el desarrollo simultáneo de un grupo de actividades en un intervalo de tiempo dado.

La forma de introducir en UDESS este tipo de restricción es muy similar a las de tipo de rango de recursos, sin embargo con menor especificidad en la información necesaria que solicita este tipo de restricción. Los ejemplos de esta categoría son los mismos que en para las de tipo Rango de Recursos, luego al ser más específico este último tipo de restricción se prescinde de la utilización de restricciones por Incompatibilidad.

Por último, cabe destacar que las precedencias como tal son a la vez restricciones del problema, pues delimitan condiciones en el orden en que las actividades deben ser realizadas durante el agendamiento, es decir, otorgan sentido al problema en el aspecto físico y operacional.

Otras consideraciones operacionales

Vale la pena mencionar que hay restricciones que no se han considerado en el caso de estudio al tratarse este último solo del Nivel de Hundimiento, pero dichas limitantes si forman parte del modelo global, particularmente del sector de nivel de producción, que es el más complejo en términos de modelamiento pues contiene el mayor número de actividades y restricciones.

1. Apertura de punto de extracción: Se debe considerar que para abrir un punto de extracción deben haberse terminado todas las labores en al menos un radio de 45m alrededor.
2. Avance Malla Teniente: Se debe tomar en consideración que para que una labor pueda girar desde una calle a una zanja, esta debe otorgar como mínimo un espacio de 12m tal que el equipo pueda maniobrar correctamente.
3. Fortificación de Intersecciones: Cada vez que exista fortificación de intersecciones debe considerarse que no puede existir un avance mayor a 3m en ninguna de las direcciones contiguas a dicha intersección.

4.3 Modelamiento trimestral

En base a los resultados expuestos por el caso de estudio, se presentan a continuación los componentes y metodología bajo la cual se construye el modelo completo de Esmeralda para el periodo de tres meses con detalle semanal, el cual se desprende del modelamiento del nivel de Hundimiento previamente visto. Se describe todo lo que se mantiene a partir del caso de estudio, así como aquellas nuevas consideraciones y criterios implementados que permiten una mejora en la eficiencia para la aplicación de esta metodología de trabajo en la construcción de planes de preparación mina.

4.3.1 Observaciones y Datos de entrada

A partir del caso de estudio se pueden desprender las siguientes observaciones que contribuyen a la construcción del modelo trimestral completo:

En términos del funcionamiento de UDESS para el cometido del caso de estudio, no se generaron mayores problemas para el software. Sin embargo, dado la discretización de los niveles restantes para completar el modelo de la mina esmeralda, se evaluará el rendimiento del programa nuevamente en el modelo integrado.

Para construir el modelo completo del periodo trimestral (enero, febrero, marzo) se ha continuado la construcción de los modelos separados por sub-nivel a modo de lograr una integración y consolidado del modelo final. En virtud de lo anterior en la construcción de los archivos de actividades (ACT.txt) y de precedencias (PREC.txt), se re-analizó la data del modelo anual tomándose las debidas precauciones.

Se verificó la nomenclatura de los códigos de actividades, de acuerdo a la fuente (layer de plano dxf, rev B 2017 en Excel o codificación del modelo anual) en la que se encuentran los datos, las actividades asignadas para enero, febrero y marzo pueden discrepar en relación a la codificación, la cual es levemente diferente en cada fuente, más aún existiendo casos en los que una actividad no está en todas las fuentes de información.

Además, se realizó un ordenamiento de las bases de datos en el modelo anual, es decir; complementar y poder entregar una guía básica del significado de cada codificación a fin de establecer trazabilidad de trabajos futuros.

Se describe a continuación los datos de entrada y como fueron utilizados en la construcción del modelo.

4.3.1.1 Rendimientos

En concordancia con el modelo anual se ha tomado en consideración los rendimientos de actividades que provienen del programa revB 2017, los cuales se muestran en la tabla a

continuación y pueden ser vistos en mayor detalle en el archivo anexo *Rev A Esmeralda Sur Final.xlsx* (Codelco División El Teniente, 2017).

A continuación, se muestran las actividades contempladas en el documento rev B 2017 utilizado como base para el modelo en UDESS

Actividad	Unidad	Año 2017												Total
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul.	ago	sep	oct	nov	dic	
Desarrollos Horizontales	m	208	321	434	421	432	414	66	282	309	357	346	336	3,925
Nivel de Hundimiento	m	78	123	159	168	126	120		80	119	120	129	123	1,345
Nivel de Producción	m	130	176	246	234	239	222		136	140	187	177	176	2,064
Nivel de Acarreo / Nivel Transporte Intermedio	m		10			44	43	40	45	30	30	20	12	274
Sub Nivel de Ventilación	m		12	29	20	23	28	26	20	20	20	20	25	243
Desarrollos Verticales	m	66	90	272	140	189	202	125	111	111	160	111	117	1,692
Nivel de Hundimiento	m		14			14					14			42
Nivel de Producción	m	38	76	182	80	80	80		46	46	46	46	57	775
Nivel de Acarreo	m	28		50		35	62	60			40			275
Sub Nivel de Ventilación	m			40	60	60	60	65	65	65	60	65	60	600
Obras Civiles														
Vaciadero de marinas UCL	u						1		1					2
Fortificación Intersección UCL	u			3	4	5	2		2	2	4			22
Habilitación salida de emergencia	u											1		1
Punto de Extracción	u	5	9	18	9	9	6		4	7	7	6	7	87
Piso Punto de Extracción	m	50	90	180	90	90	60		40	70	70	60	70	870
Muros de confinamiento	u	5.0	6.9	8	8	8	9		8	8	8	7	6	83
Fortificación Intersección NP	u	6	6	7	6	9	1		4	4	5	3	4	55
Carpeta de Rodado Calle NP	m	95	108	78	91	142	166		102	150	137	96		1165
Construcción Vía Ferrea	m	30	100	160	135	145	100	100	150	110	110	110	150	1400
Tiros de drenaje	m								120	120	520	520	510	1790
Construcción Cuneta Drenaje	m			100	100	200	228	250	250	250	237	200	211	2026
Sistema de Ventilación														
Sala Ventilador	u		1	2	2	2	3	2	2	2	2	2		20
Montaje de Ventilador	u			2	2	3	3	2	3	2	2	2	2	23
Habilitación Ventiladores	u	1	2	3	3	1	4	3	3	2	2	2	3	28

Actividad	Unidad	Año 2017												Total
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul.	ago	sep	oct	nov	dic	
Sistema de Traspaso														
Excavación Punto de vaciado	u	0.2		2.0	1.0		3.0		1.0			1.0		8
Desquinche de Pique	u	1		2	1	2		1	2		1	1		11
Blindaje de Pique	u	2.0	1.0		1.0	2.0	2.0		1.0	2.0			2.0	13
Brocal Punto de Vaciado	u		2	1	1	1	1	2		1	1			10
Base martillo	u		2	2	1	2	2	1			1		2	13
Puesta marcha martillo	u		1			5					1	2		9
Excavación Buzon	u		0.7	0.9	0.9	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	11
Construcción Buzón	u		0.8	1.0		1.0	1.0	2.0		1.0	1.0	1.0	1.0	10
Montaje de Buzon	u		0.4	1.0	2.0		2.0		2.0		1.0	1.0	1.0	10
Habilitación Hidraulica	u		1.0	2.0	1.0	6.0	1.0		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	16
Puesta marcha Buzón	u		2.0				5.0			1.0	1.0	1.0		10
Perforación Pozos PA	m	368	300	1,004			680	850	640	240		400	400	4,882
Perforacion pozos NH	m	368	300	1,004			500	400	400			400	400	3772
Perforacion pozos NP	m						180	300	240	240				960
Tiros - Caveback	m							150						150
Hidrofracturamiento	u	7	7	4			4	6	9	9	9	9	9	64
HF NH	u	2	4	4				4	4	4	4	7	7	40
HF NP	u	5	3						2	5	5	2	2	24
Perforación	mb	6,412	3,197	4,026	4,026	5,365	8,083	13,008	10,948	15,553	17,535	16,271	14,997	119,421
Perforación Radial	mb	2,710	1,610	2,439	2,439	3,778	6,496	10,011	8,656	12,436	13,656	13,802	13,410	91443
Perforación Zanja	mb	3,702	1,587	1,587	1,587	1,587	1,587	2,997	2,292	3,117	3,879	2,469	1,587	27978
Socavación y Voladura Batea														
Socavación	m2	610	955	1,015	900	1,135	1,865	2,025	2,855	2,010	2,960	3,610	3,775	23715
Voladura Batea	u	1	1	1	2	2	4	5	3	5	2	2	2	30

Tabla 6: Actividades Esmeralda, rev B 2017 (Codelco, Programa de preparación mina 2017 Rev B, 2017)

4.3.1.2 Actividades

El software, presenta una estructura a base de la definición genérica de actividades, las cuales serán descritas por recursos y/o atribuciones según el problema que se busque resolver. Cada actividad presente en el contenido de la planilla “ACT.txt” deberá presentar los siguientes componentes básicos de manera obligatoria dada la sintaxis en UDESS:

- ID o Código: Nombre de la actividad bajo la codificación correspondiente al modelo trimensual descrito en el caso de estudio.
- ING o Beneficio: Representa el beneficio percibido por la actividad al completarse. Se construye utilizando un número aleatorio entre 9.000.000 y 9.999.999. Incorporar valores en este rango permite al solver del programa resolver el problema dejando de lado el valor económico asignado a cada actividad y concentrando la solución en los tiempos de ejecución de las actividades
- Max Rate: Representa la Tasa máxima de la actividad realizable por mes. En términos del modelo trimestral esta variable indica información muy útil proveniente del modelo anual donde todas las actividades fueron concebidas con un valor de *max rate* a partir de los rendimientos indicados por la GOBM. Luego se puede calcular fácilmente con este indicador el número de semanas por actividad contempladas.
- Recurso: Todas las columnas contienen una magnitud acorde al recurso disponible para cada una de las actividades. Esta variable se mantuvo sin actualización desde el modelo anual, los recursos siguen siendo los mismos tanto para el año como para un mes, mientras UDESS reconozca que existe un cambio en los periodos de evaluación, lo cual se otorga como entrada al modelo directamente en la interfaz del programa.
- Periodos: Así mismo que las actividades, los periodos definidos para el problema se ajustan a la escala descrita, teniéndose 12 periodos para los 3 meses del caso estudio donde cada uno representa una semana. Esto implica para el programa que el *max rate*, que es mensual, se mantenga en su magnitud para cada actividad del modelo.

Codificación: Las actividades se introducirán al modelo, por medio de un código que permitirá identificar todos los aspectos relevantes de ubicación y tipo de obra que se desarrollará. A modo de ejemplo, se presenta una actividad del modelo de un desarrollo horizontal:

Actividad: NPDHC31SZ54T11

Con respecto a la idea anterior, el código para ser representado en la planilla se plasmará como sigue:

- NP: Nivel de Producción
- DH: Desarrollo Horizontal
- C31: Calle 31
- SZ54: Zanja 54
- T1: Tramo 1, segmento 1

Con ello, la actividad quedará definida e identificada en una fila del archivo “ACT.txt” correspondiente al nivel de producción. Dicho archivo tiene por encabezado: el código (ID actividad), el beneficio, *maxrate* y recurso de cada actividad tal como se visualiza en la tabla a continuación:

Codigo	Beneficio	Max rate	NH DH m
BENEFICIO	1,00E+14	1	0
INICIAL	1,00E+14	10000	0
NPDHC31SZ54T11	9442099	1.775.362.319	3.75
NPDHC31SZ54T12	9374003	1.775.362.319	3.75
NPDHC31SZ54T13	9589046	1.775.362.319	3.75
NPDHC31SZ54T14	9844713	1.775.362.319	3.75

Tabla 7: Ejemplo archivo de Actividades (ACT.txt) Esmeralda (Elaboración propia)

Cabe destacar que en relación a la sintaxis, el archivo no puede contener caracteres de acentuación. En tanto a su función principal, este cumple con la tarea de informar a UDESS que debe ir por la ruta más rápida para llegar a realizar la actividad “BENEFICIO”, pues esta tiene asignada la valorización más alta de beneficio. Por último, todos los valores aplican una tasa de descuento entregada al programa al momento que se definen los periodos (10%).

4.3.1.3 Precedencias

Determinar el predecesor y sucesor de las obras se lleva a cabo por medio del criterio de secuencia constructiva, el cual entrega un orden de seguimiento, es decir; muestra aquellas actividades que pueden realizarse de manera paralela y a su vez, muestra las actividades que obligatoriamente deben esperar el cumplimiento y término completo de otras actividades antes de comenzar, es decir, se traza el camino por el cual UDESS puede ir dirigiendo los avances contando a su vez como restricciones del problema de optimización.

Un ejemplo de ello, se muestra a continuación, donde se visualiza una columna predecesora de una actividad, la sucesora, y la columna valor quien está sujeto a la restricción de que si la actividad se realiza en paralelo o no.

predecessor	sucessor	group
INICIAL	NPDHC51SZ51T11	136
NPDHC51SZ51T11	NPDHC51SZ51T12	-1
NPDHC51SZ51T12	NPDHC51SZ51T13	-1
NPDHC51SZ51T13	NPDHC51SZ51T14	-1
NPDHC51SZ51T14	NPDHC51SZ51T21	137
NPDHC51SZ51T21	NPDHC51SZ51T22	-1
NPDHC51SZ51T22	NPDHC51SZ51T23	-1
NPDHC51SZ51T23	NPDHC51SZ51T24	-1
NPDHC51SZ51T24	BENEFICIO	-1

Tabla 8: Ejemplo archivo de Precedencias (PREC.txt) Esmeralda (Elaboración propia)

De acuerdo a la tabla anterior, y consecuentemente a la construcción del modelo caso de estudio, cada actividad seguirá un orden específico y al software UDESS se le deberá entregar una precedencia de ellas, para que este entienda que ruta tomar. Siguiendo la idea de precedencias que se utilizó en el nivel de hundimiento, aquellas actividades que, si se realizan de manera paralelas, se le asignarán un valor entero positivo, y las que no están en paralelo, tomarán el valor de menos uno.

Al software, se entregará un archivo “PREC.txt”, cuyo contenido almacenará la sintaxis en UDESS de todas las actividades que poseen sucesor y que están dentro del periodo de 3 meses a evaluar. Cabe destacar que, si una actividad está precedida por “INICIAL”, no necesariamente significará que la actividad inicia justo en la temporalidad correspondiente al trimestre en evaluación. Así mismo, aquellas actividades que son sucedidas por “BENEFICIO”, puede implicar 2 casos; el primero donde dicha actividad efectivamente termina en el trimestre concordantemente con el modelo anual o bien se corta la actividad finiquitándola para así mantenerla dentro del periodo temporal deseado.

4.3.1.4 Restricciones

El problema de modelamiento se extiende en relación al tiempo de construcción del modelo acorde al número de variables incorporadas, pero UDESS presenta la facilidad para incorporar archivos de texto tanto para las actividades como para las precedencias, sin embargo, no es el caso para el ingreso de restricciones. El hecho de que poder trabajar con archivos de texto es sin duda una gran ventaja, se pueden utilizar herramientas adicionales como programación en VBA para agilizar la construcción de los archivos “ACT” y PREC” de los modelos. Dicho lo anterior, ha sido de utilidad encontrar una manera de incorporar otra herramienta que permita el mejor manejo de restricciones, es en este tipo de entradas donde se entrega la mayor cantidad de información al modelo dado que la forma común de ingreso para el caso de estudio ha sido a través de la interfaz, es aquí donde más tiempo se invirtió, haciendo que en definitiva la metodología fuese lenta en su aplicación al problema.

En relación a las restricciones, para encausar ágilmente hacia el modelo trimestral, se utilizaron distintas formas de manipulación de los archivos UDESS para el mejor manejo de datos y la disminución de tiempo en la construcción de los modelos. Cabe recordar que el archivo codificado que contiene las restricciones en UDESS, es el único que no puede ser ingresado al programa y se trabaja directamente en forma “manual” con la interfaz del programa, no obstante, para ingresar una gran cantidad de restricciones esta forma no es la óptima, dicha interfaz no contiene funciones que aceleren el ingreso de una que se repita muchas veces, lo cual es requisito para restricciones de rango operacional o para aquellas de rango de recursos donde se debe ingresar lo mismo, pero cambiando básicamente solo los periodos en que estas ocurren. Dado el problema anterior se propone lo siguiente:

- 1) Trabajar el código de restricciones desde lo que arroja UDESS (.uds), el cual se puede abrir en formatos de mejor manejo como lo son archivos de texto u Excel. De esta forma se manipulan los datos con una otra plataforma que permita el manejo de mucha data en forma simultánea y sistemática.
- 2) Organizar la data con código programado para re-ordenar y escribir las restricciones de UDESS dentro del archivo extraído en el paso anterior. Esto puede trabajarse tanto en python como en VBA u otro lenguaje de programación tal que cumpla la sintaxis del tipo *Java Script Object Notation* (Json).
- 3) Una vez obtenido el archivo modificado, se re-introduce al programa sobre escribiendo el archivo .uds, lo cual para efectos del programa permite ejecutar el modelo contra las restricciones previamente trabajadas.

Esquemáticamente los pasos se ven en el siguiente flujograma

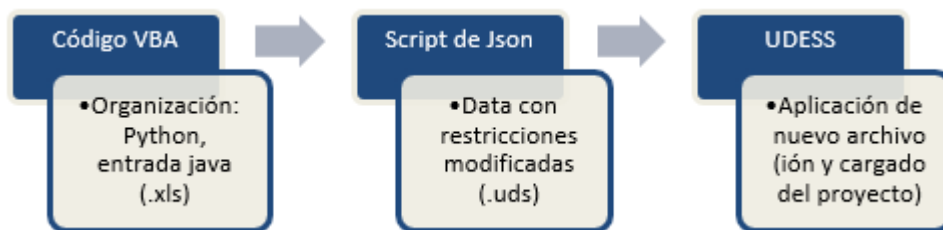


Ilustración 18: Esquema de estrategia para tratamiento de restricciones (Elaboración propia)

Sintaxis de restricciones: Cada tipo de restricción utilizada en el modelo se puede interpretar desde su archivo base (.uds) para efectos de reconocer y con ello organizar adecuadamente las líneas de código sin utilizar la interfaz UDESS, sin embargo, se requiere entender cómo se escriben estas restricciones en la interfaz para aquello por lo que se muestra a continuación la forma en que se imputan las restricciones, su entendimiento hacia el modelo trimensual y como identificarlas según su tipo.

- Restricciones de progreso Límite: Se identifican con el código MP y aplican específicamente para una actividad dentro del conjunto de aquellas ingresadas en el archivo de actividades, es decir, a una fila específica del archivo. Un ejemplo de esto es:

"MP": ["MPC{1}", "NHDHAC6C55FWT1", 1, 3, 1.0, 1.0]

[Nombre Restricción, Actividad, Periodo desde, Periodo hasta, Progreso Mínimo, Progreso Máximo]

Su aplicación en el modelo trimensual tiene el cuidado de adecuar los periodos correctamente, es decir, entre la semana 1 a la semana 12 y mantener aquellas restricciones del modelo anual que están circunscritas en los primeros 3 meses del año 2017. En el caso en que la restricción comienza en los primeros 3 meses, pero su término es más allá del periodo de evaluación, entonces se ajusta el progreso solicitado a un modelo con solución factible tal que se pueda ejecutar la actividad según lo dictado por el plan rev B 2017. Este tipo de restricción opera comúnmente sobre actividades que deben acabar obligatoriamente en un periodo particular y se aplica una a una, es decir, una restricción para cada actividad, de forma única sin agrupamiento.

Esta restricción se caracteriza por estar constituida a partir de los subtramos discretizados de manera individual, destacando que se aplica para actividades como, por ejemplo, desarrollos horizontales, muros, fortificaciones especiales, entre otras. Por obligación, cada actividad a desarrollar en la que se aplica esta restricción, debe iniciar y terminar en el periodo definido, por lo cual se respetan los periodos en los cuales está programada la construcción de las obras.

Esta restricción se aplica en las siguientes actividades distribuidas por subnivel:

- Nivel de Hundimiento:
 - Desarrollo Horizontal
 - Hidrofracturamiento
 - Perforaciones de Hidrofractura
- Nivel de producción:
 - Desarrollos horizontales
 - Muros
 - Fortificaciones especiales
 - Fortificaciones de intersección
 - Hidrofracturamiento
- Sub nivel de ventilación
 - Habilidad ventiladores
- Sub nivel de acarreo
 - Perforación piques
 - Montaje de buzón

Cada una de las actividades anteriores son ejecutadas dentro de las doce semanas correspondiente al primer trimestre del año. Las más numerosas en este tipo de restricción son aquellas aplicadas a los desarrollos horizontales del nivel de producción en donde existen casos en los que deben ser construidos por completo en los primeros cuatro o cinco meses del año (entre enero y abril) lo que es mayor al trimestre considerado para evaluación, por lo cual al discretizar la restricción, se debe considerar un % de avance y estimar así cuantos metros de avance presentará tal desarrollo horizontal. Esto se puede utilizar en cada subnivel para re-definir el límite de aquellas actividades que sobrepasan el periodo de interés.

- Restricciones de recursos operacionales: Se identifican con el código OR y aplican para un recurso completo dentro del modelo sin importar que variable esté dentro del archivo de actividades (ACT.txt), es decir, a la columna del archivo. Un ejemplo de esto es:
"OR": ["ORC{1}", "NH DH metros", 1, 1, 0.0, 84.0]

[Nombre restricción, Tipo de recurso, Periodo desde, Periodo hasta, Mínimo/mes, Máximo/mes]

Su aplicación en el modelo trimensual tiene el cuidado de adecuar los periodos correctamente, es decir, entre la semana 1 a la semana 12 y mantener aquellas restricciones del modelo anual que están circunscritas en los primeros 3 meses del año 2017. En el caso en que la restricción comience en los primeros 3 meses, pero su término este más allá del periodo de evaluación, entonces se ajusta el progreso mínimo solicitado a valor cero liberando el uso de recurso para el último periodo del modelo. De esta forma se simula el cumplimiento de lo dictado por el plan rev B 2017 y no se sobre-exige a los recursos disponibles. Este tipo de restricción son las de menor cantidad, no operan sobre las actividades sino sobre recursos del modelo de manera transversal.

Algunos ejemplos de la relación entre lo imputados al modelo y aquello que proviene de la planificación tradicional (rev B 2017) son aquellos utilizados para demostrar avances en el desarrollo de las actividades en un cierto periodo. A saber:

- DH tiene como recursos los metros de avance
- DV, también tiene como recurso los metros de avances
- FI tiene como recurso unidades construidas
- El DH y DV comparte el mismo recurso que los correspondiente al nivel de hundimiento
- CR presenta como recurso los metros de avance en el periodo definido
- MU corresponde a la unidad construida por periodo semanal

Cabe destacar que aquellos recursos que son consumidos fuera del plazo de las primeras doce semanas del año, se puede ejecutar una proporcionalidad para saber cuánto recurso se ha consumido en el primer trimestre a nivel semanal, por ejemplo; para un desarrollo horizontal (independiente del nivel de ubicación), dice ser construido en 14 semanas, entonces se debe obtener la proporción de cuantos metros se avanzaron en las primeras doce semanas y tener una idea de rendimiento prudente a alcanzar. No obstante a lo anterior, dicha proporcionalidad no es directa, pues se debe cuidar respetar las condiciones especiales que se desenvuelven a través del año para la preparación minera. En el caso particular de avances horizontales, en el primer trimestre del año se ejecuta un *rump-up* que luego solo se vuelve a repetir tras el receso de invierno en junio. Esto hace más comparables dichos momentos del año diferenciándolos de todo el resto, pero tampoco en forma directa si consideramos otros factores como por ejemplo que el *rump up* del primer

trimestre del año es debido a cambios en los contratos de construcción y re-inicio de actividades en la división.

- Restricciones de rango de recursos: Se identifican con el código GR y aplican para un set de actividades contenidas en el archivo de actividades, es decir, para más de una fila en el archivo y además para un recurso (columna) específico a indicar. Un ejemplo de esto es:
[Nombre Restricción, Actividad, Periodo desde, Periodo hasta, Límite inferior, Límite superior]

“GR”: [“RR{1}”, “NH Frente”, "NHDHAC6C55FWT1“ ”NHDHAC6C55FWT2”
“NHDHAC6C55FWT3”, 1, 1, 0.0, 84.0]

Su aplicación en el modelo trimensual tiene el cuidado de adecuar los periodos correctamente, es decir, entre la semana 1 a la semana 12 y mantener aquellas restricciones del modelo anual que están circunscritas en los primeros 3 meses del año 2017 junto a las restricciones operacionales que involucra el caso de estudio. En consecuencia, todas aquellas que contengan actividades fuera de los primeros 3 meses no son consideradas en el modelo trimensual rev B 2017.

Las restricciones GR están aplicadas a las actividades correspondiente a los desarrollos horizontales de la mina, tanto en el nivel de hundimiento como en el nivel de producción. El nivel de hundimiento cuenta con restricciones que están constituidas por dos o hasta tres subtramos. A diferencia del nivel de producción que cuenta con restricciones GR conformadas siempre por pares de subtramos.

Como se mencionó anteriormente, cada segmento de los desarrollos horizontales a nivel anual, fue subdividido en cuatro subtramos, de los cuales cada uno está agendado para ser construidos en un periodo en específico dentro del espectro semanal. Cabe destacar que cada una de las restricciones correspondientes abarca principalmente entre dos a tres actividades discretizadas, es decir, una primera restricción contiene el primer subtramo T11 desde tres sectores diferentes en la mina, para luego continuar con otra restricción para la construcción del desarrollo horizontal discretizado en T12, luego T13 hasta llegar a la construcción final correspondiente al subtramo T14.

4.3.2 Datos de entrada por Subnivel, modelo trimestral mina Esmeralda

Siguiendo el procedimiento establecido en el caso de estudio y su estructura de presentación en el presente trabajo, se procede a la descripción de los subniveles restantes que componen Esmeralda dentro de la ventana temporal establecida, es decir, primer trimestre 2017.

4.3.2.1 Nivel de Producción

Para la construcción y modelamiento del subnivel de producción, al igual que en el nivel de hundimiento, sólo se considerarán los primeros 3 meses de construcción Enero, febrero y marzo del programa Rev B 2017. Dado la experiencia en el caso base, el modelo se construye a partir de actividades que contiene el modelo anual. Cabe destacar que siendo este subnivel el de mayor número de actividades, consecuentemente se genera la mayor multiplicación al respecto de la cantidad de variables en el modelo que otorgan el detalle semanal deseado.

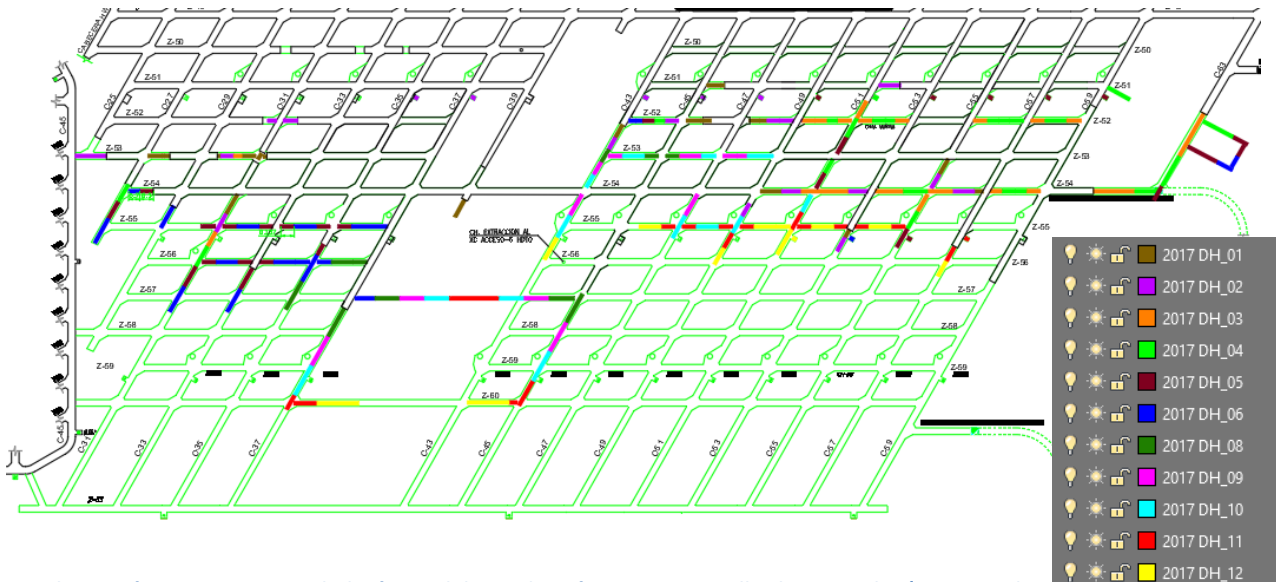


Ilustración 19: Layout y simbología Nivel de Producción ESM, Desarrollos horizontales (Gerencia de obras mina, 2019)

En la ilustración anterior, se aprecian aquellos desarrollos horizontales por construir en color verde, mientras que aquellos tramos de diferentes gamas de colores, son los que se han planificado en los diferentes meses del año, según lo decretado por el programa Rev B 2017.

En detalle los distintos periodos del año se representan con un color del 1 al 12 bajo la simbología a la derecha de la ilustración

Como se mencionó anteriormente, el caso estudio está comprendido por los tres primeros meses del año, correspondiendo al mes de enero representado por el color café, febrero en morado y marzo en naranja. Cabe notar que se aprecian los desarrollos simultáneos observando que, para un mismo color en diferentes lugares del plano, y por tanto del mismo periodo temporal, se deben generar desarrollos y obras del sub-nivel en cuestión.

A continuación, se presenta un diagrama esquemático de la secuencia constructiva del nivel de producción en donde se muestran las actividades involucradas y su discretización, la cual se verá reflejada el archivo de actividades (ACT.txt) como entrada del modelo en UDESS.

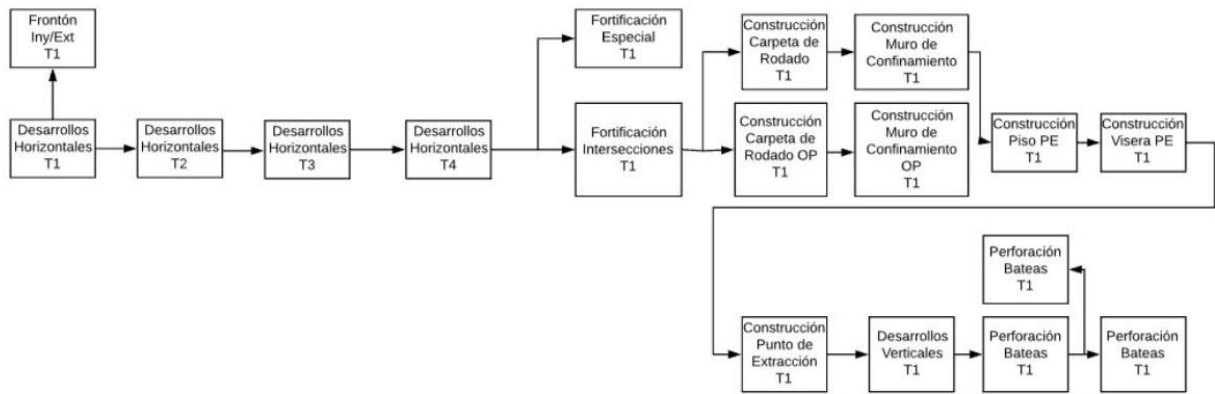


Ilustración 20: Secuencia constructiva Nivel de Producción Esmeralda (Elaboración propia)

En términos de la data, el nivel de producción entrega un total de 679 actividades asociadas a los desarrollos y obras de construcción que operativizan el sector. En tanto que, las precedencias del subnivel obtienen un total de 1952 actividades con algún sucesor y las restricciones asociadas a dicho subnivel alcanzan 274 en total.

4.3.2.2 Nivel de Acarreo

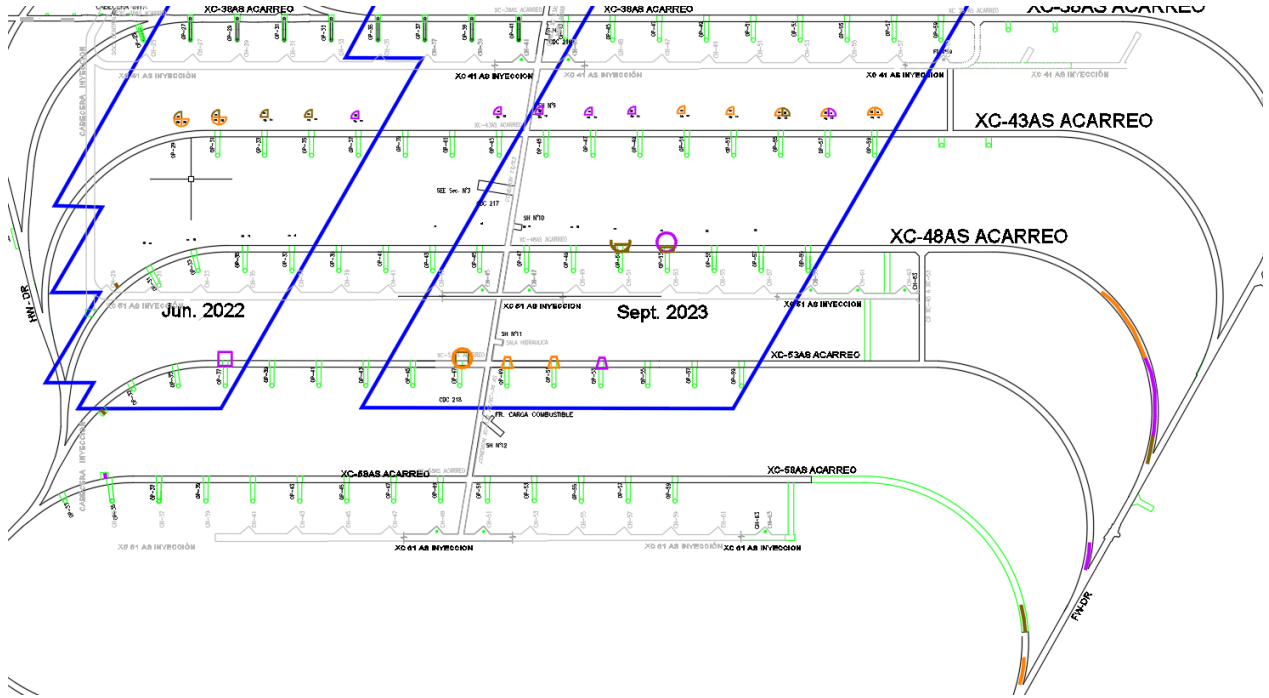


Ilustración 21: Layout Nivel de Acarreo ESM (Gerencia de obras mina, 2019)

En la ilustración anterior, se aprecian aquellos desarrollos horizontales por construir en color verde, mientras que aquellos tramos de diferentes gamas de colores, son los que se han planificado en los diferentes meses del año, según lo decretado por el programa Rev B 2017. Al igual que en los modelos anteriores se utiliza la misma simbología de colores para representar los meses del año siendo enero representado por el color café, febrero en morado y marzo en naranja.

A continuación, se presenta un diagrama esquemático de la secuencia constructiva del nivel de acarreo en donde se muestran las actividades involucradas y su discretización, la cual se verá reflejada el archivo de actividades (ACT.txt) como entrada del modelo en UDESS.

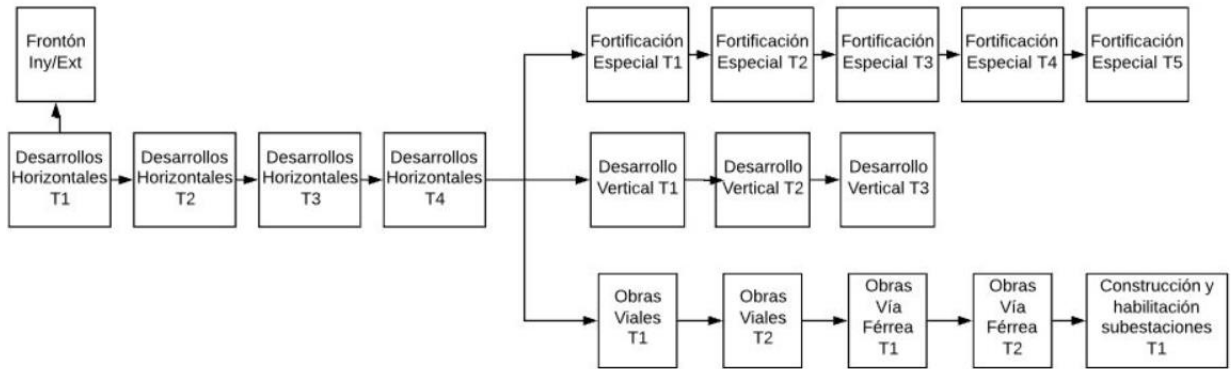


Ilustración 22: Secuencia constructiva Nivel de Acarreo Esmeralda (Elaboración propia)

En términos de la data, el nivel de Acarreo entrega un total de 217 actividades asociadas a los desarrollos y obras de construcción que operativizan el sector. En tanto que las precedencias del subnivel obtienen un total de 462 actividades con algún sucesor y las restricciones asociadas a dicho subnivel alcanzan 35 en total.

4.3.2.2 Subnivel de Ventilación

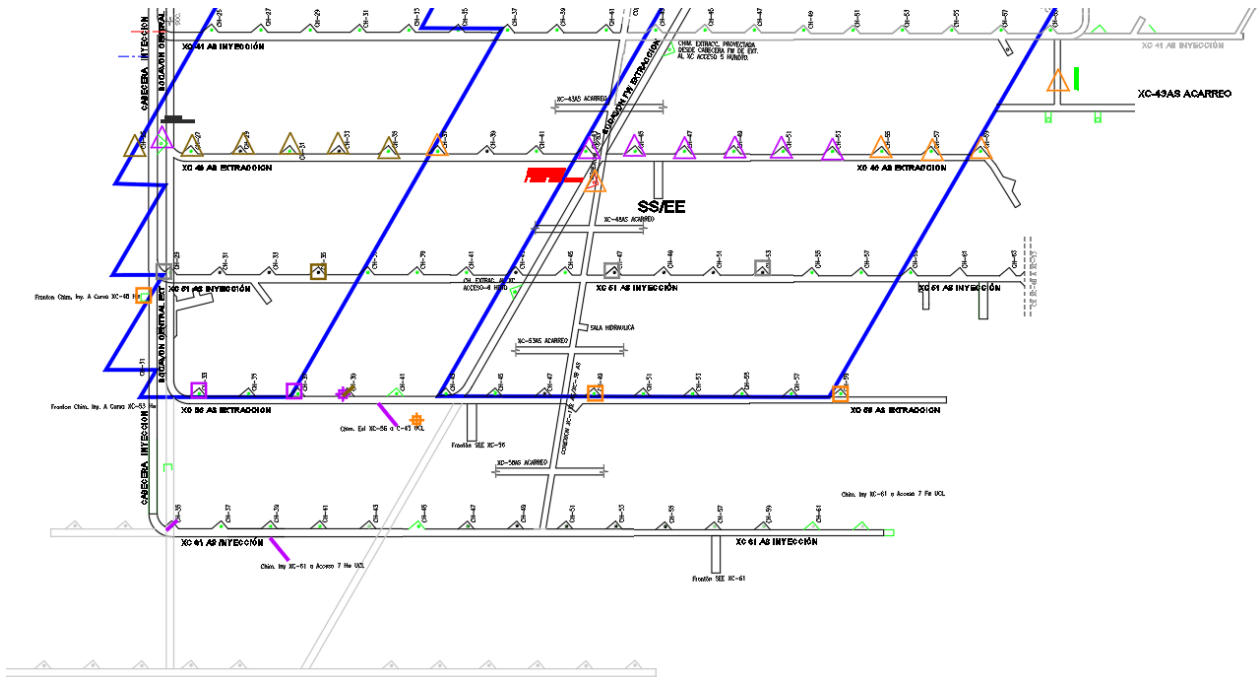


Ilustración 23: Layout Sub-Nivel de Ventilación ESM (Gerencia de obras mina, 2019)

En la ilustración anterior, se aprecian aquellos desarrollos horizontales por construir en color verde, mientras que aquellos tramos de diferentes gamas de colores, son los que se han planificado en los diferentes meses del año, según lo decretado por el programa Rev B 2017. Al igual que en los modelos anteriores se utiliza la misma simbología de colores para representar los meses del año siendo enero representado por el color café, febrero en morado y marzo en naranja.

A continuación, se presenta un diagrama esquemático de la secuencia constructiva del sub-nivel de ventilación en donde se muestran las actividades involucradas y su discretización, la cual se verá reflejada el archivo de actividades (ACT.txt) como entrada del modelo en UDESS.

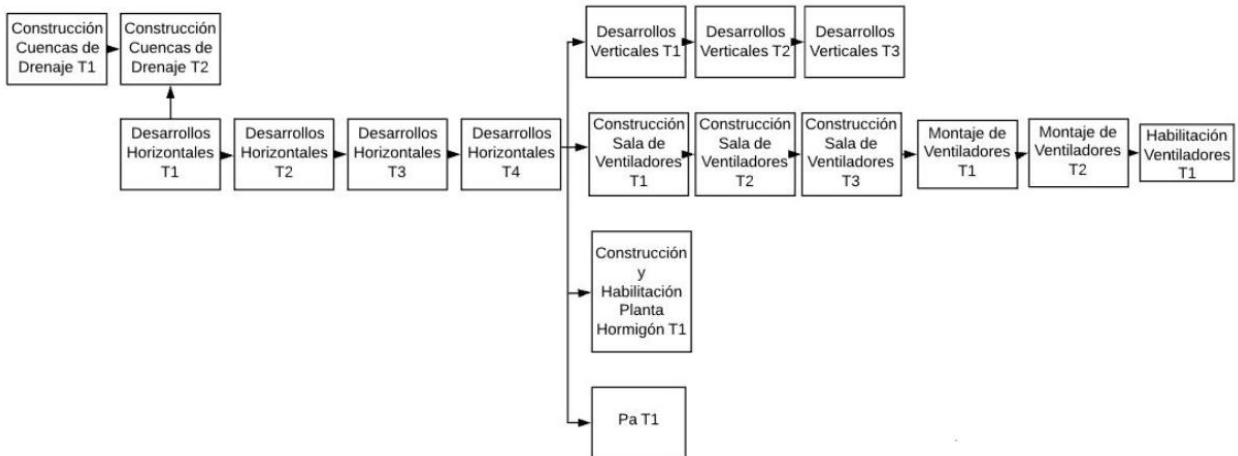


Ilustración 24: Secuencia constructiva Sub-Nivel de Ventilación Esmeralda (Elaboración propia)

En términos de la data, el sub-nivel de ventilación entrega un total de 231 actividades asociadas a los desarrollos y obras de construcción que operativizan el sector. En tanto que las precedencias del subnivel obtienen un total de 543 actividades con algún sucesor y las restricciones asociadas a dicho subnivel alcanzan 27 en total.

Por último cabe destacar que existen 498 actividades encargadas de las conexiones entre subniveles, las cuales traen consigo un total de 1138 precedencias y adicionalmente 131 restricciones que se ingresaron al modelo

5 Análisis y Resultados

Se describe en el siguiente apartado los análisis al respecto del uso de la metodología y sus resultados obtenidos en el diseño del plan trimensual de mediano plazo para Esmeralda.

5.2 Discusión y análisis de resultados caso de estudio

Lo primero que pretende el trabajo a través del caso de estudio es visualizar las diferencias entre el modelo anual y el de nivel semanal

Resultados estadísticos:

Luego de correr el modelo, el archivo instance.xls que arroja UDESS entrega la siguiente información base que fue considerada en el problema de optimización resuelto. Lo anterior se presenta a continuación como las estadísticas básicas del caso de estudio:

Caso de Estudio NH	Modelo Anual	Modelo Semanal
Actividades	55	222
Precedencias tipo "y"	88	491
precedencia tipo "o"	56	63
Total precedencias	144	554
Periodos	3	12

Tabla 9: Estadísticas básicas caso de estudio, modelo de largo y mediano plazo (Elaboración propia)

Se aprecia de la tabla que el número de variables aumenta considerablemente para el caso de estudio, es precisamente esto lo que otorga al modelo de mediano plazo una mirada más cercana y en detalle de las actividades de preparación minera.

El modelo logra correr ejecutando todas las actividades encomendadas y entregando una carta Gantt para las actividades que por su extensión se puede encontrar como anexo al presente informe. El comportamiento en términos del hardware y el software utilizado para su ejecución es eficiente siendo el tiempo de demora hasta llegar a una solución es de 15 a 20 minutos aproximadamente. Esto considerando la utilización del optimizador Gurobi como el solver y la metodología de “Full MIP” con un *MIP gap* de 5.0 % como tolerancia para encontrar solución.

Comparación plan anual v/s plan mensual

Con el objetivo de mostrar gráficamente cómo se comporta el crecimiento de los desarrollos tanto para el modelo Anual en contraste con el de nivel semanal, se muestra a continuación esquemas por periodo (enero: Café; febrero: Morado; marzo: Naranja) del desarrollo de 3 diferentes segmentos de túnel correspondientes al nivel de Hundimiento codificados por NHDHC59SAC5T1 (1), NHDHAC6C55FWT1 (2) y NHDHC47SXC5T1 (3)

Periodo Enero

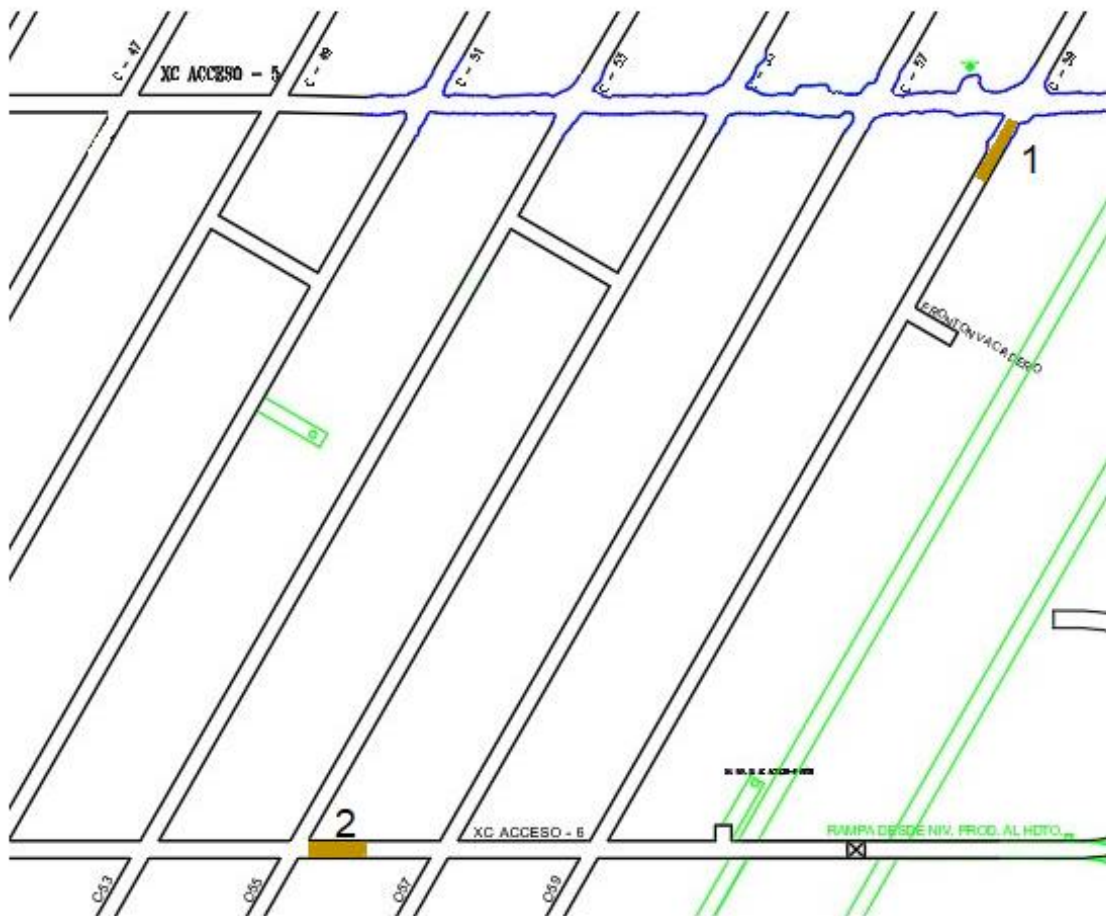


Ilustración 25: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Anual (Elaboración propia)

Se aprecia de la figura que, tanto los desarrollos 1 y 2 se planifican para quedar terminados en el mes de enero y se esquematizan con una barra naranja completa, es decir, no presenta discretización dada la naturaleza del modelo anual donde solo se ven desarrollos por mes. Por otra parte, el modelo trimestral muestra el siguiente comportamiento de acuerdo al agendamiento a nivel semanal

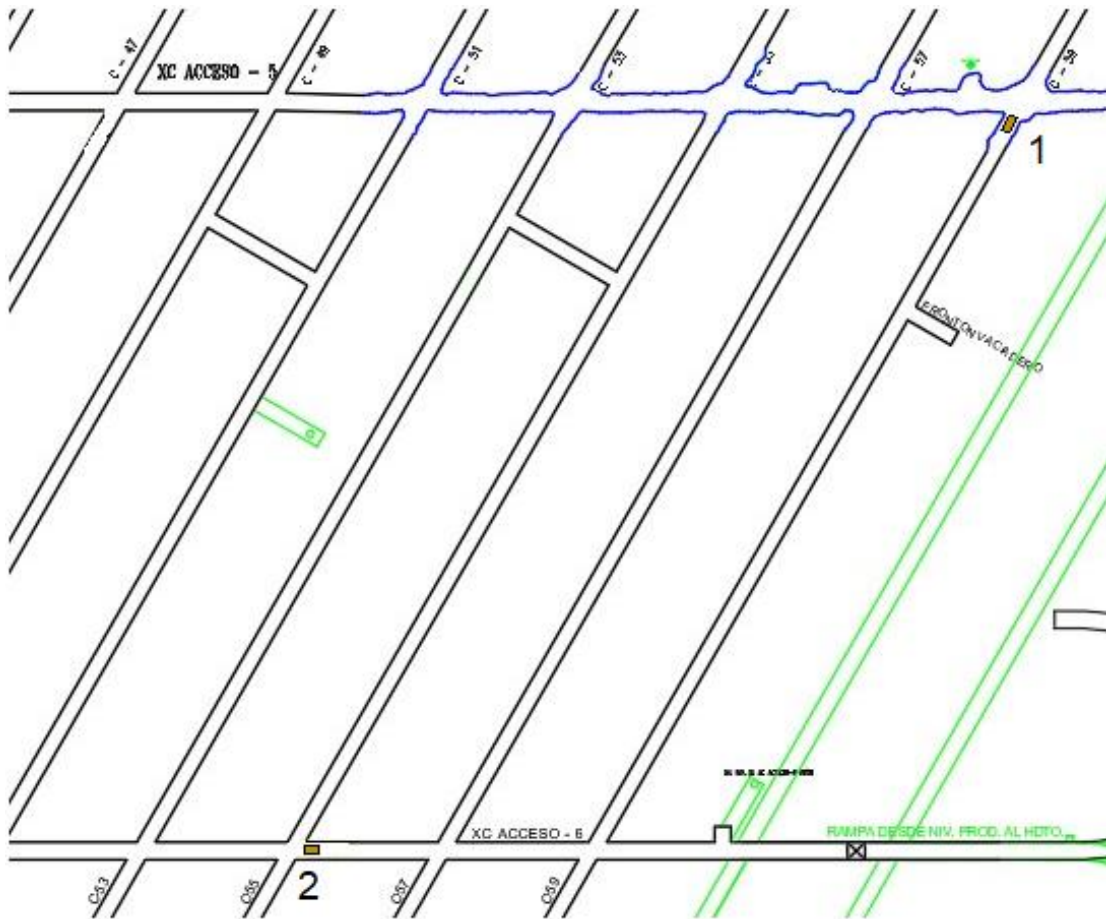


Ilustración 26: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Trimensual, Semana 1 (Elaboración propia)

Se puede apreciar en el modelo trimensual se va generando solo un pequeño segmento del total del tramo 1 y 2 respectivamente. Cabe destacar que, para estos casos el agendamiento se mantiene, es decir, que tanto el modelo Anual como el trimensual determinaron que el agendamiento óptimo involucra la construcción de estos desarrollos para el mes de enero de acuerdo a las condiciones de precedencias, restricciones se hitos utilizados como datos de entrada.

Dicho lo anterior, al observar la cuarta semana del mes de enero se puede ver entonces un desarrollo coherente con la terminación de 1 y 2 en dicho mes tal como se muestra a continuación

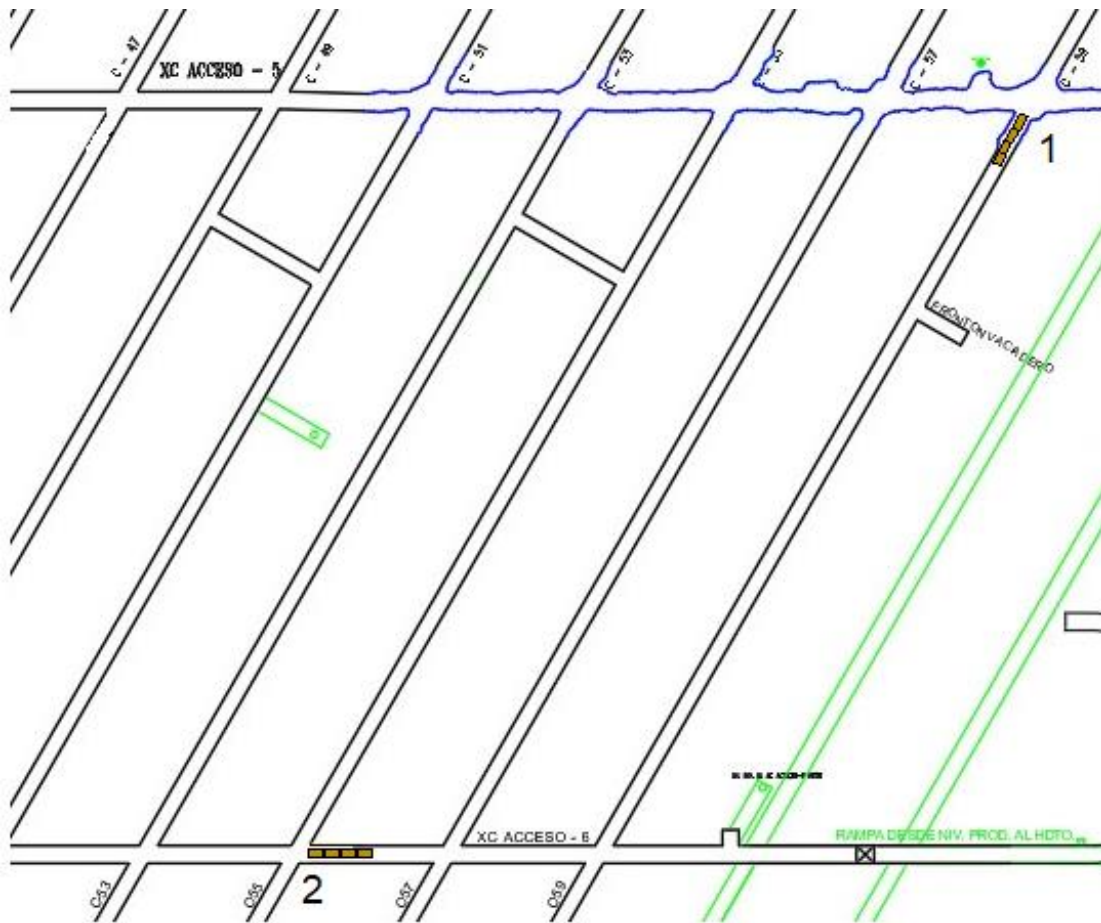


Ilustración 27: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Trimensual, Semana 4 (Elaboración propia)

Se puede apreciar entonces, como tanto para 1 como 2 se ha alcanzado el desarrollo completo de los segmentos igualmente que en el modelo Anual en mes de Enero. Ahora bien, cabe destacar que los desarrollos discretizados no son completamente uniformes, es decir, que el agendamiento no dicta que se desarrolle un 25% del cada sub-tramo en cada semana sino que pueden tener variaciones, las cuales se pueden ver con mayor detalle al analizar el archivo “output.xls” de UDESS.

Periodo febrero

No se muestra ninguna esquemática al respecto, pues para ambos casos de modelamiento, el agendamiento deja sin avances los 3 desarrollos para el mes de febrero.

Periodo Marzo-Abril

Para el último periodo del horizonte temporal del modelo a escala semanal ocurre un comportamiento distinto entre modelos, el cual se describe a continuación

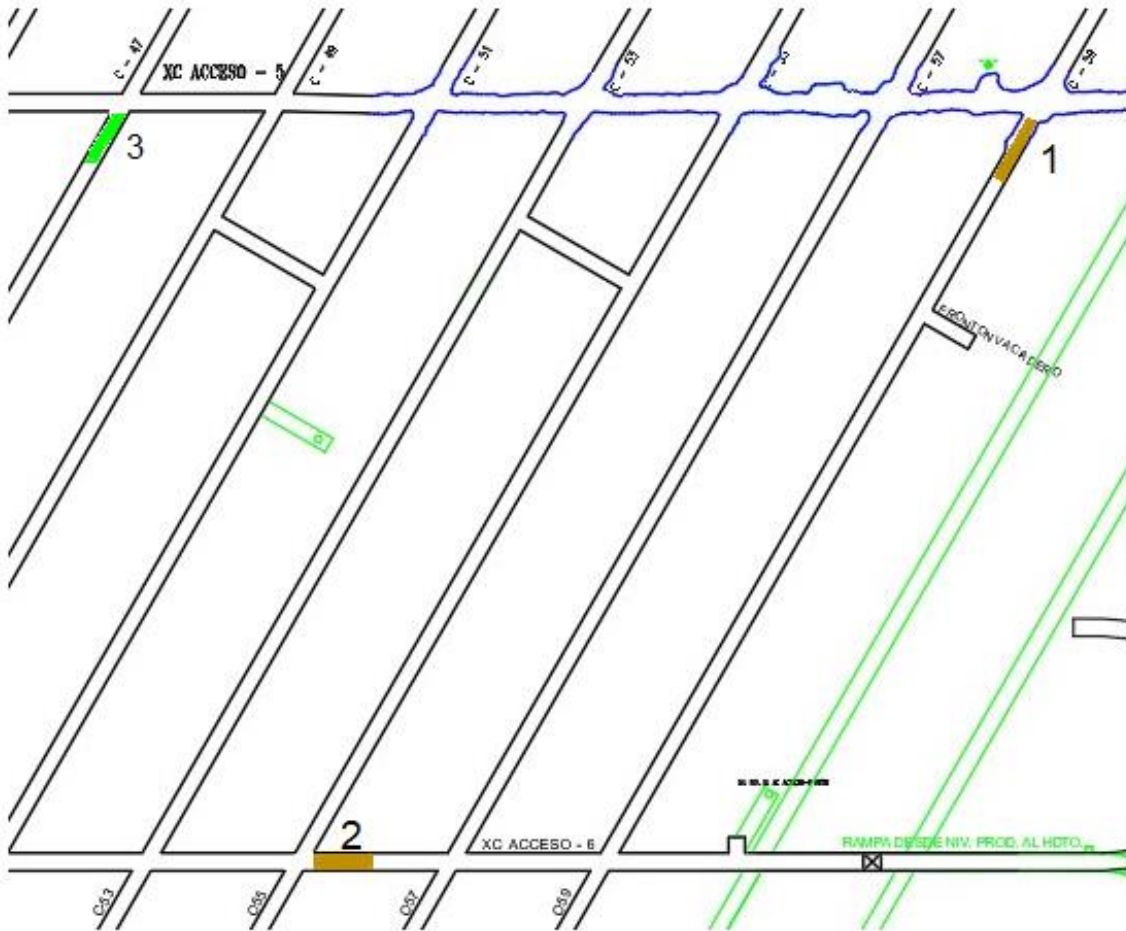


Ilustración 28: Nivel de Hundimiento, periodo de Abril, Modelo Anual (Elaboración propia)

Viendo la figura anterior, es posible evidenciar que el tramo 3 no queda agendado sino para abril, dado el color verde que presenta (marzo es color naranja). Lo anterior, crea una diferencia entre agendamientos de ambos modelos donde para el nivel semanal el tramo 3 queda planificado para marzo tal como se muestra a continuación.

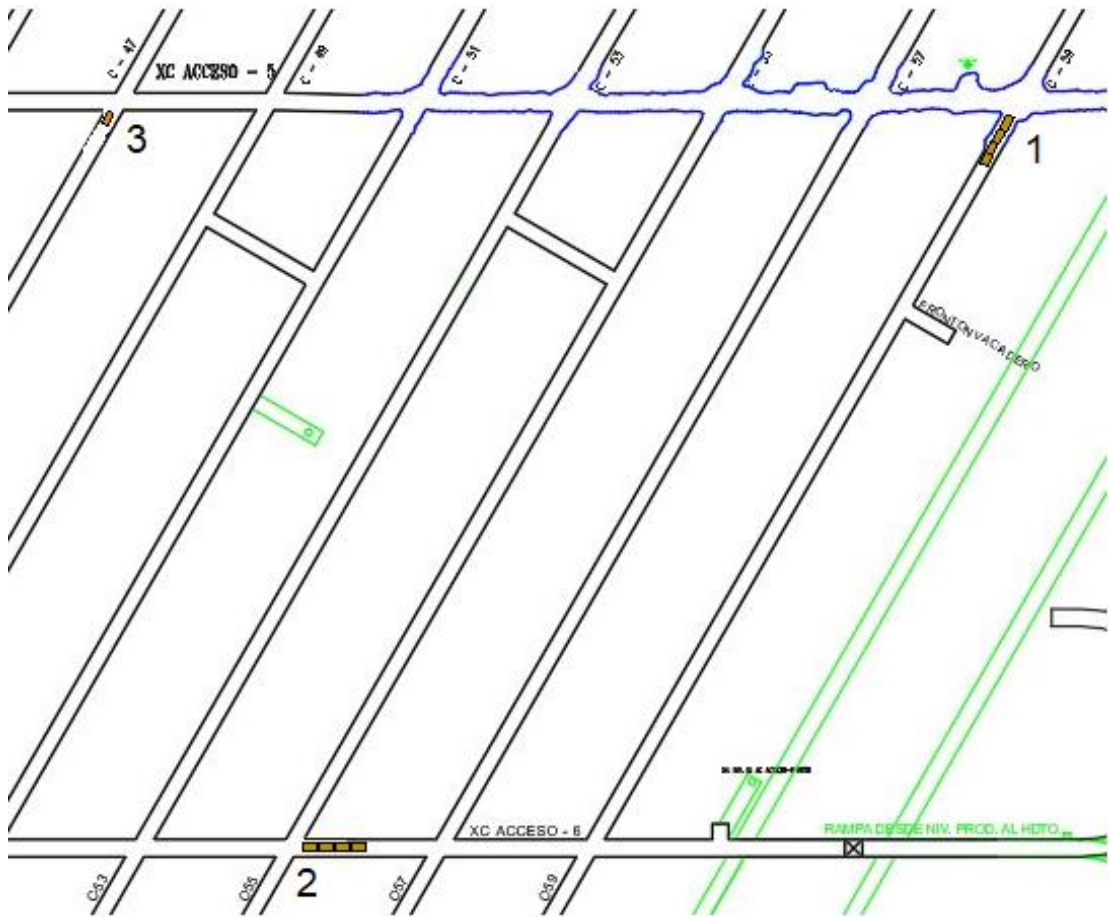


Ilustración 29: Nivel de Hundimiento, periodo de Marzo, Modelo Trimensual, Semana 1 (Elaboración propia)

Se puede ver como en la semana 1 del mes de marzo el modelo tri-mensual incorpora el desarrollo del tramo 3, agendando su primer sub-segmento. Adicionalmente, el modelo dictará que dicho tramo se culmine en el mes de marzo tal como se muestra en la imagen a continuación

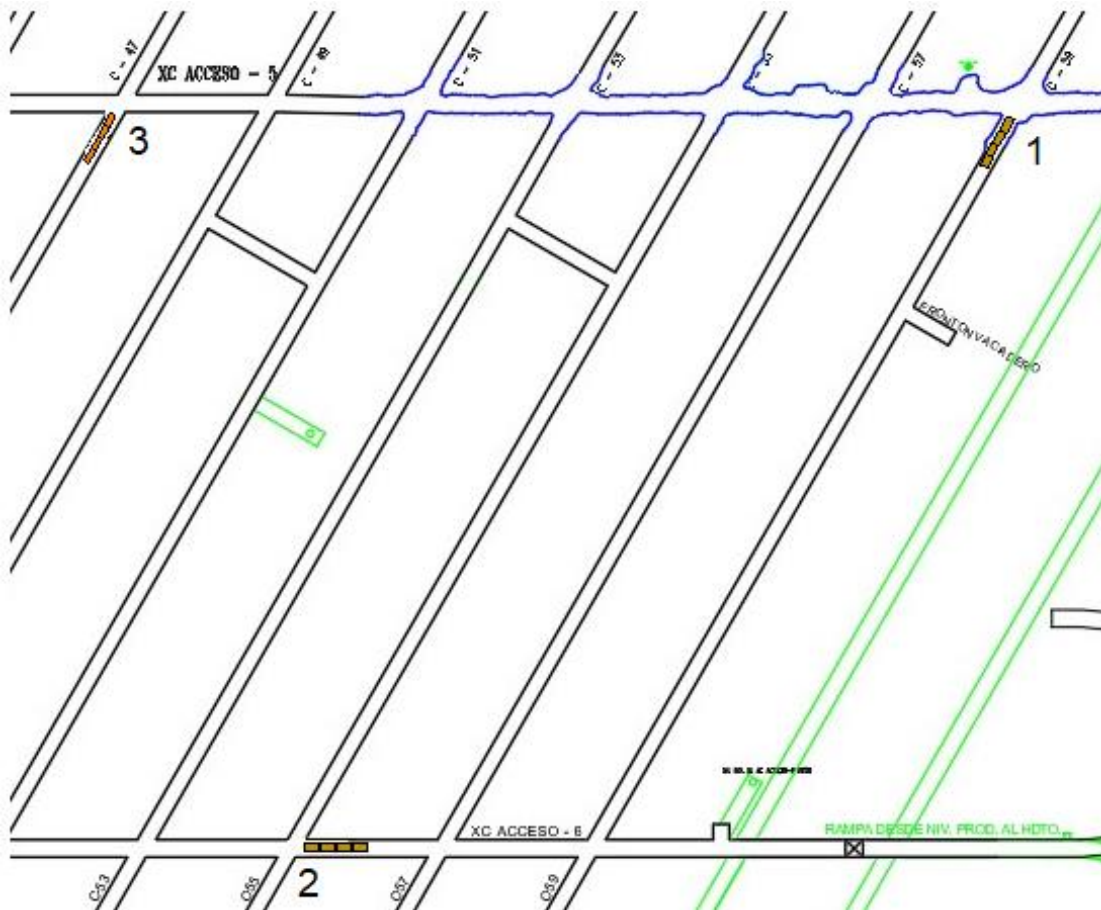


Ilustración 30: Nivel de Hundimiento, periodo de Enero, Modelo Trimensual, Semana 4 (Elaboración propia)

Importante es destacar que hay flexibilidad en los movimientos realizados y por lo tanto se sugiere que existe una optimización de los recursos agendados debido principalmente a la discretización de las obras que ejecuta el modelo a nivel semanal. Esta permite agendar obras por adelantado, si bien perseguirá un mismo “beneficio” en términos de lo solicitado al programa, podrá entregar alternativas al planificador acerca de por dónde guiar la construcción de los desarrollos de preparación minera, en este caso aquellos horizontales del nivel de Hundimiento.

Esta alternativa así como muchas otras que nacen a raíz del nuevo modelo en otros desarrollos de la mina, permitirán una re-evaluación de los recursos utilizados en terreno, dígame horas efectivas de trabajo de equipos, frentes activas, logística de materiales, mitigación de imprevistos y demoras no programadas entre otras variables operacionales de corto plazo que pueden ser impactadas positivamente.

Por último, los sub-segmentos de obras agendados no tienen uniformidad, es decir, que puede que no sean 4 sub-tramos iguales en longitud. Lo anterior es importante al momento de considerar el nivel de avance que permite el método de explotación, las condiciones en terreno, flota de equipos, cantidad de personal, entre otros factores, serán los encargados de operativizar lo dictado por esta metodología de agendamiento. Para entender mejor cómo se desarrolla el agendamiento a través

del plan tri-mensual se realiza una comparación que detalla más acerca de los números detrás de cada sub-tramo aquí esquematizado.

Comparación de modelos numérica

Para visualizar concretamente la diferencia entre el plan original y el nuevo plan generado a raíz de esta metodología se muestra a continuación un extracto del entregable de UDESS donde particularmente se muestra la actividad del Hito número 6 (Conexión XC Acceso 6 UCL con rampa lado Fw) y su desarrollo en color rojo.

Actividad	Enero	Febrero	Marzo
NHDHAC6C55FWT1	1	0	0
NHDHAC6C55FWT2	0	1	0
NHDHAC6C55FWT3	0	0	1
NHDHAC6C55FWT4	0	0	1
NHDHAC6C59FWT1	0	1	0
NHDHAC6C59FWT2	0	0	1

Tabla 10: Vista ampliada, plan de largo plazo, caso de estudio (Elaboración propia)

La tabla anterior muestra los colores por mes junto al indicador numérico equivalente al porcentaje de cumplimiento agendado por el programa. Luego, para el extracto del plan anual se aprecia que la actividad se concreta tal como se solicita para Marzo, se destaca que el agendamiento de UDESS muestra que la actividad comienza en Enero y termina durante el tercer mes del caso de estudio indicando un valor 1 para todos los tramos asociados al Hito equivalente a que se completa en un 100% la longitud de los tramos evaluados

Actividad	Enero				Febrero				Marzo			
NHDHAC6C55FWT11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT12	0	0.584541	0.415459	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT21	0	0	0	0.326203	0.673797	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT22	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT23	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT24	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT31	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
NHDHAC6C55FWT32	0	0	0	0	0	0	0	0	0.227209	0.772791	0	0
NHDHAC6C55FWT33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.454418	0.545582	0
NHDHAC6C55FWT34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.681627	0.318373	0
NHDHAC6C55FWT41	0	0	0	0	0	0.12309	0.461451	0.415459	0	0	0	0
NHDHAC6C55FWT42	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
NHDHAC6C55FWT43	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
NHDHAC6C55FWT44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
NHDHAC6C59FWT11	0	0	0	0	0.790463	0.209537	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C59FWT12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
NHDHAC6C59FWT13	0	0	0	0	0	0.395232	0.604768	0	0	0	0	0
NHDHAC6C59FWT14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
NHDHAC6C59FWT21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
NHDHAC6C59FWT22	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
NHDHAC6C59FWT23	0	0	0	0	0	0	0	0	0.916667	0.0833333	0	0
NHDHAC6C59FWT24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tabla 11: Vista ampliada, plan de mediano plazo, caso de estudio (Elaboración propia)

Por otra parte, de la figura anterior el plan de a escala semanal con las mismas restricciones y bajo el mismo Hito de cumplimiento ofrece una solución diferente al plan de largo plazo en términos de la flexibilidad de construcción reflejado en la ruta de agendamiento elegida. Se puede apreciar que, en este caso cada segmento dentro de un mes representa una semana y el porcentaje de cumplimiento del Hito también alcanza su totalidad a fin de marzo tomando en cuenta las

restricciones del problema. Sin embargo, es importante notar que para este caso la construcción de algunas obras queda adelantada para el mes de febrero como lo es el caso de NHDHAC6C55FWT41 donde se comienza en la segunda semana de febrero, es decir, 3 semanas antes que lo presupuestado por el plan anual. La segmentación en semanas para cada uno de los tramos puede verse parcializada en la ilustración, la cual ejecuta su cumplimiento en porciones de avance tal como las franjas rojas lo indican. En este caso la actividad termina cuando el segmento 4 de una actividad llega al valor 1 (100%), lo cual se puede comprobar sumando los valores decimales.

Luego, tomando en consideración todas las obras que son realizadas en un periodo anterior al que presupuesta el plan anual se tiene una anticipación de casi un mes completo comenzando las obras ganando 3 semanas en las que cualquier problema de manejo de logístico es subsanable en la planificación de preparación minera de corto plazo. Esto indirectamente puede contribuir a la baja de costos, pues se puede preparar materiales y equipos para fechas más tempranas y precisas.

En términos del alcance de la discretización, la Carta Gantt indica que algunas semanas pueden agendar avances diferentes, es decir, semanas con altos porcentajes de avance, pero también otras con muy bajo porcentaje para un determinado segmento. Esto podría ser llevado a un análisis bajo una mirada de aún más corto plazo, si bien puede haber porcentajes bajos para un determinado segmento, existirá un mínimo tal que se respete el avance diario de Perforación y Voladura, lo cual pasa a ser la discretización máxima aplicable al desarrollo de frentes horizontal. Por ejemplo, se puede asumir que el avance diario mínimo de una frente puede ser de 2m diarios, considerando el peor de los casos donde haya existido interferencia u otras dificultades en un turno con 2 disparos. Considerando lo anterior se puede imponer a las estrictiones un progreso mínimo. Por otro lado, las restricciones fueron construidas tal que el avance mensual dado por el programa RevB 2017 se siguiese respetando, pero a la vez permitiendo flexibilidad de avance entre semanas de manera que lo que no se alcanzase a realizar en una se pudiese terminar en el siguiente segmento, lo cual en la práctica no se cumpliría para segmentos con muy bajo porcentaje de avance agendado.

Restricciones:

En términos de la metodología para modelamiento, se aprecia que, dado el aumento considerable de las variables por la discretización, se incrementa consecuentemente el número de restricciones incluso superando el aumento en número de variables. Esto último desafortunadamente, si bien no ha generado problemas con la interfaz del programa, puede ser un problema para el modelo completo de la mina por lo que buscar una estrategia de re-construcción o re-agrupación para las restricciones del problema es de gran utilidad.

Restricciones	Cantidad
Recurso operacional	6
Progreso límite	35
Rango de recursos	222
Total	263

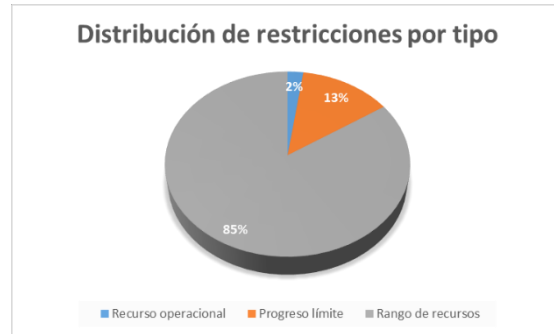


Tabla 12: Distribución de restricciones, Caso de estudio (Elaboración propia)

Gráfico 1: Distribución de restricciones, Caso de estudio (Elaboración propia)

Entrando en detalle respecto de cada tipo de restricción, se tiene que hay algunas que se crecen notablemente mucho más que otras como resultado de la discretización. Lo anterior es de importancia dentro del análisis, permitiendo apreciar el mayor manejo de datos que abarca el problema a fin de incorporar la visión de mediano-corto plazo. Adicionalmente, se pone a prueba al agendador bajo esta nueva exigencia donde hay mayor cantidad de data procesada. A saber:

- Restricción de recurso operacional: restricción que limita el consumo de un recurso dado para todas las actividades del modelo. Es el tipo de restricción más versátil dado que aplica para un conjunto de periodos y las actividades contenidas en este. Dicho esto, al ingresarlas al programa son las de menor cantidad.
- Restricción de progreso límite: Se utilizó esta restricción para los Hitos de cumplimiento primordialmente, este tipo de restricción requiere que se identifique la actividad específica. Dicho esto, se buscan todas las actividades que conforman los Hitos, las cuales pese a que por haberse discretizado y aumentado el número de actividades, no son la mayoría.
- Restricción de rango de recursos: Este tipo de restricción al utilizarse para dar límite al número de frentes crea el mayor número de estas al tener que incorporarse una por una a determinados grupos de variables, las cuales en el caso de desarrollos horizontales se cuadruplicaron al respecto del modelo anual, razón por la que se incurre consecuentemente en un mayor tiempo dividido en determinar cuales son los grupos y otorgar a cada uno esta restricción por el número los periodos que corresponda..

Es importante destacar algunas observaciones relevantes al construir la metodología e implementarla en el nivel de hundimiento

Dificultades y consideraciones del caso de Estudio

- Se debe destacar que el modelo base presenta el caso de planificación de manera anual, por lo que, al usar esto como base para el modelamiento de la preparación minera, se debió filtrar aquellas codificaciones que están fuera de la temporalidad de evaluación para esta investigación. Este trabajo se realizó en Excel, no obstante, el manejo de datos obliga al uso de herramientas como VBA u otras de manejo de

- datos, de otro modo manualmente toma un tiempo bastante extenso que resta competitividad a la metodología al respecto de la planificación tradicional.
- La magnitud de los datos presentados no permitió una eficiencia al 100% en el uso de la metodología para el caso de estudio dado que, al ser el primer test para el programa, los datos se filtraron e imputaron en forma manual, usando funciones básicas de Excel y utilizando la interfaz de UDESS. Dicho lo anterior, el margen de error en el caso de estudio es por consecuencia mayor que para el modelo Trimensual completo de la mina.
 - Los modelos son susceptibles a error de arrastre por codificación, por ejemplo, no presentan revisión del script Json en UDESS más que la pantalla DDOS, en varias oportunidades no entrega información precisa sobre un posible error. Dicho lo anterior, para encontrar errores de escritura, lectura de datos o por factor humano, se requiere imperativamente de herramientas tales como “Sublime text” y validadores de código Json a fin de codificar en forma ágil, revisar visualmente y en manos de solo Excel hacen más lenta la identificación de errores de sintaxis y también pueden dificultar el movimiento de datos hacia los archivos de texto que solicita UDESS tanto para actividades (ACT.txt), precedencias (PREC.txt) como restricciones (.uds).
 - En los primeros casos donde se realizaron modelos de forma manual, fue de gran necesidad la generación de una técnica de revisión archivos para obtener ventaja frente a los problemas de magnitud de datos versus posibles errores de arrastre buscando así certeza de los resultados obtenidos. Lo anterior es tarea que resuelve más adelante el modelo Trimensual completo

5.1.1 Conclusiones Caso de Estudio

Se puede construir un modelo de mediano plazo a nivel de caso de estudio incorporando las restricciones de un plan anual (largo plazo) y otras de nivel semanal (mediano-corto plazo). Vale destacar que la comparación próxima será utilizando el modelo Trimensual integrando todos los subniveles para ver el comportamiento y adecuación de los criterios de mediano plazo. Por otro lado, dado que paralelamente se desarrolla una metodología de planificación a corto plazo en Delphos, se mantendrá la coordinación activa para incorporar aquellas actualizaciones que influyan sobre el modelamiento a nivel semanal de este trabajo.

Acorde a la metodología de construcción del modelo anual (largo plazo) se ha seguido la recomendación en que la metodología utilizada, parte por un nivel en que el volumen de actividades más bajo o intermedio, especialmente para el caso de estudio que es la primera prueba en UDESS. Esto permite ir realizando pruebas cortas al modelo para verificar que está haciendo lo que se desea que haga, y además otorga confianza y rapidez en los niveles más complejos.

En términos del funcionamiento de UDESS para el cometido, no se generaron mayores problemas para el software. Sin embargo, dado la discretización de los niveles restantes para completar el modelo de la mina esmeralda, se evaluará el rendimiento del programa nuevamente en el modelo integrado.

La discretización del modelo anual permite al modelo de mediano plazo obtener una vista más amplia y detallada sobre cómo cambia el comportamiento de las actividades a nivel semanal. El impacto más importante es el reacomodo de las actividades pudiendo en varios casos cambiar el orden y adelantar el inicio de determinadas obras. Esto contribuye positivamente al modelo su planificación de preparación minera e indirectamente puede disminuir los costos y tiempos de construcción.

En relación a las restricciones, se debe encontrar una manera más ágil de ingreso al programa dado que el modelo de mediano plazo contempla un número significativamente mayor de actividades y el programa actualmente solo cuenta con el ingreso “manual” de las restricciones. Una herramienta adicional o complemento al programa debiera poder otorgar la velocidad buscada y por ende mejorar la metodología de modelamiento a mediano plazo de manera general.

Se ha seguido evitado el uso de restricciones de incompatibilidad, dado que, al tener gran número de actividades, es conveniente utilizar restricciones de rango de recursos, lo cual puede tomar más trabajo en el modelamiento, pero permite mayor precisión y reduce la cantidad de restricciones a crear considerablemente. Por otra parte, su remplazo se utilizaron restricciones de progreso límite en vez de las de periodo de inicio, las primeras son más versátiles y se evita aumentar con esto el tipo de restricciones en el modelo.

5.2 Resultados y análisis Modelo Trimestral

5.2.1 Resultados estadísticos

Se presenta a continuación una tabla resumen de los datos de entrada al problema de optimización a resolver en UDESS

Subnivel	Actividades	Precedencias	Restricciones
NH	214	257	190
NP	679	880	274
NA	217	257	35
SNV	231	266	52
Conexiones	498	553	131
Total	1349	2213	682

Tabla 13: Datos de entrada modelo Trimensual Esmeralda

De acuerdo a la tabla anterior, lo primero importante a señalar es que desde se mejora el caso de estudio se modifica el nivel de hundimiento considerando 8 variables menos, pero incrementando el número de precedencias a 693 incorporando algunas que antes no estaban siendo consideradas por el modelo. Igualmente, con las restricciones aumentan su cantidad en 3 veces respecto al caso de estudio aproximadamente.

Lo anterior, se debe principalmente a que existen variables que no pertenecen al universo temporal evaluado, es decir, 3 meses. Además de lo anterior, en las precedencias se consideran ahora las restricciones que unen un subnivel con otro a través de las denominadas “Conexiones” lo cual en consecuencia aumenta el número de restricciones que incorpora el modelo de optimización.

De las actividades

Desde la perspectiva del rendimiento del software al correr el modelo completo, vale mencionar que el hecho de escoger un horizonte temporal de 3 meses es positivo para correr los distintos casos que se desea probar, dado que con el número actual de variables UDESS toma aproximadamente un par de horas en llegar a resultado de agendamiento óptimo. Dicho lo anterior, construir un modelo anual en base a semanal podría gastar mucho más tiempo de procesamiento para el problema. Las condiciones en que se ejecutó el problema en términos de hardware son utilizando 12Gb de RAM con un procesador Core i7 bajo la opción MIP y Gap de valor 5.00. De acuerdo a la consola del programa el valor de la primera incumbente es encontrado a los 220 (s), lo cual en tiempo real es aproximadamente a los 10 minutos desde que se ejecuta el problema, no obstante, el proceso completo toma aproximadamente entre 30 minutos (14 periodos) a 2 hrs, (60 periodos) dependiendo del número de periodos adicionados al modelo.

El incremento de las variables, si se compara con el modelo de horizonte anual, mantiene el crecimiento particular de cuadruplicar los desarrollos horizontales y se segregan las otras variables

de acuerdo al *max rate* que presentan. Cada actividad toma en consideración para UDESS tener un máximo de veces a desarrollar a través de los rendimientos entregados en rev B 2017 por tanto existe un número máximo de semanas que puede tomar la realización de una actividad. Dicho lo anterior se utilizó la razón *Semanas/Actividad* para determinar en forma más adecuada como discretizar una determinada actividad.

Para comparar cómo se comportan las actividades entre los modelos trimensual y Anual para el horizonte temporal pre-determinado se presenta la siguiente gráfica

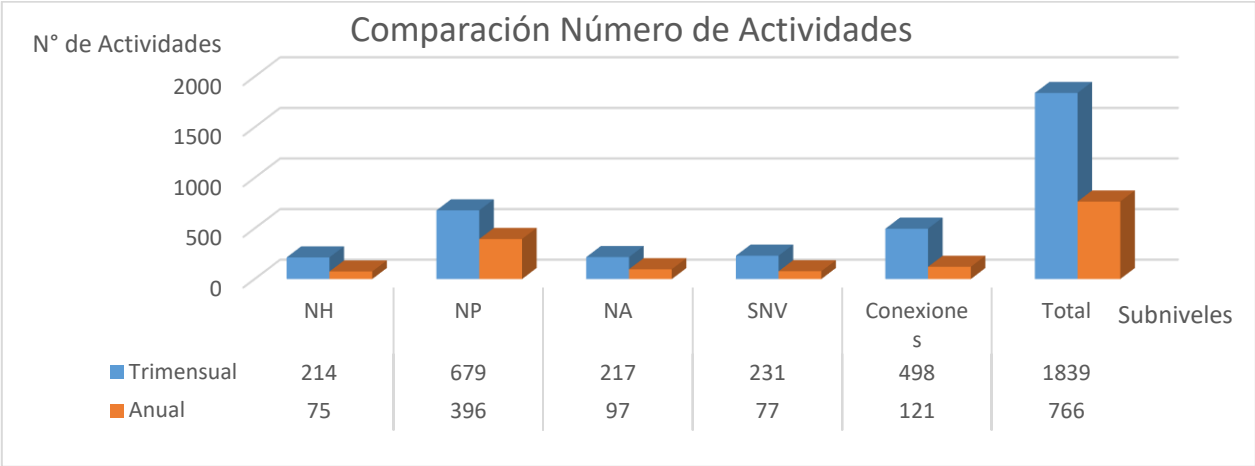


Gráfico 2: Comparación de actividades, Modelo Anual-Trimensual

Se observa que, si bien existe un aumento considerable en el número de actividades para todos los subniveles, el ajuste realizado utilizando el indicador *Semanas/Actividad* para la discretización de las variables, se atenúa este efecto al contar una triplicación, en lugar de cuadruplicación de las actividades para todos los subniveles. No así, en el caso de las conexiones, donde se incrementó a 4 veces aproximadamente. Sin embargo, este aumento es coherente con el de los demás subniveles, dado que involucra la integración del modelo.

De las precedencias

En términos de las precedencias vale mencionar que son el tipo de variable que más aumenta en cantidad al considerar la secuencia constructiva de cada nivel, la discretización en cada caso y la conexión inter-niveles. Cuando se distinguen en precedencias de tipo “y” o del tipo “o” se obtiene la siguiente gráfica



Tipo de Precedencia	Cantidad
tipo y	2065
tipo o	222
Total	2287

Gráfico 3: Distribución de precedencias por tipo

Cabe mencionar que, el archivo *instance.xls* que entrega UDESS como salida al problema, este realiza un manejo interno de las precedencias filtrando líneas que le son innecesarias por lo que en solo contabiliza las actividades que al menos poseen una precedencia a diferencia del archivo PREC.txt donde se registran mayor cantidad de variables (4861). Al igual que, lo representado en el caso de estudio, se ve reflejado como el mayor aumento en cantidad de variables ocurre en las precedencias del modelo donde tan solo un 10% del total son de tipo “o”. Esto último, se debe a que toda variable discretizada genera precedencias de tipo “y” dado el criterio otorgado al modelo. Se podría indagar en cada sección de tramo segmentado y probablemente poder asignar dependencias de tipo “o”, no obstante, esto generará resultados que siendo más óptimos en el papel no lo serían en terreno. Principalmente porque, dicha medida ocasionaría sería un aumento de obras con avances intermedios, es decir, dejando actividades sin terminar, no puede elucubrarse con certeza que esté correcto, dado que en el ciclo minero hay actividades que imperativamente deben realizarse por completo en su bloque de tiempo. Un ejemplo de esto, sería la tronadura y ventilación de gases como parte importante y delicada en cuanto a la seguridad de los trabajos en minería, sin embargo, ese nivel de detalle está por sobre el *zoom* que otorga este modelo de preparación minera.

Por otra parte, cabe recordar que el archivo de precedencias crece arduamente, sin embargo, se limita en el mes 3. Por lo tanto, toda aquella actividad que pasase de dicho periodo no es considerada y la predecesora de dicho caso debe ser la última para el modelo. En consecuencia, para culminar las actividades de acuerdo a los 3 meses de estudio se forzó sucesor “BENEFICIO” a las actividades que están al borde del universo estudiado.

Con estos ajustes se obtiene la siguiente comparación entre ambos modelos para los meses de enero, febrero y marzo.

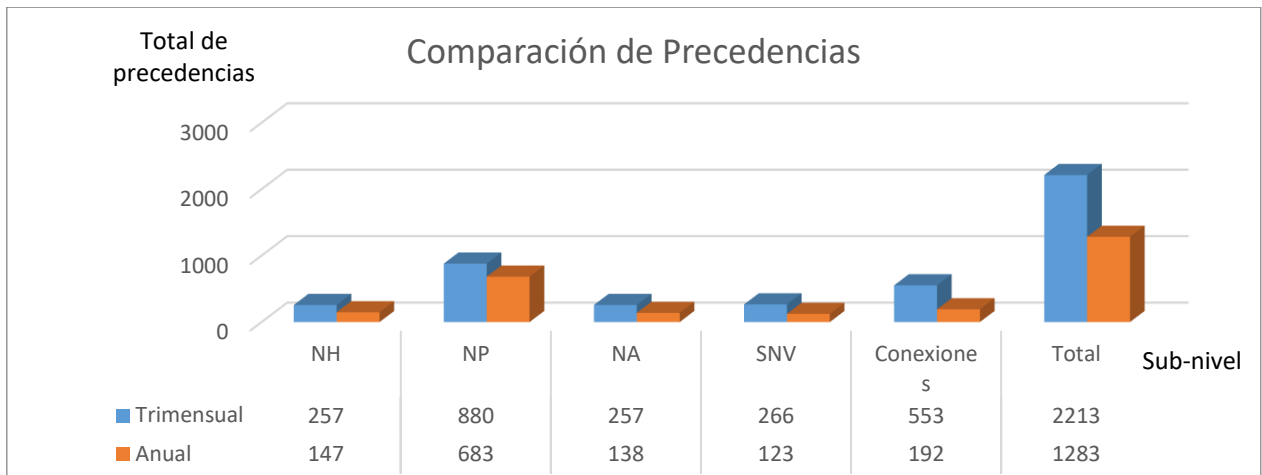


Gráfico 4: Comparación de Precedencias, Modelo Anual-Trimensual

El comportamiento es similar al de comparar las Actividades por subnivel, es decir, un aumento de cantidades en todos los casos destacándose este efecto nuevamente en el nivel de producción y que en suma total se observa cómo se duplican las precedencias desde un modelo a otro dado la discretización a nivel de detalle semanal.

De las restricciones

Por último, analizando el tratamiento que se brindó a las restricciones, vale la pena la utilización de Json como lenguaje de creación para el script. Esto dado que se ahorra un tiempo de días completos al ingresar las restricciones bajo un archivo que puede ser modificado a merced del programador. De acuerdo al archivo *Instance.xls* arrojado por UDESS la distribución en el uso de cada tipo de restricción se muestra a continuación

Subnivel/tipo de restricción	GR	MP	OR	Total por subnivel
NH	48	134	8	190
NP	83	175	16	274
NA	0	19	16	35
SNV	0	40	12	52
Conexiones	0	131	0	131
Total por tipo	131	499	52	682

Tabla 14: Cuadro resumen de restricciones modelo Trimensual

Se puede observar que, sin duda los subniveles de Hundimiento más aun el de Producción se llevan la mayor cantidad de restricciones dado el mayor número de actividades involucradas. Por otra parte, en cuanto al tipo de restricciones, las de progreso límite son las que mayormente fueron utilizadas en el modelo Trimensual. Lo anterior, porque las conexiones entre subniveles conllevan el uso de este tipo de restricción

Cabe notar que, al igual que en los casos anteriores, la cantidad de restricciones es aumenta al respecto del modelo anual, lo que es consecuente con la discretización realizada. Sin embargo, el aumento no alcanza la misma proporción dado que tal como se vio en la sección de Datos de entrada del problema, se redujeron las de tipo OR para los periodos asociados al tercer mes (del 9 al 12) y se agregaron otras por concepto de progreso límite para circunscribir las actividades al horizonte temporal pre-definido.

Una distribución del uso de restricciones para el modelo Trimensual puede verse a continuación

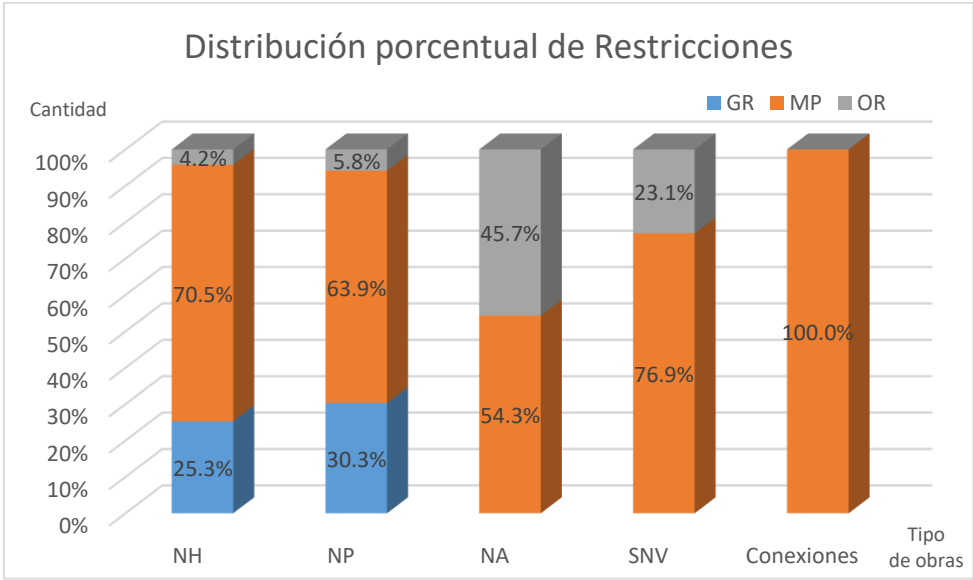


Gráfico 5: Distribución de restricciones por tipo y subnivel , modelo trimensual Esmeralda

De la gráfica se aprecia la distribución porcentual de restricciones por cada subnivel acorde, la cual obedece al tipo de problema operacional que circunscriben. Al observar por tipo de restricción, se aprecia que de manera transversal al modelo este está cargado al uso de restricciones de progreso límite dado que estas no aplican en bloques ni transversalmente para un subnivel o periodo, sino que se imputan en forma independientemente para cada actividad.

Se destaca que las obras de conexiones tienen un 100% de restricciones MP, dado que están libres de realizarse en múltiples frentes o de limitarse sus recursos, pero si deben obedecer al horizonte de evaluación tal que se cumplan previo al término del mes 3.

Cabe destacar que dentro de aquellas que clasifican del tipo límite de recursos (OR), se probó el modelo primero restringiendo al periodo asociado al tercer mes (Marzo), sin embargo, la redistribución y utilización de recursos deja infactible la solución al problema por lo que se liberaron las restricciones entre los periodos 9 al 12 para todos los recursos tal que el problema llegase a solución.

5.2.3 Análisis y Comparación de modelos

De acuerdo con los resultados obtenidos por el agendamiento trimestral y comparándolo con el modelo anual, se muestra a continuación de forma esquemática y gráfica el comportamiento de ambos modelos y se genera discusión en torno a las variables relevantes de análisis.

Tomando el Nivel de Producción como ejemplo, se procederá a mostrar un análisis comparativo que visualice las diferencias de comportamiento entre las actividades agendadas en el modelo trimestral de base semanal al respecto de cómo se agendó la construcción de obras en el modelo anual. Cabe destacar que, este es un análisis comparativo de determinados momentos en el tiempo en que se desarrolla el agendamiento y se efectúa para un sector específico de la mina, es decir, aquellas actividades comprendidas entre la Zanja 52-55 y Calles 45-49

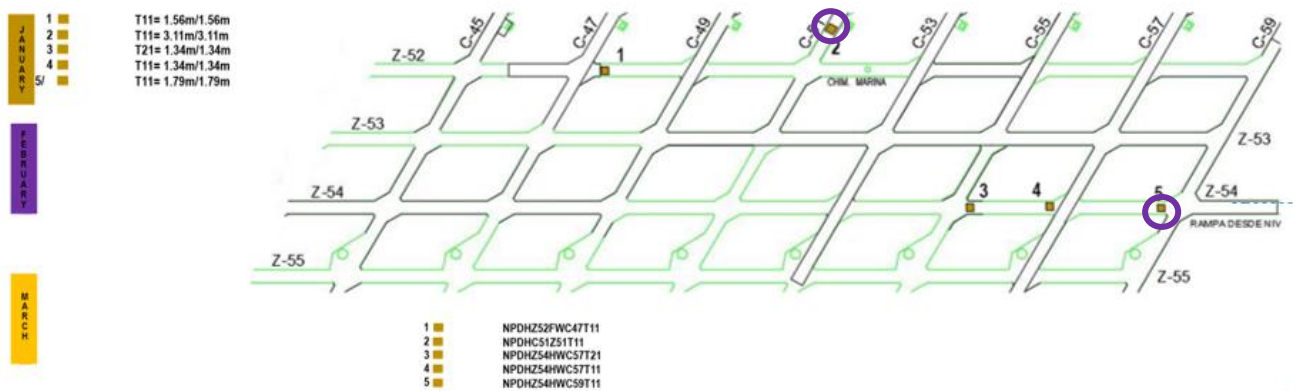


Ilustración 31: Agendamiento inicio mes de Enero, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda

Se aprecia en marrón claro las actividades agendadas para el mes de enero. La imagen muestra un momento en el tiempo determinado de cuando comienzan las actividades, las cuales van indicadas por segmentos cuadrados donde cada uno representa una semana. La simbología en la imagen dice relación con la codificación de las actividades, así, T11 corresponde a la primera semana del segmento uno.

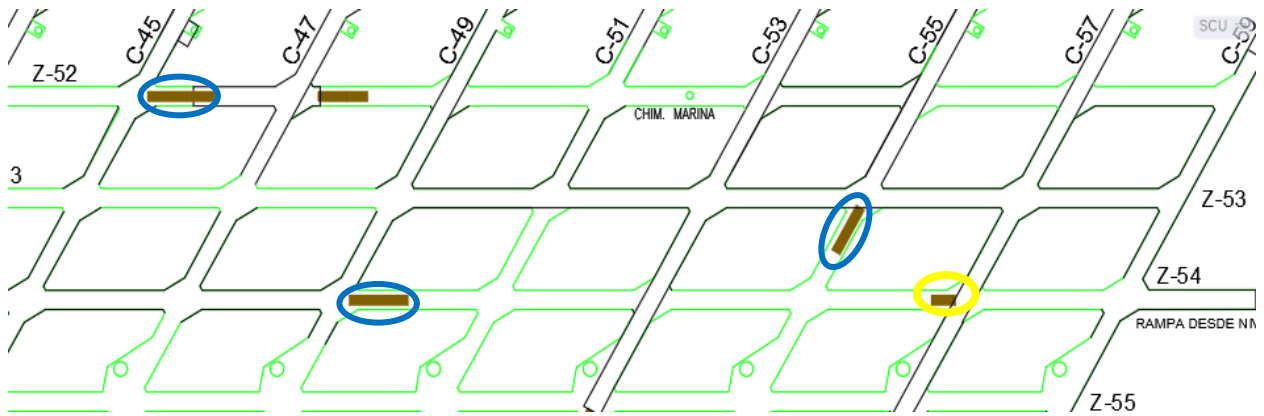


Ilustración 32: Agendamiento mes de Enero, Modelo Anual, NP, Esmeralda

De una comparación utilizando las imágenes del modelo trimestral y modelo anual, se puede notar primero que existen avances en las calles 51 y zanja 54 (marcados con círculos en morado) que no están agendadas de la misma manera en el modelo anual. Esto va precisamente de la mano con la flexibilidad que impone un agendamiento a nivel semanal que ataca distintas frentes que antes no se podían contemplar dado que el tramo de avance incurre en mayores recursos al tener que completar por completo un segmento de 10 a 15 metros de extensión. Se destaca que el avance 4 (demarcado en amarillo) es idéntico para ambos modelos, siendo este el de codificación NPDHZ54HWC57T1. Así mismo el desarrollo número 5, codificada por NPDHZ54HWC59T1, es un ejemplo de una obra por adelantada que realiza el modelo trimestral que no estaba contemplada en el modelo anual

Por otro lado, se debe considerar que la imagen del modelo semanal es para comienzos de enero por lo que recién están comenzando las obras mientras que en el modelo anual se presentan segmentos café de forma inmediata (demarcados en círculos azules), no obstante, el modelo semanal no seguirá exactamente la construcción de los mismos tramos generando así diferente prioridad e intercalando su construcción a diferentes periodos (Febrero, Marzo). También se denota la corrección del modelo anual en algunas actividades como por ejemplo en la Calle 55 tramo que ya estaba construido previamente en el diseño de Autocad, pero que había sido agregado en el modelo anual.

Se presenta a continuación otro momento del tiempo con las obras agendadas para inicios del segundo periodo de febrero.

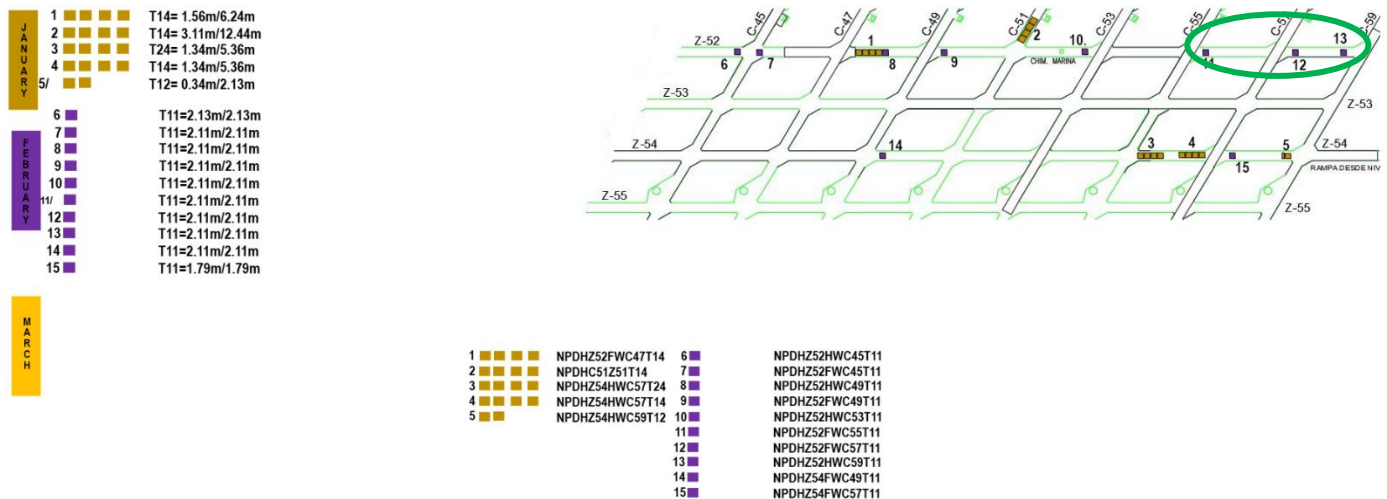


Ilustración 33: Agendamiento inicio mes de Febrero, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda

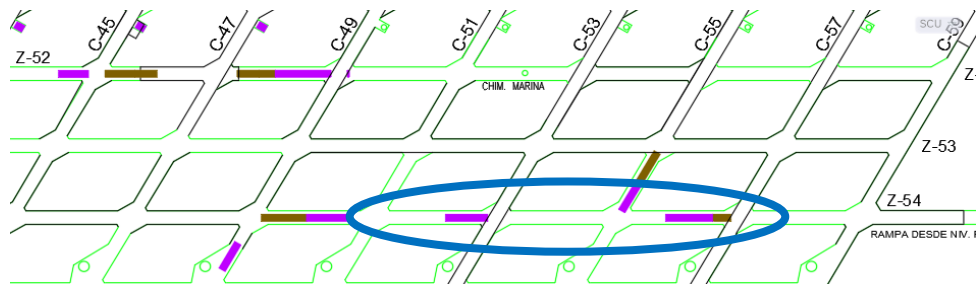


Ilustración 34: Agendamiento mes de Febrero, Modelo Anual, NP, Esmeralda

Al igual que en el caso del mes de Enero, se pueden ver demarcados en verde y azul correspondientemente para el modelo Trimestral y Anual, como los agendamientos son ejecutados de forma diferente otorgando en este caso prioridad al sector de la Zanja 52. Se pueden apreciar entonces nuevamente adelantos al respecto de ciertas obras que en este caso se agendan para febrero en el modelo trimestral. Estas obras son las comprendidas por los segmentos enumerados 11, 12 y 13.

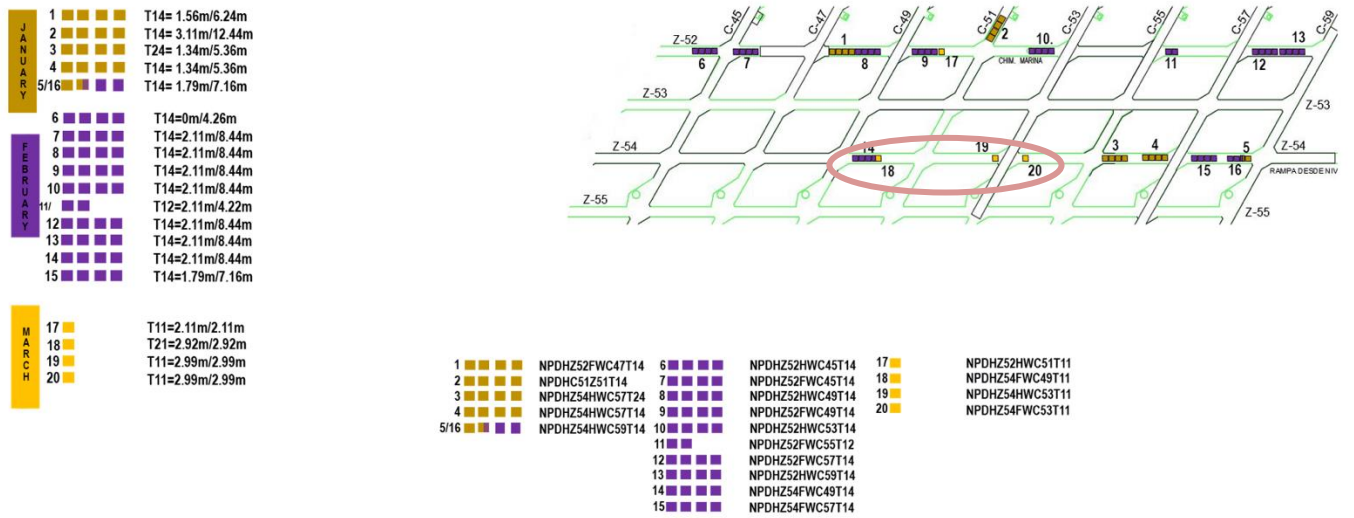


Ilustración 35: Agendamiento inicio mes de Marzo, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda Gráfico 6: Distribución de restricciones, Caso de estudio

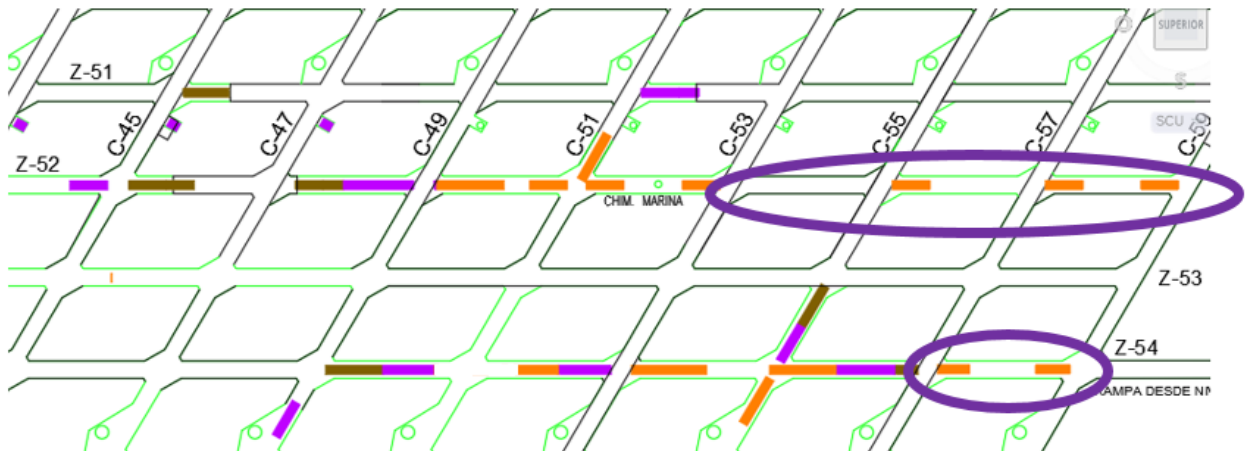


Ilustración 36: Agendamiento mes de Marzo, Modelo Anual, NP, Esmeralda Gráfico 7: Distribución de restricciones, Caso de estudio

Se repite nuevamente el comportamiento anteriormente señalado, pues en el mes de marzo se pueden ver demarcados en morado aquellas obras que fueron comprometidas para periodos anteriores (enero y febrero) en el modelo trimestral para la Zanja 52 y al oeste en la Zanja 54 (entre C-53 y C-59) mientras que hay otra correspondientes a Marzo que para el modelo Trimestral son ejecutadas con retraso al respecto del modelo Anual. Estas obras están demarcadas en rosado para las obras de la zona este (entre C-49 y C-53) Zanja 54 correspondientes a los números 14,18,19,20.

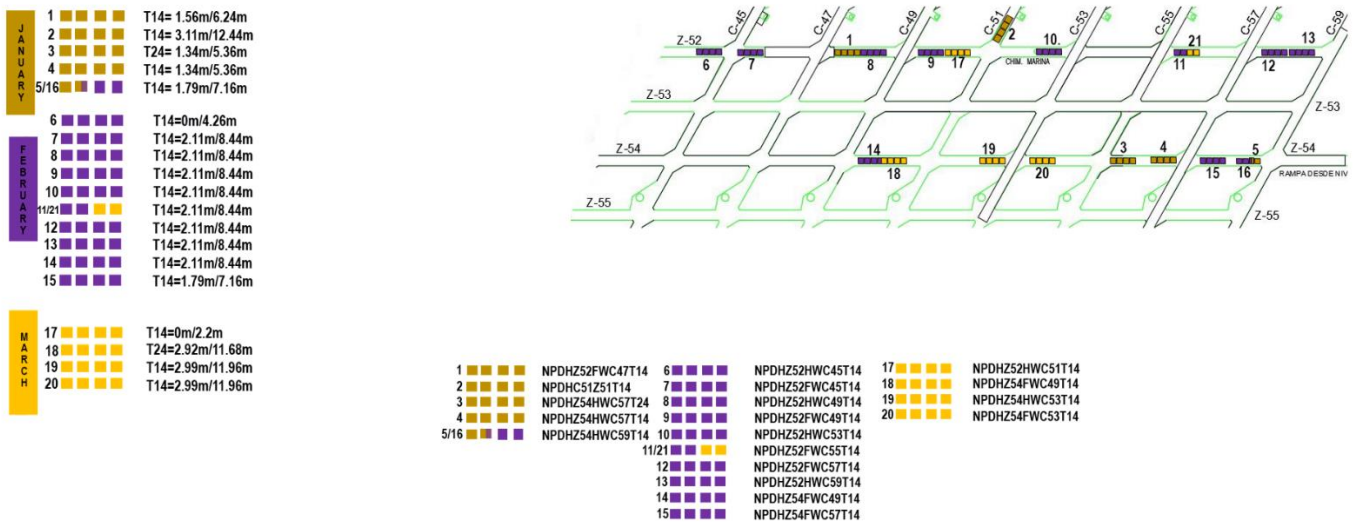


Ilustración 37: Agendamiento fin mes de marzo, Modelo Trimestral, NP, Esmeralda Gráfico 8: Distribución de restricciones, Caso de estudio

Finalmente observando la foto final de los agendamientos en el modelo trimestral se puede apreciar como conclusión de los agendamientos que:

Existen desarrollos que en el modelo anual estaban programados para el primer trimestre, y que, al transformar el modelo a semanal, estos desarrollos adelantaron sus avances para enero o febrero o bien al igual que en los análisis anteriores formarán parte de periodos posteriores, el modelo semanal otorga prioridad espacial a otros sectores de la mina. Particularmente, este comportamiento cuando ocurre en el mes de marzo dice relación con la concatenación posterior que hay del modelo al trimestre siguiente, es decir el mes de Abril.

Adicionalmente, hay otras actividades fuera del sector elegido para la comparación donde se aplica el mismo principio de adelantamiento y priorización de actividades, pero para otros sectores que el modelo anual no contempla en su planificación.

Por último, a modo de resumen, cabe destacar que los avances en el modelo anual, se completan en un 100% con del modelo semanal, no obstante, para el primero esto ocurre dentro del mismo mes dada la naturaleza en la construcción de dicho plan, mientras que para el segundo los avances del mes de enero y febrero del modelo semanal, se complementan con avances de los meses siguientes para terminar las obras comprometidas en el mes de marzo.

Complementando el análisis anterior se presenta a continuación avance porcentual de todas las obras de la preparación minera ingresadas como actividades al problema de optimización. Lo anterior para el modelo anual y trimensual (de base semanal) en plomo y azul respectivamente.

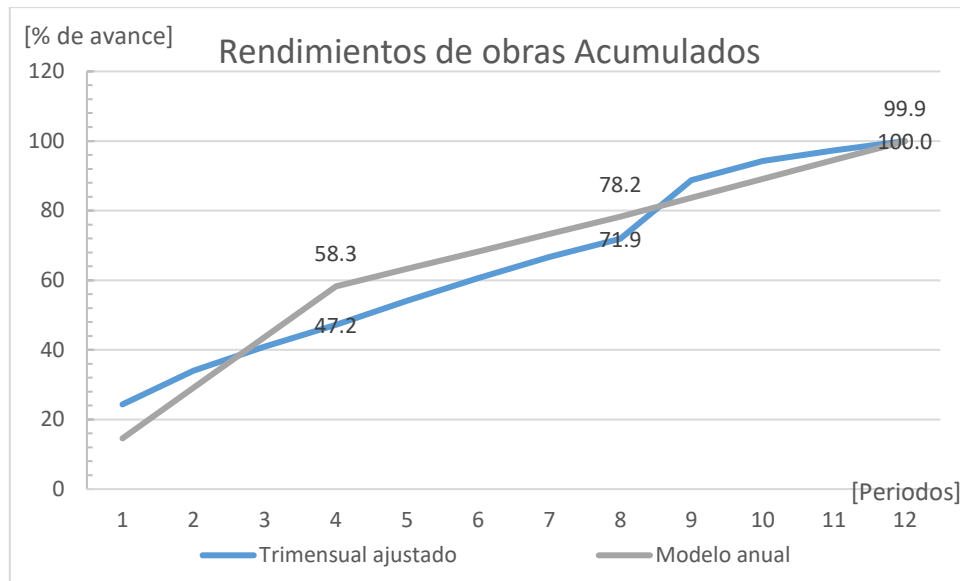


Gráfico 9: Comparación de rendimiento de obras en avance porcentual, Modelo Trimestral v/s Modelo Anual

Del gráfico es importante destacar que, en relación al porcentaje de actividad que van culminando los modelos a lo largo del tiempo de evaluación, entonces se puede apreciar que existe un comportamiento similar entre el caso de modelo trimestral y el modelo anual. Sin embargo, para los primeros 4 periodos el modelo anual logra un *peak* (58.3%) superando al trimestral en la última semana del primer mes (periodo 4). Por su parte, el modelo trimestral se mantiene con un crecimiento en el desarrollo de actividades más constante a través del tiempo, no obstante, al inicio del último mes de progreso (periodo 8) el modelo logra un *peak* (78.2) para el agendamiento optimizando trimestral superando en cantidad de obras realizadas al inicio de marzo, es decir, sobrepasando el porcentaje de obras construidas del modelo anual (71.9).

Esto se puede explicar por un mejor reordenamiento de las actividades en general que estratégicamente guardan recursos en los primeros meses para poder ejecutar un *peak* al final del periodo de evaluación. Esto es finalmente un efecto que ejecuta el agendador debido al periodo de evaluación pre-establecido, es decir, que si se aumenta el número de periodos imputados el agendamiento intentará entregar su mejor solución mejorando escaladamente la proporción de actividades que va ejecutando en sus últimos periodos.

Dado que el modelo Trimestral presenta actividades que han sido discretizadas periodos semanales, lo cual otorga flexibilidad al agendador respecto de la solución al problema de optimización. Sin embargo, se debe tener en consideración que no todas las actividades pueden ser segmentadas siguiendo la regla general del indicador “actividad/semana” explicada anteriormente. Esta pierde uso específicamente para aquellas actividades que presentan un *max rate* menor a uno, puesto que si bien para la mayor parte de las actividades se ha dejado inalterada esta variable, para el caso de un *max rate* menor a 1 que este discretizado, entonces se retrasará el cumplimiento de la actividad con respecto al modelo anual. Lo anterior ocurre porque se fuerza al *max rate* a aumentar la tasa de cumplimiento cuando para una misma actividad se adhieren más periodos (a una mayor discretización) que cumplir dentro de un mismo horizonte de tiempo. Un caso de esto

es por ejemplo una actividad que antes poseía un *max rate* 0.5 y que tomaba 2 meses en realizarse (sin restricciones operacionales de por medio), entonces la misma actividad discretizada en 9 segmentos requerirá de un *max rate* de 4.5 en cada segmento al menos para igualar la velocidad de ejecución que tenía antes.

Dado el efecto anterior, se ha dejado en forma unitaria (de un solo segmento) las actividades con un *max rate* menor a 1, tal que no se afecte la ejecución de actividades del modelo. Otra forma de solventar este comportamiento es cambiando la tasa de ejecución (*max rate*) de las variables para ajustarlas de acuerdo a lo que la discretización amerite, no obstante, para ello se requiere analizar caso a caso, pues el indicador “actividad/semana” calculado difiere según tipo de obras y por consecuencia el número de segmentos bajo el cual se discretiza también será diferente para una determinada actividad.

En total son 22.5% de las actividades las que presentan el comportamiento antes descrito y otro factor común de todas las obras bajo este comportamiento es que no poseen ningún tipo de restricción programada en JSON, más que su precedencia entre sus propios segmentos. Por lo tanto no afectan el proceso constructivo de las demás, no están obligadas a realizarse en un periodo específico ni tampoco tienen límite de recursos pre-establecido.

Ahora bien, al realizar una comparación por separado mirando en detalle el tipo de obras en donde existe una mejoría en el agendamiento trimensual, se puede destacar que este efecto se acentúa en las obras de desarrollos de túneles tanto para las construcciones horizontales como verticales consideradas en el periodo de evaluación. Se describe en breve cada caso en la sección siguiente.

Comparación de actividades modelo Trimensual vs Modelo Anual

Si bien, la conclusión global de avances muestra una mejora del modelo Trimensual ajustado respecto del Anual, cabe distinguir caso a caso para dejar en evidencia cuales obras son las que dado un mejor agendamiento contribuyen a un mejor resultado y solución del problema. Asimilando un avance gradual para el modelo Anual entre semanas, se tiene entonces la siguiente.

Desarrollos Horizontales

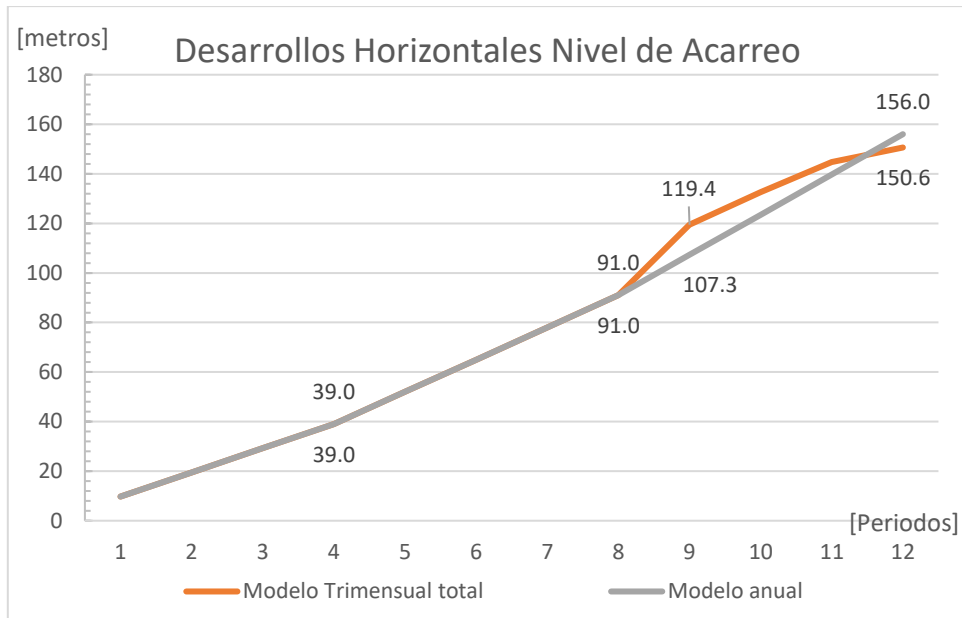


Gráfico 10: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Acarreo, ESM

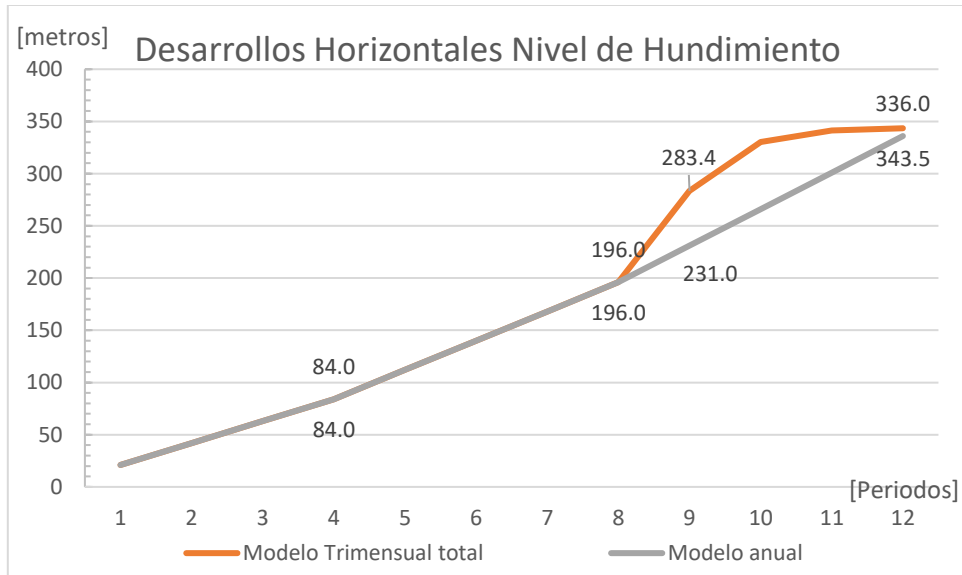


Gráfico 11: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Hundimiento, ESM

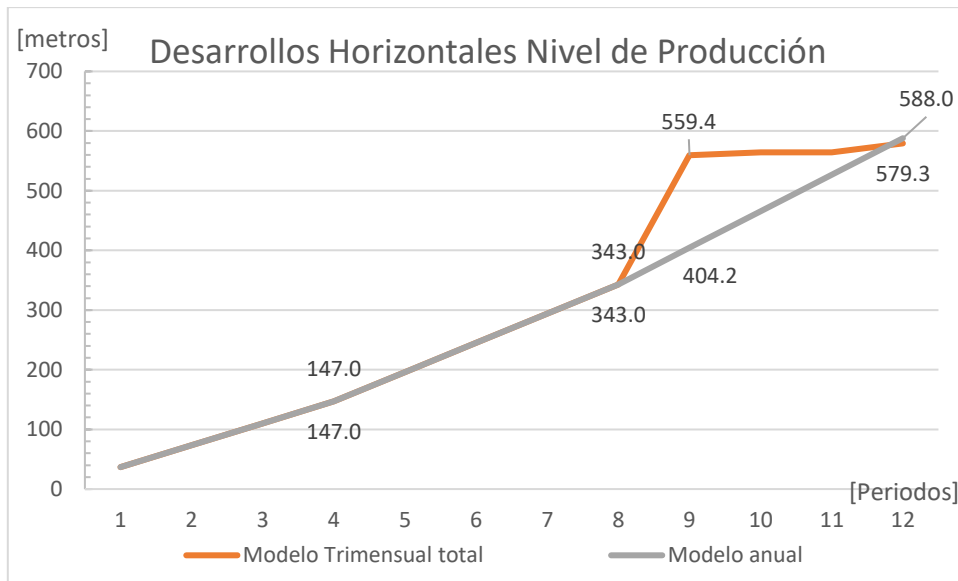


Gráfico 12: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Producción, ESM

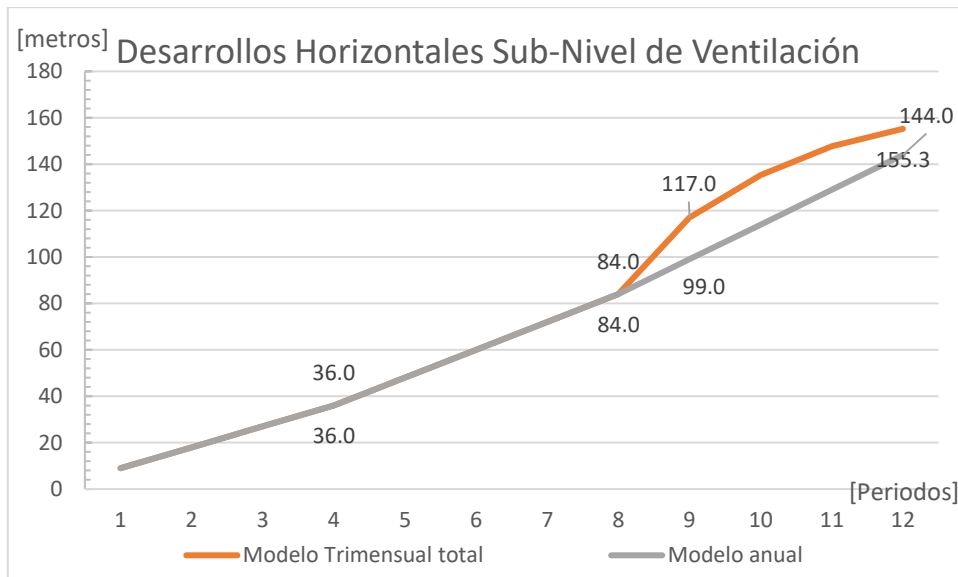


Gráfico 13: Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Subnivel Nivel de Ventilación, ESM

Al apreciar los gráficos para los desarrollos horizontales se observa claramente, como en cada caso existe un *peak* que crea la diferencia al inicio del tercer mes de agendamiento (periodo 8), el cual logra alcanzar un salto máximo en los desarrollos del nivel de producción agregando 155.2 metros y por tanto culminando antes las solicitadas a la planificación. Las razones probables del comportamiento anterior dicen relación con una mejor redistribución de los recursos sobre todo para aquellas obras que son independientes en su avance de acuerdo a menores restricciones tanto por precedencias de tipo “o” como “y”. Adicionalmente, al tener restricciones menos rígidas como por ejemplo solo tener una condición de recursos (de tipo OR), pero no de término (tipo MP) en el modelo otorgará ventaja en la re-distribución mencionada.

Desarrollos Verticales

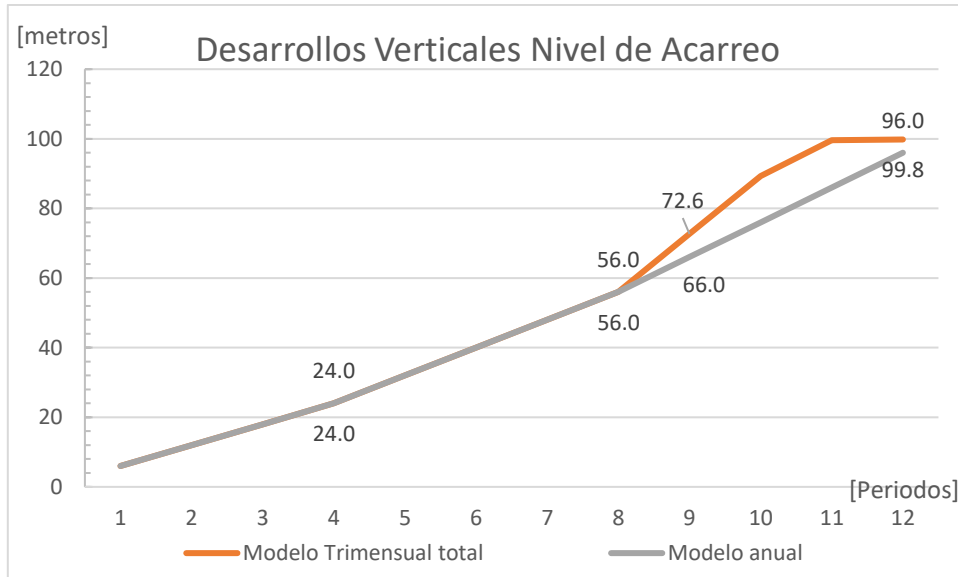


Gráfico 14: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Acarreo, ESM

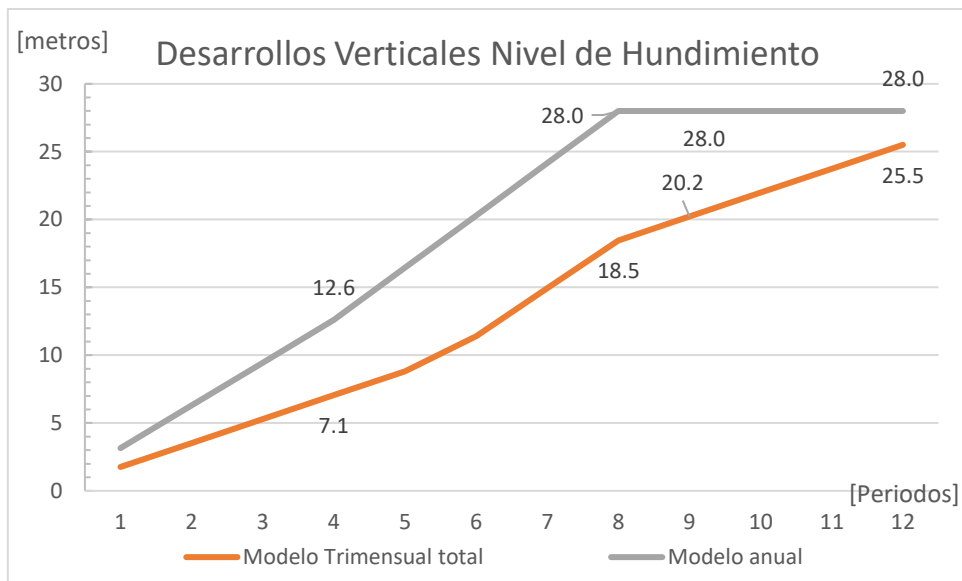


Gráfico 15: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Hundimiento, ESM

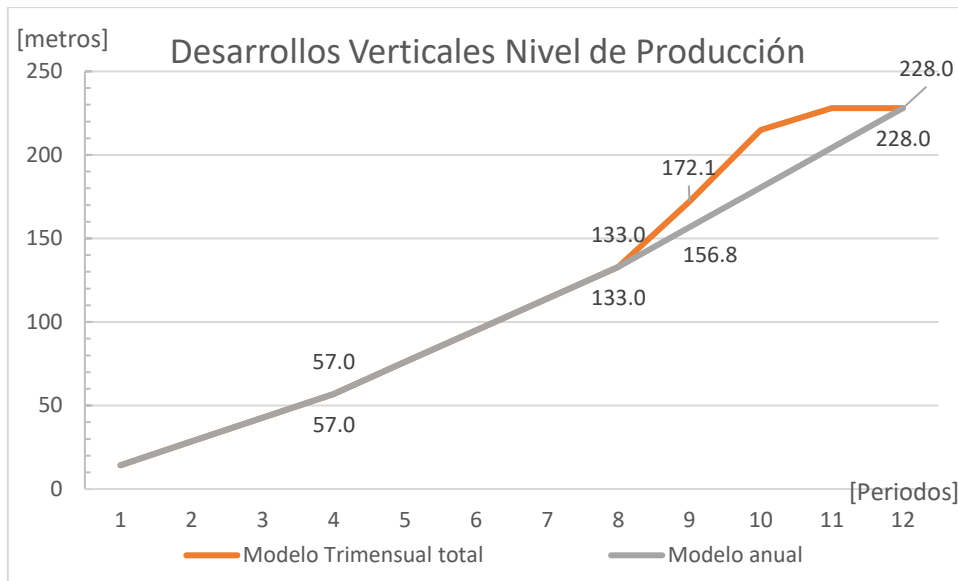


Gráfico 16: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Producción, ESM

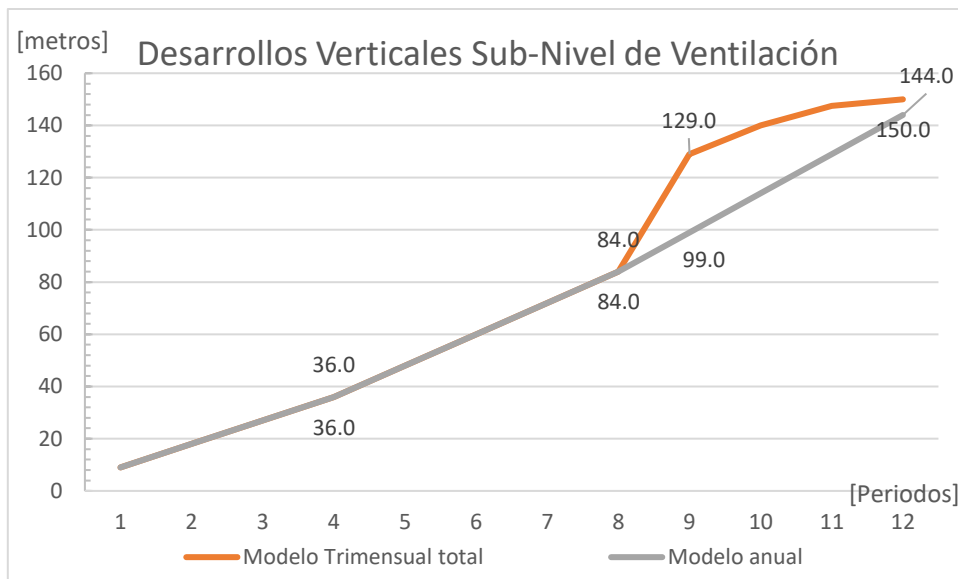


Gráfico 17: Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Sub-Nivel de Ventilación, ESM

A diferencia de los desarrollos horizontales, en los verticales, si bien ocurre la misma mejoría del modelo Trimensual respecto al anual en el tercer mes de evaluación cabe destacar que para dicha mejora en la distribución de recursos ocurre en desmedro de otras actividades como lo muestra el caso particular del nivel de Hundimiento en donde el modelo Trimensual decide escalar las obras de este tipo en forma más gradual y por tanto deja espacio y recursos para completar obras en los demás subniveles. No así el modelo Anual que decide culminar las obras en el segundo mes.

Dicho comportamiento se repite para las obras civiles relacionadas a los desarrollos horizontales como lo es por ejemplo la construcción de carpetas de rodado, de trolley, vía férrea, pre acondicionamiento, entre otros.

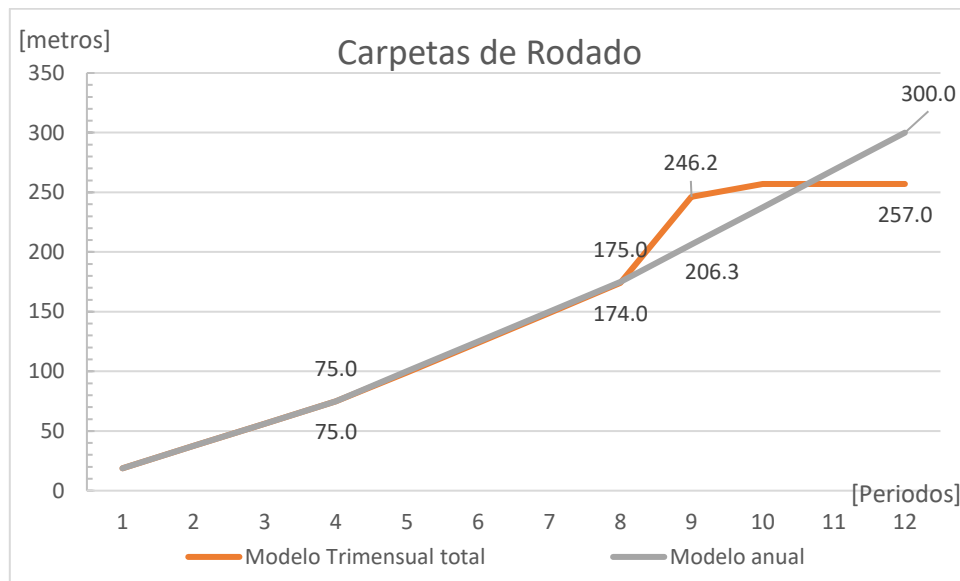


Gráfico 18: Comparación modelos Trimensual/Anual, Carpetas de Rodado NP

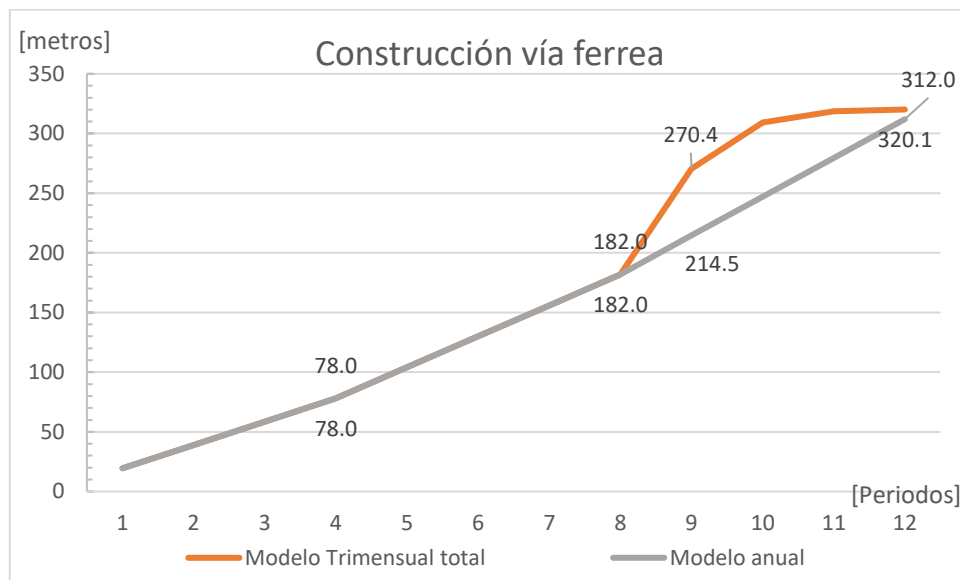


Gráfico 19: Comparación modelos Trimensual/Anual, Construcción vía férrea, NA

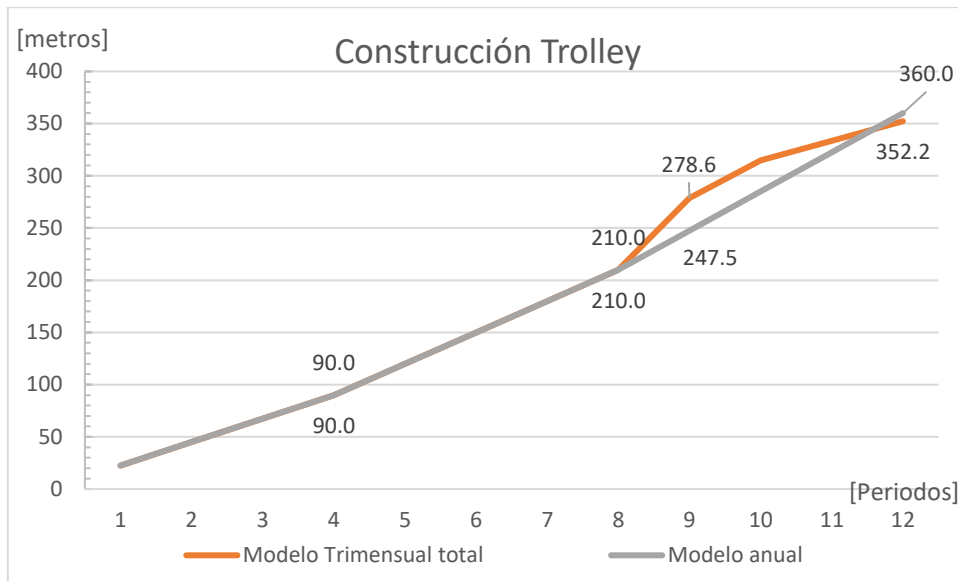


Gráfico 20: Comparación modelos Trimensual/Anual, Construcción Trolley, NA

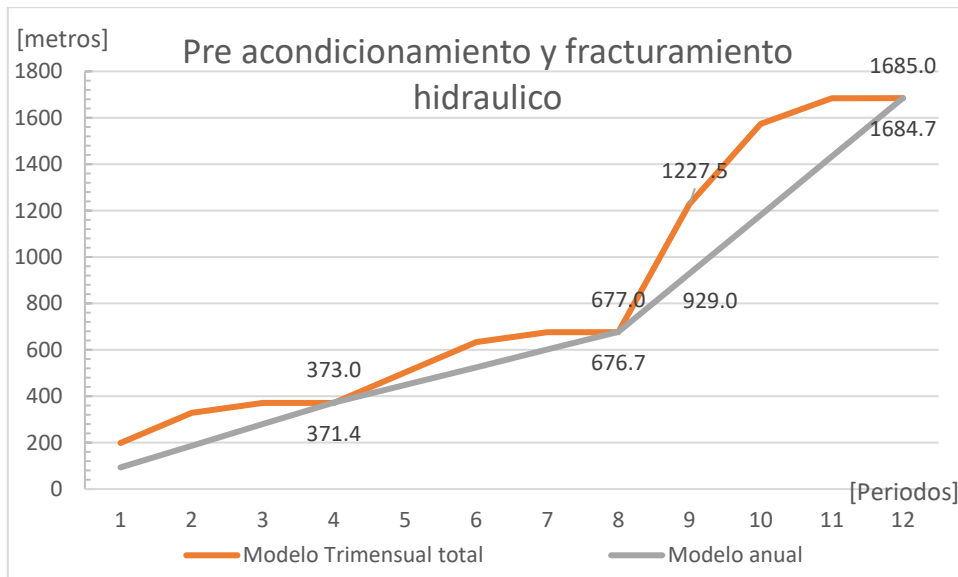


Gráfico 21: Comparación modelos Trimensual/Anual, PA y HF, NH

Particular es el caso de los PS y HF dentro del modelo, se observa una prioridad en el modelo Trimensual por este tipo de labores, en los 3 periodos culmina antes que el modelo anual sus acciones.

Casos puntuales

Bajando a un nivel de detalle mayor, es decir mirando cómo se comporta una actividad en específico se puede notar de mejor manera las diferencias que son imperceptibles a los análisis gráficos. Se analiza nuevamente la redistribución de recursos y re manejo de actividades que realiza el modelo Trimestral cuando tiene semanas en vez de meses para el caso de una actividad en concreto.

Para ejemplificar y describir dichos comportamientos tomaremos un tramo cualquiera de desarrollo horizontal y se compara entonces semana por semana la distribución en el tiempo de los archivos *output.xls* de cada modelo.

- Caso Nivel de Acarreo, Desarrollo Horizontal, Cruzado 58 conexión 1338

Se muestra a continuación el comportamiento de la actividad particular bajo la simbología de colores entregada por Autocad para los periodos y remarcando en amarillo tenue los valores de avance en metros.

Activity	Enero	Febrero	Marzo
NADHXC58CN1338T1	4	0	0
NADHXC58CN1338T2	0	16	0
NADHXC58CN1338T3	0	2	18
NADHXC58CN1338T4	0	0	7
NADHXC58CN1338T5	0	0	0
NADHXC58CN1338T6	0	0	0
NADHXC58CN1338T7	0	0	20
NADHXC58CN1338T8	0	0	20
NADHXC58CN1338T9	0	12	0
Total	4	30	65

Tabla 15: Avance de actividad NADHXC58CN1338, Modelo Anual

De la tabla anterior se puede apreciar que hay desarrollo de la actividad en forma creciente con actividad en paralelo para los periodos 1 y 2 de febrero y marzo respectivamente.

Análogamente para el modelo Trimensual la presentación de la información se aprecia en la tabla siguiente

Activity	Enero				Febrero				Marzo			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
NADHXC58CN1338T11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T21	0	0	1.1	2.9	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T22	0	0	0	1.1	2.9	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T23	0	0	0	0	1.2	2.8	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T24	0	0	0	0	0	1.3	2.8	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T31	0	0	0	0	0	0	1.3	3.7	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T32	0	0	0	0	0	0	0	0.4	4.1	0.6	0	0
NADHXC58CN1338T33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.5	1.5	0
NADHXC58CN1338T34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.6	2.4
NADHXC58CN1338T41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6
NADHXC58CN1338T42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T71	0	0	0	0	0	0	0	0	4.1	0.9	0	0
NADHXC58CN1338T72	0	0	0	0	0	0	0	1.9	3.1	0	0	0
NADHXC58CN1338T73	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0
NADHXC58CN1338T74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.1	0.9
NADHXC58CN1338T81	0	0	0	0	0	0	2.8	2.2	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T82	0	0	0	0	0	0	0	1.9	3.1	0	0	0
NADHXC58CN1338T83	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0
NADHXC58CN1338T84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.1	0.9
NADHXC58CN1338T91	0	0	0	2.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T92	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T93	0	0	0	0	0.7	2.3	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T94	0	0	0	0	0	1.8	1.2	0	0	0	0	0
Subtotal	0	1	4.1	6.7	8.1	8.1	8.1	10	16	13	12	5.9
Total	11.8				34.4				47.4			

Tabla 16: Avance de actividad NADHXC58CN1338, Modelo Trimensual

Del modelo trimensual entonces se puede apreciar como existe un temprano uso de recursos para desarrollar la actividad en cuestión comenzando durante la segunda semana de Enero y con ello obteniendo una 11.8 m en comparación con el modelo Anual, además se aprecia avances en actividad paralela del tramo 9 al inicio del mes, cosa que en el modelo Anual no logra apreciar ni tampoco se puede inferir. Por tanto, dado este efecto se obtiene un valor agregado a la planificación de mediano a corto plazo tal como se describió en el caso de estudio.

El comportamiento anterior ocurre de igual manera para el mes de febrero obteniendo una ganancia nuevamente al respecto de lo que se logra visualizar en el modelo Anual alcanzando 34.4 m planificados para construcción. Finalmente, en el último periodo se ve una baja dado que las ventajas en periodos anteriores sin duda agotan el recurso de la actividad y por tanto el programa decide en el tercer mes dar prioridad al desarrollo de otras obras.

Algo importante a destacar ,y tener especial cuidado con la magnitud de las obras que se construyen, es decir, con los metros avanzados efectivos. Esto porque, se puede ver del modelo trimensual como hay actividades que comienzan en una semana particular, pero dejan fragmentos de túnel para periodos posteriores, es decir, que por agendamiento pasan pequeñas porciones a la semana siguiente o incluso mes siguiente, como por ejemplo, el tramo NADHXC58CN1338T91. Lo anterior, puede ser visto de 2 maneras, la primera en donde con un bajo avance en febrero es negativo para construcción, pues existen valores mínimos que, ya sea por temas contractuales u operacionales, deben respetarse y por lo tanto este efecto puede agregar restricciones adicionales al problema de optimización de tipo progreso límite. Por otra parte, si se toma en cuenta que aun cuando “el zoom” del problema está aumentado y se tiene mayor visual del agendamiento, no podemos saber en cual día de la semana efectivamente parte la actividad, entonces puede ocurrir que la actividad comienza a mitad de la semana 4 del mes de enero y por continuidad deba terminar en los primeros días de la semana siguiente. Un detalle a nivel diario del problema puede entregar la respuesta a este tipo de interrogante, pero la conclusión vislumbrada en el caso de estudio se mantiene, es decir, que el nivel de discretización alcanza un límite cuando el problema deja de ser operacionalmente factible.

Otro efecto que se probó al analizar la redistribución de actividades fue liberar el tipo de precedencias en las que los desarrollos horizontales estaban enmarcadas, esto es, dejándolas del tipo “o” en vez de tipo “y”. A continuación, se presentan los resultados de este ejercicio.

Activity	Enero				Febrero				Marzo			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
NADHXC58CN1338T12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T14	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T21	0	0	0	3.1	0.9	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T22	0	0	0	0	3.1	0.9	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T23	0	0	0	0	0	3.2	0.8	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T24	0	0	0	0	0	0	3.3	0.8	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T31	0	0	0	0	0	0	0	3.3	1.7	0	0	0
NADHXC58CN1338T32	0	0	0	0	0	0	0	0	2.4	2.6	0	0
NADHXC58CN1338T33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.4	3.6	0
NADHXC58CN1338T34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	4.1
NADHXC58CN1338T41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T71	0	0	0	0	0	0	0	0	4.1	0.9	0	0
NADHXC58CN1338T72	0	0	0	0	0	0	0	2.8	2.2	0	0	0
NADHXC58CN1338T73	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9	3.1	0	0
NADHXC58CN1338T74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	4.1	0
NADHXC58CN1338T81	0	0	0	0	0	0	3.8	1.3	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T82	0	0	0	0	0	0	0	2.8	2.2	0	0	0
NADHXC58CN1338T83	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9	3.1	0	0
NADHXC58CN1338T84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	4.1	0
NADHXC58CN1338T91	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T92	0	0	0	0.6	2.4	0	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T93	0	0	0	0	1.6	1.4	0	0	0	0	0	0
NADHXC58CN1338T94	0	0	0	0	0	2.7	0.3	0	0	0	0	0
Subtotal	0	0	3	7.6	8.1	8.1	8.1	11	16	13	12	4.1
Total			10.6			35.3				45.6		

Tabla 17: Avance de actividad NADHXC58CN1338, Modelo Trimensual, cambio de precedencias.

Los resultados son bastante similares al del modelo Trimensual normal. Las actividades mantienen el mismo rendimiento de avance cuando se mira el global de las obras de desarrollo horizontal, es decir, que los resultados son idénticos a los que muestra la gráfica Modelos Trimensual/Anual Desarrollos Verticales Nivel de Hundimiento, ESM, pero cuando se mira el detalle por actividad para el caso puntual de NADHXC58CN1338, entonces si se aprecia un leve cambio en la distribución de los recursos bajando un poco su uso en enero (10.6), aumentándolo en febrero (35.3) y volviendo a decaer en marzo (45.6). Lo anterior se puede explicar dado la mayor libertad que tiene el programa cuando está frente a precedencias del tipo “o” en vez de las de tipo “y”.

Se presenta otro caso, pero ahora del nivel de producción para reforzar la explicación del efecto anteriormente descrito.

- Caso Nivel de Producción, Desarrollo Horizontal, Zanja 52, Calles 45,47,49

Activity	Enero	Febrero	Marzo
NPDHZ52C4547T1	6.25	0	0
NPDHZ52C4749T1	4.56	0	0
NPDHZ52C4749T2	0	7.44	0
NPDHZ52C4951T1	0	7.25	0
NPDHZ52C4951T2	0	5.85	0
Total	10.8	20.5	0

Tabla 18: Avance de actividad NPDHZ52, Modelo Anual

Importante de la gráfica es observar que no hay actividad en el mes de marzo, sin embargo, esto no es por restricción, sino solo por la asignación de recursos de UDESS en el modelo Anual dado las precedencias pre-existentes.

Activity	Enero				Febrero				Marzo			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
NPDHZ52C4547T11	0	0	0	1.56	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4547T12	0	0	0	1.56	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4547T13	0	0	0	0	1.56	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4547T14	0	0	0	0	0.51	1.05	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T11	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T12	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T13	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T14	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T21	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T22	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T23	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T24	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4951T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4951T12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4951T13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4951T14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4951T21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
Subtotal	0	0	0.0	7.7	2.1	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.1
Total	7.7				10.6				13.1			

Tabla 19: Avance de actividad NPDHZ52, Modelo Trimensual

Ahora al observar con detalle semanal, se obtiene que la actividad está parcializada dentro de los 3 meses en vez de solo 2. A primera vista esto es positivo para el modelo Anual y una ventaja

contra el modelo Trimensual, sin embargo, cabe recordar que se está visualizando el detalle de sólo una actividad, por lo tanto, esta redistribución puede ha de ser utilizada positivamente por el modelo más discretizado, a la larga de acuerdo a lo mostrado en la gráfica *Modelos Trimensual/Anual, Desarrollos Horizontales Nivel de Producción, ESM* hay un *peak* durante el inicio del tercer mes en donde se agregan más actividades y se optimiza la construcción de obras dentro del nivel de producción. Fijándonos en el *peak* (primeras 2 semanas) de la tabla anterior puede inferirse que esta actividad puntualmente no está dentro de las prioridades del modelo, no hace uso de recursos dentro de dicho intervalo de tiempo como lo es el caso de actividades como NPDHZ54FWC49, NPDHZ54FWC53, NPDHZ54HWC57T21 u otras de desarrollo horizontal que pueden ser vistas con mayor detalle aún en los archivos adjuntos como anexo a este trabajo.

Por último, al realizar nuevamente el ejercicio de cambiar las precedencias de tipo “y” por tipo “o”, se obtiene la siguiente gráfica.

Activity	Enero				Febrero				Marzo			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
NPDHZ52C4547T11	0	0	0	0	1.56	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4547T12	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4547T13	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4547T14	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T11	0	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T12	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T13	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T14	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T21	0	0	0	0	0	1.86	0	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4749T22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4749T23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4749T24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4951T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81
NPDHZ52C4951T12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46
NPDHZ52C4951T22	0	0	0	0	0	0	2.1	0	0	0	0	0
NPDHZ52C4951T23	0	0	0	0	0	0	0	0	2.1	0	0	0
NPDHZ52C4951T24	0	0	0	0	0	0	0	0	2.1	0	0	0
Subtotal	0	0	0.0	4.6	1.6	7.4	2.1	0.0	4.2	0.0	0.0	13.1
Total	4.6				11.1				17.3			

Tabla 20: Avance de actividad NPDHZ52, Modelo Trimensual, cambio de precedencias

Nuevamente, se tiene que la distribución es ligeramente distinta, sin embargo privilegiando en este caso al mes de febrero y marzo cargando los periodos de manera más uniforme que en el modelo Trimensual original.

5.2.3 Consideraciones metodológicas

Cabe destacar algunas observaciones al uso de la metodología que al igual que en el caso de estudio aplican para el modelo integrado. Estas se describen a continuación.

De la Construcción del modelo:

- En relación a la discretización de variables, una de las grandes dificultades para lograr el objetivo de la metodología, es que genera una alta inversión en tiempo a la construcción al modelo tal que se puedan obtener todas las variables de un modelo trimensual. Esto último, en el manejo de variables tanto para actividades como precedencias del modelo pueden extenderse tal que se dupliquen y hasta cuadrupliquen los datos de entrada al problema de optimización. El uso de herramientas para gran manejo de datos como VBA y Python es imprescindible para el manejo de la adecuada discretización de variables del modelo trimensual. Dicho lo anterior, facilita bastante la operación en UDESS el uso de Json como lenguaje de programación para cargar modelos de manera directa en la interfaz del agendador. Junto a lo anterior, es importante mencionar que la aplicación de esta metodología, requiere en promedio de dos semanas de trabajo de los modelos, siendo la primera utilizada para definir un horizonte temporal, filtrar crear y filtrar las variables de interés desde los planos e informes de preparación minera y por último para la construcción de los archivos *.ACT*, *.PREC* y *.UDS*. Posteriormente la segunda semana, se utiliza para controlar el margen de éxito que genera el agendamiento en UDESS, verificando y corrigiendo los errores y actualizaciones del modelo.
- Es importante mencionar que, la dificultad correspondiente al archivo de restricción, es que este no presenta una codificación fácil de filtrar tanto en la versión *.txt* como en la versión *.xlsx*, por lo que en primera instancia se debió incorporar las restricciones correspondientes de manera manual, lo cual es una gran desventaja, al presentar más de 1000 restricciones al problema, se requiere demasiado tiempo en lo que respecta la iteración de los modelos.
- El uso de herramientas externas para suplir las funcionalidades que hoy en día no están presentes en UDESS implican generalmente el manejo de planillas con anterioridad al uso del programa, lo cual aumenta el riesgo de presentar fallas por factor humano condicionando al modelo a un margen de error mayor y por ende obstaculizando el objetivo principal del problema de optimización en preparación minera.
- Cabe notar que, el agendamiento en UDESS obtenido para el modelo trimensual imputado, desde un 100% de sus actividades (1841), el archivo *output* del modelo restringe algunas actividades porque muchas de estas no tienen precedencias ni tampoco límite de uso de recursos rígidos al ser consideradas obras independientes. Lo anterior dice relación con que dichas actividades pertenecen a obras que fueron avanzadas en años anteriores de acuerdo a la planificación previa al cuadro temporal

evaluado. Como consecuencia de lo anterior, el modelo utiliza los recursos para ejecutar el 80% de las actividades (1456), pero gracias a ello se pueden apreciar mejoras en la utilización de recursos para determinados casos como se verá en la sección de Resultados a continuación

- Se ha evitado el uso de restricciones de incompatibilidad, dado que, al tener gran número de actividades, es más conveniente utilizar restricciones de rango de recursos, lo cual permite mayor precisión y reduce la cantidad total de restricciones en el modelo. Por otra parte, se utilizaron restricciones de progreso límite en vez de las de periodo de inicio, las primeras son más versátiles al ser más específicos los datos de entrada y por tanto también evitan el aumento en la cantidad total de restricciones.

Apreciaciones y sugerencias:

- Es importante que el software UDESS, sea sometido a una actualización en su funcionalidad para poder realizar este tipo de metodología, el factor tiempo es la variable crítica que influye en toda la ejecución, por lo cual, particularmente, se debe disminuir el factor humano en la construcción de los modelos, para que su obtención y su posterior comprobación sea dentro de tiempos efectivamente más disminuidos en relación a la planificación tradicional. Un ejemplo de funcionalidad, se desprende de esta metodología de modelamiento bajo la necesidad que el programa pueda discretizar variables para efectos de cambiar la temporalidad del problema. Esto podría ser llevado a cabo incorporando los códigos que actualmente se realizan por fuera con VBA o el mismo Python y apoyan el Script Jsona montar en UDESS.
- Otra consideración para el software UDESS, es que logre actualizar dentro de sus funcionalidades el ingreso de manera óptima para un archivo editable (.txt. o .xls) las restricciones del problema ojalá en la misma interfaz de entrada. Actualmente, el único camino para acelerar lo anterior es el script en Json, lo cual nuevamente involucra la utilización de herramientas externas al programa y adhieren riesgo y tiempo de construcción al modelo bajo esta metodología. Adicionalmente, la idea de que se incorporen estas funcionalidades facilita una capacitación para el uso y cambio de paradigma hacia una planificación más certera a través de herramientas computacionales.

5.2.4 Análisis de Sensibilidad

Se presenta a continuación un análisis de *trade off* de algunos parámetros de interés que pueden cambiar los resultados del modelo considerablemente acorde a como modifican el planeamiento del problema de optimización.

Iteración sobre la tasa de descuento

Es relevante generar un análisis en torno al valor de descuento anual que se aplica al modelo, el problema de optimización está planteado como la maximización de un valor presente neto en la ejecución de actividades, cada una posee un valor, no obstante, este efecto se mitiga en pos de obtener la velocidad óptima de construcción al tener todas las actividades un beneficio similar, lo cual deja a la actividad única llamada BENEFICIO como la única fuente de valor agregado real al modelo.

Para descartar si este efecto podría estar afectando el modelo y ver de qué manera lo hace se realizó una iteración sobre la tasa de descuento con los valores 0.01, 0.3, 0.5.

Particularmente, se observó el comportamiento del número de actividades que no se alcanzaban a ejecutar dentro del periodo de evaluación trimestral sin obtenerse mayores fluctuaciones (392, 386 y 378 actividades). Lo anterior confirma una relación inversa entre ambas variables, es decir, que mientras menor es la tasa de descuento, entonces una porción un poco más elevada de actividades queda sin ejecutarse debido a que una menor tasa genera un menor retorno futuro por el ejercicio de ejecutar actividades, lo cual quita, en menor medida, la prioridad de realizar un mayor número de actividades para la obtención de un mismo beneficio

Otro factor observado fue el orden de ejecución de actividades, el cual se vio muy levemente alterado. La secuencia de actividades que muestran las tablas desde la 17 a 21 del apartado anterior y que dicen relación con los resultados de modelo trimestral muestran un “enroque” entre actividades tal que se superpone una semana antes que otra el inicio de por ejemplo un desarrollo horizontal. Este comportamiento es muy poco perceptible, pues solo cambian muy pocas actividades y tiende a ocurrir de una a dos veces por secuencia quedando sin alterarse las 11 o 10 semanas restantes.

En general, esto no trae consigo ningún cambio sustancial como se explica en el párrafo anterior sobre el número de actividades en ejecución mientras que el pequeño cambio de orden puede verse explicado con la elección que realiza el programa entre varias opciones donde el Beneficio es similar, pues recordando el planteamiento del problema, cada actividad tiene asignado un monto “BENEFICIO” al azar, pero dentro de un rango acotado entre 90000 y 99999.

Efectos sobre la discretización de actividades

El modelo sigue una estructura de tipo trimestral, es decir, que considera 12 semanas para el transcurso de las actividades. No obstante, como se mencionó anteriormente, existen actividades que no presentan una restricción estricta operacional para su desarrollo más que las precedencias entre los mismos tramos dentro del tiempo evaluado en el modelo. Estos no afectarán la secuencia constructiva de los demás niveles y por tanto no incluyen, en este punto del tiempo, sobre el desarrollo de la mina. Ejemplo de esto son aquellas relacionadas con el nivel de ventilación y algunas del nivel de acarreo. Lo anterior, se diferencia claramente comparando con actividades del nivel de hundimiento y producción, particularmente en estos dos niveles hay una concatenación proveniente del método de explotación y que se ve reflejada también en cómo se entrelazan las secuencias constructivas de ambos sub-niveles.

Dicho lo anterior, se tiene que al correr el modelo iterando sobre la cantidad de periodos podemos encontrar que la cantidad a la cual se culminarían todas las actividades irrestrictas del modelo. Esto tiene un efecto de disminución que sigue el comportamiento siguiente:

Cantidad de periodos de modelo	Actividades no realizadas al término de evaluación
12	380
14	339
24	219
48	59
60	27
64	0

Tabla 21: Iteración sobre periodos del modelo

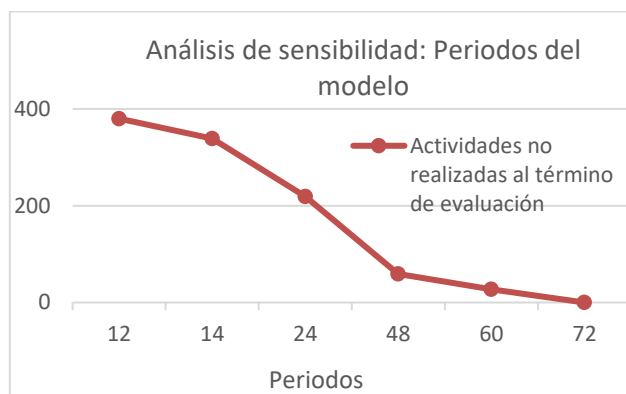


Gráfico 22: Periodos vs actividades fuera de trimestre de evaluación

Del ejercicio anterior, puede observar que a medida que uno aumenta los periodos de evaluación disminuye el número de actividades que quedan fuera de lo planificado por el modelo trimestral. Se debe considerar que los números presentados en el gráfico son resultados para un ejercicio en particular y no siempre se tendrán los mismos, dado el gap de 5% que va como parámetro de entrada en UDESS. Lo anterior, ocurre para el periodo 6 aproximadamente, es decir, 16 meses después, lo cual retrasa la construcción respecto del modelo anual, siendo incluso un tiempo mayor al predicho por el modelo anual para la ejecución de todas las actividades. Como se describió en el análisis de actividades del modelo, esto se corrige sin discretizar las actividades de *max rate* menor a 1 y que fuesen de tipo de recurso unitario. Como conclusión se puede afirmar que no todas las actividades son discretizables, al menos no con la información actual con la que se desarrolla el modelo. Habría que desagregar cada actividad unitaria en sus propios componentes y buscar un grado de avance por componente, lo cual está fuera del alcance de la información del rev B2017 y se podría llegar a encontrar en planificación de tipo diaria.

Otros efectos

Otras iteraciones que vale la pena mencionar que han sido parte de este análisis son a las precedencias del modelo. Un caso realizado fue el de transformar las precedencias de entre cada segmento discretizado desde tipo y a tipo o para ver sus efectos dentro del programa de actividades. Al igual que en los escenarios de la tasa de descuento, se pudo percibir un re-acomodo de las actividades, el cual no afecta el desempeño general del modelo en términos de avance de obras a través del tiempo. De igual manera, ocurre este efecto cuando se coloca al modelo en el escenario donde se adicionan precedencias para todas las actividades tal que cada una tenga como predecesor a la variable BENEFICIO.

5.3 Análisis del proceso Workflow

Como output final de este trabajo, se entrega el paso a paso que requiere esta metodología para ser ejecutada desde cero hasta obtener un modelo discretizado y optimizado de planificación de preparación minera.

1. Actividades

- 1.1. Conceptualización del problema de optimización: Se refiere a la identificación de los componentes de un problema de optimización, es decir, su función objetivo y restricciones de acuerdo a la información disponible de la mina (planos, informes, procedimientos, etc) para transcribirlo como un problema matemático que pueda ser posteriormente transcrito y comprendido por UDESS.
- 1.2. Elegir horizonte temporal: Se refiere al periodo de planificación que ha de ser evaluado en el programa. De esto dependerán el impacto y creación de otras actividades de la metodología tales como elegir la discretización adecuada para el problema, determinar el número de periodos y su respectiva tasa de descuento en UDESS, entre otros.
- 1.3. Definir Codificación: Una vez se tiene definida cuales son las actividades a través del tiempo que se van a ejecutar, es necesario otorgar una codificación específica que pueda ser comprendida por el usuario y que permita dar unicidad a una actividad, es decir, que se diferencie de todas las demás indicando características tales como: Subnivel al que pertenece, tipo de obra (calle, zanja, conexión, desquinche, etc) número de obra, orientación (cabeza o patilla).
- 1.4. Codificación: Se refiere a la actividad de transformar la información de la mina desde sus distintas fuentes (planos Acad, revB, planes primavera/Project, criterios de planificación y preparación minera, etc) al código definido en el paso anterior. Esta actividad puede tomar un tiempo considerable dependiendo de cuantas fuentes de información se disponga. Identificar todos los sectores y sus respectivas características es algo poco automatizable, sobre todo si cada fuente tiene su propia forma de interpretar una actividad o si estas no poseen codificación alguna y por tanto hay que crearla. Una ayuda para comenzar es el plano en Acad, puesto que los planos generalmente presentan una codificación bastante estructurada para la interpretación de obras y espacios de construcción.

2. Discretización de variables

- 2.1. Definición de escala temporal de detalle temporal: Considera el horizonte temporal previamente escogido para decidir si el problema se tratará en años, semestres trimestres, mese so incluso días, pero siempre con el cuidado de que a medida que se aumenta el detalle de la discretización crece sustancialmente la cantidad de variables en el problema y se complejiza el manejo de datos. Un ejemplo es el modelo Trimensual descrito en este trabajo, el cual tomando tres meses como horizonte de evaluación para un detalle a nivel semanal presenta aproximadamente un poco más del doble de variables que un modelo anual con detalle mensual

- 2.2. Codificación: Definida la escala de detalle temporal se procede a segmentar las actividades en tramos adecuados tal que el modelo sea operacionalmente viable. Esto quiere decir que por ejemplo las actividades no sean lo suficientemente grandes y el modelo pueda cumplir un criterio de desarrollo de múltiples frentes pudiendo cambiar la dirección de construcción sin pasar de largo. En el caso contrario, si las actividades se fragmentan a valores muy pequeños, debe cuidarse no solo el aumento de restricciones por la fragmentación en si misma de las variables, sino que además incorporar restricciones de progreso límite y de recursos para hacer física y operacionalmente viable a una variable muy pequeña
 - 2.3. Rendimientos de entrada: Toda variable discretizada debe obtener un rendimiento máximo que la haga operacionalmente viable. Para efectos del problema en UDESS esto se traducirá en la variable *max rate* y a través de ella pueden calcularse las porciones de tiempo requeridas para concretar una vez dicha actividad en cualquier escala temporal.
 - 2.4. Recursos del problema: Se refiere a otorgar la cantidad máxima de insumo disponible para un(os) tipo(s) de actividad(es), lo cual en UDESS se ingresa a través de las columnas del archivo ACT.txt y seorean con las actividades que se encuentran en las filas del archivo formando una matriz de recursos
 - 2.5. Asignación de parámetros económicos: Dado que UDESS es un agendador que concibe la resolución de un problema de optimización a través del cálculo del VAN de un proyecto. Con lo anterior en consideración, se crea primero una actividad “comodín” adicional al problema y que contenga un valor lo suficientemente grande tal que toda otra actividad con un beneficio menor desee alcanzarla. Dicho lo anterior, y al agregar un valor de beneficio similar a todas las actividades del modelo (pero siempre inferiores al comodín), se libera entonces el factor económico y la solución del problema se resuelve en torno a las precedencias y restricciones, o sea, a cuál actividad es capaz de llegar primero a poder ejecutar el comodín en el menor tiempo posible.
3. Precedencias
 - 3.1. Definición Secuencia constructiva: Se define o extrae la secuencia constructiva de los sectores a programar para tener claridad del orden en que deben ejecutarse las actividades de preparación minera.
 - 3.2. Codificación: En este caso la codificación solo alude al tipo de precedencia que mejor se adapta al problema dada la secuencia constructiva. Se asignará un sucesor y predecesor a toda variable dentro del modelo para luego seguir la sintaxis del archivo PREC.txt, es decir, asignar un grupo (número entero) -1 cuando la actividad tenga dependencia tipo “y” o asignar precedencia tipo “o” al tratarse de actividades que pueden ser ejecutadas en paralelo a otras.
4. Restricciones
 - 4.1. Codificación: Se refiere relacionar todas las restricciones del problema con alguna de las opciones disponibles en UDESS (MP,GR,OR,SC,etc), tal que puedan re-escribirse en la sintaxis de UDESS. Lo anterior cuidando que para cada tipo de restricción se deben tener

distintos datos tales como los grupos de desarrollos horizontales a los cuales se les asignará la cualidad de “múltiples frentes”, los periodos máximos y mínimos de completación de actividades, los recursos permitidos en un determinado intervalo de tiempo, entre otros.

- 4.2. JavaScript Object Notation: Una vez con el listado de restricciones construido, se debe pasar desde lo que UDESS comprende y validar en su conjunto las restricciones junto con toda la información del proyecto creado para el modelamiento. Para ello se debe transcribir la información de restricciones y referenciar los archivos *ACT.txt* y *.prec*. En el caso del archivo de precedencias se debe primero pedir al programa UDESS que en su interfaz común que valide el archivo *PREC.txt* y lo transforme a uno con extensión *.prec*
- 4.3. Validación de código Json: Una vez culminado el código con los datos anteriores es necesario tener un validador de código, tal que se agreguen o corrijan todos los detalles de sintaxis en Json, tales como por ejemplo, las comas al final de cada línea, los corchetes para delimitar grupos, las comillas dobles para indicar texto, entre otros aspectos. En el caso del modelo Trimensual se utilizó una combinación de Sublime Text con JsonLint para llevar a cabo la validación.

5. Parámetros UDESS

- 5.1. Periodos: Se acuerdo al horizonte temporal elegido y a la escala temporal se obtiene en consecuencia el número de periodos para evaluación, los cuales son un parámetro que se puede ingresar en la interfaz UDESS, pero también en el Script de Json siendo mejor la segunda opción, se concentra la data en un solo archivo.
- 5.2. Tasa: De acuerdo al número de periodos y a la prioridad que se les otorgue a las actividades a lo largo de estos se puede escoger distintas tasas de descuento que asignarán mayor o menor beneficio a los periodos futuros de acuerdo a la aplicación de la fórmula de Valor presente Neto. Este es un parámetro que se puede ingresar en la interfaz UDESS, pero también en el Script de Json siendo mejor la segunda opción, pues se concentra la data en un solo archivo.
- 5.3. Validación de datos de entrada: Para validar la data completa del archivo en extensión *.json* se debe cargar el proyecto a UDESS través de un archivo de extensión *.uds* el cual se obtiene tras obtener el archivo *.prec* y este deberá incorporar exactamente el mismo contenido que el script Json. Una vez cargado el archivo en la interfaz UDESS se presentarán los datos del problema en cada una de sus pestañas, pudiendo ser editables las precedencias y restricciones en forma “manual” si es requerido.
- 5.4. Elección de parámetros de solver: Previo a ejecutar el programa se debe otorgar los parámetros de resolución del problema, es decir, el tipo de solver a utilizar, el método que este aplicará y el MIPGap de tolerancia. Adicionalmente se podrá otorgar el nombre de los archivos de salida que por defecto llevan el nombre de *instance.xls* y *output.xls*. En ellos se podrá también designar las pestañas variables quedarán escritas en las distintas pestañas de Excel como por ejemplo , los metros de desarrollo horizontal, vertical, obras civiles, todo separado para un análisis posterior más cómodo. En el caso de este trabajo el modelo Trimensual utilizó Grurobi como *solver*, método *Full MIP* con un *gap* de valor 5.00

6. Ejecución de modelo:
 - 6.1. Toma tiempo: Tras darle “Run” al modelo para su ejecución, es importante medir el tiempo de resolución del problema para ir comparando el rendimiento del software frente a los distintos escenarios para análisis que se prueben.
 - 6.2. Consola UDESS: Mientras se ejecuta el programa la consola entregará datos sobre la resolución del problema matemático que pueden ser de utilidad, tales como la estadística de coeficiencia (rango de matriz, rango objetivo, rangos límites, rango RHS), conteo de tipos de variables (continua, binaria) y la magnitud de los valores objetivo, límite y gap

7. Resultados y análisis
 - 7.1. Archivo Instance: Este archivo de formato Excel entregará la data general de como UDESS ha entendido y construido el problema de optimización que va a resolver. Dentro de su contenido están los periodos con su tasa respectiva, la cantidad de Actividades, cantidad de precedencias y número de restricciones clasificadas por su tipo (OR, GR, MP, SC, etc).
 - 7.2. Archivo Output: Este archivo de formato Excel entrega, de acuerdo a lo solicitado en la pestaña solver, todos los parámetros con su progreso de acuerdo a los recursos que la solución del problema establece como óptima dentro del periodo de evaluación indicado. Con ello, puede interpretarse la construcción de la mina y realizar análisis del caso.
 - 7.3. Análisis de rendimiento de obras: A fin de visualizar si el modelo se comporta adecuadamente ante las restricciones del problema se plantean tres análisis al output del programa.
 - 7.3.1. Análisis global: Utilizando la pestaña “progress”, la cual muestra en términos porcentuales el avance de cada actividad. Viendo un gráfico de avance porcentual acumulado a través de los periodos, se puede entonces comparar contra escenarios de planificación tradicional o bien contra otros modelos de planificación de preparación minera. Se podrá visualizar en que momento quedan todas las obras construidas o bien cual caso distribuye de mejor forma las actividades en el tiempo a ojos del planificador.
 - 7.3.2. Análisis por tipo de obras: Utilizando las pestañas con el nombre de los recursos imputados al código del programa, pueden identificarse por tipo de obra como es la distribución y uso del recurso. Por ejemplo, podrán verse los rendimientos de avance para desarrollos horizontales del nivel de producción en forma aislada y con ello construir un gráfico de avance acumulado en la unidad que el recurso posee. Se podrá visualizar en que momento quedan todas las obras construidas o bien cual caso distribuye de mejor forma las actividades en el tiempo a ojos del planificador. El criterio experto ayudará en este análisis a decidir cuales recursos debiesen ser utilizados antes que otros y por ende corregir las restricciones en la siguiente iteración del modelo.
 - 7.3.3. Análisis de casos puntuales: Observando el comportamiento de una sola actividad bajo tablas comparativas para distintos modelos, se puede ver en el archivo output cuantos segmentos de actividad hay paralelo para un periodo determinado y además apreciar que ubicaciones ha decidido tomar el software. Analizar este nivel de detalle

sirve para la planificación de corto plazo donde nuevamente con criterio experto se puede discernir si acaso el modelo no está entregando construcción de obras física u operacionalmente inviables.

8. Iterar:

8.1. Se refiere a volver a pasos anteriores de acuerdo a la conformidad con la solución obtenida. Se podrá trabajar editando el archivo Json desde este punto en adelante tal que no se incurra en generar todo el procedimiento desde cero.

Esquemáticamente lo anterior se puede resumir en el siguiente esquema metodológico

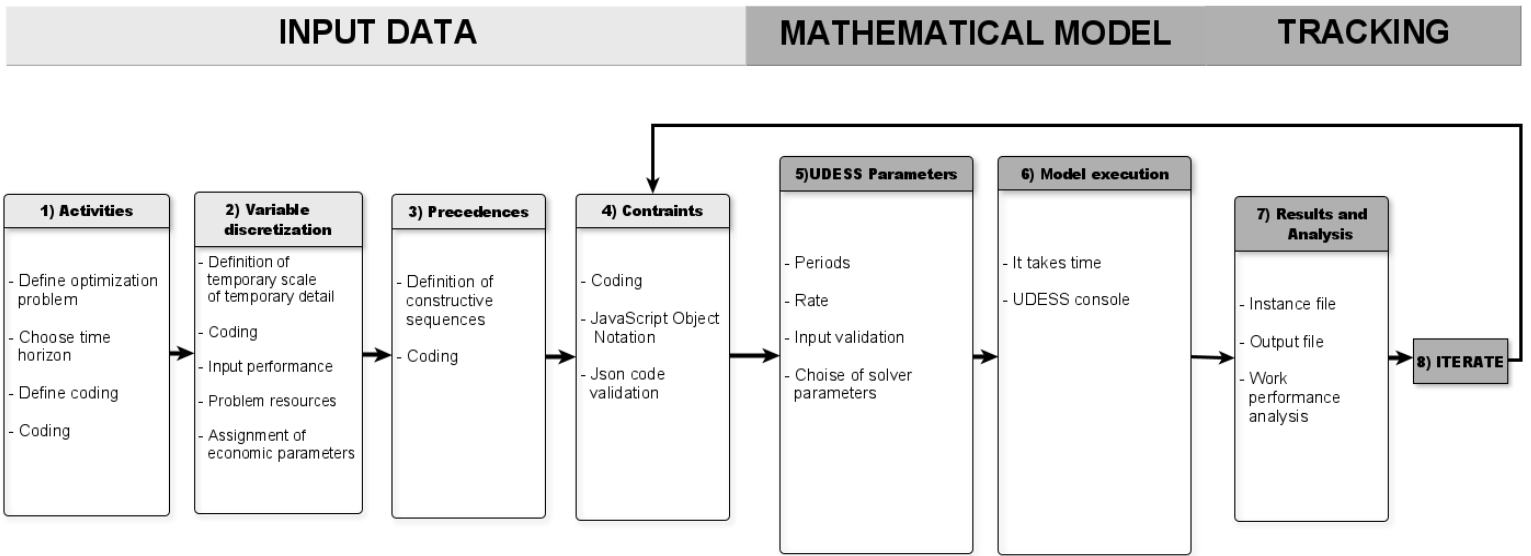


Ilustración 38: Metodología de modelación mediano plazo en UDESS

5 Conclusiones, Recomendaciones y medidas de mitigación

En términos generales, la metodología propuesta de modelamiento para preparación minera a mediano-corto plazo permite un agendamiento optimizado respecto de la planificación tradicional y además mejora el agendamiento de actividades al ser incorporada una discretización más acabada de estas últimas. Lo anterior tomando en cuenta la factibilidad operacional del plan bajo una perspectiva donde las obras se aprecian bajo una mirada de nivel semanal. La mayor ventaja que deja el uso de modelos matemáticos para resolver el problema es sin duda la generación de una mejor distribución de las actividades del plan a través del tiempo de evaluación, lo cual, por supuesto trae consigo muchas oportunidades de mejora y, de forma indirecta, reducción de costos y tiempos involucrados tras el uso de esta metodología de agendamiento.

Acorde a la metodología de construcción del modelo anual (largo plazo) se ha seguido la recomendación de modelar por sub-niveles, tal que se parte por un nivel en que el volumen de actividades es más bajo o intermedio, especialmente para el caso de estudio que es la primera prueba en UDESS. Esto permite ir realizando pruebas cortas al modelo para verificar que está haciendo lo que se desea que haga, y además otorga confianza y rapidez en los niveles más complejos.

Comparando el modelo tri-mensual con el anual en relación al porcentaje acumulado de actividad que van culminando a lo largo de los periodos de evaluación, entonces se puede apreciar que existe un comportamiento similar entre el caso del modelo a tres meses a escala semanal y el de doce meses. Particularmente para los primeros 4 periodos el modelo anual logra un *peak* superando al trimensual en la última semana mientras que el trimensual se mantiene con un crecimiento en el desarrollo de actividades más constante a través del tiempo, no obstante, en el último mes de progreso el modelo logra un *peak* en el agendamiento optimizando la cantidad de obras realizadas al inicio de marzo y con ello sobrepasando el porcentaje de obras construidas del modelo anual.

Esto se puede explicar por un mejor reordenamiento de las actividades en general que estratégicamente guardan recursos en los primeros meses para poder ejecutar un *peak* al final del periodo de evaluación. Esto es finalmente un efecto que ejecuta el agendador acorde al periodo de horizonte temporal pre-establecido, es decir, que si se aumenta el número de periodos imputados el agendamiento intentará entregar su mejor solución mejorando escaladamente la proporción de actividades que va ejecutando en sus últimos periodos.

Al realizar una comparación por separado mirando en detalle el tipo de obras en donde existe una mejoría en el agendamiento trimensual, se puede destacar que este efecto se acentúa en las obras de desarrollos de túneles tanto para las construcciones horizontales como verticales consideradas en el periodo de evaluación. Es factible construir un modelo de mediano plazo trimensual ejecutable en UDESS incorporando las restricciones de un plan anual (largo plazo) y uno de nivel semanal (mediano-corto plazo). La discretización del modelo anual permite al modelo de mediano plazo obtener una vista más amplia y detallada sobre cómo cambia el comportamiento de las actividades a nivel semanal. El impacto más importante es el reacomodo de las actividades pudiendo en varios casos cambiar el orden y adelantar el inicio de determinadas obras. Esto

contribuye positivamente al modelo su planificación de preparación minera e indirectamente puede disminuir los costos de construcción.

Dado que el modelo Trimensual presenta actividades que han sido discretizadas en partes semanales para efectos del zoom del problema, se debe tener en consideración que no todas las actividades pueden ser segmentadas de acuerdo a la regla general del indicador “actividad/semana”. Esto no puede ser utilizado específicamente para aquellas actividades que presentan un *max rate* menor a la unidad, puesto que si bien para gran parte de las actividades (88%) se ha dejado sin alteración esta variable, para el caso de un *max rate* menor a 1 en una actividad discretizada, se tiende a retrasar el cumplimiento de la actividad con respecto al modelo anual, porque se fuerza a que, al incorporarle más periodos se requiera entonces una mayor capacidad de ejecución para la actividad, es decir, un mayor *max rate*. En total son 22.5% de las actividades las que presentan el comportamiento antes descrito y otro factor común de todas las obras bajo estas características es que no poseen ningún tipo de restricción programada más que las precedencias entre sus propios segmentos y por lo tanto no afectan el proceso constructivo de las demás. Dicho lo anterior, no están obligadas a realizarse en un periodo específico ni tampoco tienen límite de recursos pre-establecido.

En cuanto a la capacidad de UDESS como software agendador, los resultados son positivos para el uso de esta metodología una vez ingresado el problema de optimización trimensual el programa toma un par de horas como máximo para el cálculo y entrega de resultados de un escenario. De acuerdo al análisis de sensibilidad el programa fue capaz de modelar hasta en 60 periodos un total de 1349 actividades asociadas al plan de preparación minera de Esmeralda con 2213 restricciones relacionadas a las secuencias constructivas del panel caving. Esto da tiempo suficiente como para generar distintos planes y en el entretiempo analizar y medir la sensibilidad respecto los periodos, descuento o actividades críticas de la planificación en preparación minera. Otra virtud de la utilización de este tipo de metodología tiene relación con la versatilidad con que un modelo matemático enfrenta el problema de optimización, entendiendo el problema y sus restricciones es posible complementar la programación a través de Json en este caso, para generar restricciones que otros agendadores no podrían. Un ejemplo de esto son las correcciones que pueden llegar a realizarse a aquellas actividades que al buscarse la solución óptima del problema quedan particionadas. Lo anterior por supuesto sumado a criterio minero teniendo el cuidado sobre aquellos casos donde no puede ocurrir fraccionamiento dado la naturaleza de la actividad como lo es por ejemplo un carguío de explosivos o actividades críticas de avance mina como la fortificación especial de una bifurcación.

En relación a las restricciones, se ha utilizado una manera más ágil de ingreso al programa dado que el modelo de mediano plazo contempla un número significativamente mayor de actividades y particularmente de restricciones, pero el programa actualmente solo cuenta con el ingreso “manual” de las restricciones. En este caso se utilizó manipulación de datos a través de script de java para objetos (Json, lenguaje con una sintaxis rígida, pero que permite exportar los datos a Excel para ser configurados con herramientas como VBA o Python. Además, un script Json ordenado permite una visualización más práctica para el cambio de restricciones evitando tener que partir de cero en la interfaz de UDESS de la pestaña “constraints”. Pese a que una herramienta adicional para

programar disminuye los tiempos de construcción del modelo, es recomendable ajustar la interfaz para un manejo más directo de las restricciones o en su defecto tener un paquete completo para el entendimiento y uso de este tipo de variables en UDESS. Esto último representaría una mejora sustancial en lo que respecta la aplicación de esta u otras metodologías de desarrollo para planes de preparación minera e incluso para otros problemas que involucren agendamiento a resolver través de un problema de optimización.

6 Bibliografía

- Albert, N. (2004). *Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine*. European Journal of Operational Research.
- Alford C., B. M. (2006). En *Optimisation in Underground Mining*. (pág. Chapter 30.).
- B. Brady, E. B. (2004). *Mining methods and method selection*. Dordrecht.
- Barrios, J. C. (2017). *Aplicación de filosofía Lean en la Preparación minera, Mina el Teniente, Codelco Chile*. Santiago: Universidad de Chile.
- Brickey, A. J. (2015). *Underground production scheduling optimization with ventilation constraints*.
- Bullock, R. L. (2011). *Introduction to Underground Mine Planning*. Mining Engineering.
- Camhi, J. (2012). *Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de block caving caso estudio mina El Teniente Codelco*. Rancagua: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Capterra. (12 de Enero de 2021). *Capterra*. Obtenido de Capterra: <https://www.capterra.cl/software/181380/oracle-primavera>
- Carrasco, C. C. (2016). *Simulación como herramienta para la planificación minera en Block/Panel Caving*. Santiago: Universidad de Chile.
- Codelco División El Teniente. (2017). *Rev A Esmeralda Sur Final*. Rancagua, Región libertador Bernardo O'Higgins.
- Codelco, G. d. (2017). *Informe Lineamientos pra Planificación programa P0-2017*. Rancagua: CODELCO División El Teniente.
- Codelco, G. d. (2017). *Programa de preparación mina 2017 Rev B*. Rancagua: CODELCO División El Teniente.
- Comisión calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras. (2015). *planificación minera 360°*. Santiago: IMCH.
- Cordero, M. (2010). *Planificación Minera Estratégica de un Panel Caving*. Santiago: Tesis Universidad de Santiago de Chile.
- Cursos GeoMin. (1 de Septiembre de 2010). *Cursos GeoMin*. Obtenido de www.cursosgeomin.com.ve

- DASSAULT SYSTEMES. (1 de Marzo de 2020). *Dassault Systems Geoviasurpac*. Obtenido de www.3ds.com
- Delgado, E. (2017). *Diseño del método de explotación bajo tierra sobre plataforma de software Surpac para la mina el santuario, minas Paz del Rio S.A.* SOGAMOSO: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC.
- DELPHOS Mine Planning Laboratory. (2020). *DELPHOS Mine Planning Laboratory*. Obtenido de www.delphoslab.cl
- Díaz, G, M. E. (2008). *Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day - El Teniente Mine*. Rancagua, Chile: Fifth International Conference & Exhibition on Mass Mining.
- Dorador, L. (2012). *Alternativas de predicción de fragmentación secundaria en minería de hundimiento masivo(Block/panel Caving*. Canadá: Golder Associates Ltd. Burnaby.
- Flapper, F. &. (1996). Towards consistent performance management systems. *International Journal of Operations and Production Management*, 27 - 37.
- Fundación tecnológica. (2012). *Planificación minera*. Santiago: Boletín Minero.
- García, A. (2018). *Ampliación Topografía Minera*. Santiago: eicm.
- Gerencia de obras mina, E. T. (2019). *Programa de preparación de Minas, sector Esmeralda Rev A*. Rancagua: Codelco, El Teniente.
- Gonzales, T. (2018). *Modelamiento del plan anual de preparación minera de la división El Teniente utilizando modelo de optimización UDESS*. Santiago: Repositorio U. Chile.
- Hartman, H. (1992). *SME Mining Engineering Handbook*. Second edition, Volume 1, .
- Inostroza, B. (2018). *Agendamiento de las preparaciones mineras para el primer macrobloque de la mina Chuquicamata subterránea*. Santiago: Universidad Andrés Bello.
- (1987). *Introductory Mining Engineering*. publisher.
- J Vázquez, N. M. (2007). *Optimización de planes mineros de producción en panel Caving incluyendo actividades de preparación y desarrollo*. SANTIAGO: DELPHOS, AMTC, DIMIN, UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Jammet N., A. R. (2014). *New growth strategy in Esmeralda Mine. Caving 2014*.
- Kazakidis V. (2001). doct. University of British Columbia.
- Lambert, W. B., Newman, A. M., & Eureka, K. (2014). *Open-pit Block-Sequencing Formulations: A tutorial*.
- Lledó, P. (2013). *Director profesional de proyectos: como aprobar el PMP sin morir en el intento*. Argentina: PABLOLEDO.COM LLC.

- Luu, K. &. (2008). Improving project management performance of large contractors using benchmarking approach. *International Journal of Project Management*, 758-769.
- Martinez M., N. A. (2011). A solution approach for optimizing long and short term production scheduling at LKAB Kiruna mine. *European Journal*.
- Moya, J. (2018). *Análisis y propuesta de mejora al seguimiento y control, y cierre de proyectos de Antofagasta minerals,. Caso Aplicado proyecto óxidos encuentro*. Valparaíso: UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS.
- Musingwini C. (2016). Optimization in underground mine planning – developments and opportunities. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Newman A. (2007). Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine. *European Journal of Operational*.
- Newman A. (2010). A review of operations research in mine planning.
- Ortiz, J. (2013). *Apuntes de curso de Explotación de minas*. Santiago: Universidad de Chile.
- Oyaneder J., R. P. (2016). Metodología de Análisis de Constructibilidad,. *Umining 2016*.
- PARAMINA. (12 de Marzo de 2020). *PARAMINA*. Obtenido de www.paramina.com
- PDFSLIDE. (1 de Marzo de 2020). *PDFSLIDE*. Obtenido de www.pdfslide.tipd
- Rocher W., R. E. (2011). Eight-Dimensional PLanning-Construction of an. *APCOM 35th*.
- Rocher, W. (2012). *Secuenciamiento óptimo de preparación minera*. Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Rodriguez C, S. S. (2 de Agosto de 2013). *Slideshare*. Obtenido de es.slideshare.net
- Rojas V., G. T. (2019). Optimization of an annual mining development plan using mathematical programming. *Geomin Mineplanning*.
- Rojas, V. (2016). *Secuenciamiento óptimo de caserones en minería subterránea selectiva*. Santiago: Universidad de Chile.
- Rubio , E., Rocher, W., & Morales, N. (2011). *Secuenciamiento de preparación y desarrollo minero en faenas subterráneas*. Santiago: Advanced Mining Technology Center, U. de Chile.
- Rubio E. (2002). Long term planning of block caving operations using mathematical. Tesis doct. University of British Columbia.
- Universidad Politécnica de Madrid. (2017). *Diseño de explotaciones e infraestructura minera subterránea*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Urbano, C. (2001). *El análisis de citas en trabajo de investigadores como método para el estudio de uso de información en bibliotecas*. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Vásquez, J. (2018). *Optimización de planes mineros en Minas explotadas por Panel Caving incluyendo actividades de preparación minera*. Santiago: Universidad de Chile.

Vergara, Y. (2014). *altura de columna en Block/Panel Caving*. Santiago: Universidad de Chile.

Winston R., c. (2012). *Secuenciamiento óptimo de preparación minera subterránea*.

7 Anexos

<https://drive.google.com/drive/folders/1F6e8zITTap2wfjhwtRDKr0Zr-8Sybl10?usp=sharing>