

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante:
Sr. René Gómez P.
Ingeniero Supervisor:
Sr. Claudio Paillamán O.

EFFECTO DE LA CONSTRUCTIBILIDAD EN MINERÍA SUBTERRÁNEA BAJO CONDICIÓN DE ALTOS ESFUERZOS

CASO PROYECTO ANDES NORTE - NUEVO NIVEL MINA

Vicepresidencia de Proyectos
División El Teniente, Codelco, Chile.

Cristóbal Eduardo Ritter Gutiérrez

Informe de Memoria de Título para optar al título de
Ingeniero Civil de Minas

Octubre, 2018

RESUMEN

La profundización progresiva de las reservas minerales explotados a lo largo del mundo ha llevado consigo un sinnúmero de desafíos tecnológicos y de ingeniería que permitan alargar la vida útil de las minas manteniendo la producción de estas a un costo operativo competitivo. En particular, la mina El Teniente de Codelco, Chile, no ha sido la excepción, por lo que la empresa estatal ha decidido generar un plan maestro que permita mantener el régimen de producción de 135 ktpd por aproximadamente otros 50 años, dicho plan es denominado como “Proyecto Nuevo Nivel Mina”.

Sin embargo, las complejidades constructivas presentadas durante la ejecución del proyecto, subyugadas principalmente por la condición de altos esfuerzos del macizo rocoso, han obligado a la corporación a reestructurar por completo el mismo.

El presente estudio contempla identificar, analizar y proponer oportunidades de mejora respecto a los impactos que la condición de altos esfuerzos ha tenido sobre las labores, particularmente en términos de planificación, productividad y costos.

Los objetivos propuestos son logrados mediante la utilización de una serie de herramientas tanto computacionales como ingenieriles, entre las que se encuentran la simulación de la constructibilidad y los plazos de ejecución de desarrollos mediante los softwares @Risk® y Deswik®, además de la realización de *benchmarking* respecto al ítem de costos.

A lo largo del estudio destaca la obtención de rendimientos mediante la simulación de escenarios, en donde se aprecia que los tiempos de ciclo realizados en frente única en condición de altos esfuerzos son hasta 4 veces mayores respecto a los tiempos obtenidos en condiciones favorables, hecho que impacta profundamente los plazos de ejecución considerados por el proyecto, por los que se proponen una serie de medidas operacionales y de planificación con el fin de disminuir el impacto identificado. Por otro lado, destacan también los valores obtenidos mediante la simulación de los desarrollos interior mina, en donde se aprecia que los metros por mes y el grado de utilización de los equipos es 50% menor en condición de altos esfuerzos, existiendo un potencial de más de 400 metros al mes entre lo que se ejecuta y lo que pudiera ejecutarse si se llevara a cabo una mejor planificación, por lo que se procede a desarrollar una herramienta de planificación con el fin de adicionar el valor presentado.

Respecto al benchmarking realizado, se destaca la obtención de los costos por metro lineal de desarrollo, en donde se aprecia que dicho parámetro puede llegar a ser 3,6 veces mayor en condición de altos esfuerzos, lo que responde a la aplicación de medidas únicas, como el preacondicionamiento, el robustecimiento de la fortificación, y la consideración de periodos de aislación post-tronadura, medidas que permiten mantener los indicadores de seguridad dentro de los márgenes propuestos tanto por la normativa legal vigente como por la corporación.

ABSTRACT

The progressive deepening of the mineral reserves exploited around the world has led to a variety of technological and engineering challenges which aim at extending the lifespan of the mines, keeping the production rate at a competitive operating cost. Particularly, the mine “El Teniente” property of CODELCO, Chile, has not been the exception; therefore, the company has decided to generate a master plan, which allows the production rate of 135 ktpd by another 50 years. This plan was named as “Proyecto Nuevo Nivel Mina”.

Nonetheless, the constructive complexities presented throughout the execution of the project, given basically by the high stress conditions of the rock mass, have forced the company to restructure the Project.

The present study intends to identify, analyze and propose opportunities of improvements with respect to the impacts of high stress condition has had over the labors, specifically in terms of productivity, planning and cost.

To achieve the proposed aims, computational and engineering tools have been used, among which we find simulation of the constructability and execution deadlines using @Risk® and Deswik® software, and the realization of benchmarking for the cost items.

Throughout the study, performance achievement stands out through the simulation of scenarios, where it can be seen that the cycle times carried out in tunnels in conditions of high stress up to 4 times larger than the previous times under favorable conditions, fact that deeply impacts the achievement of deadlines considered by the project, for which a series of operational and planning measures are proposed for the purpose of the identified damage. On the other hand, the values obtained through the simulation of the OIM developments. where it are highlighted observed that the meters per month and the degree of use of the equipment is 50% lower in the condition of high stress, presenting a potential of more than 400 meters per month between what is executed and what could be executed if a correct planning carried out, were to be therefore a planning tool is developed in order to add the value presented.

Regarding the benchmarking conducted, it is observed that the costs per linear meter of development can be 3.6 times higher in the condition of high stress, which responds to the application of unique measures, such as the preconditioning, strengthening of the fortification, and the consideration of periods of post-blasting isolation, measures that allow maintaining the safety indicators within the margins proposed by both the current legal regulations and the corporation.

AGRADECIMIENTOS

“En todas las maneras concebibles, la familia es un vínculo con nuestro pasado y el puente hacia nuestro futuro” (Alex Haley). Teniendo dicha frase como referente, quisiera agradecer primeramente al destino, por darme la oportunidad de pertenecer a una familia sencilla y cariñosa, con una tremenda base ética y valórica, lo que me permitió crecer en un ambiente grato y constructivo; oportunidad que un gran número de personas no suelen tener. Espero algún día poder retribuir mi suerte, otorgando oportunidades a quienes no las tuvieron en su momento.

Siguiendo la misma línea, quisiera agradecer a mis padres, pilares fundamentales de mi crecimiento espiritual, deportivo y profesional; personas de esfuerzo incansable, que lucharon día a día para que no me faltara nada, tanto en lo material como en lo afectivo. Viejitos, esto es para -y gracias a- ustedes, ya pueden descansar, ahora me toca a mí. Mencionar también a mis hermanos y hermanas por el apoyo brindado en pequeños pero significativos gestos; el camino no fue ni corto ni sencillo, pero gracias a ustedes el viaje se hizo más ameno.

Como olvidar a mi flaca, la persona que debe atender a todas mis virtudes y defectos (que por lo demás no son pocos). Gracias por escucharme, quererme y apoyarme en todo momento. Espero seguir forjando juntos nuestro destino, el que seguramente estará lleno de éxitos mientras el amor permanezca vivo.

Agradecer además a mis amigos, en particular a los que me han estado apoyando desde la génesis de este objetivo; somos pocos, pero locos, estoy orgulloso de tenerlos a mi lado. Espero poder seguir contando con ustedes, así como ustedes pueden contar conmigo.

Finalmente agradecer a la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco, en particular a Don Claudio Paillamán Oliva por haberme brindado esta tremenda oportunidad, mentor y guía de esta notable experiencia de constante aprendizaje; en general, quisiera reconocer a todos los viejitos que constituyen la famosa casa 62 del campamento Coya, su sabiduría y tremenda disposición son invaluable, sin duda el proyecto vive en gran medida gracias a ustedes.

Gracias totales a todos los que han aportado su granito de arena durante este largo proceso, esto recién comienza y probablemente voy a seguir necesitando de ustedes. El techo es el cielo.

CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Generalidades	1
1.2	Esquema del Estudio.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo General.....	3
1.3.2	Objetivos Específicos.....	3
1.4	Metodología General	4
1.4.1	Metodología para la Evaluación de la Planificación y Productividad.....	4
1.4.2	Metodología para la Evaluación de los Costos.....	5
1.5	Alcances	6
1.5.1	Generales.....	6
1.5.2	Túneles.....	6
1.5.3	Obras Interior Mina.....	7
2	Antecedentes del Caso de Estudio.....	8
2.1	Antecedentes de la Empresa	8
2.2	Ejecutor y Cliente del Proyecto	8
2.3	Descripción del Proyecto.....	11
2.3.1	Proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM).....	11
2.3.2	Complejidades Constructivas que Motivaron el Cambio.....	12
2.3.3	Proyecto Andes-Norte Nuevo Nivel Mina (PAN-NNM).....	13
3	Marco Teórico.....	16
3.1	Motivación del Estudio.....	16
3.2	Constructibilidad en Minería Subterránea.....	18
3.2.1	Metodologías Constructivas.....	19
3.2.2	Tipos de Desarrollo en Minería Subterránea.....	20
3.2.3	Principales Parámetros de Entrada en la Constructibilidad.....	21

3.3	Proceso de Validación de la Constructibilidad.....	22
3.3.1	Ciclo Minero Tradicional.....	22
3.3.2	Complejidades Constructivas en el Desarrollo del Proyecto.....	25
3.3.3	Validación de la Constructibilidad del Proyecto.....	26
3.3.4	Impactos de la Validación de la Constructibilidad.....	30
4	Desarrollo.....	33
4.1	Planificación y Productividad.....	33
4.1.1	Frente Única.....	33
4.1.2	Frentes Múltiples.....	40
4.2	Costos.....	46
4.2.1	Frente Única.....	46
4.2.2	Frentes Múltiples.....	46
5	Resultados y Discusiones.....	48
5.1	Perspectiva de la Planificación y la Productividad.....	48
5.1.1	Análisis por Operación Unitaria Modificada en Frentes Críticos.....	48
5.1.2	Análisis de Rendimientos Túnel Correa por Ciclo Según Tipo de Fortificación.....	55
5.1.3	Análisis de Construcción del Túnel Correa.....	61
5.1.4	Simulación del Nivel de Hundimiento (OIM).....	65
5.1.5	Identificación del Equipo Crítico en OIM.....	68
5.1.6	Herramienta de Planificación Diaria en Función de los Equipos Críticos.....	71
5.2	Perspectiva de los Costos.....	72
5.2.1	Benchmarking de Costos por Tipo de Fortificación para Túneles.....	72
5.2.2	Benchmarking con Minas Esmeralda y Reservas Norte para OIM.....	73
6	Conclusiones y Recomendaciones.....	76
6.1	Planificación y Productividad Túneles.....	76
6.2	Planificación y Productividad Obras Interior Mina	78
6.3	Costos.....	79
7	Referencias.....	81

8	Anexos.....	84
A.	Administración del Riesgo Sísmico.....	84
B.	Fotogravimetría ADAM.....	88
C.	Análisis de Base de Datos para Simulación de Túnel Correa.....	89
D.	Resultado de Ajuste de las Distribuciones.....	92
E.	Ejemplo de Validación de Ajuste.....	94
F.	Componente de la Simulación para Obtener los Rendimientos por Ciclo	95
G.	Parámetros de Entrada más Relevantes en el Modelo de Simulación	96
H.	Extracto de Informes Diarios Respecto a la Disponibilidad de Equipos	100
I.	Tiempos de Desplazamiento entre Frentes	100
J.	Resultados de las Simulaciones	101
K.	Resultados Análisis de Sensibilidad para Desarrollo de Túnel Correa.....	103
L.	Resultados de Factores de Consumo.....	105
M.	Desglose de Tiempos de Ciclo y Cantidad de Ciclo por Día según Equipo	106
N.	Construcción de Planilla para la Planificación Diaria	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema general del estudio. _____	2
Figura 2.1: Ubicación Proyecto Nuevo Nivel Mina en División el Teniente. _____	9
Figura 2.2: Distribución espacial Proyecto NNM en División El Teniente. _____	10
Figura 2.3: Programa de producción del Proyecto Nuevo Nivel Mina y División El Teniente. _____	12
Figura 2.4: Distribución de esfuerzo desviatorio en PNNM. _____	13
Figura 2.5: Programa de producción del Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina y PDA División El Teniente. _____	14
Figura 3.1: Impacto de las modificaciones en función del tiempo del proyecto. _____	17
Figura 3.2: Impactos de un buen proceso de constructibilidad en proyectos de gran envergadura. _____	18
Figura 3.3: Esquema básico de constructibilidad en minería subterránea de altos esfuerzos. _____	19
Figura 3.4: Desarrollos más importantes en Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina. _____	21
Figura 3.5: Proceso de obtención de rendimientos en minería. _____	21
Figura 3.6: Flujograma del Ciclo de Avance Minero en PAN-NNM. _____	24
Figura 3.7: Proceso de generación de sismicidad inducida. _____	25
Figura 3.8: Estallido de roca en Xc 22/23 PNNM, 19 de mayo 2015. _____	26
Figura 3.9: Vista isométrica Fracturamiento Hidráulico TAP OIM, PNNM. _____	27
Figura 3.10: Efecto teórico del Destress Blasting. _____	28
Figura 3.11: Ejemplo de fortificación utilizado en zonas con alto riesgo sísmico en PNNM. _____	29
Figura 4.1: Esquema resumen del desarrollo del estudio. _____	33
Figura 4.2: Vista Isométrica de Túneles Principales Proyecto NNM en División El Teniente. _____	34
Figura 4.3: Procedimiento de validación de distribuciones de probabilidad. _____	36
Figura 4.4: Zonificación por tipo de fortificación Túneles Principales Proyecto NNM en División El Teniente. _____	38
Figura 4.5: Frentes a simular con sus respectivos puntos de inicio y termino en base a la mensura del 01 de junio del 2018, PNNM. _____	39
Figura 4.6: Alcance de Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina en nivel de hundimiento. _____	42
Figura 4.7: Distribución de las actividades de un turno promedio en el PAN-NNM. _____	44
Figura 4.8: Cantidad de metros a realizar según sección en PAN-NNM. _____	45
Figura 5.1: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria extracción de marina según metodología constructiva. _____	48
Figura 5.2: Ejemplificación de obtención de tiempos de ciclo considerando periodo de aislación. _____	49

Figura 5.3: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria acuñadura y limpieza según metodología constructiva.	49
Figura 5.4: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria geología y topografía según metodología constructiva.	50
Figura 5.5: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria fortificación según metodología constructiva.	51
Figura 5.6: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria fortificación del frente según metodología constructiva.	52
Figura 5.7: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria perforación de avance según metodología constructiva.	52
Figura 5.8: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria carguío y tronadura según metodología constructiva.	53
Figura 5.9: Gráficos de Distribución de probabilidad de tiempo de ciclo por tipo de fortificación.	55
Figura 5.10: Gráficos de araña para análisis de sensibilidad de ciclos por tipo de fortificación.	57
Figura 5.11: Gráficos de tornado respecto a la varianza para análisis de sensibilidad de ciclos por tipo de fortificación.	58
Figura 5.12: Resultado de la simulación de los días de construcción por decil de probabilidad de cumplimiento, PNNM.	62
Figura 5.13: Gráficos de rendimientos globales por frente, PAN-NNM.	62
Figura 5.14 (a): Resumen de análisis de sensibilidad por frente de construcción en Túnel Correa, PAN-NNM.	63
Figura 5.15 (b): Resumen de análisis de sensibilidad por frente de construcción en Túnel Correa, PAN-NNM.	64
Figura 5.16: Resultado de simulación del nivel de hundimiento en PAN-NNM. Arriba 1 año de desarrollos sin condición de altos esfuerzos, abajo 1 año de desarrollos en condición de altos esfuerzos.	65
Figura 5.17: Rendimientos mensuales desarrollos nivel de hundimiento en PAN-NNM.	66
Figura 5.18: Rendimientos mensuales desarrollos nivel de hundimiento en PAN-NNM.	66
Figura 5.19: Cantidad de ciclos al día por equipo en PAN-NNM.	70
Figura 5.20: Desglose de los costos unitarios por metro línea del Túnel Correa según tipo de fortificación PNNM.	72
Figura 5.21: Benchmarking de costos por nivel minas Esmeralda, Reservas Norte y NNM.	73
Figura 5.22: Desglose del costo de material minas Esmeralda, Reservas Norte y NNM.	74
Figura 5.23: Desglose de horas de utilización de camión por metro lineal de túnel en minas Esmeralda, Reservas Norte y NNM.	75

Figura 8.1: Etapas de la Administración del Riesgo Sísmico en el PAN-NNM.	84
Figura 8.2: Sensor sísmico y esquema de registro de eventos DET.	85
Figura 8.3: Polígonos de sismicidad definidos en el PAN-NNM.	86
Figura 8.4: Sistema de semaforización por sismicidad en excavaciones.	87
Figura 8.5: Funcionamiento del proceso de Fotogravimetría.	88
Figura 8.6: Diagramas de caja de operaciones unitarias para ciclos con metodología tradicional.	90
Figura 8.7: Diagramas de caja de interferencias para ciclos con metodología tradicional.	90
Figura 8.8: Diagramas de caja de operaciones unitarias para ciclos con metodología mecanizada.	91
Figura 8.9: Diagramas de caja de interferencias para ciclos con metodología mecanizada.	91
Figura 8.10: Pasos para la validación de ajustes.	94
Figura 8.11: Obtención de los rendimientos por ciclo según tipo de fortificación. En amarillo las operaciones unitarias que se ven modificadas en los ciclos tradicionales, en verde las operaciones unitarias modificadas producto de la condición de esfuerzos.	95
Figura 8.12: Diagrama de flujo macros planilla de planificación, fase 1.	107
Figura 8.13: Diagrama de flujo macros planilla de planificación, fase 2.	108
Figura 8.14: Formulario de Iniciación Macros de Planificación.	109
Figura 8.15: Resultado de planilla fase 1, planificación diaria del Jumbo de Avance.	110
Figura 8.16: Resultado de planilla fase 2, planificación diaria por postura.	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Principales modificaciones del Proyecto Nuevo Nivel Mina en División El Teniente	15
Tabla 4.1: Tipos de Fortificación en túneles principales TAP y TC, PAN-NNM	35
Tabla 4.2: Operaciones Unitarias Estudiadas.	37
Tabla 4.3: Resumen de datos de entrada para los modelos de simulación en Deswik®.	43
Tabla 4.4: Secciones típicas analizadas en la perspectiva de los costos, DET.	47
Tabla 5.1: Resumen de tiempos de actividad según metodología constructiva.	54
Tabla 5.2: Resultados de probabilidad de cumplimiento tiempos línea base según simulaciones de ciclos por tipo de fortificación .	56
Tabla 5.3: Resumen de Simulaciones para ciclo con fortificación tipo C1 según modificaciones propuestas	59
Tabla 5.4: Probabilidad de cumplimiento de línea base según simulación.	63
Tabla 5.5: Resultados de kpi de utilización de los equipos.	68
Tabla 5.6: Tiempo de ciclo por equipo .	69
Tabla 8.1: Estadísticas básicas de los ajuste de distribuciones de probabilidad realizados para ciclos con metodología tradicional.	92
Tabla 8.2: Estadísticas básicas de los ajuste de distribuciones de probabilidad realizados para ciclos con metodología mecanizada.	93
Tabla 8.3: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el UCL.	96
Tabla 8.4: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el NP.	97
Tabla 8.5: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el SNV.	98
Tabla 8.6: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el NTI.	99
Tabla 8.7: Extracto de informes diarios PAN-NNM.	100
Tabla 8.8: tiempos de desplazamiento entre frentes.	100
Tabla 8.9: Valores de distribuciones de probabilidad acumulada ascendente para ciclos según tipo de fortificación	101
Tabla 8.10: Resultados de distribuciones de probabilidad acumuladas ascendente de simulaciones realizando mejoras en ciclos según tipo de fortificación (C1 y D1)	102
Tabla 8.11: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 1.	103
Tabla 8.12: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 2.	103
Tabla 8.13: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 3.	104
Tabla 8.14: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 4.	104
Tabla 8.15: Factores de Consumo obtenidos de la simulación mediante Deswik®	105
Tabla 8.16: Desglose de tiempo de ciclo por nivel y en función del desplazamiento realizado.	106

Tabla 8.17: Desglose de cantidad de ciclos por nivel sin considerar fallas graves. _____	106
Tabla 8.18: Desglose de cantidad de ciclos por nivel considerando fallas graves. _____	106

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Calculo de Rendimientos _____	38
--	----



NOMENCLATURA

UNIDADES DE MEDIDA:

- (ktpd) kilo toneladas por día.
- (m s.n.m.) metros sobre el nivel del mar.
- (m) metros.

FINANCIERA:

- (Capex) *Capital Expenditure*, Costo Capital.
- (CLP) *Chilean Pesos*, Pesos Chilenos.
- (US\$) *United States Dollar*, Dólar Americano.

TÉCNICA/MINERA:

- (ANFO) *Ammonium Nitrate - Fuel Oil*, tipo de explosivo de gran poder utilizado para fragmentar el macizo rocoso mediante el proceso de tronadura.
- (KPI) *Key Performance Indicator*, indicador clave de productividad y/o eficiencia de alguna labor en específico que permite realizar el seguimiento de los objetivos estratégicos.
- (OIM) Obras Interior Mina, todos aquellos desarrollos que se emplazan al interior de la mina, ya sean los correspondientes niveles o el barrio cívico.
- (OPU) Operaciones Unitarias, todas aquellas operaciones que componen el ciclo minero de avance.
- (OP) *Ore Pass*, pique de traspaso.
- (XC) Cruzado, túnel principal en niveles de ventilación y transporte intermedio.
- (UCL) *Undercut Level*, Nivel de Hundimiento.
- (NTI) Nivel de Transporte Intermedio.
- (NP) Nivel de Producción.
- (SNV) Sub Nivel de Ventilación.
- (BG) Malla tipo bizcocho galvanizada.
- (Cu) Cobre.
- (LHD) *Load-haul-dump*, máquina utilizada en minería subterránea para cargar y transportar el mineral desde el punto de extracción hacia los piques de traspaso.

INSTITUCIONES:

- (CODELCO) Corporación Nacional del Cobre de Chile.
- (DET) División el Teniente.
- (IPA) *The Institute of Professional Accountants*.
- (PMI) *Project Management Institute*.
- (CTM) Constructora de Túneles Mineros Sociedad Anónima.
- (DICTUC) Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

PROPIA AL PROYECTO:

- (PNNM) Proyecto Nuevo Nivel Mina.
- (PAN-NNM) Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina.
- (PDA) Plan de Desarrollo Alternativo.
- (CMET) Complejo Máfico el Teniente.
- (CS) Complejo Sélfico.
- (Pipa) Complejo Brecha Braden.
- (TAP) Túnel de Acceso Personal.
- (TC) Túnel Correa.



1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La profundización progresiva de las reservas minerales explotados a lo largo del mundo ha llevado consigo un sinnúmero de desafíos tecnológicos y de ingeniería que permitan alargar la vida útil de las minas, manteniendo la producción de estas a un costo operativo competitivo. En particular, la mina El Teniente de Codelco, Chile, no ha sido la excepción, por lo que la empresa estatal ha decidido generar un plan maestro que permita mantener el régimen de producción de 135 ktpd por aproximadamente 50 años, dicho plan fue denominado Proyecto Nuevo Nivel Mina.

Sin embargo, las características físicas desfavorables y los acotados plazos de entrega han llevado a la corporación a modificar el proyecto original, presentando un plan de desarrollo alternativo (PDA), en donde se contempla ejecutar solo uno de los cinco *footprints*¹ de producción presupuestados en el plan original. El procedimiento mencionado con anterioridad se ha desarrollado con la ayuda de un plan de construcción de alto detalle, lo que le permite a la corporación contemplar los riesgos constructivos y contar con un soporte técnico a la hora de licitar y auditar las labores ejecutadas por las empresas subcontratadas, lo que consecuentemente permite generar una estrategia de contratos de largo plazo; dicho plan de construcción es denominado como constructibilidad.

El presente estudio tiene por finalidad analizar los impactos productivos que ha tenido la modificación de la constructibilidad producto de las condiciones desfavorables de esfuerzos y comportamiento mecánico de la roca, debido principalmente a la profundización de las labores. Dichos cambios se presentan mayormente en el tipo de metodología constructiva utilizada, el establecimiento de nuevos protocolos de sismicidad en pre y post tronadura, y nuevas medidas de control y mitigación del riesgo sísmico, todos factores que afectan fuertemente los indicadores de costo, productividad y planificación del proyecto.

¹ *Footprint*: Delimitación de la forma y área -vista en planta- que tendrá el piso a partir del cual se construirá la mina [1].

1.2 ESQUEMA DEL ESTUDIO

Con el fin de facilitar el entendimiento del estudio se presenta un diagrama resumen del mismo en donde se puede identificar claramente el contenido de cada capítulo y su correspondiente metodología.

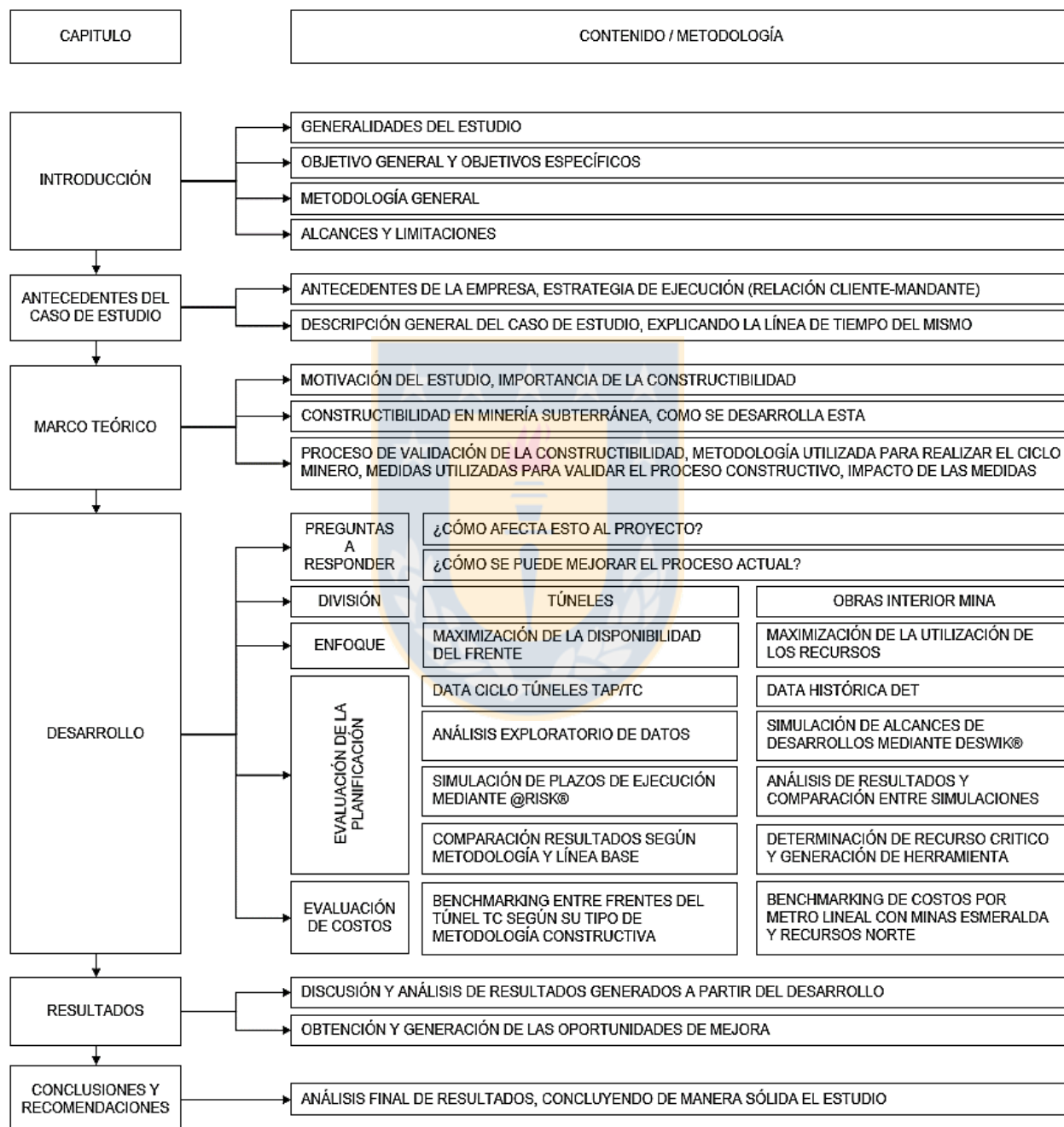


Figura 1.1: Esquema general del estudio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

El presente estudio tiene por objetivo identificar y cuantificar el impacto que la condición de altos esfuerzos ha tenido en la constructibilidad del Proyecto Andes Norte – Nuevo Nivel Mina, analizando la competitividad de las obras en términos de costos, procesos de planificación y productividad de los desarrollos. El estudio permite identificar oportunidades de mejora mediante el análisis de los factores constructivos que más impacto generan en la productividad de los desarrollos minero.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar la importancia y el impacto que posee el proceso de constructibilidad, particularmente en el desarrollo de un proyecto minero.
- Identificar las complejidades constructivas intrínsecas a desarrollos mineros bajo condiciones de altos esfuerzos, así como de las medidas adoptadas para garantizar la ejecución de las obras en dicho contexto.
- Cuantificar los impactos en términos de planificación y productividad que tienen las medidas adoptadas respecto a la metodología de construcción habitual.
- Comparar los resultados obtenidos desde la perspectiva de la planificación respecto a los valores considerados en la línea base.
- Cuantificar los impactos en términos de costos que tienen las medidas adoptadas respecto a la metodología de construcción habitual.
- Identificar las oportunidades de mejora respecto a las falencias observadas en el proceso de planificación y gestión de la productividad.
- Generación de herramienta computacional que permita mejorar el proceso de planificación en la construcción de labores subterráneas.

1.4 METODOLOGÍA GENERAL

Primero que todo se debe aclarar que el estudio pretende analizar fundamentalmente tres tipos de impactos basados en los parámetros de salida más trascendentales de la constructibilidad. Correspondientes a la planificación, el posterior desempeño productivo en el desarrollo de las obras y finalmente de los costos que estos implican. Además, dichos parámetros son analizados en dos tipos de escenarios; en primer lugar, el desarrollo de túneles -ejecutado con frente ciega o frente única- y en segundo lugar el desarrollo de obras con dos o más frentes – conocido como el desarrollo en frentes múltiples- por lo que cada una de estos escenarios posee consecuentemente una metodología de estudio diferente.

1.4.1 Metodología para la Evaluación de la Planificación y Productividad

Para la evaluación de la planificación se procede a la construcción de una base de datos robusta, la cual será utilizada como parámetro de entrada en los procesos siguientes; dicha información consiste básicamente en tiempos de ciclos, rendimientos, disponibilidad de equipos, tiempos de actividad e interferencia (entre otros) extraídas desde planillas utilizadas para el seguimiento de las obras del proyecto.

Luego de ello se utilizaron las bases de datos para realizar simulaciones de tiempos de ejecución y la constructibilidad de las labores, lo que permite conocer el impacto del antes y el después respecto a la validación de la constructibilidad producto de la condición de altos esfuerzos. Para el caso de la tunelería dicha simulación se realizó mediante el software @Risk® utilizando el procedimiento de MonteCarlo; para el caso de desarrollos multi-frente la simulación se realizó en el software Deswik®.

Respecto al funcionamiento de estas herramientas se debe mencionar que @Risk® consiste en un programa de estadística avanzada, que permite ajustar distribuciones de probabilidad a datos anteriormente ingresados, simular eventos probabilísticos mediante la iteración de valores en función de las distribuciones ajustadas y realizar posteriores análisis de sensibilidad. Por otro lado, Deswik® consiste en un software especializado en programación de actividades mineras, en donde se ingresan todos los valores de diseño, aspectos técnicos y geológicos, así como restricciones físicas o secuenciales según corresponda; luego de ello el software entrega la secuencia constructiva óptima, identificando rutas críticas, utilización de recursos y factores de consumo, entre otros; todo esto mediante una interfaz amigable que puede compararse con AutoCAD® para el caso gráfico que permite acceder a un plano en tres

dimensiones, y a Primavera® y/o Excel® para el caso de información detallada que se presenta como carta Gantt.

Una vez realizado aquello se analizaron los resultados identificando los impactos y el nivel de apego respecto a lo planificado en la línea base del proyecto, lo que trae consigo la identificación de las oportunidades de mejora que pudiera tener el proceso. Respecto al caso de túneles, la mayoría de las oportunidades de mejora son de carácter operacional, por lo que se procede a mencionar como pudieran lograrse las mismas. Por otro lado, para el escenario de desarrollos en frente múltiples, las oportunidades de mejora se presentan a nivel de planificación, por lo que el estudio se extiende con el propósito de generar herramientas que permitan planificar en función del equipo crítico, esto se logra analizando las disponibilidades y tiempos de ciclo de los recursos involucrados en el ciclo minero.

1.4.2 Metodología para la Evaluación de los Costos

Para este caso se realizó un *benchmarking* con el fin de apreciar las excentricidades consideradas en el proyecto. Para el caso de los túneles el proceso se realizó analizando y desglosando los costos según tipo de fortificación y consecuente metodología constructiva, segmentación que depende de la condición de esfuerzos. De igual modo, para el caso de multi-frente se realizó un *benchmarking* con las minas Esmeralda y Reservas Norte ya que dichas unidades productivas poseen características similares en cuanto a secciones y condiciones laborales.

A modo de resumen se podría decir que la metodología consistirá en la obtención de una base de datos robusta, una simulación de eventos con y sin condición de altos esfuerzos, el análisis de los resultados, y la profundización del estudio en los tópicos más relevantes con el fin de identificar y proponer las oportunidades de mejora. Además, se contempla un análisis respecto a los costos que implican los desarrollos en condición de altos esfuerzos.

1.5 ALCANCES

1.5.1 Generales

- El presente estudio se realizó en el Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina de la División el Teniente de Codelco, en donde el principal parámetro constructivo de entrada corresponde a la condición de altos esfuerzos, situación que se presenta particularmente en el macizo rocoso donde se circunscribe el proyecto, por lo que el estudio considera características físicas intrínsecas no presentes en otras minas.
- El presente documento sólo estudia la constructibilidad de los túneles de acceso principal y de las obras interior mina ubicadas particularmente en el *footprint*, no considerando la constructibilidad de cavernas de chancado, desarrollos verticales, montajes y obras realizadas en el sector Brecha Braden.
- Todos los valores asociados a costos fueron proporcionados por Codelco, y fueron ponderados manteniendo su proporcionalidad con el fin de resguardar las políticas de privacidad de la corporación. Dichos valores son expresados en moneda base 2016 o 2017 según se especifique.
- Las limitantes correspondientes a los factores de consumo constructivos tales como agua, aire, electricidad y disponibilidad de piques fueron considerados invariables, y se respetaron en todas las simulaciones realizadas. Su gestión se aleja de los alcances del estudio.

1.5.2 Túneles

- El presente estudio se realizó en el Túnel de Manejo de Mineral Definitivo (TC) del Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina de la División el Teniente, específicamente bajo un ciclo minero tradicional que considera perforación y tronadura. Dicho desarrollo se realizó bajo la modalidad de frente única y posee una sección de 8,9 x 6,7 m.
- Los datos utilizados fueron recopilados en terreno por personal de las empresas contratistas, en conjunto con el Ingeniero de Construcción Codelco. En total fueron 6.412 datos entre operaciones unitarias, interferencias y metros de avance, con su respectiva clasificación, hora de inicio, término, duración y observaciones.
- Para los tipos de fortificación que contienen la instalación de pernos-cable se considera que dicha operación es interferente, por lo que durante el tiempo de actividad de la misma no se puede realizar otro tipo de operación próximo al lugar en cuestión.

1.5.3 Obras Interior Mina

- La información utilizada para la obtención del equipo crítico fue obtenida de los informes diarios presentados a la gerencia del proyecto durante enero a diciembre del 2016.
- Si bien existe una mayor cantidad de equipos que se utilizan para realizar las labores mineras, se ha decidido estudiar una flota limitada por los equipos de mayor importancia, teniendo como referencia que sin ellos el ciclo minero se detiene por completo, en particular se hace referencia a los jumbos (avance y fortificación), *scoop*, *roboshot* y acuñador.



2 ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO

2.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, conocida como Codelco es una empresa estatal chilena dedicada a la explotación minera cuprífera. Codelco opera ocho centros de trabajo, ubicados entre la Región de Antofagasta y la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins; su Casa Matriz se encuentra en Santiago, Región Metropolitana.

Codelco es el productor de cobre más grande del mundo y la empresa que contribuye más a la economía chilena. Durante el año 2017, su producción totalizó más de un millón 800 mil toneladas de cobre fino (incluidas sus participaciones en El Abra y Anglo American Sur), cifra meritoria considerando que en los últimos cuatro años las leyes disminuyeron alrededor de un 10% [2].

La compañía cuenta con siete Divisiones mineras: Radomiro Tomic, Chuquibambilla, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Salvador, Andina y El Teniente. A estas operaciones se suma la División Ventanas, dotada de instalaciones de Fundición y Refinería. Se estima que, con los actuales niveles de producción, los yacimientos que hoy explota proyectan más de 65 años de vida útil [2].

Desde 1971, hasta el año 2015, los yacimientos y operaciones de Codelco han generado excedentes por cerca de US\$ 105 mil millones, en moneda base 2015. De estos excedentes, poco más de 48.000 millones de dólares se entregaron en el período 2004-2010 [2].

2.2 EJECUTOR Y CLIENTE DEL PROYECTO

La Vicepresidencia de Proyectos de Codelco (VP) es el ente responsable de planificar y ejecutar los proyectos estructurales de la corporación, sin importar la ubicación geográfica o las características intrínsecas de estos. En particular, si nos referimos a proyectos circunscritos dentro de la concesión de alguna de las divisiones de la cuprífera debemos considerar un monto superior o igual a 50 millones de dólares de costo capital para que dicho ente sea considerado el subsidiario y mandamás de las obras.

La condición descrita anteriormente es propia del proyecto en estudio, correspondiente al “Nuevo Nivel Mina” de la División El Teniente, el cual contempla la construcción de una nueva mina con extracción a nivel único que se ubica por debajo de las faenas actualmente en producción.

El yacimiento “Mineral El Teniente” se encuentra ubicado a 50 kilómetros de Rancagua, específicamente en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Se accede hacia sus obras desde la Carretera del Cobre, vía construida especialmente para conectar a la ciudad con el yacimiento [2]. En la figura 2.1 se señala la ubicación espacial de los puntos de referencia más importantes en la División.



Figura 2.1: Ubicación Proyecto Nuevo Nivel Mina en División el Teniente, Codelco.
(Google Maps, 2018)

El Teniente comenzó a ser explotado en 1905 y ya cuenta con más de 3.000 kilómetros de galerías subterráneas. Se ubica entre las cotas 2.200 y 3.200 m.s.n.m. y actualmente cuenta con una producción diaria de 135.000 toneladas aproximadamente, lo que genera alrededor de 475.300 toneladas métricas finas de Cobre y 6.700 toneladas métricas finas de Molibdeno al año [2].

La mina se subdivide en unidades productivas de menor envergadura que se encuentran alrededor de una pipa de estéril, el yacimiento está compuesto básicamente por tres tipos de litologías denominadas Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Sélfico (CS) y Complejo Brecha Braden (Pipa). Dentro de sus operaciones destacan las minas o unidades productivas de Diablo Regimiento Fase IV, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte y Pipa Norte, entre otras, que extraen minerales de cobre y molibdeno básicamente desde vetillas mineralizadas, que

representan el 70% de la extracción, completando el 30% restante desde minerales diseminados en rocas de la litología principal CMET [3]. El Teniente también posee una operación en superficie denominado Rajo Sur, ubicado entre las cotas 2.730 y 3.240 m.s.n.m. que comenzó a operar a fines del 2012, faena que extrae minerales mixtos (oxidados y sulfurados) mediante el método de explotación a cielo abierto [2].

Las unidades productivas subterráneas se explotan mediante el método de *Panel Caving*² y sus variantes (hundimiento convencional y hundimiento avanzado tipo *crinkel cut*, entre otras) donde el mineral se colecta en puntos de extracción y es extraído mediante LHD's hacia un pique de traspaso que arroja el material hacia el nivel de transporte intermedio; en dicho nivel se transporta el material por medio de camiones de bajo perfil hacia el sistema de chanchado primario (varía según unidad productiva), donde posteriormente es transportado hacia el sistema de transporte principal liderado por el ferrocarril Teniente 8, el cual tiene por finalidad transferir el material hacia el exterior de la mina. Posterior a ello el mineral es llevado a la planta procesadora Colon la cual trata el mineral mediante el proceso de pirometalurgia³ [4]. A continuación, se presenta la distribución espacial de las unidades productivas que componen la mina.

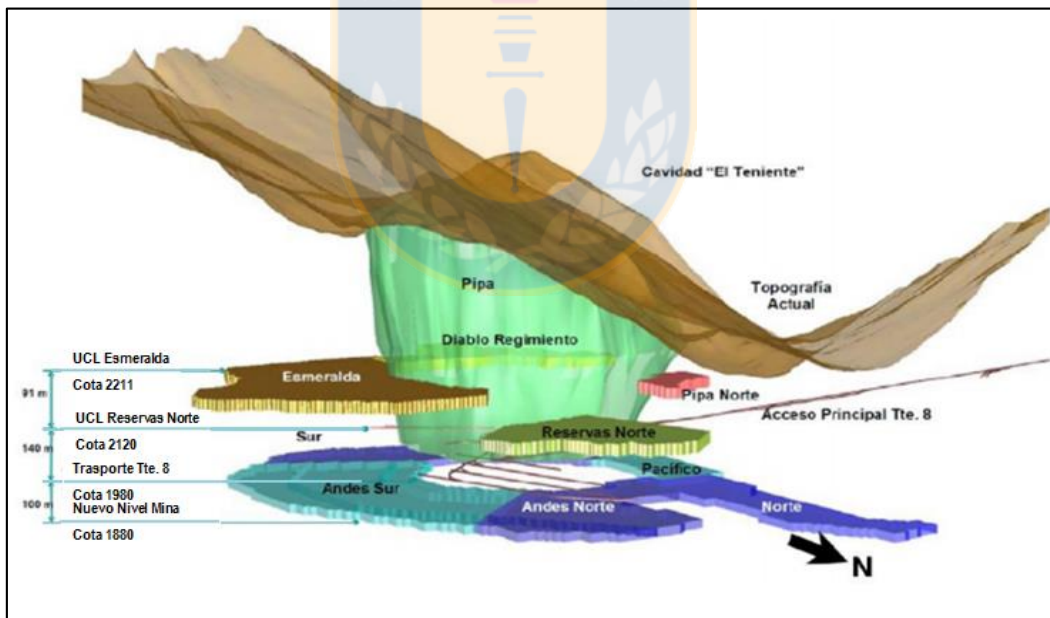


Figura 2.2: Distribución espacial Proyecto NNM en División El Teniente, Codelco.
(Programa de Inducción PNNM, 2018)

² *Panel Caving*: Método de explotación por hundimiento, variante del *Block Caving* en donde los paneles se hunden de manera continua producto de fracturas generadas debido a tensiones internas y efectos gravitacionales [5].

³ Pirometalurgia: Método de recuperación fisicoquímico que consiste en utilizar las propiedades hidrofóbicas de minerales sulfurados para su recuperación [6].

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.3.1 Proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM)

Con el fin de mantener la producción actual de la División El Teniente, se ha formulado el Proyecto Nuevo Nivel Mina, dicho plan contempla la extracción de mineral a nivel único mediante el método de explotación *Panel Caving* con hundimiento avanzado, a una cota de 1.887 m s.n.m. en el nivel de producción. El proyecto posee reservas por 2.020 millones de toneladas con una ley media de 0,86% de Cu. Cabe destacar que dicho proyecto es del tipo *greenfield*⁴, por lo que contempla el desarrollo de dos túneles principales para el acceso y acarreo de material de aproximadamente 8,9 kilómetros de largo, los que conectarán la Plataforma Confluencia con el barrio cívico y la sala de chancado principal mediante los túneles Acceso Personal (TAP) y el Túnel Correa (TC) correspondientemente. Además de la construcción de túneles y Adits⁵ de ventilación, se contempla el desarrollo de los niveles de hundimiento, producción, transporte intermedio, transporte principal y ventilación, ubicados en el *footprint* de producción. Asimismo, al interior de las obras consideradas en el barrio cívico -ubicado en la pipa- destacan: casino, oficinas, refugios, naves de mantenimiento y estacionamientos.

El alcance del proyecto en el exterior de la mina contempla la construcción de una carretera que conectará la actual Carretera del Cobre con la Plataforma Confluencia, puerta de entrada hacia la mina. Finalmente, se contempla el montaje de dos sub estaciones de energía que alimentarán el sistema de transporte principal liderado por un sistema de correas de más de 9 kilómetros, y que además otorgarán toda la energía que los servicios auxiliares requieran [7].

⁴ *Greenfield*: Proyecto minero que no utiliza facilidades constructivas de otras faenas mineras [8].

⁵ Adits: túnel horizontal o semi-horizontal que conecta la superficie con la mina para efectos de acceso, ventilación y/o drenaje [9].

A continuación, se presenta el plan de producción contemplado por la División El Teniente. La transición fue considerada con comienzo en el año 2017.

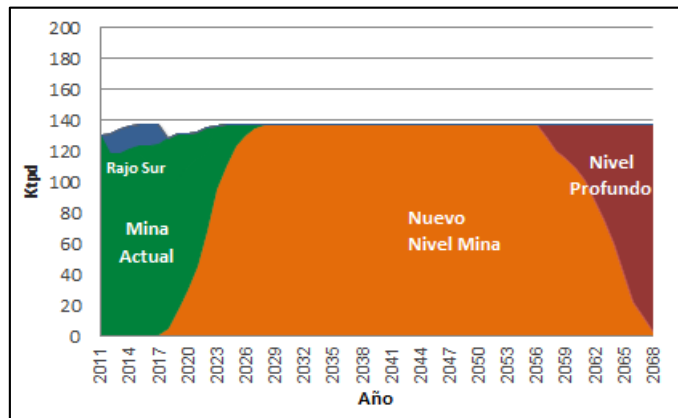


Figura 2.3: Programa de producción del Proyecto Nuevo Nivel Mina y División El Teniente, Codelco. (Informe Técnico Hito 0 PAN-NNM, 2016)

2.3.2 Complejidades Constructivas que Motivaron el Cambio

Cuando las obras del proyecto Nuevo Nivel Mina se encontraban en ejecución entre los años 2013 y 2015 ocurrieron una gran cantidad de incidentes y accidentes ocasionados principalmente por la presencia de sismicidad inducida, fenómeno que -particularmente al interior del proyecto-generó estallidos de roca de gran magnitud, ocasionando daños materiales, lesiones e incluso víctimas fatales. Dichos fenómenos no fueron previstos en ningún momento a lo largo de la planificación, por lo que las operaciones debieron ser suspendidas hasta generar el entendimiento necesario.

Es así como se concluyó que la caracterización preliminar de los esfuerzos presentó deficiencias importantes debido a la falta de información detallada, ya que se asumió un campo prácticamente isotrópico, en contraste con el escenario anisotrópico in-situ subyugado principalmente por el efecto litostático, elemento que particularmente posee gran variabilidad en el sector debido a la topografía dominada por cuencas, quebradas y subsidencias.

A continuación, se presenta la distribución del esfuerzo desviatorio en donde se emplaza el proyecto.

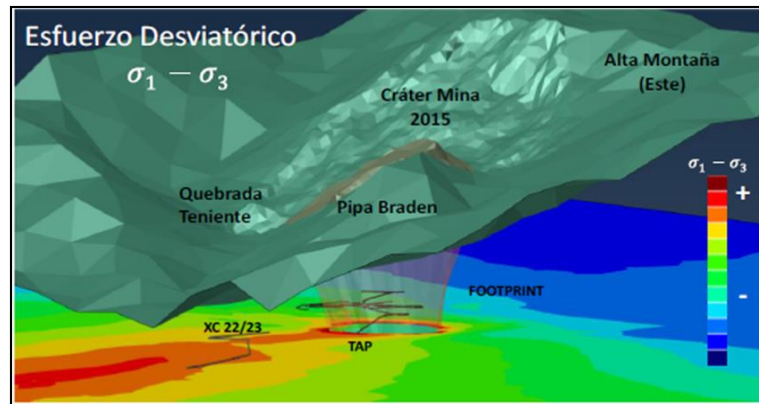


Figura 2.4: Distribución de esfuerzo desviatorio en PNNM.
(Validación de la Constructibilidad PNNM, 2017)

Una vez comprendido el fenómeno que afectó el desarrollo de las obras, este fue abordado de la siguiente manera: se robustecieron las medidas de mitigación del riesgo sísmico y se procedió a la utilización de técnicas que permitieran disminuir la condición de esfuerzos circundante, ello mediante el precondicionamiento de la zona a excavar utilizando dos tipos de metodologías. En primer lugar, el fracturamiento hidráulico, procedimiento ya conocido utilizado ampliamente para precondicionar el macizo rocoso en las zonas de *caving* mediante la inyección de agua desde el nivel de hundimiento (UCL), ahora sería utilizado para precondicionar la zona de desarrollo del cruzado de ventilación XC 22/23, el túnel acceso personal interior mina TAP OIM y la totalidad del *footprint* de producción. De igual modo, se decidió precondicionar el túnel correa TC y el túnel acceso personal dirección Fw TAP mediante el método de *Destress Blasting* que corresponde a la aplicación de cargas confinadas en la frente, previo a la tronadura de avance. Ambos métodos permiten un reacomodo de los esfuerzos y una reducción de la sismicidad producida por las labores [10].

2.3.3 Proyecto Andes-Norte Nuevo Nivel Mina (PAN-NNM)

Ahora bien, dicho fenómeno causó un retraso fatal en el programa del proyecto, por lo que fue necesario generar un programa de desarrollo alternativo (PDA) en el que la producción pretendida para el PNNM disminuyó de 137 ktpd a tan solo 35 ktpd durante los primeros años, por lo que se contempla que los restantes 100 ktpd necesarios para cumplir con la producción serán proporcionados directamente por la división mediante la explotación de dos nuevas minas denominadas Diamante y Andesita, en el marco del escalón de profundización [11].

Cabe destacar que estos yacimientos explotarán reservas antes contempladas en el PNNM por lo que la altura de columna será ajustada a estándares tradicionales. Los consecuentes *ramp-up* y *ramp-down* ⁶ son presentados en la siguiente gráfica.

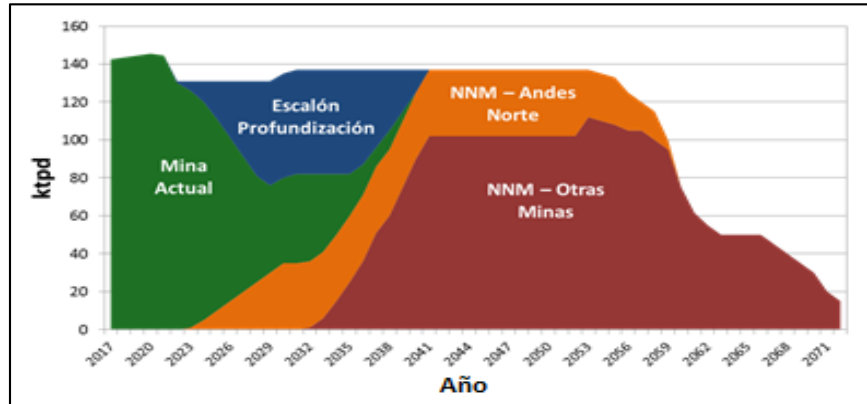


Figura 2.5: Programa de producción del Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina y PDA División El Teniente, Codelco.
(Informe Técnico Hito 0 PAN-NNM, 2016)

Del gráfico anterior podemos notar que la mina actual será exigida a continuar con su producción, lo que en conjunto con el escalón de profundización lograrán suplir la producción que el Nuevo Nivel Mina no podrá otorgar. Utilizando esta estrategia se desprende que los próximos *footprints* del nuevo nivel podrán comenzar el *ramp-up* el año 2032, dando tiempo al desarrollo de la infraestructura correspondiente.

Cabe destacar que el Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina fue modificado desde un proyecto tipo *greenfield* a uno del tipo *brownfield* ⁷, así dicho proyecto podrá aprovechar al máximo la infraestructura ya dispuesta por la división.

Con respecto al método de explotación este fue modificado a *Panel Caving* convencional con fracturamiento hidráulico total, esto ya que dicho método permite un mejor manejo de la sismicidad y el *abutment stress* ⁸ producido por la zona de transición del *caving* [11].

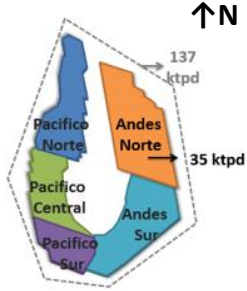
⁶ *Ramp-up/down*: fase de crecimiento/decrecimiento de la producción contabilizado desde el comienzo de la explotación hasta alcanzar el régimen o desde el régimen hasta alcanzar el fin de la producción según corresponda [9].

⁷ *Brownfield*: Proyecto minero que utiliza las facilidades constructivas de otras minas y puede ser considerado como una ampliación de la misma [8].

⁸ *Abutment Stress*: zona de acumulación de esfuerzos producto del reacomodo de estos. Zona propia de los métodos de explotación por *caving* [12].

A modo de resumen se presentan las principales modificaciones que sufrió el proyecto, proceso de reformulación que impactó desde el diseño hasta la gestión y la planificación de los objetivos estratégicos.

Tabla 2.1: Principales modificaciones del Proyecto Nuevo Nivel Mina en División El Teniente, Codelco.
(Informe Técnico Hito 0 PAN-NNM, 2017)

Modificación	Nuevo Nivel Mina	Andes Norte – NNM	Ilustración
Tipo	Greenfield	Brownfield	
Producción en Régimen	137 ktpd	35 ktpd	
Método de Explotación	P. Caving con hundimiento avanzado	P. Caving con hundimiento convencional y FH total	
Altura Crown Pillar	18 m	25 m	
Posición Piques	Zanjas	Calles	
Ingreso a la mina	Nueva carretera + Túnel de Acceso Personal	División el Teniente	



3 MARCO TEÓRICO

Una vez contextualizado el estudio, se procede a definir y explicar los conceptos más importantes respecto a la constructibilidad, particularmente bajo las condiciones sobre las cuales se desarrolla el proyecto.

3.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

Históricamente, tanto en la industria de construcción de obras civiles como en la industria minera ha existido un *gap* entre las áreas de diseño y construcción, lo que ha generado problemáticas en el proceso constructivo de las labores, ya que no se contempla la interrogante de “cómo se debe construir la obra” a la hora de realizar el diseño. Consecuentemente, dicha brecha ocasiona pérdidas tanto económicas como en los tiempos máximos de ejecución, esto pues no se han considerado las problemáticas o contingencias propias a la construcción de obras civiles de gran complejidad, entre las que se pueden encontrar las condiciones topográficas, meteorológicas o alguna característica intrínseca a la ubicación; la necesidad/disponibilidad de servicios auxiliares, insumos y/o tecnologías; además del desarrollo de la logística y las facilidades constructivas necesarias para la ejecución de la obra, por nombrar algunas [13].

La problemática antes descrita se ve reflejada por la enorme cantidad de proyectos deficientes según estadísticas IPA, en donde el 40% de los megaproyectos tiene un aumento de más del 30% en el costo capital y de por lo menos un 25% en el plazo de ejecución, por lo que abocándonos a la definición del *Project Management Institute* podrían considerarse proyectos fracasados [14].

Como respuesta a esta necesidad nace el concepto de constructibilidad, definida como un sistema que logra una óptima integración de los conocimientos constructivos en el proceso de ejecución y desarrollo de proyectos, permitiendo prever todas las oportunidades o amenazas propias al ambiente, para lograr así la maximización de la performance constructiva y consecuentemente los objetivos del proyecto. Esto trae beneficios para el/los clientes, constructores, consultores y usuarios, debido a que la conmutación del diseño, planificación, construcción y posterior consecución del proyecto logra una gestión óptima del tiempo y el dinero [15].

Tomando en consideración lo anterior, es fácil darse cuenta que la etapa de diseño y planificación de una obra de gran complejidad debe necesariamente considerar todas las variables que pudieran afectar la ejecución y consecuente éxito de este, pues se hace necesario disminuir el riesgo asociado a la inversión de capital a realizar.

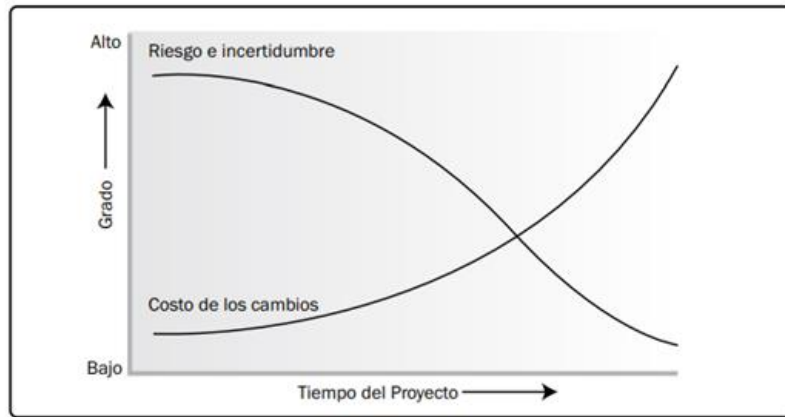


Figura 3.1: Impacto de las modificaciones en función del tiempo del proyecto. (PMBOK®)

Del gráfico anterior se puede notar que a medida que el proyecto avanza en sus etapas de planificación, aumenta progresivamente consigo el costo de realizar una modificación. Esto sucede hasta el momento de ejecutar la construcción, en donde reformar algún tópico del proyecto se hace extenso en capital y recursos involucrados. La aseveración toma mayor sentido aun cuando se hace referencia a proyectos de minería subterránea, ya que los desarrollos realizados son de carácter inamovibles, y cualquier tipo de modificación se verá restringido por la influencia geomecánica de lo ejecutado.

Finalmente y tomando como consideración el amplio número de publicaciones a partir de lecciones aprendidas y casos de estudio en la industria de obras civiles de alta magnitud, podemos afirmar que la aplicación de un correcto proceso de constructibilidad trae consigo un sinnúmero de beneficios tanto para el ejecutor de la obra como para el cliente de la misma, entre los cuales destaca el perfeccionamiento del diseño y la optimización en la planificación de la secuencia constructiva de este, integrando las variables logísticas y las restricciones intrínsecas que la locación de la obra pudiera tener; sin ir más lejos y según estudios realizados por el *Construction Industry Institute* (CII) una disminución de hasta un 5% en el costo capital y de un 13% en el tiempo de ejecución puede ser lograda si se integra el proceso de constructibilidad al desarrollo del proyecto [15].

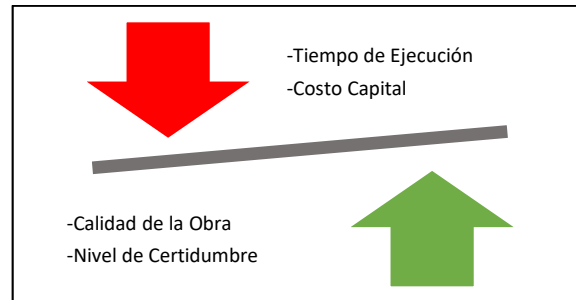


Figura 3.2: Impactos de un buen proceso de constructibilidad en proyectos de gran envergadura.

Una vez dicho esto se puede notar que la motivación del estudio radica en la importancia que posee el proceso de constructibilidad, ya que como se mencionó con anterioridad genera una planificación que considera todas las variables operativas por medio de la experiencia y la retroalimentación entre diseñadores, planificadores y constructores [16]. De esta manera se espera materializar de buena manera el proyecto, permitiendo una disminución en el grado de incertidumbre propia a las etapas tempranas del mismo.

3.2 CONSTRUCTIBILIDAD EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

Proceso de planificación que unifica las etapas de diseño y construcción de un proyecto minero. Dicho proceso consiste en desarrollar una planificación que responda al “como se debe construir” considerando restricciones de diseño, logísticas e ingenieriles; esto se logra aplicando el conocimiento constructivo del personal con la experiencia y competencia necesaria. La constructibilidad se traduce en entregables como programas y secuencias de ejecución, cubicaciones, cálculo de insumos y planes referentes, en donde se precisan plazos, hitos, rutas críticas, estándares de seguridad y metodologías constructivas que deben llevarse a cabo con el fin de garantizar los márgenes de capital y tiempo del proyecto. El proceso permite así obtener una secuencia constructiva realista y –dentro de lo posible- con bajo nivel de sesgo.

El proceso básico de constructibilidad en minería subterránea en ambiente de altos esfuerzos consiste esencialmente en tomar como parámetro de entrada el diseño de la mina a nivel de ingeniería de detalle, para luego adicionar los rendimientos (metros construidos por unidad de tiempo) que se pueden alcanzar considerando el sinfín de variables intrínsecas al proyecto en cuestión; este proceso permite obtener una secuencia constructiva con las necesidades de dotación, flota e insumos correspondiente. Cabe destacar que para este caso la variable intrínseca al proyecto más importante a considerar a la hora de realizar la constructibilidad corresponde a la condición de esfuerzos en que se encuentre la labor, puesto consecuencia de ello y del tamaño de

la sección a construir, se establecerán los parámetros de sismicidad, fortificación y protocolos de pre y post tronadura, parámetros que impactarán fuertemente los rendimientos.

Respecto a la constructibilidad del proyecto, se puede decir que su importancia radica fundamentalmente en que será la base técnica con la cual se contrastarán las ofertas en el proceso de licitación, permitiendo corroborar si dichas ofertas se ajustan a los estándares de plazos, costos, y metodologías impuestas por la corporación. A modo de resumen se presenta un esquema que explica cómo se lleva a cabo el proceso de constructibilidad al interior del proyecto.

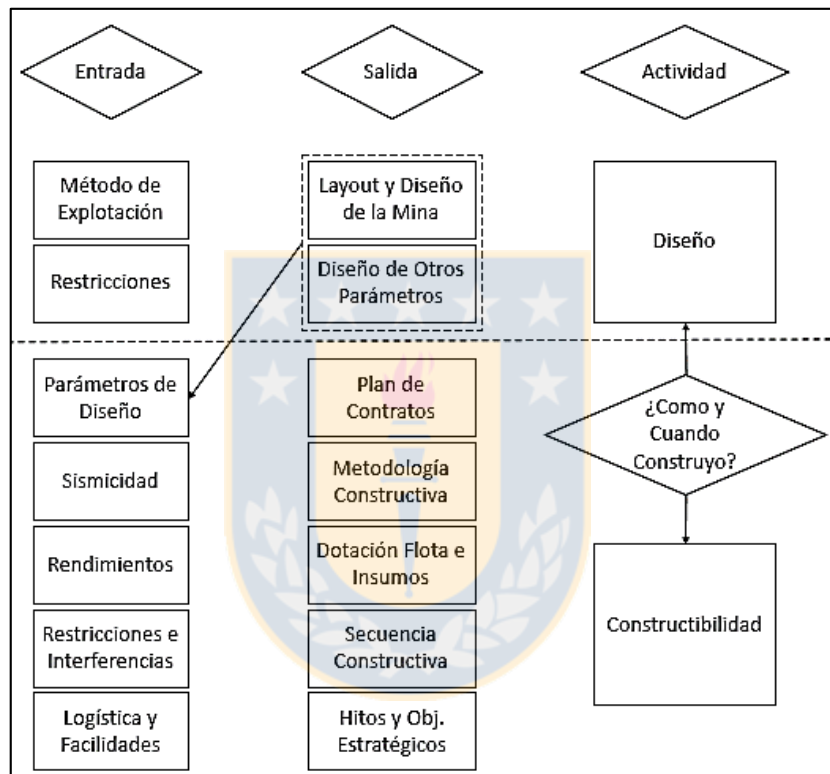


Figura 3.3: Esquema básico de constructibilidad en minería subterránea de altos esfuerzos.

3.2.1 Metodologías Constructivas

Cuando nos referimos a metodologías constructivas hacemos mención a la forma en que se construye una obra o parte de ella, es decir, cuáles serán las operaciones unitarias específicas que contemplan el ciclo y cuál será la maquinaria particular a utilizar. Dentro de las variantes más distintivas que una misma operación unitaria puede adquirir destaca la realización manual, en donde el personal realiza la función, encontrándose expuesto al entorno; la realización mecanizada, que corresponde a la ejecución de la actividad mediante maquinaria especializada, donde la operación del equipo se hace desde las cabina de este, lo que evita la exposición directa del operador; la realización a control remoto o telecomandada, en donde el personal realiza la operación mediante la conducción del equipo desde una cabina distanciada a más de 50 metros

del mismo, lo que evita completamente la exposición; y finalmente la realización automatizada, proceso en el cual la actividad es realizada por un equipo que es programado de manera que funcione sin intervención humana. Cabe destacar que como se hace referencia a etapas de desarrollo minero se hace muy complejo estandarizar una operación unitaria para permitir la automatización de ésta, esto pues los puntos de carga, descarga, acopio y frentes de trabajo disponibles son variables en el tiempo, por lo que en el presente estudio sólo abarcarán las primeras tres metodologías.

3.2.2 Tipos de Desarrollo en Minería Subterránea

Con el fin de simplificar la redacción y ordenamiento del estudio se ha decidido subdividir las obras en dos grandes tipos de excavación: la tunelería y las obras interior mina. Esto pues ambos tipos de excavación presentan grandes diferencias a la hora de ejecutar el proceso de constructibilidad.

3.2.2.1 Desarrollo en Frente Única

Por tunelería se entiende como todas las obras correspondientes a la generación de accesos hacia las áreas futuras de producción o barrio cívico, tales como el túnel de acceso personal TAP, túnel de manejo de material TC, rampas de acceso o emergencia, Adits de acceso o ventilación, y cualquier otro tipo de infraestructura que contemple un proceso de construcción por frente única.

3.2.2.2 Desarrollos en Frentes Múltiples

Por obras interior mina se entiende como todas las obras realizadas en el área de producción (*footprint*) así como en la pipa de estéril (barrio cívico). Más precisamente corresponderá a todas las labores ejecutadas en frentes múltiples, como lo son los niveles de hundimiento, producción, transporte intermedio y ventilación, además de la anteriormente mencionada infraestructura destinada al barrio cívico.

A modo de resumen se presenta la distribución de las labores según el tipo de desarrollo mencionado anteriormente.

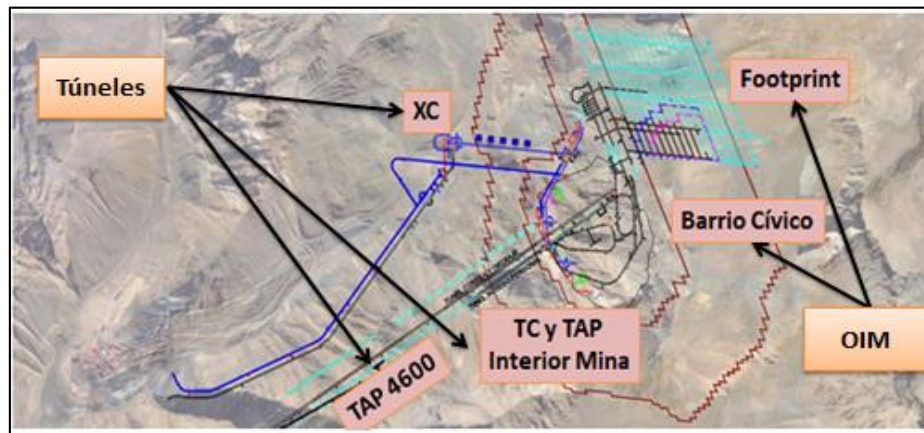


Figura 3.4: Desarrollos más importantes en Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina, Codelco VP.

3.2.3 Principales Parámetros de Entrada en la Constructibilidad

La constructibilidad del proyecto posee fundamentalmente dos parámetros de entrada que serán la base de los resultados obtenidos, hablamos del *layout* de la mina y de los rendimientos de desarrollo, generalmente expresados en metros por unidad de tiempo. Como el diseño y *layout* de la mina se encuentra fuera del alcance del estudio, se centrará el análisis en el segundo parámetro más relevante, correspondiente a los ya mencionados rendimientos; dichos indicadores tienen a su vez dos parámetros de entrada correspondientes al tiempo de duración del ciclo -que depende consecuentemente de la metodología constructiva, las operaciones unitarias consideradas y algunas restricciones de seguridad- y en segundo lugar los metros de avance otorgados por dicho ciclo mediante la operación de tronadura.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para la obtención de los rendimientos.

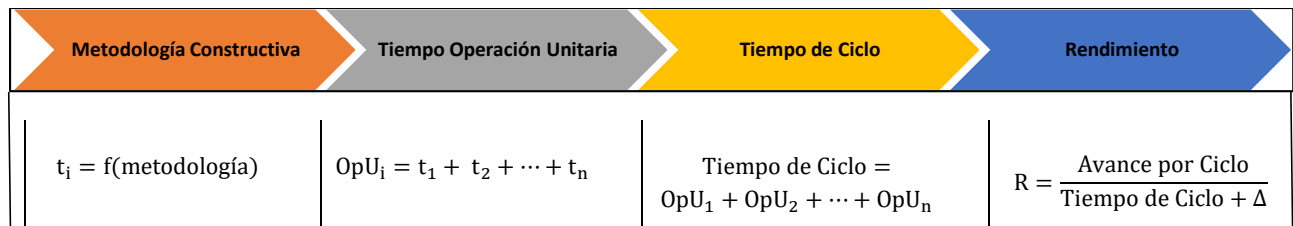


Figura 3.5: Proceso de obtención de rendimientos en minería.

Cabe destacar que la importancia de dicho indicador radica en que es utilizado como *input* para obtener el plazo de ejecución y será consecuentemente la base para el cálculo de los costos del proyecto.

3.3 PROCESO DE VALIDACIÓN DE LA CONSTRUCTIBILIDAD

Una vez indicada la importancia del ciclo minero en la obtención de los rendimientos, es prudente mencionar como se realiza este al interior del proyecto en estudio, por lo que en las siguientes líneas se procederá a explicar brevemente el ciclo utilizado en los desarrollos del mismo. Luego se mencionarán y explicarán las nuevas actividades, operaciones y medidas impulsadas por la corporación que debieron ser implementadas para validar la constructibilidad en las condiciones físicas intrínsecas al proyecto. Finalmente, se señalarán los impactos que tuvo este proceso, haciendo especial énfasis en el “cómo se construye”, factor que se refleja principalmente en el ciclo minero.

3.3.1 Ciclo Minero Tradicional

- **Carguío de explosivos y tronadura:** Corresponde a la colocación y conexión de explosivos en las perforaciones de acuerdo a un diagrama de disparo o diseño de avance. El carguío de la frente se realiza dentro de una jaula sujeta a un equipo de levante, la que protege a los trabajadores que realizan la actividad de eventuales caídas de roca. Posterior a ello se realiza la tronadura, proceso que corresponde al arranque del material con explosivos, regularmente ANFO o emulsión [17].
- **Ventilación y chequeo:** Inmediatamente después de realizada la tronadura, la frente se deriva a un tiempo de espera de 30 minutos, como mínimo, con el fin de que el sector pueda ser ventilado de los gases generados por la operación de carguío y tronadura. Pasado el tiempo de espera, se deben medir los gases presentes en el ambiente con el fin de garantizar que la operación cumplió exitosamente con el cometido de disipación de gases tóxicos, posterior a ello se riega la marina fresca con el fin de acelerar el proceso de supresión de gases y material particulado [18].
- **Extracción de marina:** Consiste en la extracción del material quebrado producto de la tronadura de avance. Las frentes de trabajo son liberadas del material de marinas por cargadores frontales o LHD's, los que acopian el material en frontones especialmente dispuestos para ello (en algunas oportunidades se descarga directamente a piques de traspaso), posteriormente el material es cargado sobre camiones tolvas los que finalmente las trasladan al lugar de destino; generalmente un punto de vaciado al interior de la mina [17].

- **Acuñadura y limpieza:** Actividad que consiste en desprender el material inestable en cajas y techo de la galería para evitar su caída sobre personal y/o equipos o deteriorar la instalación y posterior desempeño de la fortificación. Esta actividad se realiza en forma manual desde una jaula que protege al trabajador mientras ejecuta la labor. En esta operación se considera además la limpieza de pata -que corresponde al saneo de la zona inferior tronada para preparar el acceso de los equipos- y el saneamiento de la fortificación dañada en la tronadura, facilitando así el desarrollo de las demás operaciones unitarias.
- **Geología y topografía:** Etapa de inspección geológica y mensura, realizada con el fin de cuantificar el avance y reconciliar los datos geotécnicos, tales como fracturas, fallas y calidad de roca, entre otros. Dicho procedimiento se realiza por medio de la observación de personal calificado y la utilización de maquinaria afín a la mensura.
- **Fortificación:**
 - **Shotcrete de sello:** Proyección de hormigón sobre las paredes y techo de la labor. Su función es consolidar cajas y techo, responde a la primera protección a trabajadores y equipos, previo a la colocación de la fortificación definitiva. Se realiza mediante un camión robotizado, llamado también *roboshot*.
 - **Perforación de pernos helicoidales:** Luego de que el tiempo de fragüe del *shotcrete* de sello se haya cumplido, se procede a la marcación del punto en donde se instalarán de forma radial pernos helicoidales. Las perforaciones se realizan con un equipo Jumbo, el que perfora en forma perpendicular a la superficie que posee la sección de la galería [17].
 - **Lechado de pernos helicoidales:** Inmediatamente después de la perforación de pernos se procede a inyectar lechada de cemento, lo que permitiría instalar los pernos helicoidales y generar el adosamiento requerido. Estas actividades se realizan desde una jaula dispuesta en equipo de levante, en donde la inyección es ejecutada manualmente por medio de un equipo Lechador, luego de ello se debe esperar al fragüe de la mezcla aplicada.
 - **Colocación de malla perimetral:** Corresponde a la colocación de una malla en toda la sección de la galería, afianzada de los pernos helicoidales con planchuela y tuerca. Una vez colocada la malla se procede al apriete de las tuercas y pernos, proceso también conocido como "hilteo". La actividad se realiza sobre una jaula dispuesta en equipo de levante.
 - **Perforación de pernos Split-set:** Corresponde a la perforación para la colocación de pernos en el frente, dicha actividad se ejecuta con el equipo Jumbo y en algunas ocasiones se realiza inmediatamente después de la perforación de pernos helicoidales, puesto presenta ventajas operacionales.

- **Colocación de malla frente y pernos Split-set:** Corresponde a la colocación de pernos Split-set en el frente además de una malla para minimizar el riesgo de colapso o desprendimiento de roca que pudiera dañar a personas o maquinaria, dicha actividad se ejecuta utilizando un jumbo de perforación y se finaliza de manera manual.
- **Shotcrete sobre malla:** Proyección de hormigón en forma perpendicular a la superficie de la galería, en donde el espesor de la capa es definido en etapa de diseño, cubriendo en forma total la malla. Una vez proyectado el hormigón se deberá esperar el tiempo establecido para su fragüe. La actividad se realiza mediante la utilización de un camión robotizado, llamado también *roboshot*.
- **Perforación de avance:** Actividad de perforación de la frente de avance a través de un equipo Jumbo, de acuerdo con un diagrama de disparo y largo de perforaciones previamente establecidas [17].

A modo de resumen, y para garantizar el entendimiento se presenta el flujograma del ciclo minero de avance que tradicionalmente se realiza al interior del proyecto.

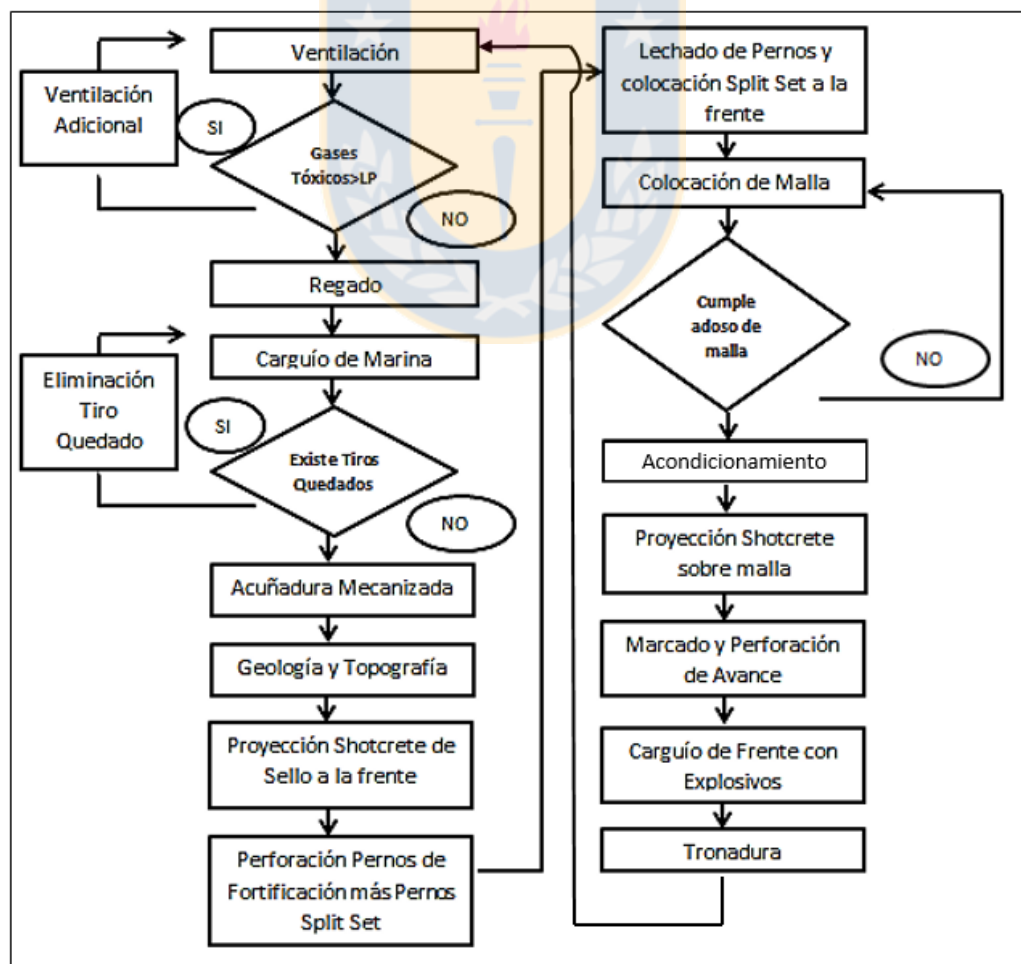


Figura 3.6: Flujograma del Ciclo de Avance Minero en PAN-NNM.

3.3.2 Complejidades Constructivas en el Desarrollo del Proyecto

Como se mencionó anteriormente el proyecto original tuvo que ser modificado debido a las complejidades constructivas presentadas en su momento, por lo que resulta relevante detallar en mayor medida las características más complejas que exigieron dicho proceso. Cabe destacar que las complejidades constructivas a mencionar guardan estricta relación con la condición de esfuerzos, parámetro más relevante a la hora de diseñar y construir las labores al interior del proyecto.

3.3.2.1 Sismicidad

Para comprender el fenómeno de sismicidad inducida se debe tener siempre presente que el causante de dicha anomalía es el reacomodo de los esfuerzos producto de las labores mineras, es decir, sin minería no existiría dicho fenómeno. De este modo el concepto desde la perspectiva geomecánica señala que la sismicidad inducida corresponde a la liberación de energía de forma súbita producto de la ruptura de alguna de las estructuras presentes en el macizo rocoso, que –al ser más débiles que el núcleo- ceden ante la aplicación de los altos esfuerzos inducidos y redireccionados por la apertura de excavaciones. Una vez dicho esto se debe recordar que el proyecto se localiza a gran profundidad, por lo que el esfuerzo litostático cobra gran relevancia, cabe destacar además que las obras se emplazan en roca primaria, la cual posee una alta dureza y grado de fragilidad, todas condiciones que favorecen la inducción de la sismicidad.

En definitiva, la definición de sismicidad aceptada por la corporación corresponde a “la ruptura súbita del macizo rocoso que libera energía en forma de ondas sísmicas” [19]. A continuación, se presente una figura que explica de mejor manera la interacción esfuerzo/sismicidad.

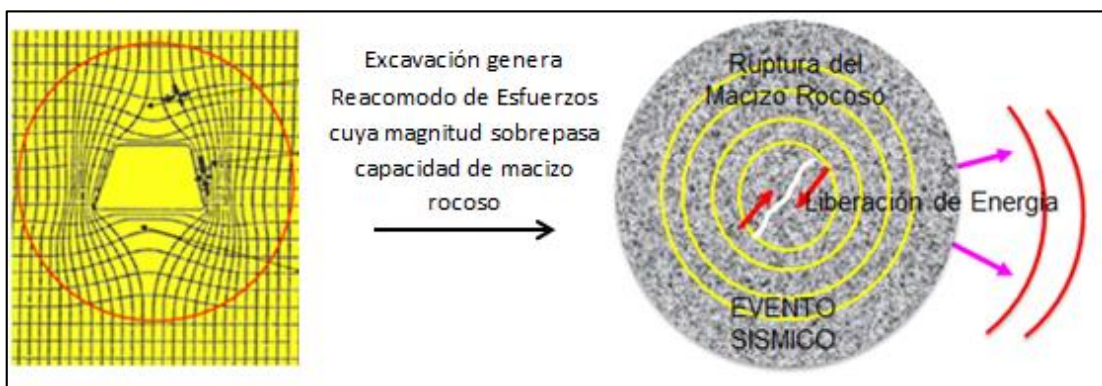


Figura 3.7: Proceso de generación de sismicidad inducida.
(Después de Contreras, 2018)

3.3.2.2 Estallidos de Roca

Se podría definir un estallido de roca como la respuesta local de un evento sísmico, por lo que se deduce que para que esto ocurra se debe generar un evento sísmico de tal magnitud que las ondas generen la ruptura y proyección instantánea del macizo rocoso, sobrepasando las características de disipación de la energía del sistema de fortificación. Además, acorde a la definición de este fenómeno establecido por la corporación, debe causar daños a la fortificación, maquinaria, personal o bien causar el detenimiento de la producción o del ciclo de desarrollo según corresponda, pudiéndose categorizar el grado de perjuicio generado por el evento [19].



Figura 3.8: Estallido de roca en Xc 22/23 PNNM, 19 de mayo 2015.
(Validación de la Constructibilidad PNNM, 2017)

3.3.3 Validación de la Constructibilidad del Proyecto

Con el fin de lograr la ejecución de la totalidad de las obras definidas en el proyecto, se han ejecutado una serie de herramientas que facilitan y garantizan la construcción con altos estándares, minimizando las condiciones de altos esfuerzos próximos a las excavaciones o bien mitigando el riesgo que dicha condición provoca, aminorando por ende la complejidad constructiva presentada y la propensión a accidentes.

3.3.3.1 Métodos de Preacondicionamiento

Los métodos de preacondicionamiento comprenden el fracturamiento y microfracturamiento del macizo rocoso circundante al frente de desarrollo, con el fin de generar un reacomodo de los esfuerzos que actúan sobre la zona a intervenir. A continuación, se señalan los dos métodos que utiliza el proyecto.

- **Fracturamiento Hidráulico**

El fracturamiento hidráulico corresponde a una técnica de preacondicionamiento actualmente utilizada en los métodos de explotación con principio de *caving* que se aplican en roca primaria. El proceso de hidrofracturamiento consiste en perforar extensos barrenos de 91 o 135 metros para luego introducir sondas especiales que arrojarán agua a gran presión, lo que provocará la propagación de fracturas en el macizo rocoso circundante; cabe destacar que dichas perforaciones deben ser siempre perpendiculares a la dirección de esfuerzo σ_3 esto con el fin de facilitar la propagación de las fracturas [20].

Dicho método fue probado exitosamente para los desarrollos de la tunelería del proyecto, por lo que se validó su utilización en el proceso constructivo de frentes críticos⁹. En el siguiente grafico se presenta el alcance de los pozos hidrofracturados en una sección del Túnel Correa.

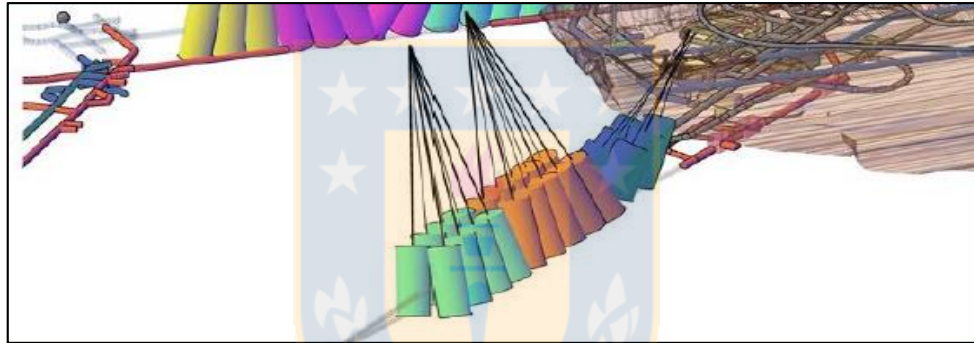


Figura 3.9: Vista isométrica Fracturamiento Hidráulico TAP OIM, PNNM.
(Torres, 2017)

- ***Destress Blasting***

Esta metodología se define como el proceso de uso de cargas confinadas de explosivos con el objetivo de crear o extender fracturas en un entorno inmediato de la labor, la creación de dichas fracturas tiene como propósito reducir la capacidad de transmisión de altos esfuerzos y el potencial de falla violenta. La aplicación principal de esta técnica se encuentra en las frentes de desarrollos horizontales, y su realización no requiere de grandes cantidades de explosivos, ni la modificación de grandes volúmenes de roca [21]. Por lo tanto, según lo anteriormente descrito se podría definir el método de *Destress Blasting* como la aplicación de cargas confinadas en la frente, esta técnica se realiza previo a la tronadura de avance.

La siguiente imagen presenta el efecto teórico esperado luego de la aplicación del método de preacondicionamiento.

⁹ Frente Crítico: Frente que -dadas sus características de esfuerzo y sismicidad circundante- es catalogado como de alto riesgo para la ejecución de labores manuales [20].

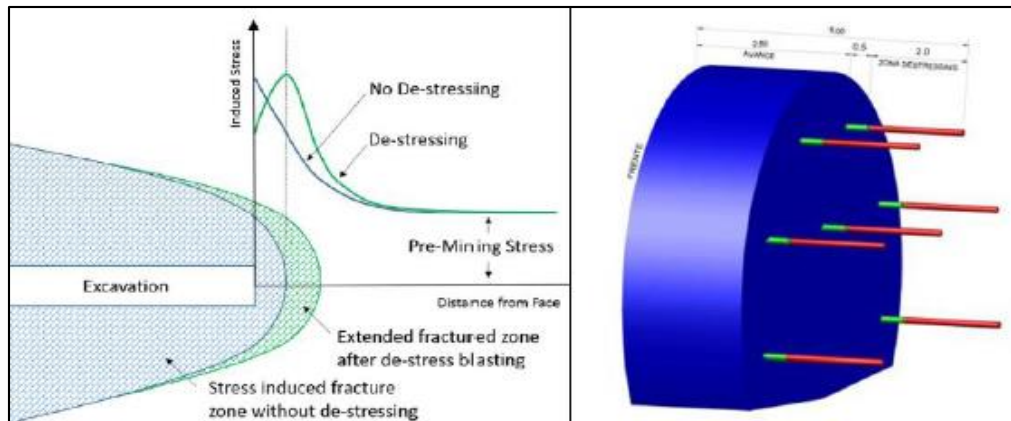


Figura 3.10: Efecto teórico del *Destress Blasting*.
(Sánchez y Rodríguez, 2017)

3.3.3.2 Robustecimiento de la Fortificación

Al momento de realizar la validación de la constructibilidad –debido a las complejidades anteriormente descritas- se validó consecuentemente un nuevo sistema de fortificación, enfocado principalmente a la absorción de energía y contención de materiales que pudieran proyectarse producto de la sismicidad inducida. Con motivo de ello se optó por definir secciones de fortificación según la condición de esfuerzos en las que se encontrará la obra, especificando un sinnúmero de clases de fortificación, entre las cuales destacan las de tipo C1 y D1 puesto eliminan casi por completo la utilización de *shotcrete*, aumentan la utilización de pernos y cables adosados con planchuelas, y además contemplan la colocación de doble malla galvanizada, la cual posee un grado de resistencia ampliamente mayor a las mallas tradicionales.

La siguiente figura corresponde a la fortificación típica utilizada en zonas del tipo D1. El proceso se realiza en dos etapas, arriba la denominada “fortificación segura”, abajo el refuerzo de esta, a la derecha la vista en sección de los elementos de fortificación considerados.

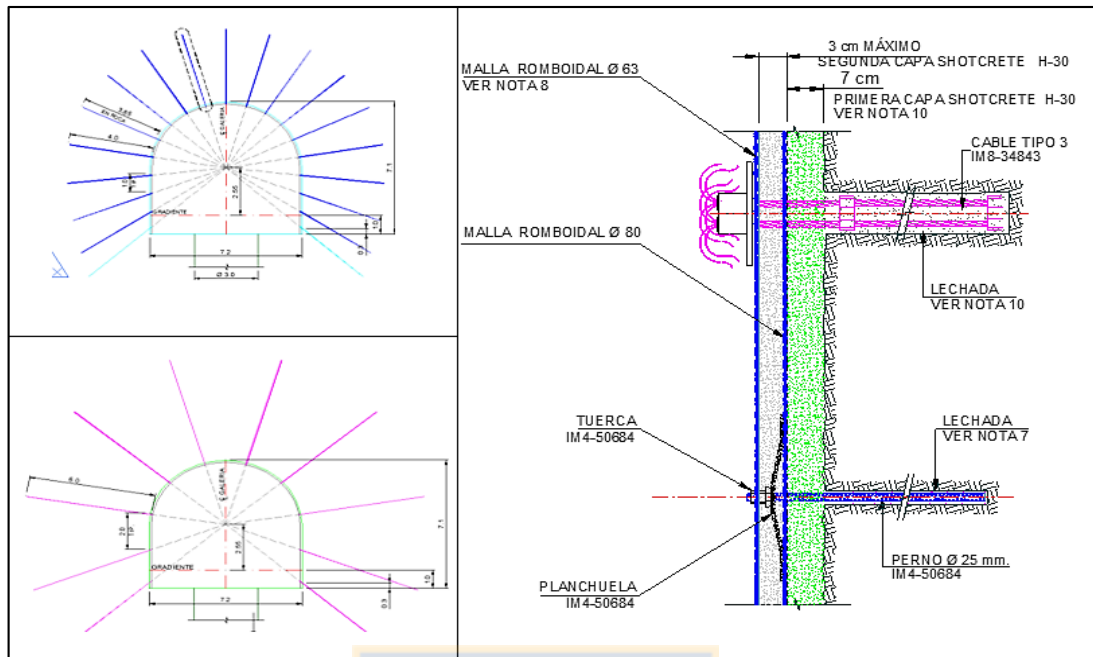


Figura 3.11: Ejemplo de fortificación utilizado en zonas con alto riesgo sísmico en PNNM.
(Validación de la Constructibilidad PNNM, 2017)

3.3.3.3 Mecanización y Telecomando de Operaciones Unitarias

Con el fin de disminuir al mínimo el riesgo de accidentes y evitar la exposición del personal hacía el entorno intrínsecamente sísmico, se ha optado por la realización de la mayor cantidad de actividades mediante la utilización de maquinaria especializada, aplicando a ello el telecomando o control remoto como mecanismo de conducción. Las operaciones unitarias que sufrieron variaciones, y la maquinaria utilizada para ello son descritas en el punto 3.3.4.

3.3.3.4 Otras Medidas de Mitigación del Riesgo

Al interior del proyecto se ha decidido tomar agresivas medidas de mitigación y control de riesgo sísmico, esto con el fin de evitar por completo el acontecimiento de eventos en donde se viera afectado el personal. A continuación, se detallan brevemente las demás medidas aplicadas

10.

- Aumento y robustecimiento de la red de geófonos (sensores sísmicos), otorgando mayor cobertura a frentes críticos.
- Establecimiento de protocolos sísmicos para evacuación y reingreso en caso de condiciones adversas. Además, se establece nueva metodología de alerta sísmica tipo semáforos, que indican el nivel de riesgo sísmico en tiempo real.

¹⁰ Para mayor información dirigirse al Anexo A

- Reestructuración de los protocolos de pre y post tronadura, estableciendo el criterio de “aislación”, el cual corresponde básicamente a la prohibición de acceso al frente de trabajo hasta la estabilización de la actividad sísmica circundante; cuyo estado de desequilibrio es producido por la tronadura respectiva.

3.3.4 Impactos de la Validación de la Constructibilidad

3.3.4.1 Operaciones Unitarias Modificadas para Frentes Críticos

Con el fin de hacer viable la construcción del proyecto, se tomó la decisión de modificar algunas operaciones unitarias en las zonas con condiciones complejas, que para este caso corresponden a las secciones con fortificación clase C1 y D1. A continuación se detallan las modificaciones que ya se encuentran en aplicación:

- **Extracción de marinas:** La evacuación del material quebrado producto de la tronadura de avance sigue el mismo principio que la metodología tradicional, sin embargo, para frentes críticos esta se realiza mediante LHD's dirigidos por control remoto (se debe recordar que el operador se encuentra entre 30 y 50 metros de distancia y se apoya básicamente en su visual) o bien de manera telecomandada (se debe recordar que se opera desde una cabina que entrega las imágenes de las cámaras dispuestas en el equipo).
- **Geología y topografía:** La etapa de inspección geológica sigue el mismo principio que la metodología tradicional, sin embargo, actualmente esta se realiza median Fotogravimetría ADAM ¹¹.
- **Acuñadura y limpieza:** La actividad que consiste en desprender el material inestable en el techo de la galería para evitar su caída sobre personal y/o equipos sigue el mismo principio que la metodología anterior, pero es realizada en forma mecanizada a través de un equipo acuñador.
- **Fortificación:**
 - **Perforación de pernos helicoidales, Lechado de pernos helicoidales y Colocación de malla perimetral:** Actualmente y dadas las condiciones de riesgo intrínsecas del proyecto, estas tres operaciones unitarias son realizadas de manera consecutiva por maquinaria especializada, más específicamente un jumbo de tres brazos denominado Jumbo empernador.

¹¹Para mayor información dirigirse al Anexo B

- **Perforación de pernos split-set, Colocación de malla frente y pernos Split-set:** Estas actividades siguen el mismo principio que la metodología tradicional, sin embargo, actualmente esta se realiza mediante la utilización del jumbo de avance capaz de perforar, colocar el perno y la malla.
- **Perforación de avance:** La perforación de avance sigue la misma metodología constructiva que el ciclo tradicional, pero se hace más extensa en tiempo y recursos dado que dicha operación considera la perforación de los barrenos de *destress blasting*.
- **Carguío de explosivos y tronadura:** Esta operación sigue la misma metodología tradicional, pero se hace más extensa en tiempo y recursos, debido a que considera la carga y tronadura de los barrenos de *destress blasting*.

3.3.4.2 Restricciones Geomecánicas

Respecto a la realización de actividades simultáneas en frentes próximos entre sí, se ha decidido tomar las siguientes medidas:

- No se podrán realizar tronaduras simultáneas en un halo de 50 metros en todas las direcciones respecto a la posición del frente.
- No se podrán realizar estocadas hasta que el frente de la galería inicial esté distanciada a lo menos 15 metros del punto de inicio de la futura intersección.

Dichas restricciones fueron impuestas por el área geomecánica luego de estudiar y simular la interacción de los esfuerzos; y tienen como finalidad evitar la sinergia de esfuerzos inducidos que pudieran generar sismicidad y/o estallidos de roca.

3.3.4.3 Otras Consideraciones Constructivas que Afectan la Planificación

Finalmente se deben considerar algunas excentricidades del proyecto, que pueden afectar el proceso de planificación, generando cuellos de botella o interferencias:

- **Interferencias producto del Fracturamiento Hidráulico.** Se debe recordar que se considera la realización de fracturamiento hidráulico en la totalidad del *footprint* de producción, por lo que necesariamente se debe considerar la secuencia de ejecución del preacondicionamiento a la hora de planificar los desarrollos.
- **Existencia de punto de descarga único.** Al tratarse de desarrollos en un sector sin sistema de manejo de material concluido, solo se dispone de un pique de traspaso (OP-14) para la evacuación de la totalidad de la marina, dicho pique se encuentra conectado al sistema de manejo de mineral Teniente 8 y posee una disponibilidad limitada, la cual es gestionada directamente por la división y sus necesidades. Dicha complejidad logística

debe ser considerada en el proceso de planificación puesto puede generar un gran número de interferencias o sobre acopio de material al interior de la mina.

Como se aprecia, la actividad de planificación y cálculo de recursos necesarios para desarrollar de manera óptima la obra se complejiza debido a la consideración de nuevos factores. Por lo que es trivial considerar que dichos nuevos factores tendrán un fuerte impacto en los parámetros de salida claves de la constructibilidad, correspondientes al costo (Capex), plazos de ejecución e indicadores de seguridad.

Una vez presentados los antecedentes en el que se basará el estudio se procederá a desarrollar el estudio, a continuación se señalan las consideraciones, cálculos y procedimientos que llevaron a la obtención de los resultados.



4 DESARROLLO

A continuación, se presenta un cuadro que resume el desarrollo del estudio.

Referente a la Planificación y Productividad	Frente Única	Obtención de Base de Datos: Análisis Exploratorio y Ordenamiento
		Validación de ajustes de distribuciones de probabilidad y parámetros de simulación
		Análisis de distribuciones de probabilidad de misma actividad con diferente metodología
		Simulación de tiempos de ejecución de Túnel Correa y análisis de impactos de nuevas metodologías
		Identificación de riesgo/oportunidad respecto a plazos de ejecución considerados en la línea base
		Propuestas operacionales y de planificación para disminuir riesgo identificado
	Frentes Múltiple	Obtención de Base de Datos: Indicadores productivos y factores de consumo
		Simulación de la constructibilidad del nivel de hundimiento y análisis de resultados
		Identificación del riesgo/oportunidad de mejora
		Obtención del equipo critico/cuello de botella
Costos	Frente Única	Benchmarking de costos unitarios por metodología constructiva
	Frentes Múltiples	Benchmarking de costos unitarios con minas RENO y Esmeralda

Figura 4.1: Esquema resumen del desarrollo del estudio.

Luego de ello, se presenta en detalle las metodologías y consideraciones utilizadas a lo largo del estudio con el fin de alcanzar los objetivos propuestos con anterioridad.

4.1 PLANIFICACIÓN Y PRODUCTIVIDAD

4.1.1 Frente Única

En el caso de los desarrollos de frente única se debe tener en consideración que el enfoque será la maximización del tiempo disponible de la frente de trabajo, es decir, la maximización del tiempo por turno que la frente puede ser utilizada realizando operaciones contributivas al ciclo minero y que permitan la máxima productividad alcanzable. Por lo tanto, se prioriza la eliminación de tiempos de inactividad, interferencias y reprocesos.

Cabe destacar que, en dicho tipo de desarrollo los equipos poseen gran tiempo de inactividad debido a que solo se utilizan específicamente cuando el ciclo minero así lo requiere, por lo que se considera que el estatus de los equipos es del tipo “cautivos”.

Para el estudio de la constructibilidad de frentes únicas nos centraremos en analizar la constructibilidad del túnel de manejo de mineral definitivo, más conocido como Túnel Correa, esto pues dicho desarrollo se encuentra dentro de la ruta crítica del proyecto ¹².

Con el fin de analizar el impacto que las metodologías constructivas tienen en el desarrollo de la planificación y los plazos de ejecución se realizó una simulación de Montecarlo mediante el software @Risk. Los pasos ejecutados fueron los siguientes:

4.1.1.1 Construcción de Base de Datos

Primero que todo se procedió al establecimiento de una base de datos robusta y libre de errores para evitar que esta pudiera llevar a resultados erróneos. Para ello se recopiló la información de tiempos de ciclo desde 2 frentes de construcción del túnel; en primer lugar, el denominado Pk0 frente que avanza desde Confluencia en dirección a interior mina; en segundo lugar, desde el denominado P4600 correspondiente a una ventana constructiva generada para desarrollar el túnel desde otros frentes con el fin de acelerar la construcción del mismo, dicho frente avanza en dirección hacia Confluencia.

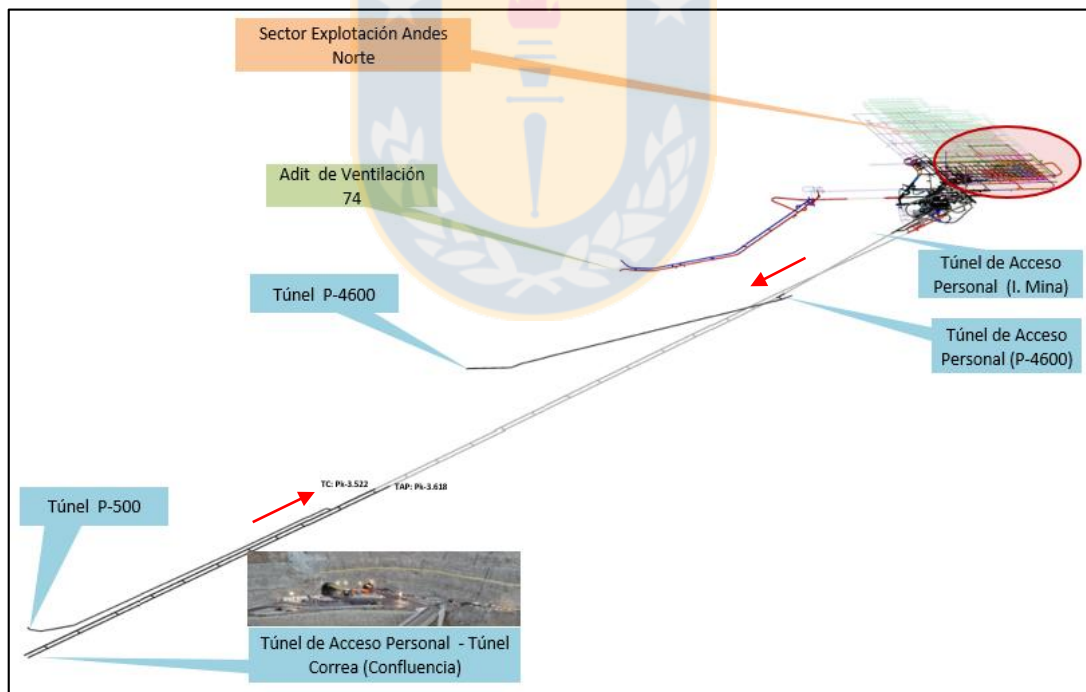


Figura 4.2: Vista Isométrica de Túneles Principales Proyecto NNM en División El Teniente, Codelco. (Constructibilidad Sistema de Manejo Mineral Definitivo PNNM, 2018)

¹² Ruta crítica del proyecto: Desarrollos que poseen un margen menor a 30 días respecto a la fecha estimada de finalización, un atraso mayor significará retrasar la puesta en marcha de la totalidad del proyecto [22].

Una vez obtenida la información se procedió a ordenar y analizar la base de datos con el fin de identificar errores de transcripción, traslapes y datos erráticos o simplemente carentes de sentido. De dicho análisis se procedió a eliminar tan solo 19 datos (0,3% del total) validados mediante el test de Grubbs (fue tomado solo como referencia ya que asume distribución normal de la población) y el juicio experto ¹³ ya que en general dichos datos sobrepasaban en más de 10 veces el valor de la media del parámetro analizado.

Una vez validados los datos se segmentó la información en función del tipo de fortificación y consecuentemente la metodología constructiva utilizada. Cabe destacar que -al no existir aún- los segmentos del túnel desarrollados con la operación unitaria que contempla la colocación de pernos cable, dicho tiempo de actividad fue extrapolado desde la base de datos del cruzado de ventilación Xc 22/23 puesto considera el mismo largo y número de pernos cable por metro lineal que el tipo de fortificación correspondiente al túnel en estudio.

A continuación, se presentan los tipos de fortificación considerados en el estudio. Cabe destacar que la variación en los números indicados en las filas correspondientes a “Malla” guardan relación con la cantidad de aberturas por metro cuadrado que la caracteriza.

Tabla 4.1: Tipos de Fortificación en túneles principales TAP y TC, PAN-NNM.
(Constructibilidad Sistema de Manejo Mineral Definitivo PNNM, 2018).

Característica	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo E	Tipo C1	Tipo D1
Metodología Constructiva (T: tradicional; M: mecanizada)	T	T	T	T	M	M
Primera Capa Shotcrete	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Pernos (Pattern 2.0 x 2.0 ; L: 4 m)	-	-	-	-	9 un	-
Pernos (Pattern 1.5 x 1.5 ; L: 4 m)	12 un	-	-	15 un	-	-
Pernos (Pattern 1.2 x 1.2 ; L: 4 m)	-	15 un	-	-	-	-
Pernos (Pattern 1.0 x 1.0 ; L: 4 m)	-	-	19 un	-	17 un	18 un
Malla (BG: Galvanizada; R: Reticulada)	BG	BG	BG	BG	R G80	R G63
Marco Reticulado	-	-	-	1 un	-	-
Segunda Capa Shotcrete	2 cm	2 cm	2 cm	23 cm	3 cm	2 cm
Segunda Malla	-	-	-	-	R G80	R G63
Pernos Cable (Pattern 2.0 x 2.0 ; L: 8 m)	-	-	-	-	-	10
Largo Perforación de Avance	4.0 m	4.0 m	3.6 m	2.5 m	3.8 m	3.8 m
Aislación Post Tronadura	0 hr	0 hr	12 hr	0 hr	24 hr	24 hr

¹³ Para mayor información dirigirse al Anexo C

4.1.1.2 Parámetros de Ajuste y Simulación

Una vez realizado aquello se ajustaron los datos de cada operación unitaria a una distribución de probabilidad representativa ¹⁴, esto con el fin de obtener un atributo de comparación entre operaciones, además de ser utilizados como parámetros de entrada para la posterior simulación. Dichas distribuciones de probabilidad fueron validadas según el siguiente esquema:

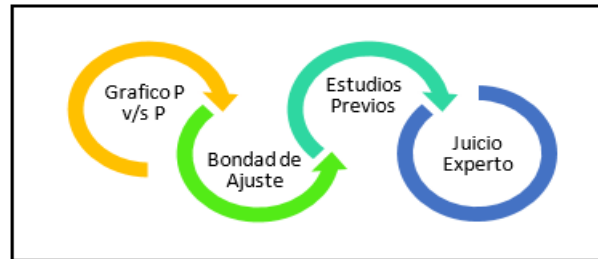


Figura 4.3: Procedimiento de validación de distribuciones de probabilidad.

En primer lugar, se analizan los gráficos de probabilidad acumulada de datos reales versus probabilidad acumulada de la distribución ajustada, en caso de que el gráfico se aproxime a una línea recta con pendiente positiva de 45 grados se está en presencia de un buen ajuste. En segundo lugar, se realizan las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado, las que permiten rechazar o aceptar la hipótesis nula correspondiente a aseverar con un 95% de confianza que los datos se ajustan de buena forma a la distribución seleccionada, por lo que si el p-valor entregado por el software es mayor a 0.05, se procede a validar el ajuste realizado [23].

En caso de que ninguno de los métodos permitiera corroborar el ajuste, se procedió a la comparación de las distribuciones recomendadas por el software versus las presentadas en estudios previos. Dichos estudios corresponden a:

- Modelos de gestión del riesgo asociado a la incertidumbre en las variables intrínsecas del proceso de construcción de una mina subterránea [13].
- Análisis del impacto de actividad sísmica en programa de excavaciones de minería subterránea en ambientes de altos esfuerzos, Proyecto Nuevo Nivel Mina El Teniente [17].
- Aplicación de filosofía LEAN en la preparación minera, mina El Teniente, Codelco, Chile. Tesis de Magister en Minería [24].
- Modelo de confiabilidad operacional de un sistema explotado por método Block Caving. Memoria de Título en Ingeniería Civil de Minas [25].

¹⁴ Para más información dirigirse al Anexo D

Finalmente, el mejor ajuste fue seleccionado por el equipo de constructibilidad del proyecto, teniendo siempre como sustento las distribuciones recomendadas por el software y las distribuciones presentadas en estudios previos ¹⁵.

4.1.1.3 Análisis de Operaciones Unitarias Modificadas

A continuación, se comparan los gráficos de probabilidad acumulada de las operaciones unitarias tradicionales versus su símil con metodología modificada, esto con el fin de analizar su impacto respecto a la productividad y seguridad de las labores. La selección de este método de comparación responde a la gran variabilidad que poseen los datos, por lo cual los parámetros estadísticos tradicionales no permiten obtener una comparación realista y libre de sesgo. Se considera como parámetro de comparación el valor correspondiente al 80% de probabilidad acumulada.

Las operaciones unitarias estudiadas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.2: Operaciones Unitarias Estudiadas.

Operación Unitaria	Metodología Estándar DET	Metodología en Frentes Críticos
Extracción de Marina	Operador a bordo	Telecomandada u operada a control remoto
Acuñadura	Manual desde jaula	Mecanizada
Geología	Tradicional	Fotogravimetría ADAM
Fortificación	Mixta (Mecanizada + Manual)	Jumbo Perforador/Lechador/Enmallador
Fortificación del Frente	Mixta (Mecanizada + Manual)	Jumbo
Perforación de Avance	Tradicional	Considera Destressing
Carguío y Tronadura	Tradicional	Considera Destressing

4.1.1.4 Simulaciones

Ya analizadas las operaciones unitarias modificadas se realizó un análisis desde una perspectiva global, en primer lugar, realizando un estudio de los rendimientos (metros/día) por ciclo según tipo de fortificación y en segundo lugar realizando una simulación de los tiempos de ejecución del Túnel Correa. Los parámetros utilizados para dicho proceso son detallados a continuación.

En primer lugar, se realiza la simulación de los rendimientos por tipo de fortificación y consecuentemente por tipo de metodología constructiva, esto se realizó mediante una simulación

¹⁵ Para revisar un ejemplo de la validación de los ajustes de las distribuciones de probabilidad, dirigirse al Anexo E

de la suma de las operaciones unitarias que componen el ciclo, sus respectivas interferencias y periodos de aislación; todo esto dividido por los metros de avance por ciclo. La realización de este proceso entregará los metros por día ejecutados por cada ciclo.

A continuación, se presenta la fórmula que permite obtener los rendimientos ¹⁶ :

$$\text{Rendimiento} \left(\frac{m}{\text{día}} \right) = \frac{(24) * (\text{Metros de Avance por ciclo})}{[(OPU_1 + OPU_2 + \dots + OPU_n) + (Int_1 + Int_2 + \dots + Int_n) + (Ais)]} \quad (\text{Ec.1})$$

Con:

- OPU: Distribución de probabilidad del tiempo de duración de la operación unitaria (horas/ciclo)
- Int: Distribución de probabilidad del tiempo de duración de la interferencia (horas/ciclo)
- Ais: Distribución de probabilidad del tiempo de duración del periodo de aislación post-tronadura (horas/ciclo)

Una vez obtenidos los rendimientos por ciclo según tipo de fortificación se procedió a comparar y analizar los resultados obtenidos entre dichos ciclos y además entre los valores considerados en la línea base; si los valores obtenidos difieren en demasía con la línea base, el estudio se profundiza con la finalidad de encontrar oportunidades de mejora. Esto se realiza mediante análisis de sensibilidad y simulación de casos hipotéticos.

Luego, utilizando los rendimientos como parámetro de entrada se realizó la simulación de lo que resta de construcción del Túnel Correa, para ello se consideró la zonificación por metro lineal de túnel según el tipo de fortificación, información otorgada por el área geomecánica del proyecto y presentada en el documento “Constructibilidad del Sistema de Manejo de Mineral Definitivo”.

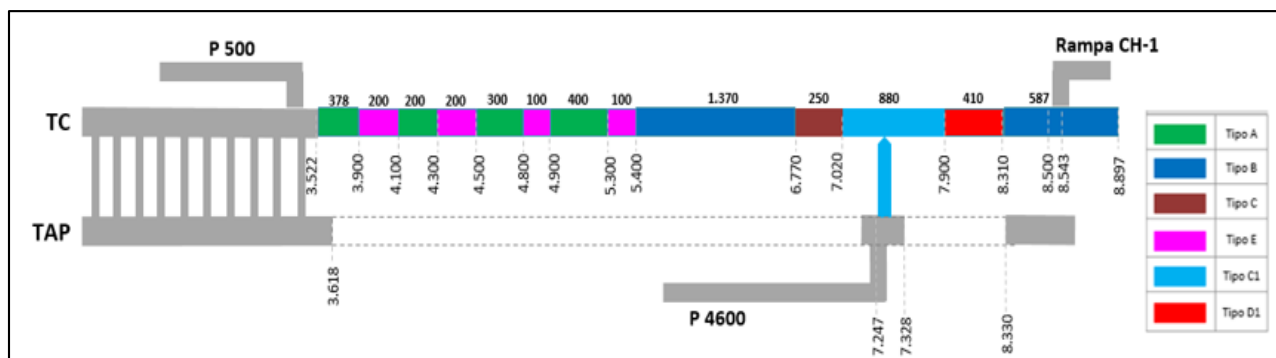


Figura 4.4: Zonificación por tipo de fortificación Túneles Principales Proyecto NNM en División El Teniente, Codelco.

(Constructibilidad Sistema de Manejo Mineral Definitivo PNNM, 2018)

¹⁶ Para conocer las operaciones unitarias, interferencias y periodos de aislación que contempla cada ciclo, diríjase al anexo F

Una vez realizada la construcción del modelo se procedió a la validación del mismo, corriendo este por los Pk realizados con anterioridad, correspondientes al segmento 7245-7118, simulación de 125 metros lineales.

Se simulan 4 frentes de ataque, ya que corresponden a los frentes considerados para la construcción, cada uno con un punto de inicio y término; el punto de partida fue considerado según la mensura del 01 de junio del presente año, y el punto de término se obtuvo como el punto de unión entre los frentes a empalmar, esto según los cálculos realizado por el equipo de constructibilidad. A continuación, se presenta la figura con los frentes y los puntos de partida y término de cada uno de estos.

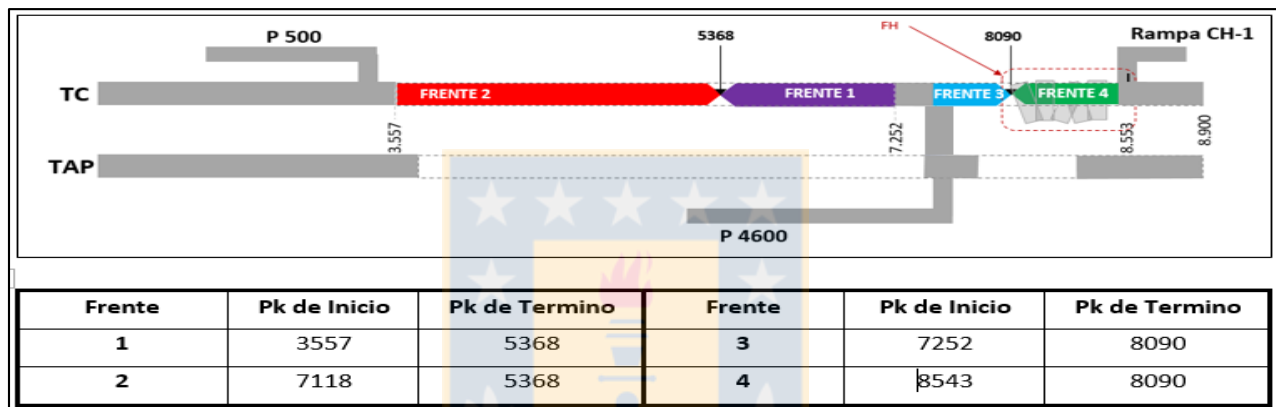


Figura 4.5: Frentes a simular con sus respectivos puntos de inicio y termino en base a la mensura del 01 de junio del 2018, PNNM.

(Constructibilidad Sistema de Manejo Mineral Definitivo PNNM, 2018)

Posteriormente y con motivo de identificar oportunidades de mejora, se ejecutó un análisis de sensibilidad de la construcción del túnel, analizando los factores gestionables que mayor impacto tienen en los plazos de ejecución.

A modo de resumen se puede decir que el desarrollo del estudio desde la perspectiva de la planificación y la productividad en frentes únicos se basará en: un análisis del impacto que ha generado la modificación de la metodología constructiva por operación unitaria, el estudio de los rendimientos por ciclo según tipo de fortificación, y finalmente un análisis de manera holística respecto a la construcción del túnel, esto con el fin de analizar el real impacto que las modificaciones pudieran tener respecto de la línea base.

Todos estos análisis permitirán determinar los factores críticos y las oportunidades de mejora del proceso constructivo de los frentes únicos del proyecto.

4.1.1.5 Selección del Intervalo de Confianza

Se debe señalar que a la hora de analizar los resultados se utilizará siempre un intervalo de confianza igual o superior al 70%, esto pues dicho valor entrega una tasa de riesgo aceptable según lo considerado por el equipo de constructibilidad. Al respecto se menciona que, si bien dicho valor puede parecer arriesgado, se hace referencia a desarrollos subterráneos en donde ocurren una gran cantidad de interferencias y contingencias o circunstancias favorables que modifican fuertemente el tiempo, por lo que considerar un valor mayor de confiabilidad otorgará un resultado en extremo conservador. A modo de ejemplo se puede considerar las horas de duración de un ciclo, dichas horas probablemente pueden considerarse estables, pero en algunos casos se extiende en demasía producto de interferencias por sismicidad, logísticas o de cualquier otra índole; para este caso se considera que dicha situación ocurre con poca frecuencia por lo tanto no debe ser considerada a la hora de calcular los plazos de ejecución.

4.1.2 Frentes Múltiples

Para el caso del estudio de la constructibilidad de desarrollos multi-frente se tiene en consideración que el enfoque será la maximización en la utilización de los equipos, esto pues se dispone de un gran número de frentes disponibles pero con recursos limitados para el desarrollo de la misma, es por ello que –independiente del grado de utilización de la frente- se orientan los esfuerzos a la optimización de los recursos, con el fin de mantenerlos activos todo el tiempo que sea posible, maximizando así la productividad en la construcción. Por lo tanto, se busca la disminución al máximo de las interferencias que pudiera sufrir los equipos, tales como fallas, falta de energía o ausencia de operadores, además de la optimización en el proceso de planificación para evitar la presencia de tiempos ociosos. En definitiva, la limitante para este caso corresponderá a los recursos y no a la disponibilidad de las frentes, característica propia del caso mencionado anteriormente.

Con el fin de analizar el impacto que tiene la condición de altos esfuerzos respecto a la planificación y productividad, se ha tomado la decisión de –en primer lugar- realizar una simulación de la construcción del nivel de hundimiento en la zona del *footprint* de producción. Luego de ello se procedió a estudiar en mayor detalle los resultados otorgados por dicho análisis, esto con el fin de obtener las oportunidades de mejora del proceso.

La selección de dicho nivel responde básicamente a que es desde esta zona dónde se realiza el preconditionamiento por fracturamiento hidráulico descendente, método utilizado para mitigar el efecto de la sismicidad en los demás niveles de la mina. Dicha operación es intrínseca de la condición de altos esfuerzos por lo que resulta importante que se vea reflejada en la

simulación. Cabe recordar que la actividad de preacondicionamiento es fuertemente interferente, tanto en el nivel desde donde se realiza, como para los demás niveles, esto debido a dos motivos: en primer lugar, se genera un halo de aislación al momento de realizar la actividad, lo que limita fuertemente la disponibilidad de frentes; en segundo lugar, el desarrollo de los demás niveles debe realizarse sobre roca preacondicionada por lo que se desprende que antes de la construcción de estos niveles se debe ejecutar el fracturamiento hidráulico.

Una vez dicho ello, se procede a mencionar los pasos que permitieron desarrollar de buena manera el análisis.

4.1.2.1 Parámetros de Simulación en Deswik®

Primero que todo, cabe destacar que para realizar dicha simulación se trabajó conjuntamente con el equipo de planificación minera, puesto el manejo del software es de acceso restringido y responde a una alta complejidad técnica.

En primer lugar, se debe importar y reconvertir a formato 3D el *layout* de la mina, esto con el fin de garantizar que todas las características geométricas sean consideradas por el software, entre las que destacan el tamaño de las secciones y las distancias de desplazamiento promedio de los equipos, parámetros de los cuales dependerán los tiempos de actividad por frente y desplazamiento. Una vez realizado ello se procede a adicionar la flota de equipos y la dotación considerada para la realización de la obra, obtenida de cálculos anteriormente realizados por el equipo de constructibilidad, agregando además los factores de consumo necesarios para la utilización de dichos recursos, tales como consumo de energía, combustible, aire fresco y agua. Luego de ello corresponde ingresar el ciclo operativo que realiza cada equipo, considerando los tiempos de posicionamiento, instalación, actividad según la sección del frente, desinstalación y retiro, entre otros. Finalmente, se ingresa la secuencia constructiva lógica, esto con el fin de otorgar los lineamientos al software para la correcta construcción del ciclo minero. Además, respecto a las condiciones operacionales de nuestro caso de estudio, el software permitirá ingresar las restricciones geomecánicas, de procedencia lineal (es decir, la dirección preferencial de construcción), disponibilidad de equipos, eficiencia de trabajadores, curva de aprendizaje y cualquier otra consideración que se estime conveniente ¹⁷.

¹⁷ Para revisar los parámetros de entrada más importantes dirigirse al Anexo G

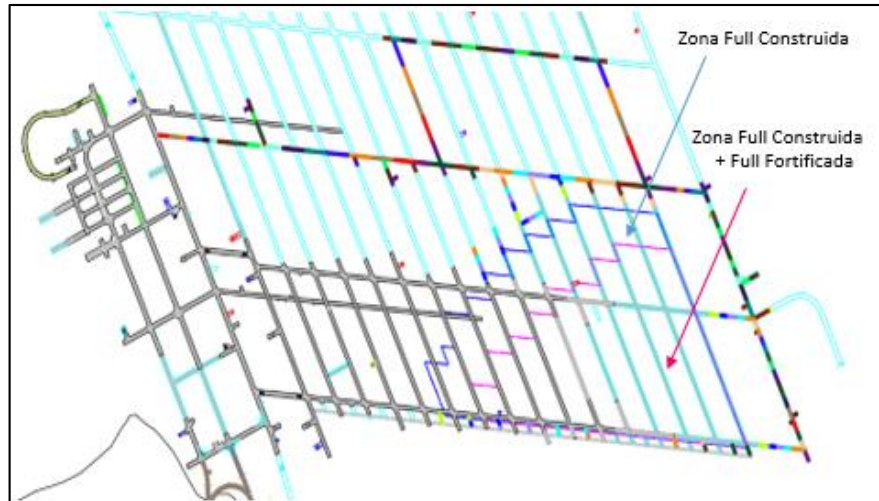


Figura 4.6: Alcance de Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina en nivel de hundimiento.
(Codelco, 2018)

Con el fin de evitar las redundancias se obvia la presentación de la secuencia lógica constructiva y las restricciones geomecánicas, puesto responden a lo ya mencionado en capítulos anteriores.

Una vez dicho ello podemos distinguir dos simulaciones, la primera, denominada como caso base corresponderá a la simulación de la ejecución de los desarrollos de 1 año en el UCL en condición de altos esfuerzos; el segundo caso corresponderá a la simulación en el mismo periodo de tiempo, pero obviando las restricciones y actividades propias a la condición de esfuerzos. Cabe destacar que las simulaciones consideran los mismos estándares de dotación y equipos, pero el grado de utilización de los recursos harán variar fuertemente los factores de consumo, los cuales se encuentran limitados de acuerdo a las características de la mina. Entre los factores de consumo más relevantes destaca la utilización de agua y aire, los cuales no pueden sobrepasar el umbral de disponibilidad que tiene la mina en estudio.

La siguiente tabla resume las modificaciones que sufrió el modelo entre el caso base y el caso de análisis sin condición de altos esfuerzos.

Tabla 4.3: Resumen de datos de entrada para los modelos de simulación en Deswik®.

Restricciones	Con condición de altos esfuerzos	Sin condición de altos esfuerzos
Periodo de ventilación y aislación	1-3 horas según polígono de sismicidad	30 minutos
Fracturamiento hidráulico descendente	Considera	No Considera
Limitación de cantidad de frentes activas	Considera	No Considera
Área mínima halo de aislación post tronadura	50 metros	Sin restricción
Distancia entre frentes a detonar	50 metros	Sin restricción
Distancia mínima entre frente-estocada	15 metros	Sin restricción

Se debe recordar que, como se explicó con anterioridad la mayoría de las restricciones aplicadas al caso base responden a evitar el efecto sinérgico que pudiera tener la realización de actividades en frentes próximos entre sí.

4.1.2.2 Análisis de Equipos Críticos OIM

Los resultados de las simulaciones presentados en el capítulo correspondiente arrojan preocupantes valores en lo que respecta al grado de utilización de los equipos, es por ello que el enfoque de profundización del estudio apuntará a maximizar la utilización de los mismos. Por lo tanto, el objetivo de este análisis responde a identificar el equipo crítico o cuello de botella en la ejecución de desarrollos al interior de la mina, principalmente con el fin de modificar el enfoque de planificación, pasando desde una perspectiva de cantidad de metros a cumplir por unidad de tiempo (enfoque que se utiliza actualmente), hacia un enfoque de planificación en función del equipo crítico. Esto pues si consideramos a dicho equipo como el cuello de botella del proceso, es lógico considerar que, logrando una máxima utilización de este, se consigue consecuentemente la máxima productividad que el sistema puede alcanzar. La justificación de la utilización de ambos enfoques de planificación es explicada en el capítulo de resultados.

La base de datos que sustenta el análisis de equipos críticos al interior de la mina se obtuvo desde 3 diferentes áreas, las que son especificadas a continuación.

En primer lugar, se utilizan como referencia los informes gerenciales diarios de la totalidad del año 2016 correspondientes al contrato ejecutado por la empresa Zublin y en donde se señalan todas las interferencias mecánicas que tuvieron los equipos a lo largo del turno, considerando básicamente dos tipos: fallas y mantenciones. Esta base de datos fue analizada, depurada y

ordenada con el fin de obtener las horas de disponibilidad real de los equipos ¹⁸. Cabe destacar que para efectos prácticos las fallas de corta duración y los mantenimientos preventivos diarios fueron considerados como situaciones cotidianas, por lo que se incluyen a la hora de calcular el tiempo promedio de disponibilidad del equipo por turno. Por otro lado, las fallas que ocasionaron gran pérdida de tiempo (más de un turno) y las mantenciones de gran envergadura, fueron aisladas y utilizadas para obtener los KPI de tiempo medio entre falla y tiempo de falla, los cuales indicarán cada cuanto falla el equipo y –en caso de fallar- cuanto tiempo se encontrará no operativo respectivamente. De este modo se obtiene una disponibilidad sin fallas significativas y otra disponibilidad considerando dichos tiempos de inactividad.

En segundo lugar, con el fin de obtener las horas de trabajo efectivas por turno, se utiliza el estudio realizado por la DICTUC durante el mismo periodo considerado en la base de datos anterior [26]. Dicho estudio presenta el tiempo de inicio real del turno, las horas perdidas por interferencias administrativas, las horas de colación y el tiempo real de fin de turno, lo que consecuentemente permitirá definir las horas de trabajo efectivas por día.

A continuación, se presenta de manera gráfica los resultados obtenidos en el estudio realizado por la gerencia de proyectos por medio de la institución antes mencionada.

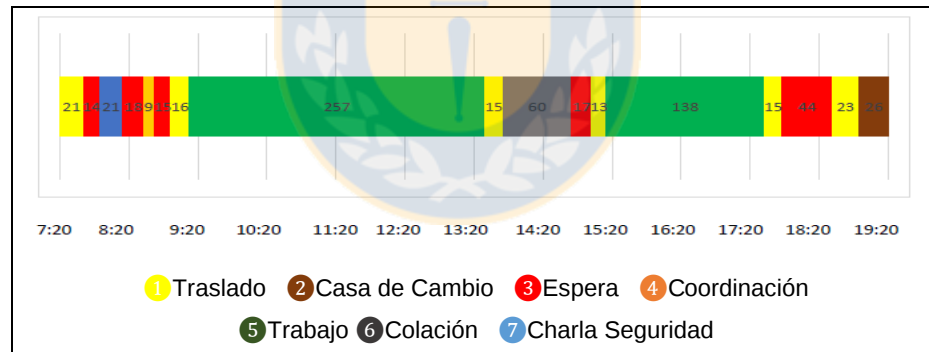


Figura 4.7: Distribución de las actividades de un turno promedio en el PAN-NNM. (Informe N°1341569 Unidad GEPRO, DICTUC)

Del gráfico anterior se puede apreciar que las horas de trabajo efectivo a lo largo de un turno arroja aproximadamente 6,6 horas efectivas de un total de 12 contempladas para cada turno, lo que arroja una 55% de tiempo efectivo de trabajo. Cabe destacar que en este caso se hace referencia a un turno de modalidad 7x7.

Finalmente, para la obtención de los tiempos de ciclo de los equipos se utilizó la base de datos otorgada por el área de constructibilidad del proyecto, información avalada por la data histórica de la División El Teniente; la cual posee el desglose de los tiempos de actividad de cada

¹⁸ Para ver un ejemplo de la planilla diaria dirigirse al Anexo H

equipo según el tamaño de la sección en donde este se desempeñe. Dicha data es la misma considerada como parámetro de entrada en el modelo de simulación anteriormente descrito, por lo que detallar en mayor medida dichos parámetros resulta redundante. Cabe destacar que para efectos prácticos solo se utilizó el tiempo de actividad asociada a la sección típica de cada nivel, dicha sección fue seleccionada contabilizando la cantidad de metros a desarrollar por cada contrato (“enlace” actualmente en ejecución y principal con comienzo en abril del 2019 y duración de 5 años), el gráfico de los resultados es presentado a continuación.

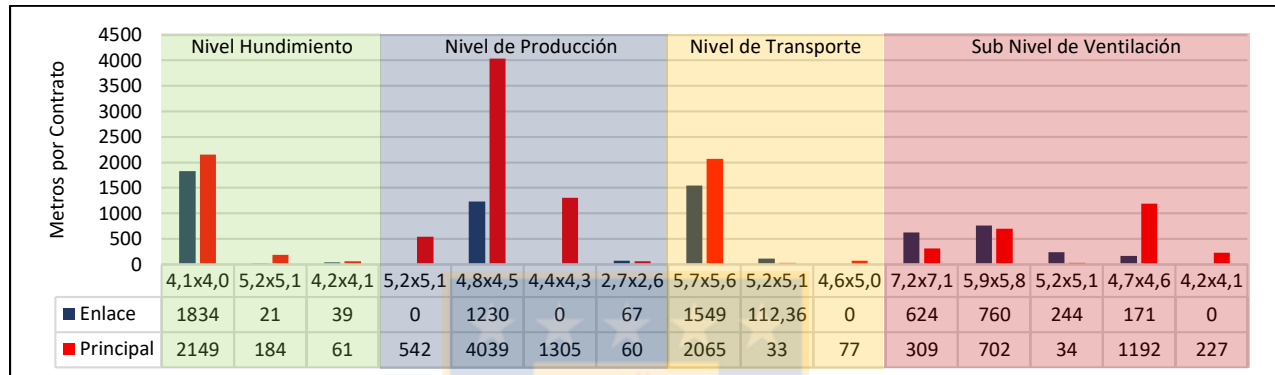


Figura 4.8: Cantidad de metros a realizar según sección en PAN-NNM.

Del gráfico presentado se desprende que las secciones típicas serán de 4,1 x 4,0 para el nivel de hundimiento, de 4,8 x 4,5 para en nivel de producción, de 5,7 x 5,6 para el nivel de transporte intermedio y finalmente de 5,9 x 5,8 y de 4,7 x 4,6 para el sub nivel de ventilación que considerará dos secciones típicas. Como se menciona con anterioridad, dichas secciones serán utilizadas para la obtención de los tiempos de actividad, los cuales lógicamente varían en función del tamaño a desarrollar.

Para la obtención del tiempo de desplazamiento se calculó la distancia promedio entre frentes, lo que en conjunto con la velocidad media de cada equipo arrojará un tiempo promedio. De igual modo, la obtención del tiempo de desplazamiento entre niveles se realizó tomando como base los valores otorgados el juicio experto del equipo de constructibilidad¹⁹. Cabe destacar que no se consideró la aceleración y desaceleración de los equipos, puesto a juicio del autor (y de los expertos del área de constructibilidad) no constituye un factor relevante en el tiempo de ciclo total del equipo.

Finalmente, la obtención del equipo crítico se logró calculando la cantidad de ciclos por día que puede realizar cada equipo, esto se realizó calculando el tiempo de ciclo del equipo, el cual considera básicamente los tiempos de desplazamiento, posicionamiento, instalación, actividad y

¹⁹ Para revisar tiempo de Desplazamiento, dirigirse al Anexo I

retiro, entre otras. Luego se procedió a contabilizar la cantidad de ciclos que puede realizar cada recurso durante las horas efectivas de trabajo por turno, anteriormente calculadas. Cabe destacar que este procedimiento se realizó para los casos con las horas disponibles por equipo sin considerar fallas significativas y posteriormente considerando el tiempo no disponible producto de dichas fallas.

Por lo tanto, a modo de resumen se puede decir que el análisis de planificación y productividad para Obras Interior Mina consistirá en simular los alcances de desarrollo tanto en condición de altos esfuerzos como en condición idónea de los mismos. Luego se analizan los resultados obtenidos con el fin de identificar las causas de los mismos. Una vez obtenida la causa se procede a identificar el cuello de botella del proceso y a proponer las oportunidades de mejora fundamentalmente respecto a una modificación en el enfoque de planificación.

4.2 COSTOS

4.2.1 Frente Única

Respecto al análisis de costos en frente única este se realizó mediante un *benchmarking* del costo por metro lineal de túnel según tipo de fortificación y consecuente metodología constructiva, esto pues según el frente en estudio podemos diferenciar costos de construcción en condiciones favorables y costos de construcción en condiciones de altos esfuerzos. El desglose de los costos se realiza con el fin de identificar correctamente cuales son las excentricidades consideradas y los impactos que poseen las actividades y/o equipos utilizados en el desarrollo de frente única en condición de altos esfuerzos. Es importante mencionar que todos los costos expuestos corresponden a frentes de un mismo túnel y por ende poseen la misma sección (8,9 m x 6,7 m).

Cabe destacar que dicha información es proporcionada por la Corporación y fue ponderada con el fin de resguardar el desarrollo de la licitación actualmente en proceso. Se debe considerar además que todos los valores presentados corresponden a moneda base 2018.

4.2.2 Frentes Múltiples

Para estudiar el impacto que la condición de esfuerzos tiene en las obras interior mina desde la perspectiva de los costos, se realiza un *benchmarking* con las minas Esmeralda y Reservas Norte, ambas pertenecientes a la división. Dichos datos fueron obtenidos por el área de contratos de la empresa de ingeniería colaboradora Dessau, en donde se detallan los costos por metro lineal según nivel y sección correspondiente.

Cabe destacar que todos los contratos utilizan la misma jornada de trabajo, correspondiente a 10x5, además, todos los valores son expresados en moneda base 2017.

Dicho análisis considera los costos asociados a las secciones típicas, dimensiones compartidas por las 3 minas que son señaladas a continuación.

Tabla 4.4: Secciones típicas analizadas en la perspectiva de los costos, DET.

Nivel de Hundimiento (m)	Nivel de Producción (m)	Nivel de Transporte Intermedio (m)	Sub Nivel de Ventilación (m)
4,1 x 4,0	4,8 x 4,5	5,7 x 5,6	5,9 x 5,8

El procedimiento realizado consistió básicamente en:

- Desglose del costo total del contrato en costos directos, indirectos, gastos generales y utilidades.
- Desglose de los costos directos e indirectos en mano de obra, equipos y materiales.
- Desglose de costos de materiales, equipos y de mano de obra en unidades de recursos con el fin de diferenciar las excentricidades consideradas en el contrato.

Una vez mencionado el desarrollo, metodología y consideraciones utilizadas a lo largo del estudio, corresponde presentar y discutir los resultados obtenidos.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 PERSPECTIVA DE LA PLANIFICACIÓN Y LA PRODUCTIVIDAD

5.1.1 Análisis por Operación Unitaria Modificada en Frentes Críticos

A continuación, se presentan los gráficos de distribución de probabilidad acumulada de las operaciones unitarias modificadas en frentes críticos producto de la condición de esfuerzo, esto con el fin de comparar dichas operaciones en términos de productividad. Debemos recordar que la importancia de estudiar las operaciones unitarias en la constructibilidad se debe a que estas serán la base para el cálculo del parque de equipos, la dotación, los insumos y el tiempo de ejecución; todos parámetros limitados por la disponibilidad tanto de capital como de factores de consumo (agua, aire, combustible, piques, entre otros). Por lo tanto, la metodología que se utilice para realizar las actividades, impactará fuertemente en todos los parámetros constructivos.

- **Extracción de Marina**

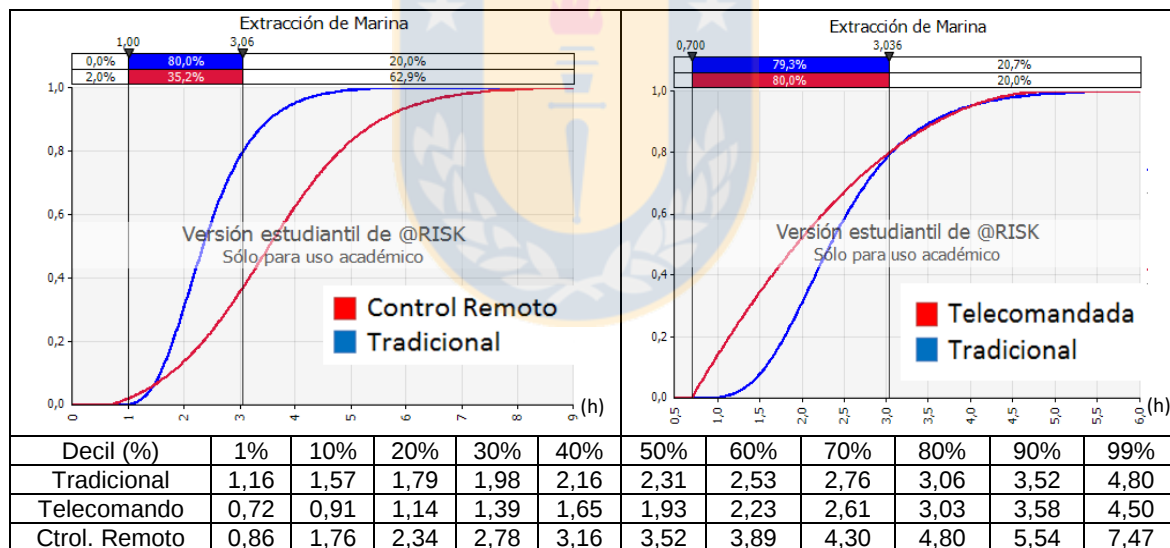


Figura 5.1: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria extracción de marina según metodología constructiva.

Cuando se analiza la extracción de marina tradicional versus la telecomandada se observa que el valor confiable (P70) es similar utilizando ambas metodologías, quedando este alrededor de las 2,7 horas. Ahora bien, se aprecia que la curva de extracción telecomandada posee mayor pendiente, por lo que las probabilidades de realizar un tiempo menor aumentan conforme disminuimos el decil en estudio. Esto se debe a que el telecomando puede comenzar a operar en periodo de aislación, ya que con dicha metodología el operador no se encuentra físicamente en la

zona circundante al frente, evitando la exposición al riesgo y cumpliendo así los protocolos de seguridad mencionados en los capítulos anteriores.

Se debe explicar que, aun cuando el tiempo de la actividad por telecomando resulta similar o incluso mayor al de las otras metodologías, en el ejercicio contable este es considerado como menor, ya que casi la totalidad de dicha actividad es realizada en periodo establecido como “tiempo muerto” debido a la aislación. A continuación, se presenta una figura que permite explicar de mejor manera el ejercicio contable.

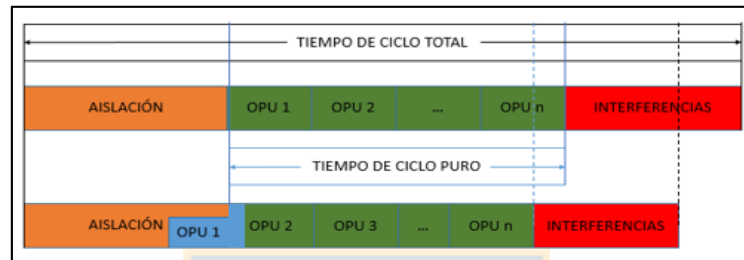


Figura 5.2: Ejemplificación de obtención de tiempos de ciclo considerando periodo de aislación.

Por otro lado, cuando comparamos la metodología tradicional versus la actividad por control remoto se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 2,7 horas, en desmedro del 30% de las probabilidades del control remoto. Esto se debe a las dificultades intrínsecas de operar con dicha metodología, ya que el operador debe manejar el equipo a distancia por medio de un joystick, sin ningún tipo de apoyo visual para la toma de decisiones. Ahora bien, la metodología a control remoto resulta ser mucho más provechosa en términos de seguridad puesto retira al operador de la zona de riesgo latente, alejándolo entre 30 y 50 metros de la frente.

- **Acuñadura y Limpieza**

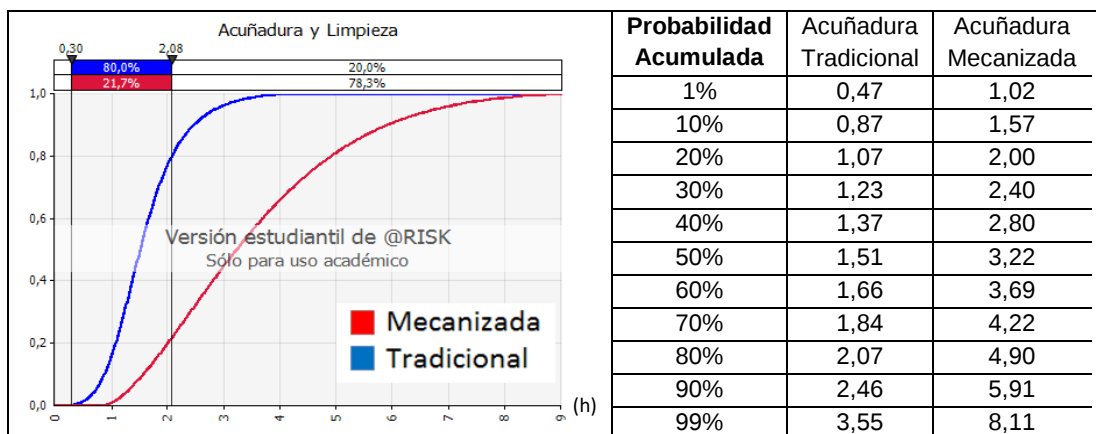


Figura 5.3: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria acuñadura y limpieza según metodología constructiva.

Al analizar la operación de acuñadura y limpieza se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 1,8 horas, en desmedro del 18% de las probabilidades de la metodología mecanizada. Ahora bien, el tiempo perdido se justifica ya que al realizar dicha actividad de manera mecanizada se disminuye drásticamente la exposición al riesgo y por ende la probabilidad de accidentes, ya que el operador se encuentra protegido por la cabina del equipo.

Este cambio metodológico se justifica de mejor manera considerando que un 40% de los accidentes de trabajo en minería con metodología manual se genera en la actividad de acuñadura. Además, se debe considerar que en la mayoría de los casos dichos accidentes resultan gravemente incapacitantes o fatales [27].

- **Geología y Topografía**

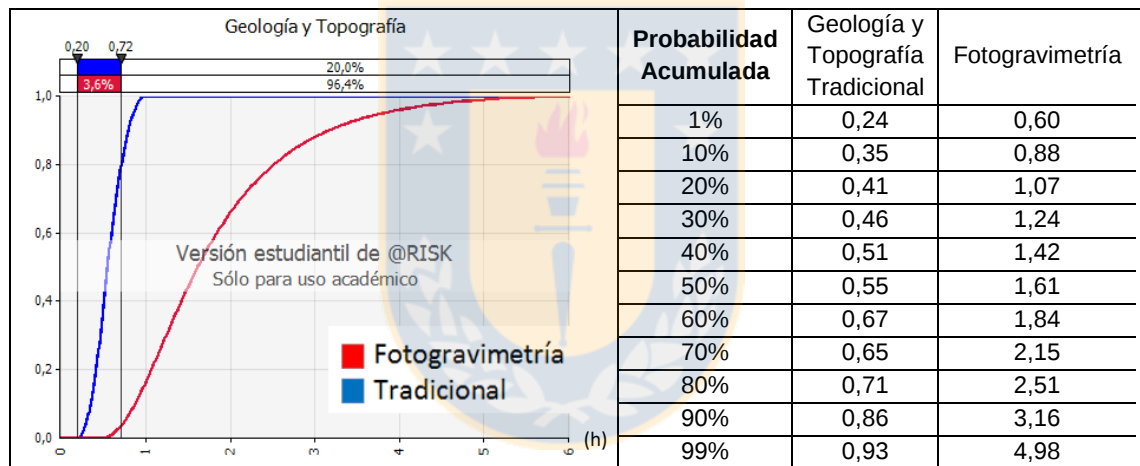


Figura 5.4: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria geología y topografía según metodología constructiva.

Al analizar la diferencia entre la metodología tradicional versus la fotogrametría se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 0,7 horas, en desmedro del 2,6% de las probabilidades de la fotogrametría. Esto se debe principalmente ya que el proceso de toma fotográfica se realiza en dos etapas, correspondiente a pre y post acuñadura, y considera además un proceso de colocación, posicionamiento y nivelación previo a la ejecución de la fotografía, echo que intrínsecamente toma más tiempo. Ahora bien, la justificación del aumento en el tiempo responde principalmente a dos razones: en primer lugar, la máxima de la validación de la constructibilidad, la eliminación de la exposición al riesgo.

En segundo lugar -y de mayor relevancia en este caso- se debe a que dicha metodología permite una excelente caracterización del macizo rocoso circundante, siendo una potente herramienta de conciliación de la información de estructuras geológicas, tanto regionales como locales; lo que consecuentemente permitirá tomar mejores decisiones en términos de productividad y seguridad de las labores.

- **Fortificación**

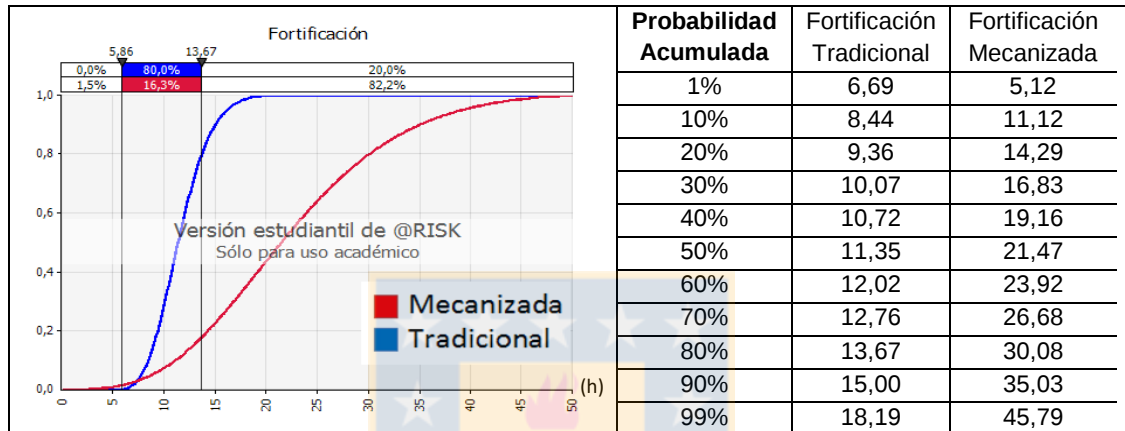


Figura 5.5: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria fortificación según metodología constructiva.

Al realizar el análisis entre la fortificación tradicional versus la mecanizada se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 12,7 horas, en desmedro del 15% de las probabilidades de la metodología mecanizada, la cual se realiza mediante la utilización de un Jumbo Boltec. El aumento en el tiempo se justifica ya que se disminuye considerablemente la exposición al riesgo de los operadores y realizadores de las labores y por ende la probabilidad de accidente con pérdida de tiempo, grave o fatal. Se debe recordar que anteriormente el lechado de pernos y la colocación de malla se realizaba de manera manual, hecho que resulta inverosímil en frentes críticos, donde la probabilidad de estallido de roca es latente, más aún considerando que la sección referida se encuentra con fortificación incompleta.

- **Fortificación de la Frente**

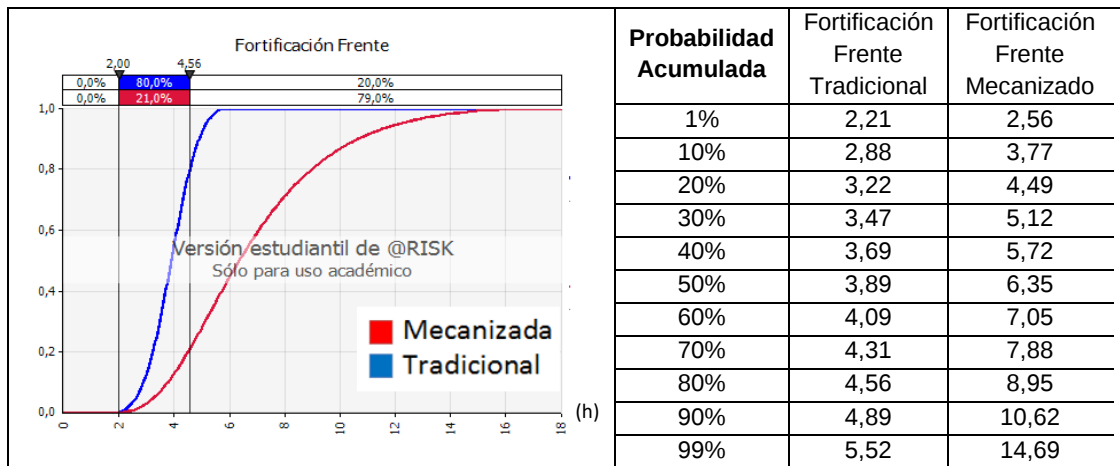


Figura 5.6: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria fortificación del frente según metodología constructiva.

Al realizar el análisis entre la metodología tradicional y la mecanizada se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 4,3 horas, en desmedro del 18% de las probabilidades obtenidas con la metodología mecanizada. De igual modo que en el tópico presentado con anterioridad el tiempo perdido se justifica ya que se disminuye considerablemente la exposición al riesgo de los operadores y trabajadores, principalmente hacia accidentes por colapso o estallido de roca, hechos que han acontecido con anterioridad tanto en la obra como en las demás unidades productivas de la división.

- **Perforación de Avance**

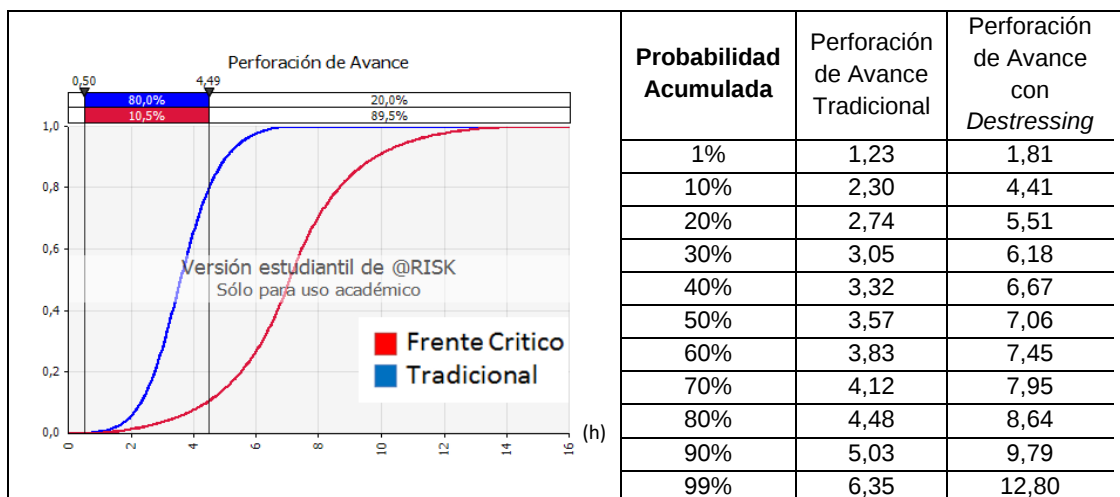


Figura 5.7: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria perforación de avance según metodología constructiva.

Al analizar las metodologías de perforación de avance en frentes críticos versus frentes en condiciones tradicionales se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 4,1 horas, en desmedro del 8% de las probabilidades obtenidas en los frentes críticos. El tiempo perdido se debe a que, en conjunto con las perforaciones de avance, se realizan también las perforaciones del preacondicionamiento del frente por *destress blasting*, método utilizado para disminuir el riesgo de estallido de roca en frentes críticos.

Al respecto del método de preacondicionamiento mencionado podemos decir que al interior de la industria no existe un acuerdo sobre de su real contribución a la disminución de sismicidad o propensión a estallidos de roca. Esto debido a que el impacto de dicho proceso solo ha sido corroborado de manera teórica. Por otro lado, según las experiencias empíricas del proyecto los resultados de mejora varían en función de la condición geomecánica de la frente y no han podido ser validadas concretamente como en el caso del preacondicionamiento por fracturamiento hidráulico. El único punto de consenso radica en la efectividad para disminuir el tiempo de estabilización de la actividad sísmica, factor preponderante en el establecimiento de los periodos de aislación, por lo que dicho periodo podría ser disminuido en sectores con buena respuesta al *destressing*. Finalmente, debemos señalar que aun cuando existen dudas respecto de su real contribución en la disminución de la sísmica, el estándar de la corporación apunta hacia maximizar los esfuerzos por disminuir el riesgo de accidentes, por lo que indistintamente de lograr mejoras del 1% o del 100% en aspectos de seguridad, dicha actividad debe realizarse.

- **Carguío y Tronadura**

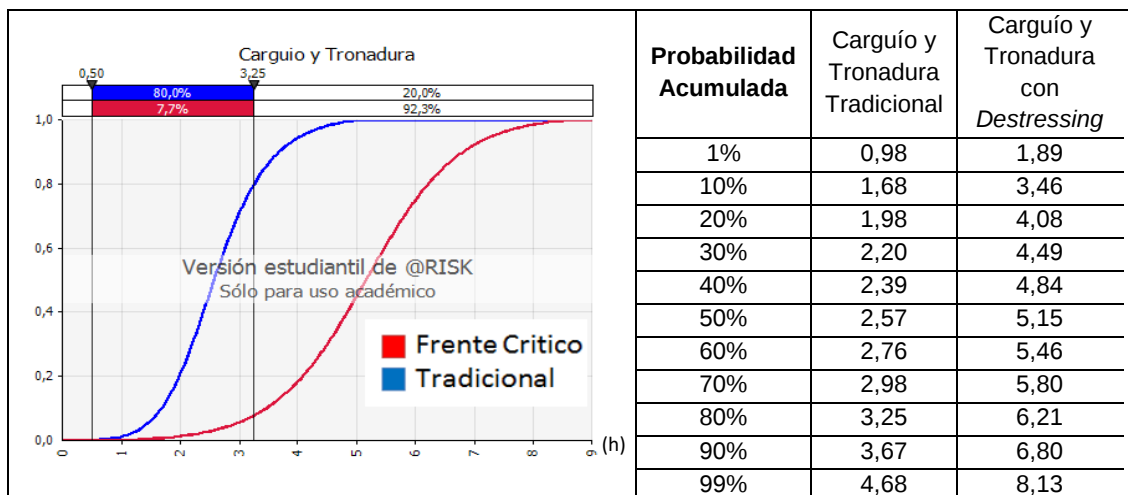


Figura 5.8: Distribución de probabilidad acumulada de operación unitaria carguío y tronadura según metodología constructiva.

Al analizar las metodologías de carguío y tronadura en frentes críticos versus frentes en condiciones tradicionales se observa que la metodología tradicional es superior productivamente hablando, ya que posee un 70% de probabilidades de realizarse en menos de 3,0 horas, en desmedro del 7% de las probabilidades obtenidas en los frentes críticos. El tiempo perdido se debe a que, en conjunto con el carguío y tronadura de los barrenos de avance, se realiza también la carga del preacondicionamiento del frente por *destress blasting*. La justificación de dicho tiempo responde al mismo análisis realizado en la operación de perforación de avance.

A modo de resumen se presenta una tabla con los tiempos de ejecución de cada actividad, esto considerando una probabilidad de cumplimiento del 70%.

Tabla 5.1: Resumen de tiempos de actividad según metodología constructiva.

Actividad	Tiempo de Actividad Según Metodología		
	Tradicional	Mecanizada	Otro
Extracción de Marina	2,8	4,3	2,6 (Telecomandada)
Acuñadura y Limpieza	1,8	4,2	-
Geología y Topografía	0,7	-	2,1 (Fotogravimetría)
Fortificación	12,8	26,7	-
Fortificación Frente	4,3	7,9	-
Perforación Avance	4,1	-	7,9 (Con <i>Destressing</i>)
Carguío y Tronadura	3,0	-	5,8 (Con <i>Destressing</i>)

De los resultados presentados con anterioridad se concluye que las metodologías utilizadas para realizar operaciones unitarias en condición de altos esfuerzos se desarrollan en prácticamente el doble del tiempo que tradicionalmente tardan. Dicho ello corresponde analizar el impacto en la construcción del Túnel Correa perteneciente al PAN-NNM.

5.1.2 Análisis de Rendimientos Túnel Correa por Ciclo Según Tipo de Fortificación

Una vez analizadas las operaciones unitarias modificadas se procedió a simular el tiempo de ciclo según tipo de fortificación, que intrínsecamente indica la condición de esfuerzos donde se localice, además de la metodología constructiva que debe utilizarse a lo largo del proceso. Los resultados gráficos son presentados a continuación.

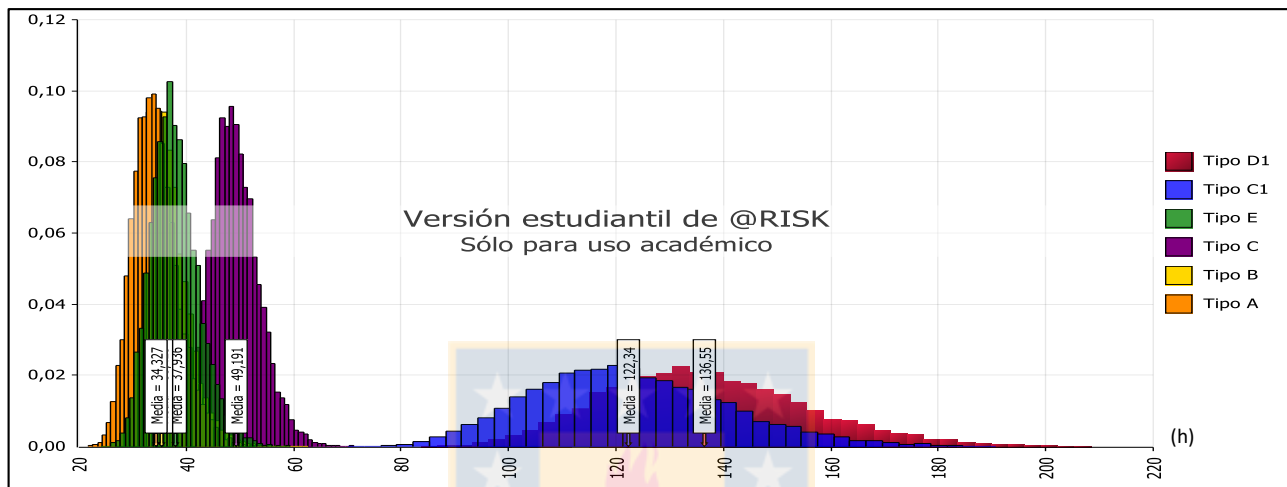


Figura 5.9: Gráficos de Distribución de probabilidad de tiempo de ciclo por tipo de fortificación.

Del gráfico anterior podemos notar que las distribuciones de los tiempos de ciclo con metodología constructiva mecanizada se encuentran muy alejadas de las distribuciones de los ciclos con metodología tradicional, arrojando una diferencia de más del doble respecto a la media. Por otro lado, podemos notar que las campanas de los ciclos C1 y D1 poseen una frecuencia acumulada menor (gráficamente se aprecia como una distribución más “achatada”) y que además poseen largas colas; esto puede traducirse como un indicador de alta desviación entre sus datos, es decir, de comportamiento altamente inestable.

En definitiva, podemos notar que los ciclos con metodología tradicional poseen un comportamiento estable y presentan rangos de tiempo máximo y mínimo acorde a lo esperado. Por otro lado, las distribuciones de los ciclos mecanizados poseen una alta variabilidad entre el máximo y el mínimo, por lo que se desprende que el tiempo de ciclo aún no ha sido estabilizado y consecuentemente existen oportunidades de mejora.

Una vez realizado aquello se procedió a obtener los rendimientos por tipo de fortificación, expresados en metros por día, esto se logró dividiendo las distribuciones anteriormente presentadas por la distribución de probabilidad del avance por ciclo respectivo.

Posterior a ello se analizaron los resultados estableciendo la probabilidad de que los valores considerados en la línea base se cumplan. Los resultados son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 5.2: Resultados de probabilidad de cumplimiento tiempos línea base según simulaciones de ciclos por tipo de fortificación ²⁰.

Tipo de Fortificación	Valor de línea base (m/día)	Probabilidad cumplimiento de línea base (%)	Valor confiable obtenido de simulación (m/día)
A	2.3	67,7%	2,3
B	1.9	87,7%	2,2
C	1.1	98,2%	2,5
E	1.3	65,8%	1,3
C1	1.0	2,9%	0,6
D1	1.0	0,6%	0,5

La tabla anterior puede leerse como “de todas las iteraciones por tipo de fortificación realizadas, en tan solo el X% de las oportunidades los rendimientos fueron menores o iguales a los señalados en la línea base”.

Por lo tanto, se puede inferir que los valores considerados en la línea base respecto a los ciclos con metodología tradicional son adecuados y en ocasiones podrían considerarse conservadores. Ahora bien, para los ciclos con metodología mecanizada dicho valor solo se cumplió como máximo un 2,9% de las iteraciones, valor que resulta preocupante si consideramos que los plazos de ejecución fueron calculados con los valores de la línea base. Las causas de la brutal diferencia entre los valores considerado en la línea base y los reales puede deberse principalmente a que -al tratarse de nuevas tecnologías- los tiempos de ciclo fueran calculados sin la información suficiente, ya que no se comprendía totalmente el funcionamiento y el desempeño real de los equipos, principalmente en lo que respecta al equipo jumbo Boltec que realiza las labores de fortificación. Puede deberse además a que los operadores de dichos nuevos equipos no se encuentran totalmente capacitados para mantener de manera óptima la performance de estos, debido principalmente al desconocimiento de su funcionamiento o simplemente debido a que no cuentan con las competencias suficientes para tan compleja operación. Otra causa de dicha diferencia puede deberse a que se consideraron menos horas de interferencia por ciclo, factor que tiene como promedio empírico 40 horas; respecto a dicho factor se puede decir que las interferencias que más impactan el proceso corresponden a las fallas mecánicas de los equipos y

²⁰ Para revisar resultados completos de simulaciones dirigirse al anexo 8.10

la pérdida de tiempo de trabajo efectivo producto de eventos sísmicos que obligan a la evacuación del frente.

Luego de la obtención y discusión de los resultados respecto a los rendimientos corresponde realizar un análisis de sensibilidad para los ciclos que no cumplen con la línea base, esto con el fin de identificar los parámetros de entrada que mayor impacto tienen en el resultado de la simulación y consecuentemente direccionar los esfuerzos que permitan obtener mejoras.

En el gráfico presentado a continuación se señalan los parámetros de entrada que tienen un impacto de más de un 10% en los resultados de la simulación.

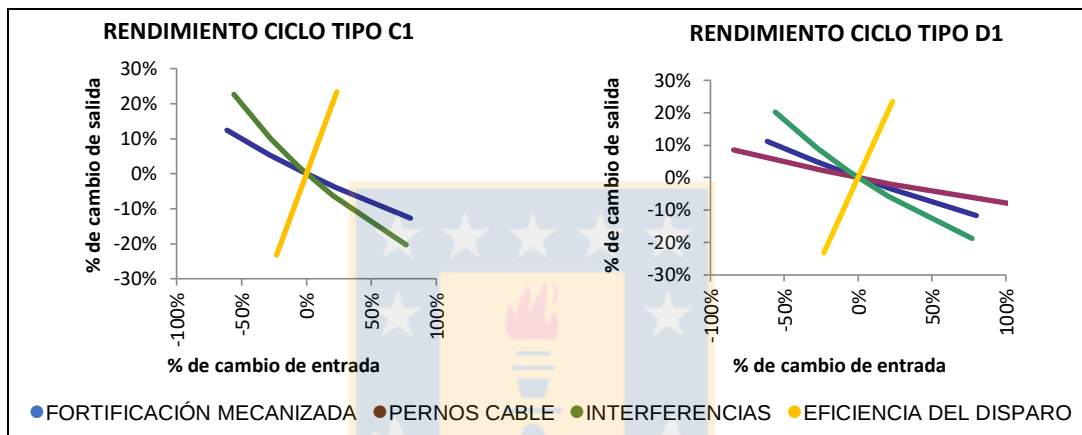


Figura 5.10: Gráficos de araña para análisis de sensibilidad de ciclos por tipo de fortificación.

Ahora bien, dicho gráfico no puede ser utilizado por si solo como un dato de confiabilidad absoluta ya que se debe considerar la factibilidad de que los parámetros presentados puedan realmente ser gestionados. Esto pues, puede darse el caso de que una operación o parámetro de entrada tenga un fuerte impacto en la salida por el solo hecho de tener una mayor ponderación por su prolongada duración, aun cuando dicho tiempo de duración sea intrínseco a la operación y resulta invariable o no gestionable mediante los recursos existentes.

Debido a lo anterior se presenta el gráfico de los parámetros de entrada que tienen una mayor contribución a la varianza del modelo, y que por lo tanto se presume pueden gestionarse para disminuir dicha variabilidad.

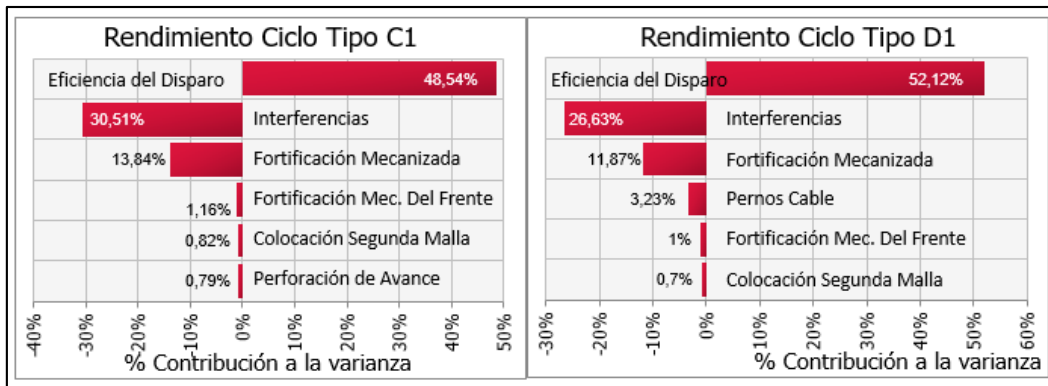


Figura 5.11: Gráficos de tornado respecto a la varianza para análisis de sensibilidad de ciclos por tipo de fortificación.

De los dos gráficos presentados se puede notar que los parámetros con mayor impacto en los resultados corresponden ser la eficiencia del disparo, el tiempo de interferencia y el tiempo de fortificación mecanizada. Por lo tanto, se presume que gestionando estos 3 parámetros de entrada se espera obtener un tiempo de ciclo promedio con menor duración y variabilidad, que podrá ser utilizado para una fase de conciliación de la proyección del proceso constructivo. Respecto a la variabilidad de estos factores debemos mencionar que se produce por un variados de motivos, entre los que destacan: la calidad de la roca y de la perforación para el caso de la eficiencia del disparo, ya que pueden darse los casos de obtener valores por sobre el 100% o bien muy por debajo de este; la actividad sísmica para el caso de las interferencias, ya que dicho valor varía fuera del alcance que tienen las gestiones operacionales; y a la sobre excavación en el caso de la fortificación, ya que esta genera problemas del tipo operacional.

Ahora bien, con el fin de apreciar de manera concreta el impacto que la gestión de dichos parámetros tiene en las probabilidades de cumplimiento respecto a la línea base, se realizó la simulación de 4 casos hipotéticos, variando cada uno de estos factores para beneficio del ciclo. Cabe destacar que para la obtención de dichos resultados solo se modificó el valor de distribución de probabilidad del parámetro de entrada en estudio, multiplicando esta por el factor correctivo correspondiente, lo que no modifica el comportamiento de la distribución, sino más bien genera un desplazamiento de sus valores en dirección hacia el origen. La siguiente tabla resume las modificaciones y los resultados obtenidos luego de realizar la simulación respectiva.

Tabla 5.3: Resumen de Simulaciones para ciclo con fortificación tipo C1 según modificaciones propuestas ²¹.

Propuestas Para Ciclos con Fortificación Tipo C1	Probabilidad cumplimiento 1 m/día para C1	Probabilidad cumplimiento 1 m/día para D1
Caso Base	2,9%	0,2%
Disminución 35% tiempos de Interferencia	8,8%	1,1%
Disminuyendo 35% tiempos de fortificación mecanizada	7,7%	0,7%
Disminuyendo 35% tiempos de interferencia y fortificación	23,1%	6,3%
Disminuyendo 35% tiempos de interferencia y fortificación; aumentando además en 10% la eficiencia del disparo	40,8%	17,7%

Como se aprecia de los resultados obtenidos, en ninguno de los casos se alcanza una probabilidad de cumplimiento aceptable por lo que se recomienda realizar las siguientes acciones:

- Estabilizar y disminuir el tiempo de Fortificación mecanizada.** Como se demostró con anterioridad, una de las operaciones con mayor contribución a la varianza de los rendimientos corresponde al proceso de fortificación mecanizada, por lo que resulta vital gestionar su grado de variabilidad, permitiendo lograr así un tiempo de ciclo conciso. Para la realización de este proceso de mejora, se propone conseguir un aumento en la performance del equipo, principalmente por medio de la optimización en la labor de los operadores. Por lo tanto, se propone realizar dicha gestión por medio de capacitaciones a los operadores con foco en mejoras productivas; en segundo lugar, se propone el establecimiento de medidas que faciliten la operación de los equipos in situ, tal como el perfeccionamiento en las terminaciones del piso minero, cajas y techo, evitando en lo posible la sobre excavación, lo que facilitara el desplazamiento e instalación del equipo y el posicionamiento de los brazos del mismo; por otro lado, no se debe descartar la entrega de bonos por metas de productividad, generando un estímulo positivo al cumplimiento de tiempos menores; y finalmente, se propone propiciar la contratación de personal con mayor experticia, hecho que resulta complejo considerando que se trata de una tecnología totalmente nueva y la disponibilidad de operadores con dichas características es prácticamente nula.

²¹ Para revisar resultado completo de simulaciones dirigirse al Anexo J

- **Disminuir el tiempo de interferencia.** Otro de los factores con mayor contribución a la varianza de los rendimientos corresponde al tiempo de interferencia, por lo que resulta relevante proponer medidas para su estabilización y disminución. Como se mencionó con anterioridad, al realizar un análisis simple por medio de Pareto, se aprecia que los tiempos de interferencias más relevante corresponden a las fallas mecánicas de los equipos, particularmente del Jumbo Boltec. De igual modo, otro factor de interferencia relevante corresponde al fenómeno de sismicidad que, al obligar a realizar la evacuación del frente, detiene el ciclo minero. Cabe destacar que como el segundo factor resulta no gestionable, se centrarán los esfuerzos en proponer gestiones que permitan disminuir los tiempos perdidos debido a falla mecánica en el equipo Jumbo Boltec. En primer lugar, se debe notar que –al igual que en la primera propuesta- se debe apuntar hacia un perfeccionamiento de la operación del equipo, esto pues, si se cuenta con un operador que comprenda a cabalidad el funcionamiento y operación del equipo, conocerá los movimientos y acciones críticas y consecuentemente tenderá a exigir menos el mecanismo, disminuyendo así las probabilidades de falla. En segundo lugar, se propone realizar actividades de mantenimiento de manera periódica, focalizadas hacia los puntos de mayor fragilidad; para lograr ello se debe contar con mecánicos altamente capacitados, de manera que comprendan el funcionamiento del equipo y logren identificar y reparar rápidamente la falla presentada. Para cumplir dicho cometido se hace necesario contar con un periodo de capacitación y adaptación hacia esta nueva tecnología.
- **Aumentar la eficiencia del disparo.** Una forma sencilla de aumentar los rendimientos corresponde a arrancar una mayor cantidad de metros lineales por cada ciclo, particularmente optimizando el proceso de perforación y tronadura. Dicha mejora puede ser lograda mediante dos acciones; en primer lugar, aumentando la eficiencia del disparo, indicador que según la data recolectada bordea el 85%, y puede ser mejorado hasta un 95% si se toman las medidas correctivas correspondientes, entre las cuales destacan el soplido de los barrenos, operación que se realiza antes de introducir el explosivo y tiene como fin expulsar los detritus que pudieran haber contaminado el interior de los barrenos; por otro lado, se debe realizar un correcto proceso de perforación en lo que respecta a posicionamiento y ángulo del barreno, esto con el fin de garantizar que los pozos cumplan con las condiciones establecidas en el diagrama de disparo. Ahora bien, una segunda alternativa corresponde a la realización de perforaciones más profundas, lo que consecuentemente permitirá avanzar una mayor cantidad de metros; sin embargo, se debe considerar que esta opción no puede ser utilizada sin antes considerar criterios geológicos

y geomecánicos, puesto la seguridad, estabilidad y terminación de la sección pueden verse mermadas.

Una vez que se logren las mejoras propuestas, alcanzando disminuciones del orden del 35% en el tiempo de fortificación mecanizada e interferencias y aumentando además en un 10% la eficiencia del disparo, se espera obtener un rendimiento confiable de 0,85 m/días para el caso de la fortificación tipo C1 y de 0,75 m/día para el caso de la fortificación tipo D1, esto según las simulaciones realizadas, que arrojan una probabilidad de cumplimiento de dichos rendimientos del orden del 68%.

Respecto a la viabilidad de alcanzar dichos valores se puede decir que es factible, ya que algunos de los últimos ciclos realizados se encuentran alrededor de estos valores, sin embargo, la complejidad radica en mantener la estabilidad a lo largo del tiempo.

5.1.3 Análisis de Construcción del Túnel Correa

Una vez realizado el estudio de los rendimientos, corresponde analizar el impacto que las nuevas metodologías han generado desde una perspectiva holística, esto mediante la simulación de la construcción del túnel correa, lo que nos permitirá apreciar si existe o no un efecto escalar o bien el impacto de las modificaciones solo responden a un efecto puntual.

Primero que todo se realizó la validación del modelo descrito en el capítulo anterior, utilizando un segmento correspondiente a 125 metros lineales, en donde la simulación arrojó una diferencia de tan solo 2 días respecto a la media y la moda lo que se traduce en un error relativo del 1%, por lo que a juicio del autor el modelo puede ser considerado válido. Respecto a este punto, resulta complejo comparar un valor determinístico versus una distribución de probabilidad, por lo que se utilizó como referente, la media y la moda de la distribución, ambas del mismo valor y que difieren en 2 días respecto al valor obtenido empíricamente. Además, considerando la frecuencia relativa de dicho valor, con un segmento de ± 5 días notamos que se abarca más del 15% de toda la distribución, lo que podría traducirse en 1.500 casos que cumplieron con el plazo real.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de construcción del túnel según los parámetros mencionados en el desarrollo. Recordemos que la motivación de dicho análisis radica en estudiar el impacto que tienen las diferentes metodologías en el plazo de ejecución.

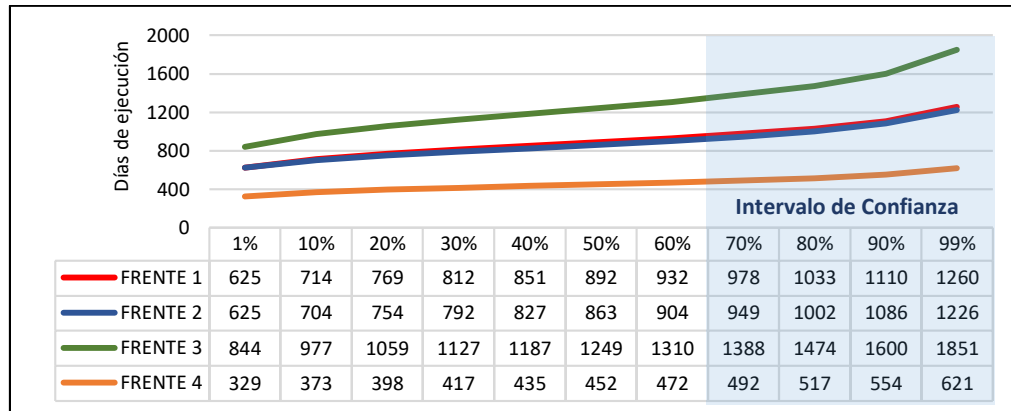


Figura 5.12: Resultado de la simulación de los días de construcción por decil de probabilidad de cumplimiento, PNNM.

Tomando como parámetro de confianza la probabilidad de cumplimiento del 70% se aprecia que las distribuciones son completamente diferentes en tiempo de ejecución, esto puede deberse básicamente a la diferencia en metros lineales que cada frente considera, por lo que, con el fin de estandarizar este factor se ha decidido calcular los rendimientos globales por frente, valores que fueron obtenidos dividiendo los metros totales contemplados en cada frente por la cantidad de días que tarda la ejecución de los mismos (tomando nuevamente como referencia el decil correspondiente al 70% de probabilidad acumulada).

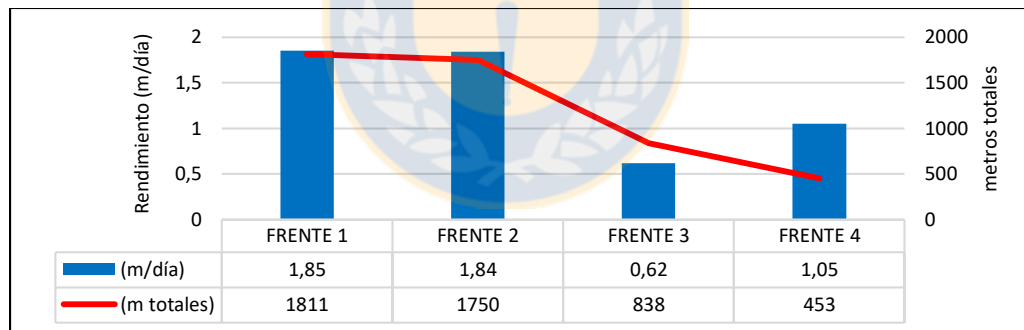


Figura 5.13: Gráficos de rendimientos globales por frente, PAN-NNM.

Una vez realizado aquello se concluye que la frente de mayor complejidad y lentitud corresponde al número 3, esto pues es la frente que tarda más días en ejecutarse y el que posee la segunda menor cantidad de metros lineales. Como se aprecia en el gráfico anterior, su rendimiento global solo alcanza los 0,62 metros por día, que significa 3 veces menos que los frentes 1 y 2. Los resultados entregados se explican debido a que los frentes 3 y 4 son los que poseen la mayor cantidad de metros lineales con fortificaciones del tipo mecanizada, por lo que se puede extrapolar que dichas secciones se encuentran emplazadas en ambientes de altos esfuerzos y deberán lidiar con las restricciones y metodologías descritas con anterioridad.

Una vez realizado aquello, y con el fin de cuantificar como impactan los resultados obtenidos con respecto a los plazos propuestos por la corporación, se procedió a comparar los valores de la simulación versus los presentados en la línea base de la constructibilidad. Los resultados se entregan en la siguiente tabla y son presentados intersectando el plazo determinístico de la línea base con la simulación antes presentada.

Tabla 5.4: Probabilidad de cumplimiento de línea base según simulación.

	FRENTE 1	FRENTE 2	FRENTE 3	FRENTE 4
Días de plazo determinístico	1020	969	870	360
Probabilidad cumplimiento	78,1%	74,3%	1,9%	5,8%

De la tabla anterior se puede notar que los resultados son dispares y preocupantes, ya que las probabilidades de cumplimiento de los frentes 1 y 2 resultan altas y por lo tanto se podría asumir que su finalización se ajustará a los plazos con un alto grado de confianza. Ahora bien, las probabilidades de cumplimiento de los frentes 3 y 4 resultan muy bajas y resulta lógico pensar que la meta propuesta no será alcanzada. Esto se debe a lo anteriormente descrito, ya que dichos frentes poseen la mayor cantidad de metros lineales con fortificación tipo C1 y D1, ciclos con 3 veces menos rendimientos que los ejecutados en circunstancias tradicionales.

Ahora bien, con el fin de apreciar las oportunidades de mejora, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad por frente. Para efectos prácticos los resultados son presentados en las figuras dispuestas a continuación ²².

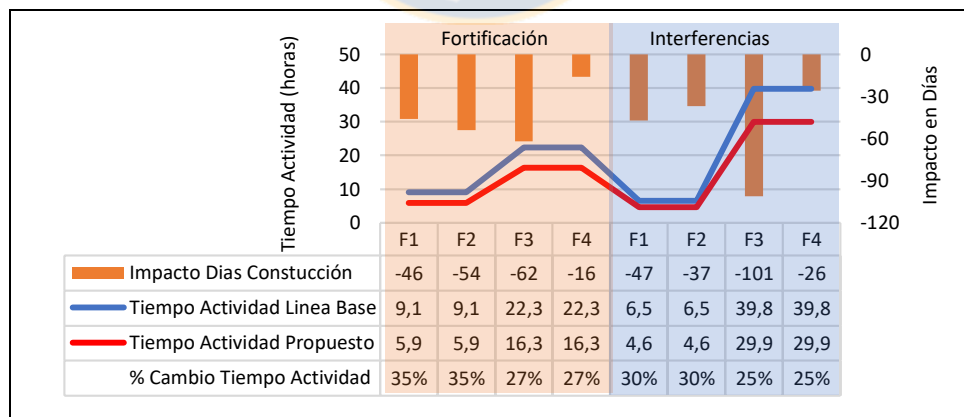


Figura 5.14 (a): Resumen de análisis de sensibilidad por frente de construcción en Túnel Correa, PAN-NNM.

²² Para revisar resultados por frente, dirigirse al Anexo K

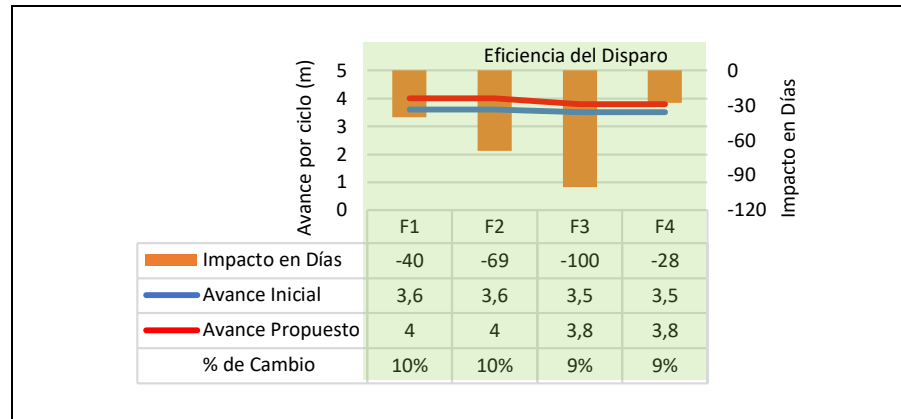


Figura 5.15 (b): Resumen de análisis de sensibilidad por frente de construcción en Túnel Correa, PAN-NNM.

El gráfico presentado resume de manera concisa el análisis de sensibilidad realizado, en donde se aprecia que los factores que más afectan la construcción del túnel corresponden a las horas de fortificación, las horas de interferencia y la eficiencia del disparo; resultados que responden a la misma lógica del análisis realizado a nivel de rendimientos, por lo que se puede concluir que el impacto de las nuevas metodologías producto de la condición de esfuerzos no solo se aprecia de manera puntual, sino que resultan una complejidad global respecto a la construcción del Túnel Correa. Por otro lado, realizando una cuantificación del impacto que tendría la gestión de los factores antes mencionados se aprecia que para el caso del frente 3 una disminución del 25% en el tiempo de interferencia y un aumento del 9% en la eficiencia del disparo puede ahorrar alrededor de 200 días de ejecución. Se aprecia, además, que la frente menos sensible corresponde al frente 4, esto se debe ya que corresponde al frente con la menor cantidad de días de construcción, por lo que una optimización de su rendimiento posee un bajo impacto en términos de días de ejecución.

Una vez realizado el estudio de frentes únicos, se considera que las oportunidades de mejora corresponden básicamente a dos: en primer lugar, una gestión óptima del ciclo minero, otorgando todas las facilidades constructivas que el mandante pudiera otorgar al contratista, esto con el fin de mejorar los rendimientos presentados en los resultados anteriormente descritos. De igual modo se propone rectificar los rendimientos por tipo de fortificación considerados en la línea base puesto se encuentran subestimados para el caso de algunos ciclos con metodología tradicional y sobrestimados para el caso de los ciclos con metodología mecanizada, lo que podría incurrir en un error de cálculo respecto a los plazos de ejecución.

5.1.4 Simulación del Nivel de Hundimiento (OIM)

Con el fin de apreciar el impacto que tiene la condición de esfuerzos respecto a la planificación y al posterior proceso productivo en el desarrollo de las obras interior mina, se procedió a realizar una simulación de la ejecución del nivel de hundimiento mediante la herramienta Deswik®. Los parámetros que sufrieron modificaciones entre simulaciones fueron presentados en el capítulo de desarrollo, de igual modo se debe mencionar que destacan entre ellos la eliminación de las restricciones de aislación sísmica pre y post tronadura, el distanciamiento entre frentes disponibles, y el de fracturamiento hidráulico descendente.

A continuación, se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos mediante la simulación.

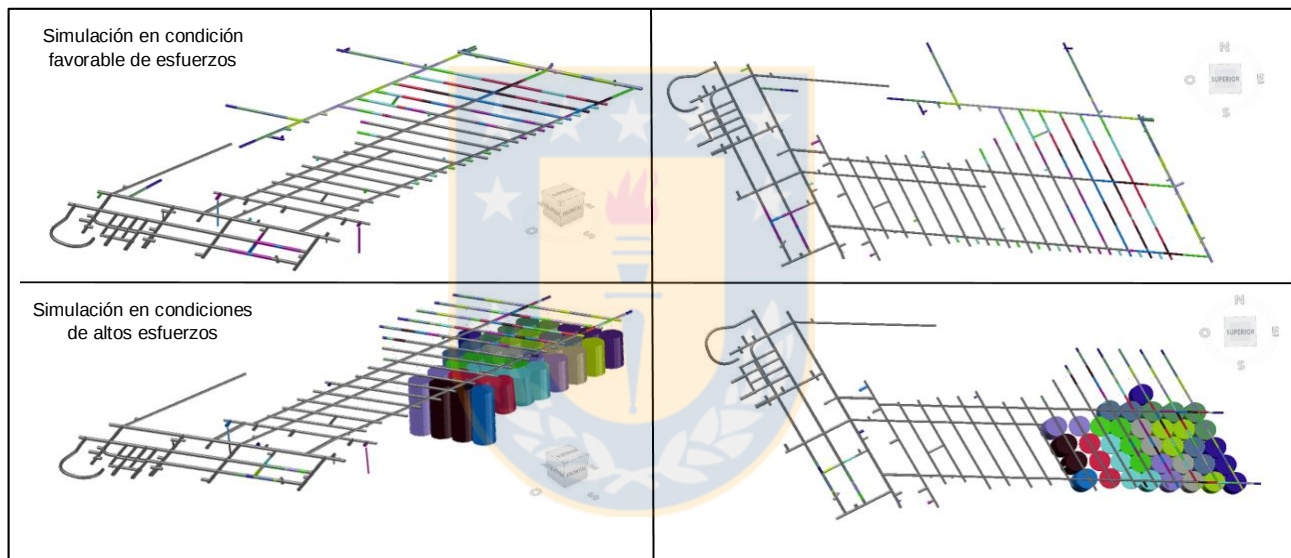


Figura 5.16: Resultado de simulación del nivel de hundimiento en PAN-NNM. Arriba 1 año de desarrollos sin condición de altos esfuerzos, abajo 1 año de desarrollos en condición de altos esfuerzos.

De la figura anterior se aprecia que el alcance de las obras en condiciones favorables se hace mucho más extenso, consiguiendo incluso desarrollar casi la totalidad de un cruzado que no se encuentra considerado en la simulación del *footprint* en condición de altos esfuerzos. Además, se aprecia claramente el alcance que posee el fracturamiento hidráulico descendente, el que consecuentemente traerá interferencias y complejidades logísticas respecto a plazos de ejecución y utilización de recursos.

A continuación, se presenta un gráfico que refleja la cantidad de metros por mes desarrollados, esto con el fin de apreciar de manera más objetiva el impacto que las condiciones del proyecto tienen en la productividad.

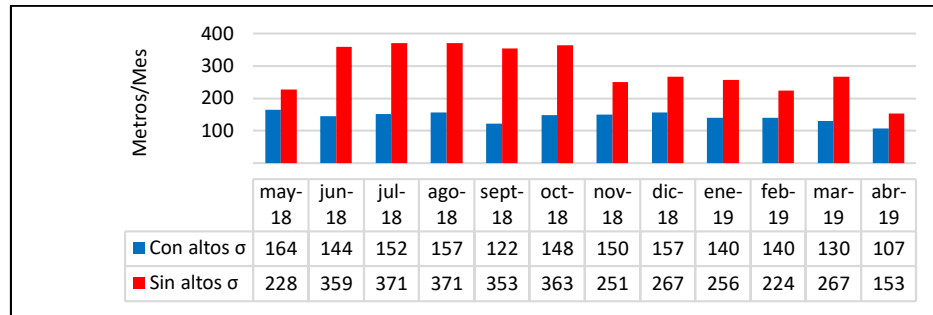


Figura 5.17: Rendimientos mensuales desarrollos nivel de hundimiento en PAN-NNM.

Del gráfico anterior podemos notar que la cantidad de metros desarrollados al mes se duplica en condiciones favorables, esto se debe principalmente a la gran cantidad de restricciones tanto de procedencia como logísticas que no permiten una máxima utilización de los recursos en condición de altos esfuerzos, afectando además la disponibilidad de frentes o sectores de desplazamiento. Cabe destacar que al hablar de restricciones se hace referencia a las restricciones geomecánicas presentadas o bien las interferencias operacionales causadas por la realización de algún otro tipo de actividad, tal como obras civiles, montajes o fracturamiento hidráulico descendente.

De igual modo, con el fin de estudiar el grado de utilización de los equipos se presenta el siguiente gráfico.

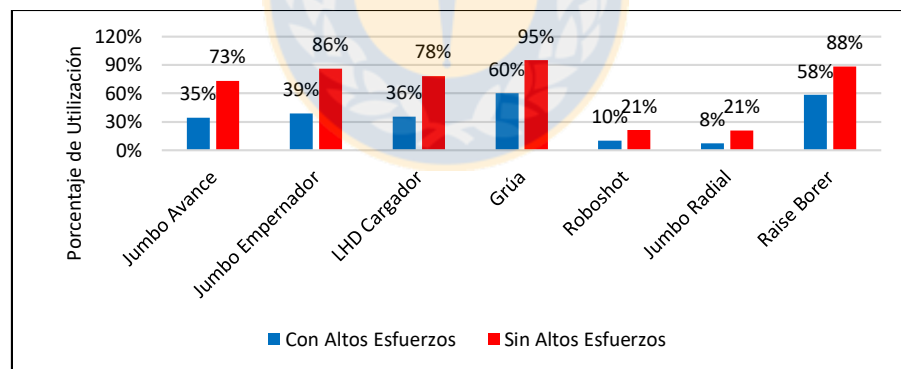


Figura 5.18: Rendimientos mensuales desarrollos nivel de hundimiento en PAN-NNM.

Del gráfico anterior se aprecia claramente como se ve impactada la utilización de los equipos en condición de altos esfuerzos, ya que estos presentan solo la mitad de utilización respecto a la simulación en condiciones favorables. Dicho resultado guarda relación con la información presentada con anterioridad, ya que es lógico pensar que, si la cantidad de metros se ve aumentada, los recursos deben consecuentemente ser mejor o bien, mayormente utilizados.

Una vez dicho ello se presume que el comportamiento presentado en los gráficos 16 y 17 se debe principalmente a dos factores, en primer lugar, se debe considerar las restricciones de

procedencia y logística operacional intrínsecas al proyecto, que por lo demás ya fueron mencionadas. En segundo lugar, se debe considerar el enfoque de planificación a largo-mediano plazo que se utiliza en el proyecto, este enfoque considera la cantidad de metros al mes que un contratista puede llegar a lograr, tomando para este valor el promedio de lo acontecido históricamente en la división. Luego de obtenido dicho valor, la planificación se “bloquea” para alcanzar dichos metros, funcionando como una especie de *target* y por lo tanto el software solo se remite a entregar la secuencia constructiva óptima.

Ahora bien, dicho enfoque es utilizado como una manera de resguardar la certidumbre del proyecto, ya que dicha cantidad de metros posee intrínsecamente todas las interferencias y contingencias que no pueden ser consideradas en una planificación desde otra perspectiva, lo que otorga una aproximación bastante realista de lo que sucederá. Por otro lado, dicho enfoque puede otorgar –en algunos casos- una planificación conservadora o bien evitar o bloquear las oportunidades de mejora.

Respecto a los factores de consumo corresponde mencionar que si bien la cantidad de metros realizados puede aumentar de diferentes maneras (mejoras operacionales, tecnológicas, de recursos, etc.) no se debe perder de vista que todas las modificaciones traerán consigo un impacto en ellos, por lo que se debe tener extremo cuidado en aseverar una cantidad de metros potencial sin antes considerar dichos factores. En particular la disponibilidad de aire, agua y electricidad se encuentra limitada por obras anteriores a los desarrollos, tales como tomas de agua, sub estaciones eléctricas e instalación de ventiladores y una modificación de estos parámetros se hace extensa en capital y tiempo en la mayoría de los casos. Por otro lado, la disponibilidad del pique limita igualmente la cantidad de metros que pudieran desarrollarse, ya que una producción por sobre dicho límite traerá problemas de acopio y eliminación de marina. Cabe destacar que para el caso de las simulaciones dichos parámetros máximos fueron considerados ²³.

Dicho esto, se aprecia que la planificación toma vital importancia en las condiciones del proyecto, por lo que se hace necesario modificar el enfoque de planificación a corto plazo con el fin maximizar la cantidad de metros, para ello se procede a identificar el equipo crítico y se construyen herramientas que permitan planificar en función de dicho cuello de botella.

²³ Para revisar el valor de los factores de consumo en condiciones idóneas vs altos esfuerzos, dirigirse al Anexo L

5.1.5 Identificación del Equipo Critico en OIM

Para la obtención del recurso considerado cuello de botella se procedió en primer lugar a realizar el cálculo del tiempo efectivo de trabajo por turno, lo que podría ser extrapolado como el tiempo máximo de utilización por turno que un equipo puede tener. Para ello se consideró el estudio de los tiempos de ciclo por turno realizados por la DICTUC, intersectando en dichos tiempos los periodos de mantenimiento preventivo o de corta duración debido a fallas superficiales, esto con el fin de establecer un margen de tiempo ajustado a la realidad. Además, se obtiene el tiempo entre fallas de gran envergadura y el consecuente tiempo perdido que tarda el restablecimiento de la operatividad del equipo. La tabla 5.5 resume los resultados obtenidos. Cabe destacar que el tiempo efectivo perdido por falla fue calculado teniendo como base las horas efectivas de trabajo por día, es decir, considerando un día de aproximadamente 12 horas, por lo que podría extrapolarse que, si dicho tiempo supera las 12 horas, el equipo se encuentra fuera de servicio por más de un día.

Tabla 5.5: Resultados de KPI de utilización de los equipos.

Equipo	Tiempo máximo de utilización (h/día)	Tiempo medio entre fallas (días)	Tiempo efectivo perdido por falla (h)	Tiempo perdido por falla (días/mes)
Cargador Frontal	11,7	7,0	46,8	4,0
Scoop	11,5	10,4	39,4	3,4
Acuñador	11,4	10,9	42,5	3,7
Jumbo de Avance	11,1	10,2	44,4	4,0
Jumbo de Fortificación	11,3	11,4	25,9	2,3
Roboshot	11,5	8,3	28,2	2,4

De la tabla anterior se aprecia que el tiempo máximo promedio de actividad es bastante similar para todos los equipos ya que los valores bordean indistintamente las 12 horas por día. Respecto al tiempo medio entre fallas podemos notar que existen dos equipos que fallan con mayor frecuencia respecto a los demás, correspondientes al cargador frontal y al *roboshot* ya que fallan cada 7 días aproximadamente. Finalmente, apreciando el tiempo desperdiciado producto de las fallas, podemos notar que los equipos críticos respecto a este indicador resultan ser el cargador frontal y el jumbo de avance. Ahora bien, aunque estos indicadores resultan relevantes – a juicio del autor- se deben considerar dos factores adicionales a la hora de definir el equipo critico al interior del proyecto, estos consisten primeramente en la cantidad de equipos de la misma gama disponibles en el proyecto, y en segundo lugar al grado de facilidad que tiene dicha gama de ser sustituida por otro equipo, o bien de ser intercambiada en el mercado, factor que depende de su disponibilidad local y el grado de facilidad de compra venta de la misma. A modo de ejemplo, si

bien el cargador frontal resulta crítico, debemos considerar que existe un gran número de ellos al interior de la mina, y que además puede ser sustituido por el *scoop/LHD* por lo que no corresponde considerar a dicho equipo como el cuello de botella del proceso.

Una vez analizados dichos KPI se presentan los resultados de los tiempos de ciclo por equipo, considerando tiempos medios de desplazamiento, posicionamiento, instalación, actividad, desinstalación, y retiro entre otros; esto con el fin de cuantificar cuantos ciclos por día son capaces de realizar dichos recursos. Cabe destacar que el ciclo de los equipos considera una eficiencia del operador del 85%.

Tabla 5.6: Tiempo de ciclo por equipo ²⁴.

Equipo	Tiempo (horas)
Cargador Frontal	4,25
<i>Scoop</i>	4,25
Acuñador	0,95
Jumbo de Avance	3,72
Jumbo de Fortificación	3,62
<i>Roboshot</i>	1,25

De los resultados presentados se aprecia que los equipos que poseen el mayor tiempo de ciclo corresponden al *scoop* y al cargador frontal, ambos con 4 horas y media aproximadamente, consecutivo a ellos se encuentran los Jumbos con casi 4 horas de ciclo, y finalmente el acuñador y el *roboshot*.

Luego de obtenidos estos parámetros corresponde presentar los resultados globales del sub estudio de equipos críticos, en donde se señalan la cantidad de ciclos máximos por día que cada recurso puede realizar y la cantidad de metros mes que ello implicaría si consideramos que cada ciclo minero posee un avance de 3,5 metros. Cabe destacar que dichos indicadores son calculados de dos maneras, primero considerando los tiempos de utilización máximos por turno, y luego restándole a dicho tiempo los tiempos de falla de manera mensual, análisis que podría ser considerado como el caso más realista.

²⁴ Para revisar desglose por nivel, dirigirse al Anexo M

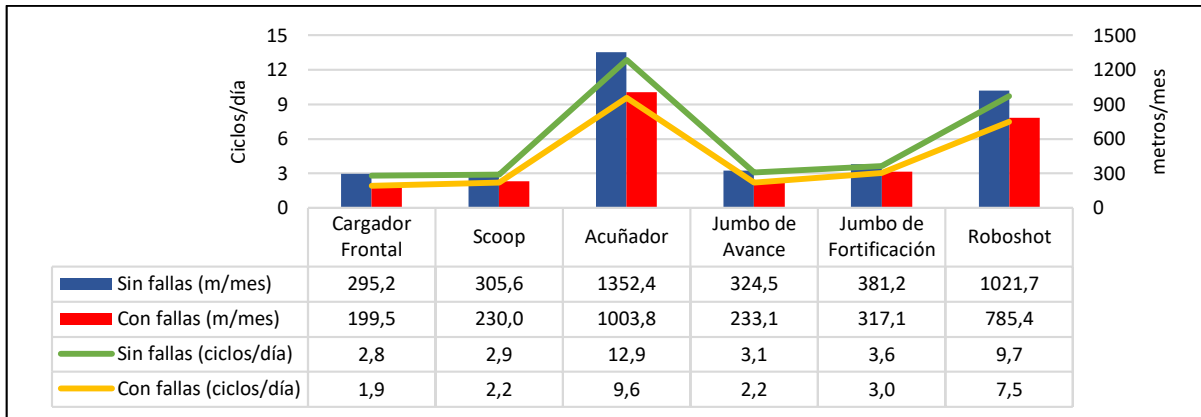


Figura 5.19: Cantidad de ciclos al día por equipo en PAN-NNM.

Del gráfico anterior se infiere que los equipos críticos corresponden a los cargadores frontales y los *scoop*, seguidos de cerca por el jumbo de avance. No obstante, se debe considerar que la criticidad global dependerá también de los aspectos anteriormente señalados, referentes a la cantidad de recursos existentes y la facilidad de adquisición de los mismos. Según ello se infiere que el equipo crítico corresponde al jumbo de avance, puesto su alto costo y limitada disponibilidad en el mercado solo permiten tener una cantidad restringida de equipos al interior de la mina (4 para el caso de este contrato), a diferencia de los *scoop* y cargadores frontales (que bordean los 10) por lo que se asume que su disponibilidad global se ve aumentada.

Además, considerando que los equipos jumbo tendrán el mismo comportamiento apreciado durante el año 2016, y considerado las 4 unidades presentes hoy al interior del proyecto se extrapola que el número máximo de metros que pueden lograrse asciende a poco más de 920, cifra muy lejana a los 500 metros mes que hoy en día se realizan.

Una vez dicho ello podemos apreciar la oportunidad de mejora, la cual corresponde al cambio de enfoque de planificación a corto plazo, que a juicio del autor debe ser modificado desde la perspectiva actual de metros o disparos por día -que recordemos utiliza como objetivo la data histórica- hacia el enfoque de planificación por equipo crítico, maximizando la utilización de este, permitiendo ejecutar el ciclo de manera tal que dicho equipo se mantenga siempre en actividad.

Para ello se propone la creación de una planilla que permita realizar la planificación diaria en función de los equipos críticos, que en este caso corresponde al jumbo de avance.

5.1.6 Herramienta de Planificación Diaria en Función de los Equipos Críticos

A continuación, se señalan de manera sucinta los pasos que permitieron la realización de la planilla de planificación diaria. Para la consecución de una interfaz amigable y de fácil acceso se utilizó la herramienta Macros de Excel, perteneciente a la gama Microsoft Office®.

La herramienta de planificación se creó con el objetivo de planificar de manera sencilla las actividades del día, por lo que la interfaz resulta vital en dicho proceso. Para la consecución de este objetivo se creó en primer lugar un formulario que permita ingresar los parámetros de entrada para la posterior planificación, en dicho formulario se ingresa la condición del equipo (operativo o fuera de servicio), el estatus de este al comienzo del turno, es decir, si la operación de perforación ha finalizado o debe continuar aún, en donde se puede elegir entre 25, 50 y 75%; finalmente se ingresan las frentes que se desean perforar durante el día considerando el orden prioritario de cada una de ellas. Cabe destacar que el estatus de los equipos para el próximo día es entregado por la misma Macros al momento de generar la planificación. Una vez realizado aquello el programa busca el tiempo asociado a la sección de la postura y el tiempo de desplazamiento hacia esta, generando las actividades del equipo a lo largo del día, el cual solo se ve interrumpido por las interferencias administrativas, entre las que destacan charlas, colaciones y cambios de turno entre otras. Finalmente y tomando como parámetro de entrada el ciclo del equipo, se genera la programación diaria por frente, guardando de igual modo el estatus en que quedará la frente para el próximo día ²⁵.

²⁵ Para revisar diagramas de flujo e interfaz de la herramienta, por favor dirigirse a Anexo N

5.2 PERSPECTIVA DE LOS COSTOS

5.2.1 Benchmarking de Costos por Tipo de Fortificación para Túneles

Como se mencionó con anterioridad, se procede a realizar un *benchmarking* entre los tipos de fortificación, esto con el fin de identificar el impacto que la condición de esfuerzos posee respecto a los factores económicos. Los resultados para el caso de frentes único se presentan a continuación. Cabe recordar que las fortificaciones tipo C1 y D1 se asocian a los ambientes más desfavorables, puesto es en los sectores con condiciones geomecánicas complejas donde se utilizarán dichas fortificaciones.

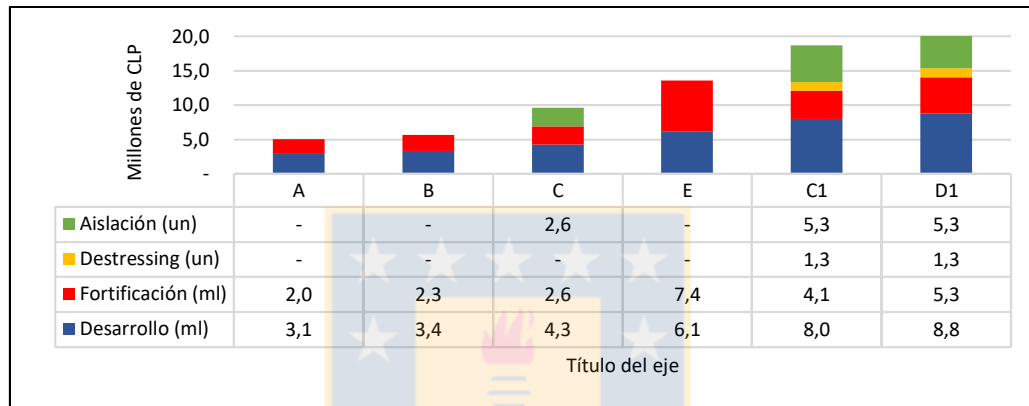


Figura 5.20: Desglose de los costos unitarios por metro línea del Túnel Correa según tipo de fortificación PNNM.

Del gráfico presentado se aprecia claramente que el costo de realizar los desarrollos de manera mecanizada supera ampliamente el costo de la metodología tradicional, llegando a ser hasta 4 veces mayor. Esto se explica básicamente debido a que en dichos ciclos se considera la realización de *destressing* y aislación, actividades que en su conjunto encarecen el metro lineal en más de 6,5 millones de pesos, representando sin ir más lejos entre un 25 y 30% del costo total por metro. Se extrapola además que, aunque el contratista no utilice ningún recurso en el ítem de aislación, este parámetro posee un costo muy elevando, esto se debe a que durante dicho periodo el contratista no puede realizar ninguna labor, resignando de esta manera la utilización de los equipos a un estatus nulo, recursos que –se utilicen o no- poseen un costo de posesión (se debe considerar análogamente como un arriendo).

Ahora bien, si solo se consideran los costos de desarrollo y fortificación se aprecia aún una gran diferencia, esta se explica básicamente debido a que la fortificación de los ciclos mecanizados es más robusta (contempla una mayor cantidad de elementos), por lo que considera mayores recursos e insumos para su instalación; debemos considerar además que –debido a los tiempos de duración de las operaciones unitarias- el nivel de utilización de los equipos es mayor, costo que se refleja en el costo del contrato.

Respecto a la fortificación tipo E se aprecia que los costos de desarrollo y fortificación son mayores en relación a las fortificaciones tradicionales, esto se explica debido a 3 factores; en primer lugar, debido a la utilización de marcos reticulados, elemento de fortificación que posee un elevado costo; en segundo lugar, el costo por aplicación de shotcrete sobre los marcos, debido a que para este caso el grosor de la capa de shotcrete bordea los 30cm, en desmedro de los 2 a 5 cm utilizados tradicionalmente para cubrir la malla, encareciendo lógicamente el ítem de fortificación. Finalmente, se considera además que el ciclo de dicho tipo de fortificación posee mayor duración y un avance por disparo menor que los demás ciclos, puesto dicho ciclo es planificado con disparo corto debido a la inestabilidad de la sección a desarrollar; todos estos ítems son cargados al costo del contrato.

Por lo tanto, se concluye que el impacto en costo que posee la condición de esfuerzos en los túneles principales consiste en considerar 3,7 veces más capital respecto al metro lineal en condiciones normales.

5.2.2 Benchmarking con Minas Esmeralda y Reservas Norte para OIM

Para analizar el impacto en costos que tiene la condición de altos esfuerzos al interior de la mina se realiza un benchmarking de los contratos según nivel con las minas Esmeralda y Reservas Norte.

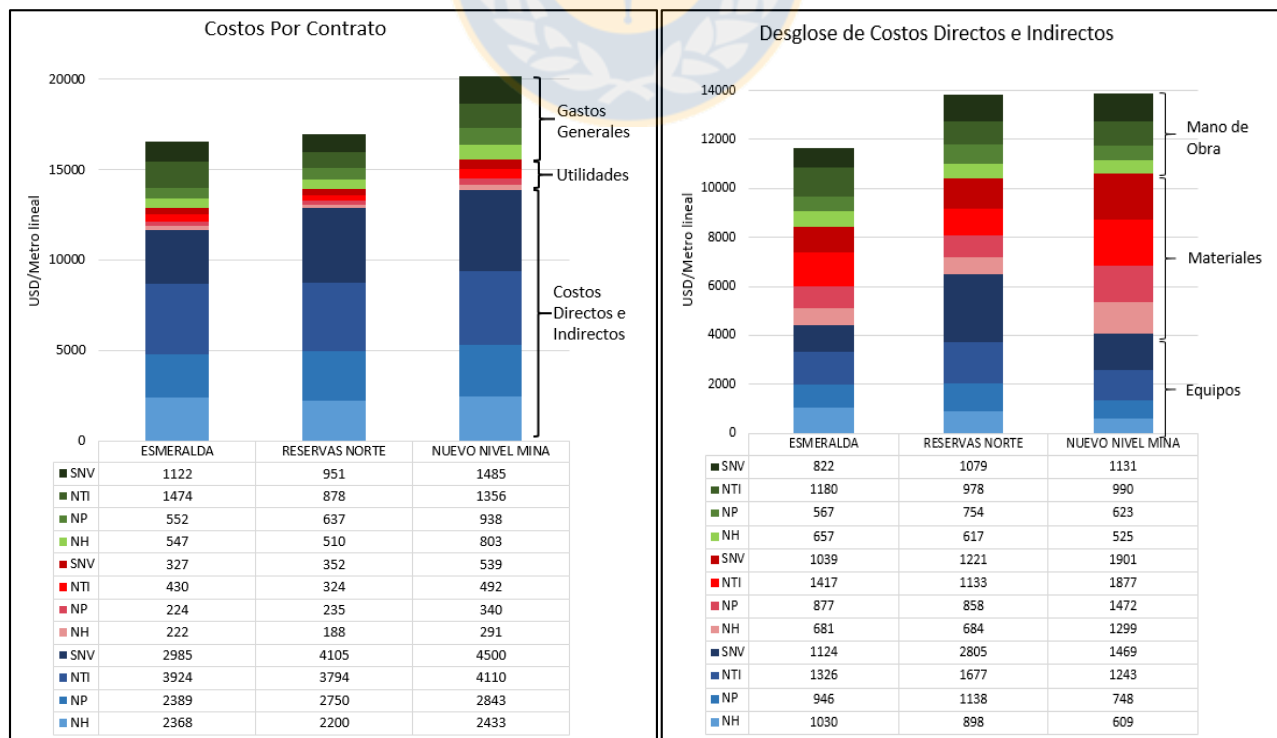


Figura 5.21: Benchmarking de costos por nivel minas Esmeralda, Reservas Norte y NNM.

De la figura izquierda se aprecia que, si bien existen diferencias entre los 3 tópicos presentados, resulta relevante desglosar solo el ítem de costos, puesto las utilidades y los gastos generales responden básicamente a dicho factor y particularmente, al alcance que posea el contrato. Una vez desglosados los costos -correspondiente a la figura de la derecha- se aprecia que la diferencia más importante corresponde a los costos por material, seguido de los equipos y mano de obra; diferencia que se aprecia especialmente en los niveles de transporte y sub nivel de ventilación, por lo que resulta relevante analizar en mayor medida dichos factores. Para ello se presentan los gráficos a continuación, que desglosan el costo de material y el grado de utilización de camiones de bajo perfil, puesto la utilización de los demás equipos responde a parámetros similares en todas minas.

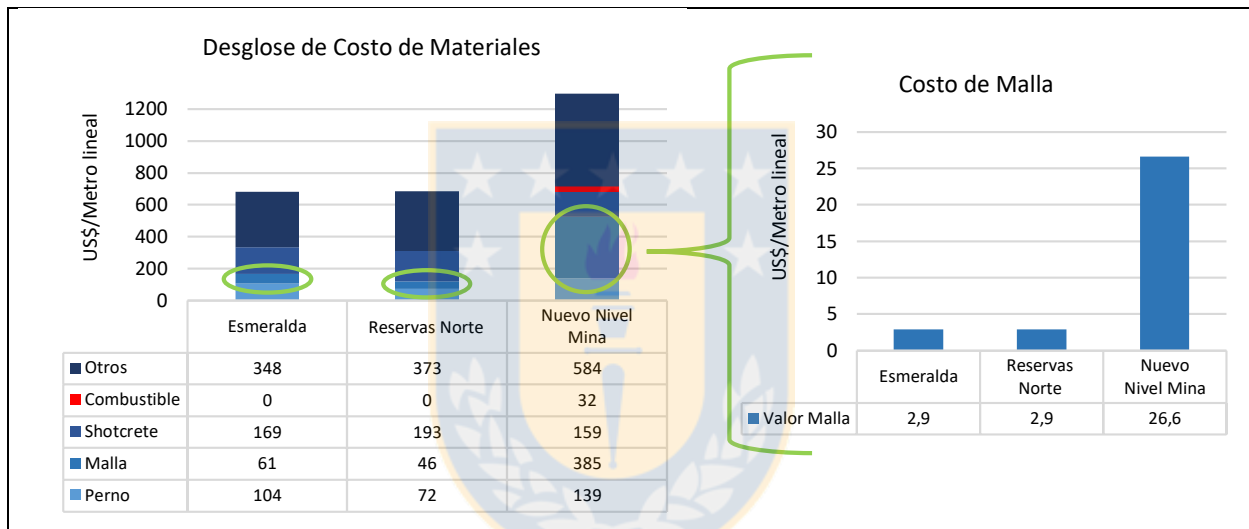


Figura 5.22: Desglose del costo de material minas Esmeralda, Reservas Norte y NNM.

De la figura presentada se aprecia claramente que el encarecimiento en el ítem de costo de materiales corresponde al costo de malla G-65, la cual posee un costo casi 10 veces superior a la malla tipo 10006 utilizada por la División El Teniente. Dicho costo se debe a las características de resistencia y capacidad de disipación de la energía que posee la malla, condición clave para formar parte de la fortificación en zonas propensas a sismicidad. Una vez dicho ello se debe notar que esta variable no es gestionable, por lo que no formará parte de las oportunidades de mejora.

Luego de ello, se analizó la variable que más diferencia presentaba en el costo por mano de obra y equipos al interior de la mina, el cual corresponde a las horas de utilización de camión por metro lineal de túnel construido. Los resultados se muestran a continuación.

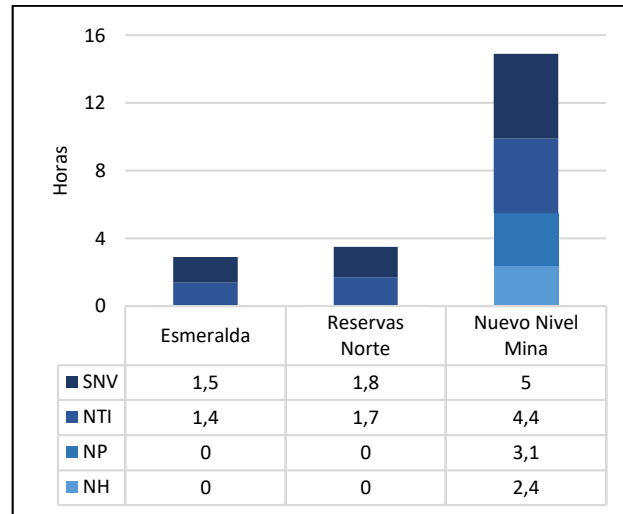


Figura 5.23: Desglose de horas de utilización de camión por metro lineal de túnel en minas Esmeralda, Reservas Norte y NNM.

Del gráfico anterior se aprecia que las horas de utilización de dicho recurso son considerablemente más altas, esto se debe principalmente a la existencia de un solo punto de vaciado al interior de la mina, el cual además se encuentra alejado tanto en distancia como en cota de los niveles en construcción, ya que para acceder a la ubicación de dicho punto se debe subir la rampa salida de emergencia. Por otro lado, las minas Esmeralda y Reservas Norte, poseen un sistema de traspaso de material ya establecido, lo que permite la utilización del mismo inmediatamente una vez construido los piques de traspaso entre niveles, ahorrando tiempo y costo en cuanto a recursos y mano de obra.

Por lo tanto, podemos concluir que el impacto de la condición de altos esfuerzos se debe principalmente al robustecimiento de la fortificación, aumentando su costo debido a la necesidad que dicho factor tiene al interior del proyecto respecto a la disipación y/o absorción de la energía. Por otro lado, aunque dicho factor no guarde relación con la condición de esfuerzos, se debe notar que la característica intrínseca del punto de vaciado único genera una diferencia igual de importante en los costos del contrato. Finalmente, se puede decir que el nivel de competitividad del proyecto respecto a costos se ve subyugado principalmente por estas dos características, por lo que una vez concluido el sistema de manejo de material, y obtenido una disminución en el costo de la malla se espera que el costo se equilibre. Cabe destacar que el costo de la malla se debe tanto al material utilizado como a la existencia de un solo oferente de esta, por lo que se espera que en los próximos años exista mayor oferta de dicho producto, situación que propicie una disminución de costos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La profundización progresiva de las labores subterráneas ha traído consigo complejos desafíos de ingeniería, poniendo a prueba la experticia y calidad de los profesionales, ya que se debe otorgar solución a dichas complejidades resguardando los márgenes de tiempo y dinero que garanticen la rentabilidad del proyecto. A lo largo del estudio se han presentado los impactos que la condición desfavorable de altos esfuerzos ha provocado en los distintos indicadores claves, demostrando que pese a las adversidades la minería a gran profundidad es posible y más aún, existe una amplia gama de oportunidades de mejora; aseveración que se ajusta al cumplimiento de los objetivos presentado al inicio del estudio.

6.1 PLANIFICACIÓN Y PRODUCTIVIDAD TÚNELES

Primero que todo corresponde hacer mención del impacto que las nuevas metodologías de construcción (utilizadas producto de la condición de esfuerzos) han tenido en las operaciones unitarias, particularmente en el ciclo minero. Como se demostró extensamente, las nuevas metodologías, sumadas a los nuevos estándares de fortificación y medidas de mitigación del riesgo sísmico han traído consigo un aumento sustancial del tiempo de ciclo, llegando a ser incluso 4 veces mayor al tiempo considerado en un ciclo tradicional. Ahora bien, se debe considerar que dicha merma productiva se hace necesaria puesto las actividades consideradas en estos ciclos validan la construcción del proyecto bajo los estándares de seguridad planteados tanto por la corporación como por la normativa legal vigente, por lo que se concluye que, si dicho ciclo no se realizara de esta manera, el riesgo de accidentes por complejidades sísmicas sería inminente, aumentando consigo el riesgo de fracaso del proyecto, situación inadmisible dado el grado de relevancia que el mismo posee.

Respecto al procedimiento de simulación de rendimientos mediante la herramienta de Montecarlo se concluye que para el caso de la constructibilidad puede ser utilizada para realizar fases de conciliación de los rendimientos y consecuentes plazos de ejecución, disminuyendo el riesgo a la hora de considerar las fechas de cumplimiento de hitos o entrega. Por lo tanto, el autor recomienda la integración de dicha herramienta al proceso de constructibilidad.

Ahora bien, enfocando la discusión en los resultados obtenidos mediante el software @Risk® se recomienda realizar una etapa de conciliación de los rendimientos, particularmente los utilizados para proyectar el plazo de ejecución del túnel correa ya que se comprobó la imposibilidad de cumplir los valores presupuestados en la línea base. Bajo esta perspectiva se propone mantener los valores para los ciclos con fortificación tipo A y E, los que actualmente consideran 2,3 y 1,3 metros por día respectivamente; de igual modo se propone aumentar los rendimientos para los ciclos con fortificación tipo B y C, pasando de 1,9 a 2,2 metros por día para el primer caso y de 1,1 a 1,6 metros por día para el segundo; finalmente, se propone disminuir los rendimientos considerados para los ciclos con fortificación tipo C1 y D1, pasando de 1,0 a 0,85 y 0,75 metros por día consecuentemente. Esta medida se propone considerando el rendimiento alcanzado en el 70% de las iteraciones realizadas, las que en su totalidad contabilizan 10.000.

Los resultados presentados con anterioridad para los ciclos con metodología mecanizada - correspondientes a los ciclos fortificación tipo C1 y D1- solo pueden ser logrados con un nivel de confianza aceptable (70%) si se toman medidas operacionales que permitan disminuir o estabilizar los factores mencionados a continuación. En primer lugar, se debe disminuir en un 35% el tiempo de interferencia, factor que tiene como media 40 horas por ciclo. Dicha disminución se logra - según los análisis realizados- mediante la disminución de las interferencias producto de fallas mecánicas, particularmente en lo que respecta al Jumbo Boltec (de fortificación); esta situación puede ser lograda capacitando y otorgando herramientas de mejora tanto a operadores como mecánicos, o bien contemplar un equipo *stand-by* al interior de los túneles, esto con el fin de realizar una rápida sustitución cuando el jumbo que se encontraba operando, falle. En segundo lugar, se debe disminuir en un 40% el tiempo de fortificación, actividad que bordea las 23 horas de media; y de igual modo que en el caso anterior, se estabiliza otorgando capacitaciones y herramientas de mejora al operador; y considerando además la generación de facilidades constructivas que promuevan una rápida instalación y posicionamiento del equipo en la sección a fortificar. Finalmente se debe mejorar la eficiencia del disparo, aumentando esta en alrededor de un 10%, ya que hoy alcanza un valor de entre un 80% a 85%; dicho factor puede ser mejorado mediante gestiones operacionales, tales como el soplido de los barrenos previo a la carga, y el aseguramiento de un correcto proceso de perforación, tanto en posición como en ángulo, teniendo como base el diagrama del disparo planificado. Todos estos factores fueron analizados extensamente el capítulo de resultados.

Por otro lado, los rendimientos pueden ser mejorados de igual manera si se logra aumentar el tiempo efectivo de trabajo, lo que puede ser logrado con una planificación precisa de las

interferencias administrativas, correspondientes a charlas de seguridad, periodos de colación y transporte barrio cívico – frente.

De igual modo que en el caso de los rendimientos, se propone que los plazos de ejecución del Túnel Correa sean rectificadas para las frentes que poseen una alta cantidad de metros lineales con fortificación mecanizada, correspondientes a los frentes 3 y 4. Además de ello, se concluye que logrando las mejoras operacionales señaladas con anterioridad los plazos de ejecución podrían disminuir hasta 200 días.

Finalmente, respecto a lo que concierne a túneles y metodologías constructivas, se puede concluir que a medida que se realicen las gestiones correspondientes, los tiempos de ciclo y posteriores rendimientos para metodologías mecanizadas comenzarán a ser competitivos respecto a la metodología tradicional, pero difícilmente lograrán valores similares. Se debe considerar además que dentro de las gestiones con mayor impacto se encuentra el telecomando de las operaciones unitarias, lo que permite utilizar el tiempo de aislación como periodo productivo, evitando totalmente la exposición al riesgo de los operadores. Cabe destacar que en este contexto el Proyecto Nuevo Nivel Mina ha dado un gran paso, ya que el proceso de extracción de marina se realiza casi en su totalidad mediante telecomando. No obstante, se puede aseverar que se trata solo del comienzo puesto se trabaja en el telecomando de la Fotogravimetría ADAM (conocido como geología y topografía) y de la actividad de acuñadura, lo que permitirá disminuir fuertemente los tiempos de ciclo que consideren aislación post-tronadura mayor a las 12 horas.

6.2 PLANIFICACIÓN Y PRODUCTIVIDAD OBRAS INTERIOR MINA

Ahora bien, enfocando la discusión hacia los resultados obtenidos, se aprecia que la simulación en condiciones favorables arroja el doble de metros mensualmente ejecutados respecto de la simulación en condición de altos esfuerzos, lo que consecuentemente resulta en una mayor utilización de los equipos. Este resultado se explica principalmente por dos factores, en primer lugar, debemos considerar las restricciones de procedencia y de logística operacional intrínsecas al proyecto, como los halos de aislación, las interferencias por sísmica y las medidas de control y mitigación del riesgo de estallidos de roca lo que limita la cantidad de frentes y tiempos disponibles; y en segundo lugar, debemos considerar el enfoque de planificación que se utiliza en el proyecto, el cual consiste en obtener la cantidad de metros al mes que un contratista puede llegar a lograr, tomando para este valor el promedio de lo acontecido históricamente en la división, luego de obtenido dicho valor, la planificación se “bloquea” para alcanzar dichos metros, funcionando como una especie de *Target*, otorgando rigidez a la cantidad de metros por mes. Ahora bien, dicho enfoque es utilizado como una manera de resguardar la certidumbre del

proyecto, ya que dicha cantidad de metros posee intrínsecamente todas las interferencias y contingencias que no pueden ser consideradas en una planificación desde otra perspectiva, lo que otorga una aproximación bastante realista de lo que sucederá a largo plazo. Por otro lado, dicho enfoque puede otorgar –en algunos casos- una planificación conservadora o bien impedir las oportunidades de mejora respecto al corto plazo. Dicho esto, se propone realizar la planificación diaria en función del equipo crítico, el cual funciona como el cuello de botella del proceso.

Teniendo en consideración lo anterior y según los cálculos realizados, se obtiene que el equipo crítico al interior de la mina, correspondiente al Jumbo de Avance, equipo que solo logra 3,1 ciclos por día o bien 2,1 ciclos por día si consideramos el comportamiento de fallas estudiado a lo largo de 1 año. Por lo que asumiendo que el comportamiento de los ciclos se comportará de manera similar a lo ya estudiado, la cantidad máxima de metros al mes a desarrollar corresponde a poco más de 920, en desmedro de los 500 que se realizan hoy en día, por lo que es lógico considerar que existe un potencial no alcanzado. Según lo expuesto, dicho equipo será el parámetro de entrada principal para la creación y consecución de la planilla de planificación diaria presentada en los anexos, y construida con el fin de optimizar la cantidad de ciclos que se realizan en las obras interior mina. En definitiva, se recomienda la utilización de dicha planilla puesto optimiza el proceso de distribución de recursos, maximizando los indicadores de productividad y utilización de los equipos.

6.3 COSTOS

Respecto al análisis de costos, se aprecia que los principales ítems que encarecen el desarrollo de las obras de frentes únicos ejecutados en condiciones de altos esfuerzos corresponden al periodo de aislación, el preacondicionamiento por *destress blasting* y el robustecimiento de la fortificación, llegando a generar un costo casi 4 veces mayor por metro lineal respecto a los frentes que no consideran dichos factores; de igual modo, para las obras interior mina notamos que el ítem de mayor impacto corresponde al costo de la malla, la cual posee un valor casi 9 veces mayor en el proyecto debido a su capacidad de disipación y absorción de la energía. Además, aun cuando este factor no responde a la condición de esfuerzos, se aprecia que el costo por utilización de camión de bajo perfil por metro lineal de galería arrancada en el proyecto es prácticamente 3 veces mayor al valor tradicional, encareciendo el costo del contrato. Cabe destacar que como estos factores no resultan gestionables no se hondará en la búsqueda de oportunidades de mejora. Por otro lado, la única gestión que pudiera realizarse en términos económicos es de carácter productiva, puesto al finalizar de manera anticipada un contrato podría lograrse un ahorro de los gastos generales considerados de manera mensual, pero no así de los

costos, ya que estos son calculados por metro lineal construido, ítem que solo varía si el alcance del contrato es modificado por el mandante.

Como reflexión final podemos decir que, si bien la condición de esfuerzos corresponde a una complejidad difícil de solventar tanto económica como respecto a plazos de ejecución debemos recordar que las medidas aplicadas validan la ejecución del proyecto, disminuyendo el riesgo del mismo. Por lo tanto, independiente de los costos que dichas medidas conlleven, se prioriza resguardar la promesa de valor, asegurando la continuidad del proyecto.



7 REFERENCIAS

- [1] VARGAS VIERLING, EMILIO ANDRÉ (2014). Cálculo de envolvente económica para minas de *caving* bajo incertidumbre geológica. Tesis de Magister en Minería. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [2] CODELCO (2018). Información extraída desde el URL <https://www.codelco.cl>
- [3] CONTRERAS CONTRERAS, JORGE (2018). Curso de geomecánica aplicada en el Proyecto Nuevo Nivel Mina. Rancagua, Chile: Presentación Interna.
- [4] DIVISIÓN EL TENIENTE CODELCO (2017). Presentación General División el Teniente. Rancagua, Chile: Presentación Interna.
- [5] GÓMEZ PUIGPINOS, RENÉ (2015). Curso Métodos de Explotación. Universidad de Concepción, Concepción, Chile: Presentación Interna.
- [6] GUTIERREZ, LEOPOLDO (2015). Curso Metalurgia Extractiva. Universidad de Concepción, Concepción, Chile: Presentación Interna.
- [7] VICEPRESIDENCIA PROYECTOS CODELCO (2018). Programa de Inducción Proyecto Nuevo Nivel Mina. Rancagua, Chile: Presentación Interna.
- [8] RIO TINTO (2015). Fact Sheet Exploration. London, England.
- [9] E. CANER ORHAN Y OZAN OZTUK (1996). Dictionary of mining, mineral, and related terms. Hacettepe University, Department of Mining Engineering, Ankara, Turkey.
- [10] VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS CODELCO (2016). Validación de la Constructibilidad del Proyecto Nuevo Nivel Mina. Rancagua, Chile: Documento Interno.
- [11] VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS CODELCO (2016). Informe Técnico Hito 0 Proyecto Andes Norte-Nuevo Nivel Mina. Rancagua, Chile: Documento Interno.
- [12] LAUBSCHER, D. H. (2000). A practical manual on block caving, International Caving Study.
- [13] CAMPBELL BRAÑES, ALEXANDER NICHOLAS (2013). Modelos de gestión del riesgo asociado a la incertidumbre en las variables intrínsecas del proceso de construcción de una mina subterránea. Tesis de Msc. Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.
- [14] EDWARD W. MERROW, CEO IPA (2007). Análisis de Factores de Éxito y Fracaso de Megaproyectos, Tercera Edición. Four Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073-3299 EE.UU.
- [15] ALAN GRIFFITH, TONY SIDEWELL (1995). Constructability in building and Engineering Projects. London, England: Macmillan Building and Surveying Series, First Edition.

- [16] NIKIFOROS STAMATIADIS, ROY STURGILL & KIRIAKOS AMIRIDIS (2016). Benefits from Constructability Reviews. Shangai, China: World Conferencie on Transport Research-WCTR 2016.
- [17] POZO QUIJADA, RODRIGO OSVALDO (2016). Análisis del impacto de actividad sísmica en programa de excavaciones de minería subterránea en ambientes de altos esfuerzos, Proyecto Nuevo Nivel Mina El Teniente. Tesis de Magister en Administración de la Construcción. Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.
- [18] Reglamento de Seguridad Minera (2002), Título III, Capítulo IV. Santiago, Chile.
- [19] VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS DE COLDELCO (2016). Protocolo de Pre y Post Tronadura para Desarrollos. Rancagua, Chile: Documento Interno.
- [20] TORRES PINILLA, PATRICIO (2017). Informe Perforación y fracturamiento hidráulico para túneles TAP-TC. Rancagua, Chile: Documento Interno.
- [21] SÁNCHEZ, JOSÉ Y RODRÍGUEZ, FABIO (2017). Evaluación de Aplicación de Destress Blasting en el Proyecto Nuevo Nivel Mina. Rancagua, Chile: Documento Interno.
- [22] VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS DE CODELCO (2017). API Inversional PAN-NNM T18M408. Santiago, Chile: Documento Interno.
- [23] KISBYE, PATRICIA (2010). Técnicas de validación estadística mediante bondad de ajuste. Facultad de Matemáticas, Astronomía, Física y Computación, Universidad de Córdoba, Argentina.
- [24] CCATAMAYO BARRIOS, JOHNNY HENRRY (2017). Aplicación de filosofía LEAN en la preparación minera, mina El Teniente, Codelco, Chile. Tesis de Magister en Minería. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [25] ARMIJO MUÑOZ, SEBASTIÁN OSVALDO (2014). Modelo de confiabilidad operacional de un sistema explotado por método Block Caving. Memoria de Título en Ingeniería Civil de Minas. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [26] DICTUC GEPRO (2016). Informe Preliminar de Cierre del Proyecto, Etapas de diagnóstico, diseño e implementación de mejoras. Santiago, Chile: Documento Interno.
- [27] PINTO LOBOS, NELSON. Acuñaadura Manual. Santiago, Chile: Asociación Chilena de Seguridad.
- [28] ENGINEERING STATISTICS HANDBOOK (2012). Información extraída desde el URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc16.htm>

- **OTROS:**
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (2012). Guía de los Fundamentos Para la Dirección de Proyectos PMBOOK®, Tercera Edición. Fourteen Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073- 3299 EE.UU.
- VICEPRESIDENCIA PROYECTOS CODELCO (2017). Presentación Desafíos Proyecto Nuevo Nivel Mina. Rancagua, Chile: Presentación Interna.
- DUARTE DIAZ, RAUL (1993). Glosario Minero. Rancagua, Chile: Biblioteca Nacional, Segunda Edición.



8 ANEXOS

A. ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

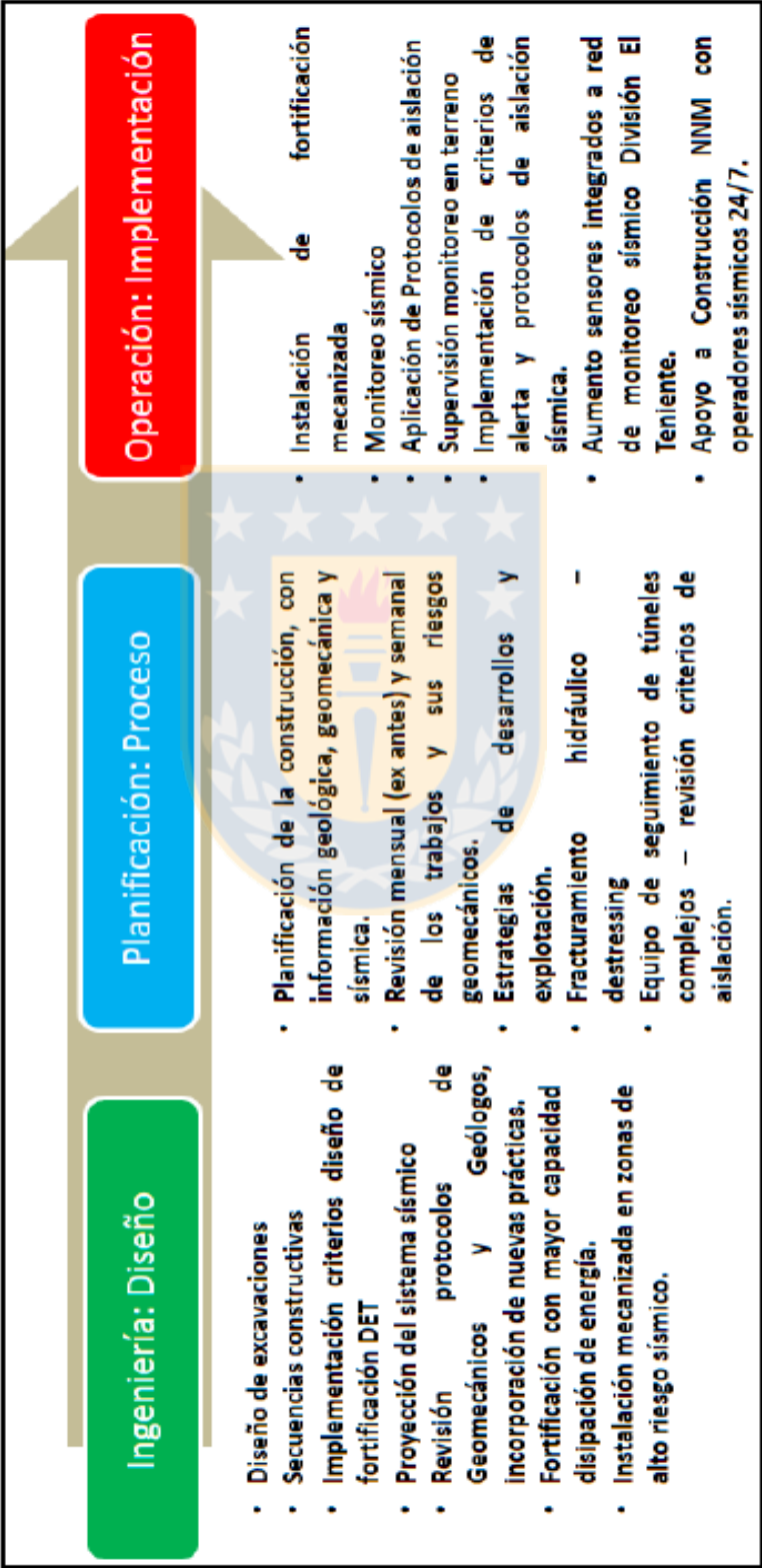


Figura 8.1: Etapas de la Administración del Riesgo Sísmico en el PAN-NNM. (Protocolo de Pre y Post Tronadura Desarrollos, CODELCO VP)

Infraestructura de Apoyo para Monitoreo de Sismicidad

La sismicidad, en el PAN-NNM se registra a través de una red de geófonos ²⁶, herramientas que conforman parte del sistema de monitoreo sísmico de la DET. Dicho sistema permite estimar el punto de inicio de la ruptura, denominado foco, junto con los parámetros geofísicos característicos, como magnitud local y energía liberada.

El principio de funcionamiento del equipo consiste en detectar la ruptura del macizo rocoso, que, producto de este evento produce ondas elásticas de forma radial que viajan a través de él, ondas que son detectadas por las diferentes estaciones sísmicas, para luego transferir esta información en el sistema central de monitoreo sísmico, teniendo la posibilidad de visualizar los resultados de manera global a través del sitio web del sistema sísmico El Teniente.



Figura 8.2: Sensor sísmico y esquema de registro de eventos DET.
(Pozo, 2016)

Polígonos de Control

El control de las excavaciones en el PAN-NNM, se realiza a través del monitoreo de las áreas divididas en los llamados polígonos de control del riesgo sísmico. La Figura 8.3, muestra la distribución en planta de los diferentes polígonos que cubren las obras de interior mina del proyecto. Cada polígono se define tanto por la litología que lo compone, como por su comportamiento geomecánico esperado.

²⁶ Geófono: sistema electro mecánico que tiene la capacidad de transformar las variaciones (movimientos) del macizo rocoso en señales eléctricas [18].

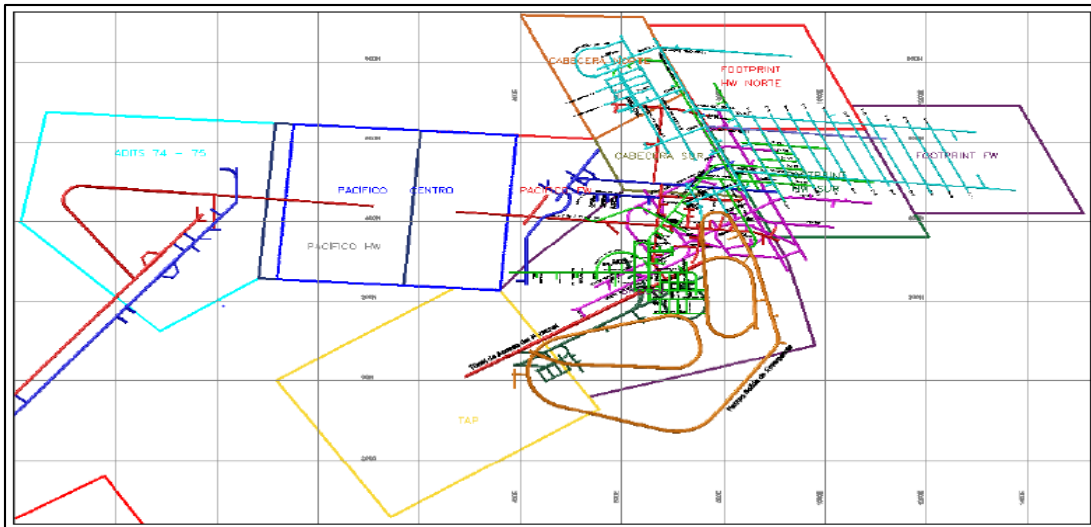


Figura 8.3: Polígonos de sismicidad definidos en el PAN-NNM.
(Protocolo de Pre y Post Tronadura Desarrollos, CODELCO VP)

Protocolos de Pre y Post-Tronadura

El protocolo pre y post tronadura tiene por objetivo administrar el riesgo sísmico presente en las obras de preparación interior mina pertenecientes al PAN-NNM, a fin de resguardar la seguridad del personal ante un potencial estallido de roca. La variable principal que considera este protocolo corresponde al tiempo que tarda el macizo rocoso en estabilizarse o lograr el equilibrio sísmico en un halo determinado, el cual está definido por el entorno inmediato a la tronadura.

Restricciones Geomecánicas

Este criterio corresponde a medidas que se deben implementar con anterioridad a la tronadura las cuales contemplan los siguientes alcances:

- Planificación de las tronaduras consecutivas considerando un halo de al menos 50 metros, independiente de la ubicación espacial de estas y del tipo de explosivo a utilizar.
- Se establecen condiciones para postergar la tronadura, entre las que se encuentran: alguna recomendación que el Área de Geomecánica especifique en la zona; la ocurrencia en las 24 horas previas al disparo y en un halo de 50 metros de dos eventos sísmicos superiores a 0.3 Mw; la ocurrencia de ruido persistente y crepitaciones en el frente de carguío durante el turno o acciones de aislación producto de un evento sísmico “Fuerte local” ²⁷ o “Fuerte Global” ²⁸.

²⁷ Fuerte Local: Aquel que es percibido solo en el área de trabajo específico.

²⁸ Fuerte Global: Aquel que es percibido en el área de trabajo y es percibida además por el personal desde diferentes niveles [18].

Aislaciones Post Tronaduras

Otras de las medidas adoptadas luego de los estallidos de rocas, corresponde a las aislaciones posteriores a las tronaduras, en la cual, se definen tiempos de reingresos mínimos contabilizados a partir de efectuada dicha operación; este lapso de tiempo se define mediante análisis estadísticos del comportamiento de los eventos sísmicos acontecidos en las proximidades del frente con posterioridad a la tronadura. Los tiempos de aislaciones post tronaduras, fluctúan entre las 1 y 48 hora según corresponda.

Como regla general se tiene que para las obras interior mina (*footprint*) dicho periodo varía entre 1 a 3 horas, esto según el polígono de sismicidad en que se encuentre la frente a tronar. Para el caso de la tunelería la aislación considerada fluctúa entre 12, 24 o 36 horas según señale el área geomecánica del proyecto.

Criterios de Alerta por Sismicidad en las Excavaciones

En relación al tipo de escenario sísmico, se establece un sistema de semaforización que regula las operaciones en un determinado polígono de control. Este varía en función de la frecuencia e intensidad de la actividad sísmica circundante e indica el nivel de riesgo en función de la actividad sísmica presentada, información que es entregada en tiempo real.

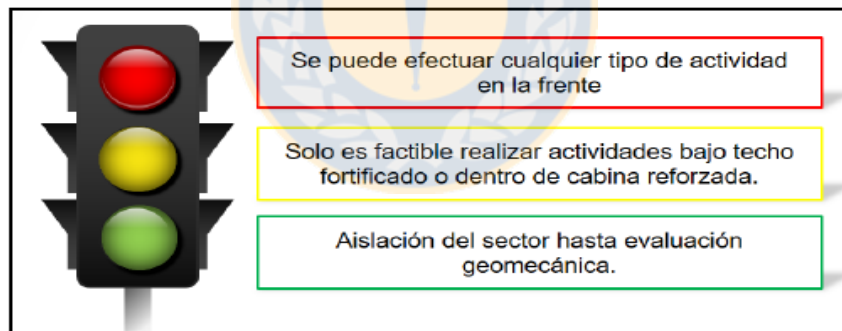


Figura 8.4: Sistema de semaforización por sismicidad en excavaciones.
(Protocolo de Pre y Post Tronadura Desarrollos, CODELCO VP)

B. FOTOGRAVIMETRÍA ADAM

En esta actividad, se llevan a cabo todos los estudios referidos a la calidad geológica de la roca, la mineralización y la identificación de *sets* o estructuras principales presentes en las proximidades del frente. La Fotogravimetría Adam, tal como se aprecia en la Figura, permite efectuar mapeos estructurales por intermedio de cuatro fotos, las cuales son ingresadas a un software llamado *Xilab*, para posteriormente tener los mapeos estructurales correspondientes, lo cual consecuentemente permite el análisis estadístico y la realización de las respectivas redes estereográficas.

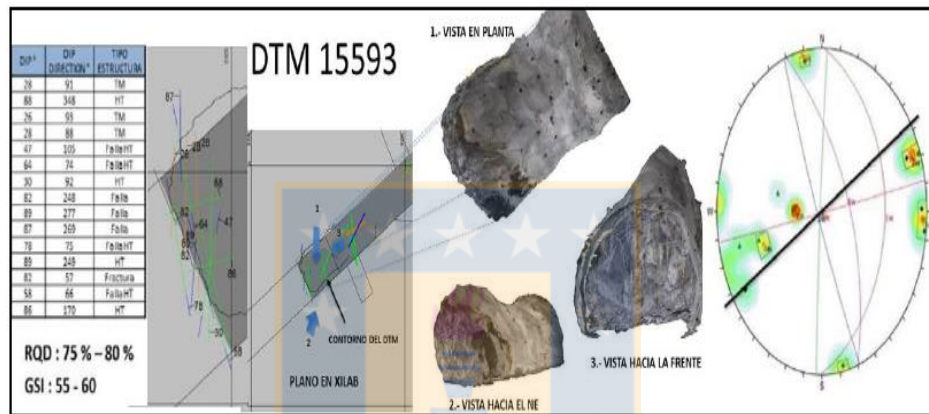


Figura 8.5: Funcionamiento del proceso de Fotogravimetría.

C. ANÁLISIS DE BASE DE DATOS PARA SIMULACIÓN DE TÚNEL CORREA

Respecto al eliminación de *outliers* se debe mencionar que se utilizó el test de Grubbs para corroborar que estadísticamente los datos pudieran considerarse atípicos, el test consiste básicamente en considerar altos erráticos a cualquier valor que sobrepase el ultimo cuartil más 1,5 veces el rango intercuartil (definido como la diferencia entre el primer y el ultimo cuartil). Una vez realizado aquello se procedió a interpretar cada valor con el fin de apreciar si este podría ser considerado realmente un alto errático, en donde el criterio más relevante fue el sentido común. A modo de ejemplo, existía un valor en la operación de perforación de avance que consideraba alrededor de 30 horas de trabajo, notamos entonces que es imposible que el jumbo se encuentre trabajando durante 30 horas (sin fallas) y aún no logre con el cometido, por lo que se asume un error de transcripción o bien la omisión de las interferencias.

Ahora bien, cabe destacar que el test de Grubbs, ya sea utilizado de manera gráfica (con los *boxplot* o histograma) o utilizado de manera numérica asume que la distribución de la población estudiada es de carácter normal, situación que no ocurre en todos los casos por lo que solo fue utilizado como una manera de justificar estadísticamente que los datos pudieran corresponder a *outliers* [28].

A continuación, se presenta los *boxplots* de la base de datos inicial.

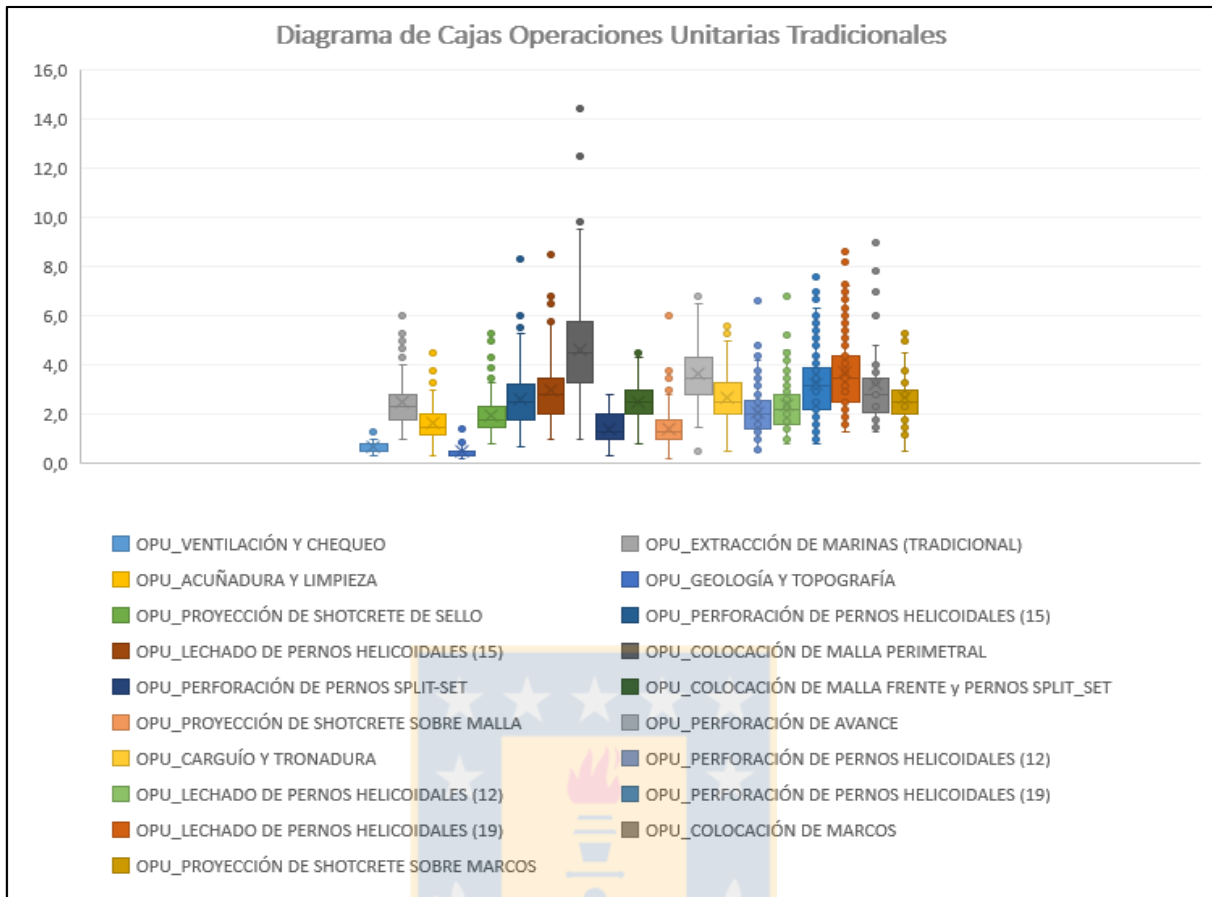


Figura 8.6: Diagramas de caja de operaciones unitarias para ciclos con metodología tradicional.

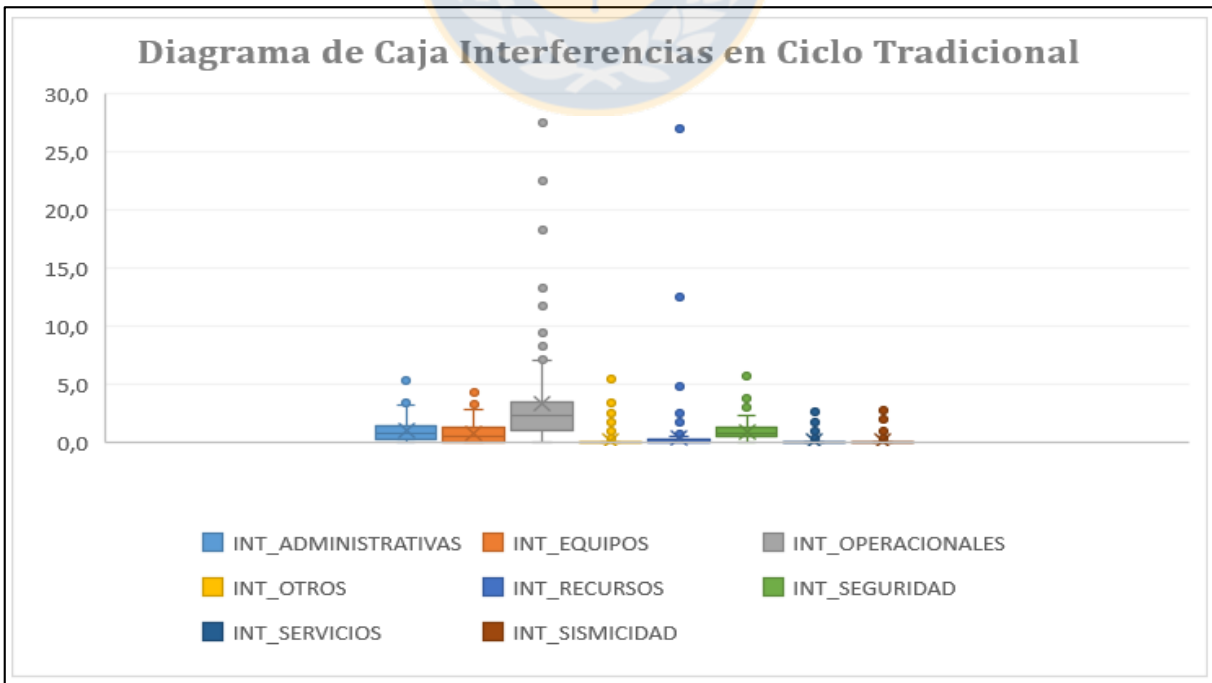


Figura 8.7: Diagramas de caja de interferencias para ciclos con metodología tradicional.

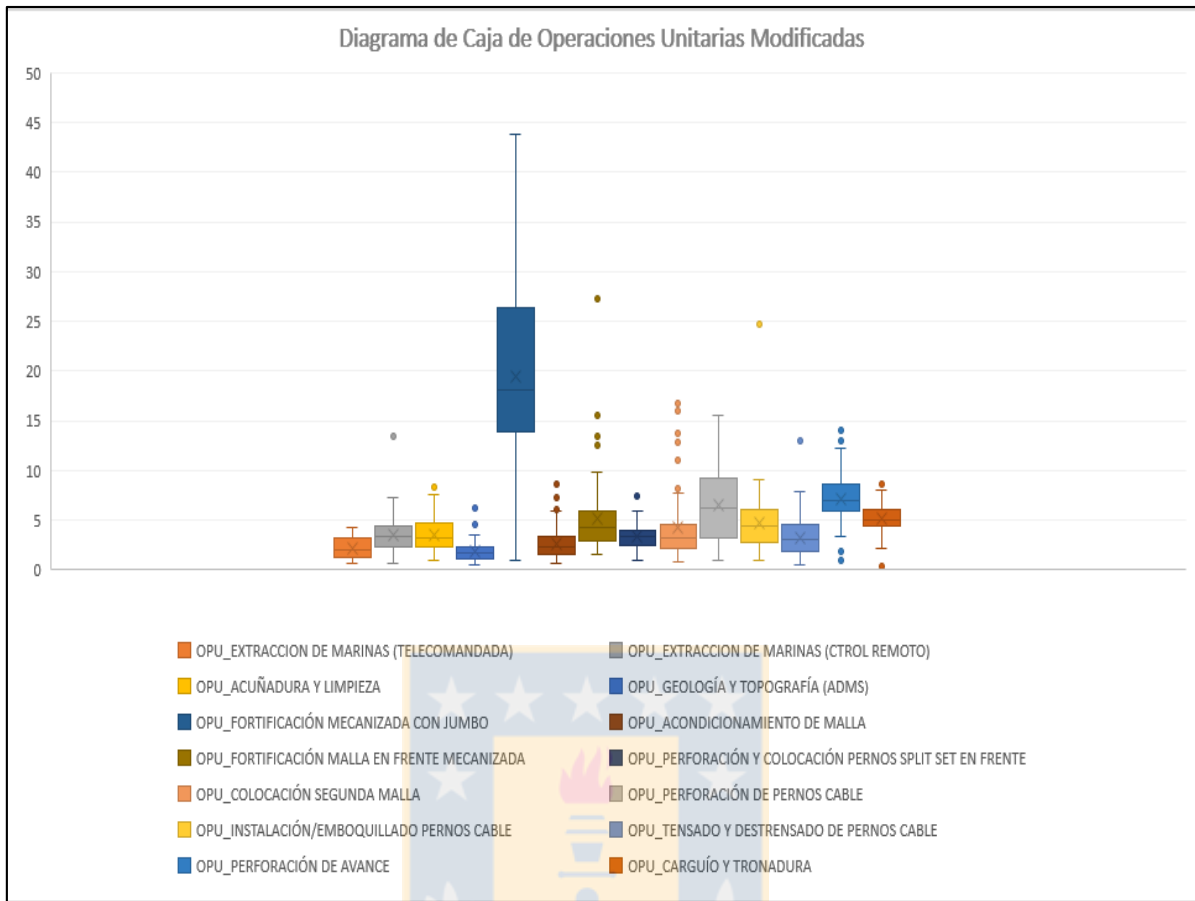


Figura 8.8: Diagramas de caja de operaciones unitarias para ciclos con metodología mecanizada.

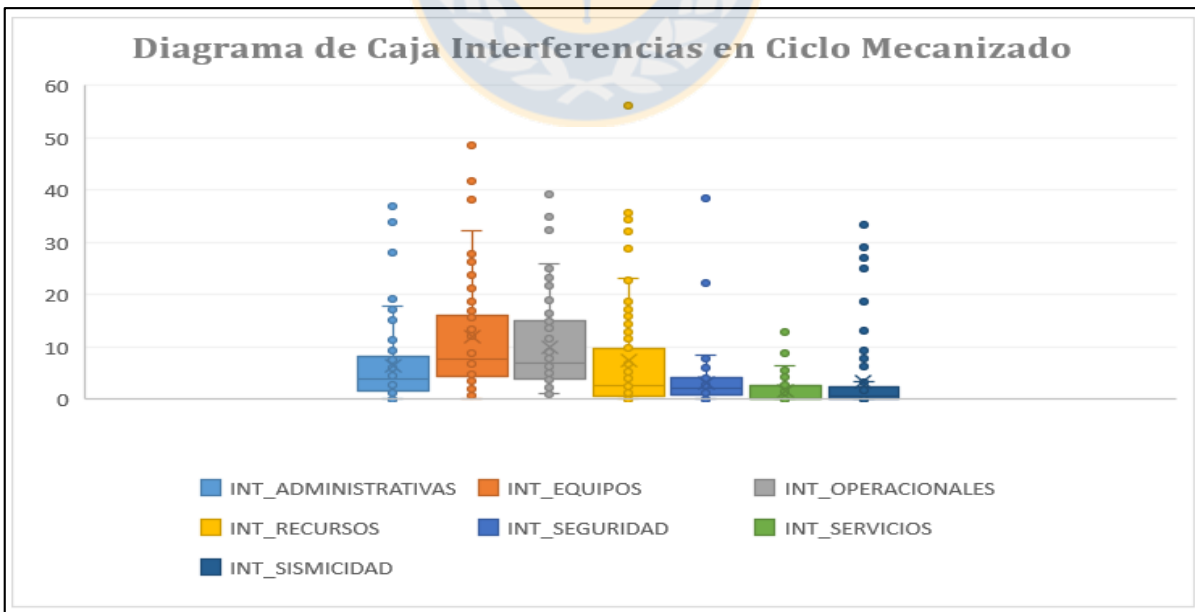


Figura 8.9: Diagramas de caja de interferencias para ciclos con metodología mecanizada.

D. RESULTADO DE AJUSTE DE LAS DISTRIBUCIONES

A continuación, se presentan los parámetros más importantes de las distribuciones de probabilidad utilizadas, cabe destacar que no se presentan de manera gráfica debido al gran número de estas (alrededor de 65), ya que se debe considerar que las fortificaciones están compuestas por –como mínimo- 3 operaciones.

Tabla 8.1: Estadísticas básicas de los ajuste de distribuciones de probabilidad realizados para ciclos con metodología tradicional.

OPERACIÓN UNITARIA (OPU)	N° Datos	Distribución	Media	Máximo	Mínimo	Desviación
VENTILACIÓN Y CHEQUEO	200	Lognormal	0,7	1,2	0,3	0,2
AISLACIÓN DE 12 HORAS	Juicio exp	Lognormal	12,4	14	12	0,3
EXTRACCIÓN DE MARINA TRADICIONAL	203	ExtValue	2,5	5,5	1,0	0,8
ACUÑADURA Y LIMPIEZA	196	Loglogistic	1,6	4,0	0,3	0,6
GEOLOGÍA Y TOPOGRAFÍA	178	Triangular	0,6	1,0	0,2	0,2
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE DE SELLO	201	Loglogistic	1,9	4,5	0,8	0,6
FORTIFICACIÓN TRADICIONAL TIPO A	164	Invgauss	9,1	17,3	4,3	2,2
FORTIFICACIÓN TRADICIONAL TIPO B	156	Invgauss	10,2	18,3	4,8	2,3
FORTIFICACIÓN TRADICIONAL TIPO C	156	Gamma	11,6	19,9	5,9	11,6
FORTIFICACIÓN TRADICIONAL TIPO E	36	Invgauss	8,5	14,9	4,1	2,1
FORTIFICACIÓN TRADICIONAL DEL FRENTE	54	Weibull	3,9	5,7	2,0	0,8
COLOCACIÓN DE MARCOS	36	Loglogistic	3,0	8,0	1,0	1,2
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE SOBRE MARCOS	35	Loglogistic	2,6	5,3	0,7	0,8
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE SOBRE MALLA	149	Loglogistic	1,4	3,5	0,2	0,5
PERFORACIÓN DE AVANCE	202	Loglogistic	3,6	6,8	0,5	1,1
CARGUÍO Y TRONADURA	206	Loglogistic	2,6	5,0	0,7	0,8
INTERFERENCIAS METODOLOGÍA TRADICIONAL	207	Loglogistic	6,5	20,1	1,5	3,1
METROS DE AVANCE POR CICLO	168	Weibull	3,6	5,9	2,4	0,6
METROS DE AVANCE POR CICLO CON MARCO	34	Lognormal	2,3	3,9	1,3	0,5

Tabla 8.2: Estadísticas básicas de los ajuste de distribuciones de probabilidad realizados para ciclos con metodología mecanizada.

OPERACIÓN UNITARIA (OPU)	N° Datos	Distribución	Media	Máximo	Mínimo	Desviación
VENTILACIÓN Y CHEQUEO	200	Lognormal	0,7	1,2	0,3	0,2
AISLACIÓN DE 24 HORAS	Juicio exp	Lognormal	25,7	31,0	24,0	1,3
EXTRACCION DE MARINA TELECOMANDADA	22	Triangular	2,1	4,9	0,7	1,0
ACUÑADURA Y LIMPIEZA MECANIZADA	73	Weibull	3,5	8,9	0,9	1,7
FOTOGRAVIMETRÍA ADAM	74	Lognormal	1,9	5,7	0,5	0,9
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE DE SELLO	72	Loglogistic	1,9	4,5	0,8	0,6
FORTIFICACIÓN MECANIZADA	73	Gamma	22,4	49,4	4,4	9,2
FORTIFICACIÓN FRENTE MECANIZADA	73	Pearson	6,8	16,0	2,0	2,7
COLOCACIÓN SEGUNDA MALLA	70	Loglogistic	3,8	14,0	0,7	2,4
COLOCACIÓN PERNOS CABLE	68	BetaGeneral	14,2	28,0	4,1	4,7
PROYECCIÓN DE SHOTCRETE SOBRE MALLA	73	Loglogistic	1,4	3,5	0,2	0,5
PERFORACIÓN DE AVANCE CON DESTRESSING	74	Laplace	7,1	14,0	1,0	2,1
CARGUÍO Y TRONADURA CON DESTRESSING	74	Logistic	5,1	8,6	1,1	1,3
INTERFERENCIAS METODOLOGÍA MECANIZADA	75	Gamma	39,8	82,6	11,6	14,6
METROS DE AVANCE POR CICLO	31	Normal	3,5	4,8	2,3	0,5

E. EJEMPLO DE VALIDACIÓN DE AJUSTE

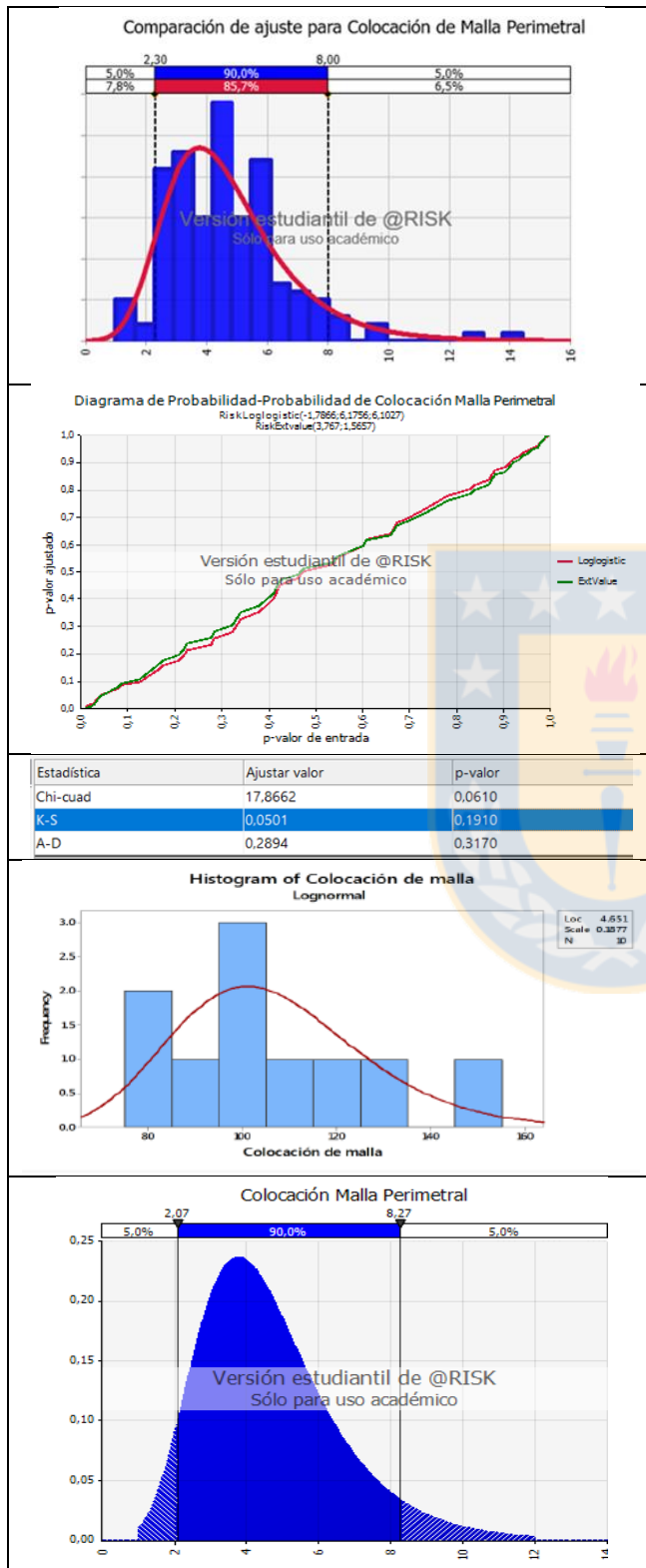


Figura 8.10: Pasos para la validación de ajustes.

- Se comienza realizando el ajuste de datos reales a alguna distribución de probabilidad, proceso generado automáticamente por el software. Luego, mediante una representación gráfica podemos observar que tan bien se ajustan las curvas de cada distribución al histograma de datos reales.

- A continuación, se analiza el gráfico de probabilidad acumulada de datos reales (eje x) versus la probabilidad acumulada del ajuste (eje y); tomando como referencia que un ajuste perfecto corresponderá a una línea recta con una pendiente positiva de 45 grados.

- Posterior a ello se analizan los p-valor de las pruebas estadísticas de Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling; teniendo como referencia que la hipótesis nula (los datos se ajustan correctamente) no se rechaza con un 95% de confianza si el p-valor es mayor a 0,05.

- Si el ajuste no aprueba satisfactoriamente ninguna de estas etapas se procede a comparar el resultado con los ajustes realizado en estudio previos, con el fin de obtener una o dos distribuciones representativas de la operación unitaria en cuestión. (en el gráfico vemos el ejemplo de ajuste en el estudio de Ccatamayo, 2017).

- Una vez consideradas la(s) opciones para dicha operación unitaria, se procede a seleccionar la distribución considerada más acertada por parte del equipo de constructibilidad del proyecto.

F. COMPONENTE DE LA SIMULACIÓN PARA OBTENER LOS RENDIMIENTOS POR CICLO

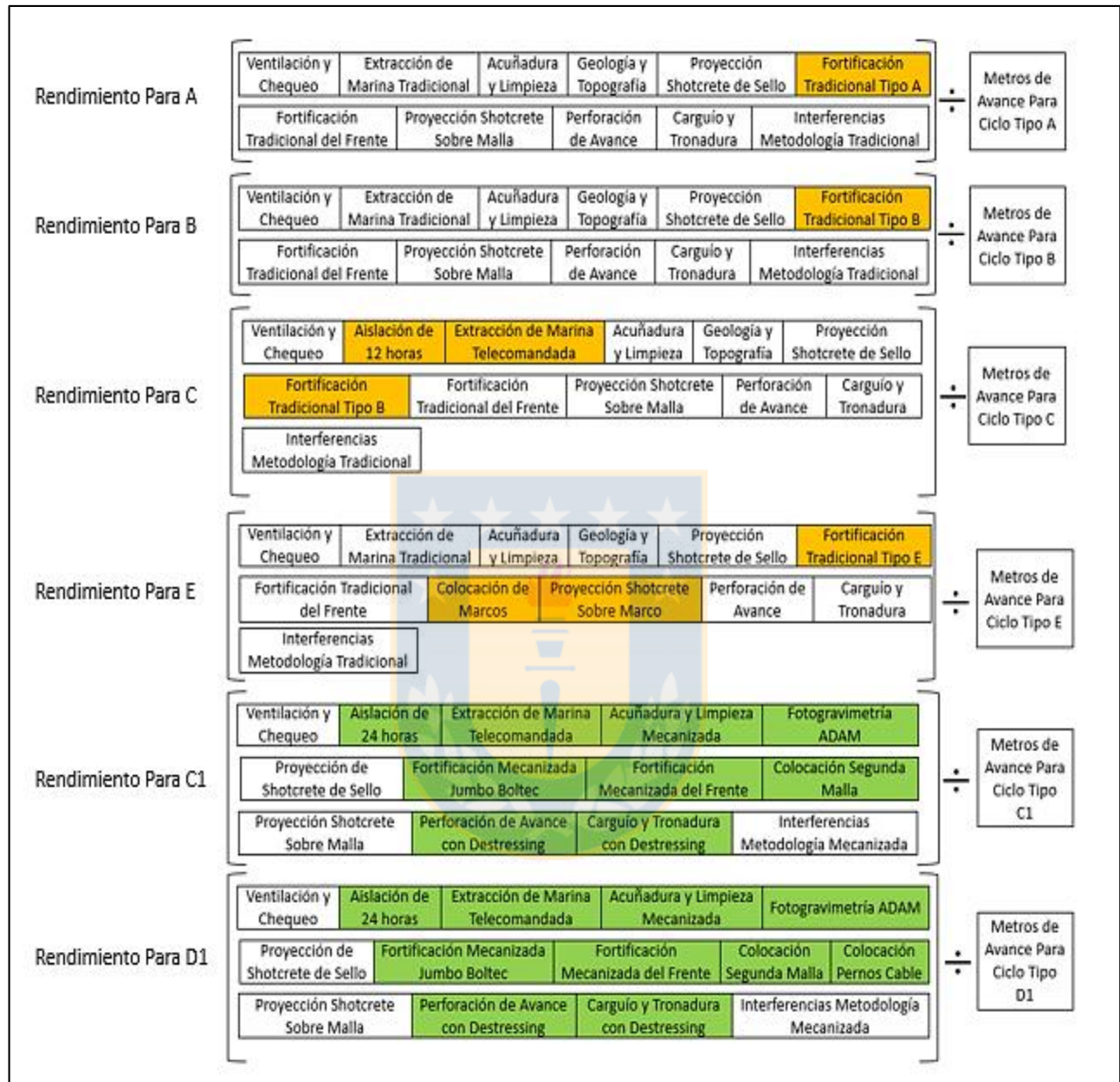


Figura 8.11: Obtención de los rendimientos por ciclo según tipo de fortificación. En amarillo las operaciones unitarias que se ven modificadas en los ciclos tradicionales, en verde las operaciones unitarias modificadas producto de la condición de esfuerzos.

G. PARÁMETROS DE ENTRADA MÁS RELEVANTES EN EL MODELO DE SIMULACIÓN

Tabla 8.3: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el UCL.

Sección		UCL									
		5,2 x 5,1		4,1 x 4,0		4,2 x 4,1		4,2 x 2,8		7,2 x 6,45	
		Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
CICLO											
Tiempo Perforación Avance	Intalacion Jumbo Avance [min]	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
	Total perforación [m]	311,6	212,8	224,2	224,2	98,8	357,2	357,2	357,2	357,2	357,2
	Velocidad de perforacion Jumbo 2 bz [mb/min]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	Tiempo perforacion [min]	126,7	86,5	91,1	91,1	40,2	145,2	145,2	145,2	145,2	145,2
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min]	0,5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	Tiempo total posicionamiento [min]	41,0	28,0	29,5	29,5	13,0	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0
	Retiro Jumbo Avance [min]	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Tiempo total perforación avance [min]		180,7	127,5	133,6	133,6	66,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2
Tiempo Carguío y Tronadura	Instalación equipo de carga [min]	15,00	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
	Tiempo carga por tiro [min/perf]	1,50	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Tiempo carga total por avance [min]	118,50	79,5	84,0	84,0	34,5	136,5	136,5	136,5	136,5	136,5
	Retiro equipo [min]	3,00	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	Tiempo de evacuación [min]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
	Tiempo carguío de frente [min]	151,50	112,50	117,00	117,00	67,50	169,50	169,50	169,50	169,50	169,50
Parámetros Carguío Marina	Esponjamiento [%]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Volumen esponjado marina por disparo [m3]	155	96	101	101	41	225	225	225	225	225
	Capacidad de carguío [m3]	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36
	Factor de llenado [%]	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	N° de viajes	30	19	20	20	8	44	44	44	44	44
	Distancia promedio a camión [m]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Velocidad [km/h]		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Tiempo Carguío Marina	Carguío y Levante [min]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Maniobra [min]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Traslado a punto de vaciado [min]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Vaciado [min]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	Maniobra [min]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Traslado a la frente [min]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Tiempo carguío [min/viaje]	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Tiempo Split Set	Numero de Pernos	17	11	11	11	8	26	26	26	26	26
	Largo Perno en roca [m]	2,1	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
	Tiempo de Perforación 1bz [min]	29,0	11,6	11,6	11,6	8,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
	Tiempo maniobra [min/perno]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Tiempo total maniobra [min]	17,0	11,0	11,0	11,0	8,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min/tiro]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Tiempo posicionamiento [min]	6,0	3,9	3,9	3,9	2,8	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	Tiempo instalación perno [min/perno]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Tiempo instalación [min]	17,0	11,0	11,0	11,0	8,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0
	Tiempo total split set [min]	69,0	37,5	37,5	37,5	27,3	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6
Tiempo Perforación Perno	Instalación jumbo empernador + marcar forti.[min]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Total perforación [m]	149,0	38,0	81,0	-	89,0	-	57,0	-	184,0	-
	Velocidad de perforacion Jumbo [mb/min]	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
	Tiempo perforacion [min]	121,14	30,89	65,85	-	72,36	-	46,34	-	149,59	-
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Tiempo total posicionamiento [min]	15,75	4,20	12,25	-	13,30	-	8,40	-	19,25	-
	Retiro jumbo empernador [min]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Tiempo total perforación perno [min]	147,89	46,09	89,10	-	96,66	-	65,74	-	179,84	-
Tiempo Lechado Perno	Tiempo instalación lechadora [min]	5,0	5,0	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-
	Tiempo lechado perno [min/perno]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo lechado [min]	135,0	36,0	105,0	-	114,0	-	72,0	-	165,0	-
	Tiempo desinstalación lechadora [min]	5,0	5,0	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-
	Tiempo total lechado [min]	145,0	46,0	115,0	-	124,0	-	82,0	-	175,0	-
Tiempo Colocación Malla	Aplica Doble Malla?	SI		NO		NO		NO		NO	
	Tiempo instalación malla [min/m2]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Área de colocación malla [m2]	45,18	45,18	35,5	-	36,4	-	23,2	-	54,2	-
	Ingreso equipo de levante [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo colocación de malla [min]	135,5	135,5	106,5	-	109,2	-	69,6	-	162,7	-
	Retiro equipo de levante [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo total malla [min]	141,5	141,5	112,5	-	115,2	-	75,6	-	168,7	-
Tiempo Proyección Shotcrete	Lavado de caja y techo [min]	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
	Tiempo instalación equipo [min]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Tiempo proyección shotcrete [min]	12,8	5,5	7,2	2,9	7,4	2,9	4,7	1,9	11,0	4,4
	Tiempo retiro de equipo [min]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	Tiempo total proyección shotcrete [min]	26,8	18,5	21,2	15,9	21,4	15,9	18,7	14,9	25,0	17,4

Tabla 8.4: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el NP.

Sección		NP									
		5,2 x 5,1		4,8 x 4,5		4,4 x 4,3		2,7 x 2,6		7,2 x 6,45	
		Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
CICLO											
Tiempo Perforación Avance	Intalación Jumbo Avance [min]	9,0		9,0		9,0		9,0		9,0	
	Total perforación [m]	285,0		231,8		205,2		79,8		315,4	
	Velocidad de perforación Jumbo 2 bz [mb/min]	2,5		2,5		2,5		2,5		2,5	
	Tiempo perforación [min]	115,9		94,2		83,4		32,4		128,2	
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min]	0,5		0,50		0,50		0,50		0,50	
	Tiempo total posicionamiento [min]	37,5		30,5		27,0		10,5		41,5	
	Retiro Jumbo Avance [min]	4,0		4,0		4,0		4,0		4,0	
	Tiempo total perforación avance [min]	166,4		137,7		123,4		55,9		182,7	
Tiempo Carguo y Tronadura	Instalación equipo de carga [min]	15,00		15,0		15,0		15,0		15,0	
	Tiempo carga por tiro [min/perf]	1,50		1,5		1,5		1,5		1,5	
	Tiempo carga total por avance [min]	109,50		88,5		78,0		28,5		121,5	
	Retiro equipo [min]	3,00		3,0		3,0		3,0		3,0	
	Tiempo de evacuación [min]	15,00		15,00		15,00		15,00		15,00	
	Tiempo carguo de frente [min]	142,50		121,50		111,00		61,50		154,50	
Parámetros Carguo Marina	Esponjamiento [%]	60		60		60		60		60	
	Volumen esponjado marina por disparo [m3]	155		126		111		41		268	
	Capacidad de carguo [m3]	5,36		5,36		5,36		5,36		5,36	
	Factor de llenado [%]	95		95		95		95		95	
	N° de viajes	30		25		22		8		53	
	Distancia promedio a camión [m]	300		300		300		300		300	
	Velocidad [km/h]	20		20		20		20		20	
Tiempo Carguo Marina	Carguo y Levante [min]	1,5		1,5		1,5		1,5		1,5	
	Maniobra [min]	1,0		1,0		1,0		1,0		1,0	
	Traslado a punto de vaciado [min]	0,9		0,9		0,9		0,9		0,9	
	Vaciado [min]	1,5		1,5		1,5		1,5		1,5	
	Maniobra [min]	1,0		1,0		1,0		1,0		1,0	
	Traslado a la frente [min]	0,9		0,9		0,9		0,9		0,9	
	Tiempo carguo [min/viaje]	7,0		7,0		7,0		7,0		7,0	
Tiempo Split Set	Número de Pernos	17		11		11		8		26	
	Largo Perno en roca [m]	2,1		1,3		1,3		1,3		1,3	
	Tiempo de Perforación 1bz [min]	29,0		11,6		11,6		8,5		27,5	
	Tiempo maniobra [min/perno]	1,0		1,0		1,0		1,0		1,0	
	Tiempo total maniobra [min]	17,0		11,0		11,0		8,0		26,0	
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min/tiro]	0,35		0,35		0,35		0,35		0,35	
	Tiempo posicionamiento [min]	6,0		3,9		3,9		2,8		9,1	
	Tiempo instalación perno [min/perno]	1,0		1,0		1,0		1,0		1,0	
	Tiempo instalación [min]	17,0		11,0		11,0		8,0		26,0	
	Tiempo total split set [min]	69,0		37,5		37,5		27,3		88,6	
Tiempo Perforación Perno	Instalación jumbo empernador + marcar forti.[min]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Total perforación [m]	149,0	38,0	97,0	-	89,0	-	40,0	-	224,0	-
	Velocidad de perforación Jumbo [mb/min]	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
	Tiempo perforación [min]	121,14	30,89	78,86	-	72,36	-	32,52	-	182,11	-
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Tiempo total posicionamiento [min]	15,75	4,20	14,70	-	13,30	-	8,40	-	20,65	-
	Retiro jumbo empernador [min]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Tiempo total perforación perno [min]	147,89	46,09	104,56	-	96,66	-	51,92	-	213,76	-
Tiempo Lechado Perno	Tiempo instalación lechadora [min]	5,0	5,0	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-
	Tiempo lechado perno [min/perno]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo lechado [min]	135,0	36,0	126,0	-	114,0	-	72,0	-	177,0	-
	Tiempo desinstalación lechadora [min]	5,0	5,0	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-
	Tiempo total lechado [min]	145,0	46,0	136,0	-	124,0	-	82,0	-	187,0	-
Tiempo Colocación Malla	Aplica Doble Malla?	SI		NO		NO		NO		NO	
	Tiempo instalación malla [min/m2]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Área de colocación malla [m2]	45,18	45,18	40,6	-	38,1	-	23,2	-	59,3	-
	Ingreso equipo de levante [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo colocación de malla [min]	135,5	135,5	121,8	-	114,4	-	69,6	-	177,8	-
	Retiro equipo de levante [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo total malla [min]	141,5	141,5	127,8	-	120,4	-	75,6	-	183,8	-
Tiempo Proyección Shotcrete	Lavado de caja y techo [min]	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
	Tiempo instalación equipo [min]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Tiempo proyección shotcrete [min]	12,8	5,5	11,5	4,9	7,7	3,1	4,7	1,9	12,0	4,8
	Tiempo retiro de equipo [min]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	Tiempo total proyección shotcrete [min]	26,8	18,5	25,5	17,9	21,7	16,1	18,7	14,9	26,0	17,8

Tabla 8.6: Parámetros de entrada en Deswik® para construcción de ciclos en el NTI

Sección		NTI								7,2 x 6,5	
		Pipa-Cabecera		Footprint		Frontones					
		5,7 x 5,6		5,7 x 5,6		5,2 x 5,1		4,6 x 5,0			
		Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2		
CICLO											
Tiempo Perforación Avance	Intalacion Jumbo Avance [min]	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0			
	Total perforación [m]	326,8	326,8	311,6	281,2	372,4					
	Velocidad de perforacion Jumbo 2 bz [mb/min]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5					
	Tiempo perforacion [min]	132,8	132,8	126,7	114,3	151,4					
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min]	0,5	0,5	0,50	0,50	0,50					
	Tiempo total posicionamiento [min]	43,0	43,0	41,0	37,0	49,0					
	Retiro Jumbo Avance [min]	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0					
	Tiempo total perforación avance [min]	189,0	189,0	180,7	164,3	213,4					
Tiempo Carguo y Tronadura	Instalación equipo de carga [min]	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0					
	Tiempo carga por tiro [min/perf]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5					
	Tiempo carga total por avance [min]	124,5	124,5	118,5	106,5	142,5					
	Retiro equipo [min]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0					
	Tiempo de evacuación [min]	15,0	15,0	15,00	15,00	15,00					
	Tiempo carguo de frente [min]	158,0	158,0	151,50	139,50	175,50					
Parámetros Carguo Marina	Esponjamiento [%]	60	60	60	60	60					
	Volumen esponjado marina por disparo [m3]	187	187	155	136	271					
	Capacidad de carguo [m3]	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36					
	Factor de llenado [%]	95	95	95	95	95					
	N° de viajes	37	37	30	27	53					
	Distancia promedio a camión [m]	300	300	300	300	300					
	Velocidad [km/h]	20	20	20	20	20					
Tiempo Carguo Marina	Carguo y Levante [min]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5					
	Maniobra [min]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
	Traslado a punto de vaciado [min]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9					
	Vaciado [min]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5					
	Maniobra [min]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
	Traslado a la frente [min]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9					
	Tiempo carguo [min/viaje]	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0					
Tiempo Split Set	Numero de Pernos	23,0	21,0	17	11	26					
	Largo Perno en roca [m]	2,1	2,1	2,1	1,3	1,3					
	Tiempo de Perforación 1bz [min]	39,3	35,9	29,0	11,6	27,5					
	Tiempo maniobra [min/perno]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
	Tiempo total maniobra [min]	23,0	21,0	17,0	11,0	26,0					
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min/tiro]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35					
	Tiempo posicionamiento [min]	8,1	7,4	6,0	3,9	9,1					
	Tiempo instalación perno [min/perno]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
	Tiempo instalación [min]	23,0	21,0	17,0	11,0	26,0					
	Tiempo total split set [min]	93,3	85,2	69,0	37,5	88,6					
Tiempo Perforación Perno	Instalación jumbo emperrador + marcar forti.[min]	8,0	8,0	8,0	-	8,0	-	8,0	-	8,0	-
	Total perforación [m]	198,0	48,0	198,0	-	105,0	-	97,0	-	224,0	-
	Velocidad de perforacion Jumbo [mb/min]	1,2	1,2	1,2	-	1,23	-	1,23	-	1,23	-
	Tiempo perforacion [min]	161,0	39,0	161,0	-	85,37	-	78,86	-	182,11	-
	Tiempo posicionamiento entre tiros [min]	0,4	0,4	0,4	-	0,35	-	0,35	-	0,35	-
	Tiempo total posicionamiento [min]	18,2	4,6	18,2	-	15,75	-	14,70	-	20,65	-
	Retiro jumbo emperrador [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,00	-	3,00	-	3,00	-
	Tiempo total perforación perno [min]	191,0	55,0	191,0	-	112,12	-	104,56	-	213,76	-
Tiempo Lechado Perno	Tiempo instalación lechadora [min]	5,0	5,0	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-
	Tiempo lechado perno [min/perno]	4,0	4,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo lechado [min]	208,0	52,0	156,0	-	135,0	-	126,0	-	177,0	-
	Tiempo desinstalación lechadora [min]	5,0	5,0	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-
	Tiempo total lechado [min]	218,0	62,0	166,0	-	145,0	-	136,0	-	187,0	-
Tiempo Colocación Malla	Aplica Doble Malla?	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO			
	Tiempo instalación malla [min/m2]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Área de colocación malla [m2]	49,6	49,58	49,6	-	45,2	-	42,6	-	59,5	-
	Ingreso equipo de levante [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo colocación de malla [min]	148,7	148,7	148,7	-	135,5	-	127,8	-	178,6	-
	Retiro equipo de levante [min]	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
	Tiempo total malla [min]	155,0	155,0	155,0	-	141,5	-	133,8	-	184,6	-
Tiempo Proyección Shotcrete	Lavado de caja y techo [min]	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
	Tiempo instalación equipo [min]	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	Tiempo proyección shotcrete [min]	14,1	6,0	14,1	6,0	9,1	3,7	8,6	3,5	12,1	4,8
	Tiempo retiro de equipo [min]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	Tiempo total proyección shotcrete [min]	29,0	20,0	29,0	20,0	23,1	16,7	22,6	16,5	26,1	17,8

H. EXTRACTO DE INFORMES DIARIOS RESPECTO A LA DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS

Tabla 8.7: Extracto de informes diarios PAN-NNM.

ESTADO EQUIPOS (CAPTURA SPOT)							
N° Identificación	Descripción	Estado T°A	Horas F/S		Estado T°B	Horas F/S	
			Inicio	Término		Inicio	Término
J-007	Jumbo Enmallador						
J-064	Jumbo	F/S	7:00	11:20	F/S	23:30	1:10
J-066	Jumbo	F/S	12:30	13:30		2:00	3:00
J-067	Jumbo				F/S	22:30	23:15
J-073	Jumbo	F/S	10:20	11:00			
J-074	Jumbo				F/S	3:30	4:30
J-076	Jumbo	F/S	7:00	13:30			
J-077	Jumbo						
J-081	Jumbo				F/S	0:50	1:30
J-082	Jumbo					2:00	2:30
J-086	Jumbo				F/S	1:00	1:30
SC-080	Scoop	F/S	11:00	13:00			
SC-085	Scoop				F/S	19:00	7:00
SC-092	Scoop						
SC-097	Scoop						
SC-099	Scoop						
CFA-017	Cargador Frontal	F/S	7:00	19:00	F/S	19:00	7:00
CFA-020	Cargador Frontal						
RA-028	Retroexcavadora						
RA-047	Retroexcavadora						
RA-050	Retroexcavadora						
PA-070	Acuñador	F/S	7:00	19:00	F/S	19:00	7:00
PA-075	Acuñador				F/S	0:30	1:30
						2:00	3:30

I. TIEMPOS DE DESPLAZAMIENTO ENTRE FRENTES

Tabla 8.8: tiempos de desplazamiento entre frentes.

Equipo	Tiempo de desplazamiento en horas				
	UCL	NP	NTI	SNV	Entre Niveles
Cargador Frontal	0,08	0,05	0,09	0,16	0,3
Scoop	0,08	0,05	0,09	0,16	0,3
Acuñador	0,08	0,05	0,09	0,16	0,5
Jumbo de Avance	0,10	0,06	0,11	0,20	0,5
Jumbo de Fortificación	0,10	0,06	0,11	0,20	0,5
Roboshot	0,08	0,05	0,09	0,16	0,5

J. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Tabla 8.9: Valores de distribuciones de probabilidad acumulada **ascendente** para ciclos según tipo de fortificación.

	TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO E	TIPO C1	TIPO D1
1%	1,5	1,5	1,1	0,8	0,4	0,4
5%	1,8	1,7	1,3	1,0	0,5	0,4
10%	1,9	1,9	1,4	1,1	0,5	0,5
15%	2,0	2,0	1,4	1,1	0,6	0,5
20%	2,1	2,0	1,5	1,2	0,6	0,5
25%	2,2	2,1	1,5	1,2	0,6	0,5
30%	2,3	2,2	1,6	1,3	0,6	0,6
35%	2,3	2,3	1,6	1,3	0,6	0,6
40%	2,4	2,3	1,7	1,3	0,7	0,6
45%	2,5	2,4	1,7	1,4	0,7	0,6
50%	2,5	2,5	1,8	1,4	0,7	0,6
55%	2,6	2,5	1,8	1,5	0,7	0,6
60%	2,7	2,6	1,9	1,5	0,7	0,7
65%	2,8	2,7	1,9	1,6	0,7	0,7
70%	2,9	2,8	2,0	1,6	0,8	0,7
75%	2,9	2,9	2,0	1,7	0,8	0,7
80%	3,0	2,9	2,1	1,8	0,8	0,7
85%	3,2	3,1	2,2	1,9	0,9	0,8
90%	3,3	3,2	2,3	2,0	0,9	0,8
95%	3,6	3,4	2,4	2,2	1,0	0,8
99%	4,0	3,9	2,7	2,5	1,1	0,9

Tabla 8.10: Resultados de distribuciones de probabilidad acumuladas **ascendente** de simulaciones realizando mejoras en ciclos según tipo de fortificación (C1 y D1).

	C1				D1			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
1%	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5
5%	0,6	0,5	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6
10%	0,6	0,6	0,7	0,8	0,5	0,5	0,6	0,7
15%	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,5	0,6	0,7
20%	0,7	0,6	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7
25%	0,7	0,7	0,8	0,9	0,6	0,6	0,7	0,8
30%	0,7	0,7	0,8	0,9	0,6	0,6	0,7	0,8
35%	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	0,6	0,7	0,8
40%	0,8	0,7	0,8	0,9	0,7	0,6	0,7	0,8
45%	0,8	0,7	0,9	1,0	0,7	0,7	0,8	0,8
50%	0,8	0,8	0,9	1,0	0,7	0,7	0,8	0,9
55%	0,8	0,8	0,9	1,0	0,7	0,7	0,8	0,9
60%	0,8	0,8	0,9	1,0	0,7	0,7	0,8	0,9
65%	0,9	0,8	1,0	1,1	0,8	0,7	0,8	0,9
70%	0,9	0,9	1,0	1,1	0,8	0,8	0,9	0,9
75%	0,9	0,9	1,0	1,1	0,8	0,8	0,9	1,0
80%	0,9	0,9	1,0	1,1	0,8	0,8	0,9	1,0
85%	1,0	0,9	1,1	1,2	0,8	0,8	0,9	1,0
90%	1,0	1,0	1,1	1,2	0,9	0,9	1,0	1,1
95%	1,1	1,1	1,2	1,3	0,9	0,9	1,0	1,1
99%	1,2	1,2	1,3	1,5	1,0	1,0	1,1	1,3

- **Caso 1:** Disminución en un 40% del tiempo de Interferencias
- **Caso 2:** Disminución en un 40% del tiempo de Fortificación
- **Caso 3:** Disminución en un 40% del tiempo de Interferencias y del tiempo de Fortificación
- **Caso 4:** Disminución en un 40% del tiempo de Interferencia y del tiempo de Fortificación, y aumento en un 10% de la eficiencia del disparo.

K. RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA DESARROLLO DE TÚNEL CORREA

Tabla 8.11: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 1.

Gráfico de Araña	Nombre de entrada	Indicador Histórico	Cambio en el Indicador (%)	Impacto en Días
FRENTE 1	FORTIFICACIÓN TRADICIONAL	9,1	-35%	-46
			-16%	-21
			13%	17
			45%	57
	PRFORACIÓN DE AVANCE	3,6	-47%	-41
			-18%	-16
			16%	14
			52%	46
	INTERFERENCIAS	6,5	-56%	-88
			-30%	-47
			16%	26
			93%	147
	METROS DE AVANCE POR CICLO TIPO A	3,6	-28%	191
			-12%	64
			11%	-48
			29%	-110
	METROS DE AVANCE POR CICLO TIPO E	2,3	-31%	178
			-15%	69
			12%	-40
			43%	-116

Tabla 8.12: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 2.

Gráfico de Araña	Nombre de entrada	Indicador Histórico	Cambio en el Indicador (%)	Impacto en Días
FRENTE 2	FORTIFICACIÓN TRADICIONAL	9,1	-34%	-54
			-15%	-24
			12%	20
			42%	66
	INTERFERENCIAS	6,5	-56%	-69
			-30%	-37
			16%	20
			93%	115
	METROS DE AVANCE POR CICLO TIPO B	3,6	-28%	272
			-12%	92
			11%	-69
			29%	-158

Tabla 8.13: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 3.

Gráfico de Araña	Nombre de entrada	Indicador Histórico	Cambio en el Indicador (%)	Impacto en Días
FRENTE 3	FORTIFICACIÓN MECANIZADA	22,3	-60%	-136
			-27%	-62
			23%	51
			75%	169
	INTERFERENCIAS CICLO MECANIZADO	39,8	-53%	-211
			-25%	-101
			20%	80
			69%	275
	METROS DE AVANCE POR CICLO MECANIZADO	3,5	-23%	380
			-9%	121
			9%	-100
			24%	-240

Tabla 8.14: Resumen del análisis de sensibilidad para Frente 4.

Gráfico de Araña	Nombre de entrada	Indicador Histórico	Cambio en el Indicador (%)	Impacto en Días
FRENTE 4	FORTIFICACIÓN MECANIZADA	22,3	-61%	-36
			-27%	-16
			23%	13
			75%	44
	COLOCACIÓN DE PERNOS	14,1	-72%	-27
			-25%	-9
			22%	8
			97%	36
	INTERFERENCIAS CICLO MECANIZADO	39,8	-53%	-55
			-25%	-26
			20%	21
			69%	72
	METROS DE AVANCE POR CICLO TIPO B	3,6	-28%	37
			-12%	12
			11%	-9
			29%	-21
	METROS DE AVANCE POR CICLO MECANIZADO	3,5	-23%	108
			-9%	34
			9%	-28
			24%	-68

L. RESULTADOS DE FACTORES DE CONSUMO

Tabla 8.15: Factores de Consumo obtenidos de la simulación mediante Deswik®.

Fecha Condición	Mayo 2018		Junio 2018		Julio 2018		Agosto 2018		Septiembre 2018		Octubre 2018	
	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ
Consumo de Agua (m3)	6 753	4 266	5 032	4 255	5 486	5 553	5 796	6 095	5 568	5 860	5 672	5 689
Consumo de Aire (kcfm)	1 549	780	740	435	639	640	728	823	829	906	783	799
Consumo de Energía (kWh)	1 337 624	817 466	951 791	788 398	1 021 889	1 028 877	1 089 802	1 150 814	1 049 911	1 113 435	1 075 543	1 097 724
Consumo de Explosivo (kg)	29 519	22 275	24 103	21 124	27 089	27 464	28 576	30 002	27 447	28 795	27 835	27 764
Consumo de Malla (rollos)	421	286	348	309	409	411	419	429	405	419	403	413
Consumo de Shotcrete (m3)	635	438	497	436	566	571	597	628	575	602	585	591
Consumo de Pernos Rosca (unidades)	7 798	5 265	6 165	5 396	7 083	7 133	7 398	7 705	7 122	7 444	7 230	7 343
Consumo de Pernos Split Set (unidades)	2 818	2 081	2 326	2 095	2 691	2 728	2 830	2 967	2 712	2 841	2 757	2 743
Toneladas Marinas (tons)	53 501	26 732	35 743	26 937	34 616	35 060	36 405	38 158	34 918	36 481	35 350	35 201
Fecha Condición	Noviembre 2018		Diciembre 2018		Enero 2019		Febrero 2019		Marzo 2019		Abril 2019	
	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ	Sin Altos σ	Con Altos σ
Consumo de Agua (m3)	5 539	5 575	4 939	5 177	4 078	4 570	3 610	4 088	3 731	4 439	6 177	6 137
Consumo de Aire (kcfm)	800	794	677	734	482	633	382	560	385	557	848	806
Consumo de Energía (kWh)	1 042 708	1 060 180	914 162	970 747	754 520	871 039	662 020	787 036	684 935	845 111	1 130 698	1 118 501
Consumo de Explosivo (kg)	27 000	27 009	24 354	25 358	19 980	22 117	17 726	19 625	18 342	21 326	29 167	28 939
Consumo de Malla (rollos)	392	402	357	373	289	316	258	292	276	324	437	441
Consumo de Shotcrete (m3)	570	574	509	532	421	471	372	423	383	454	640	634
Consumo de Pernos Rosca (unidades)	7 004	7 115	6 326	6 629	5 236	5 831	4 632	5 293	4 841	5 753	7 685	7 669
Consumo de Pernos Split Set (unidades)	2 705	2 705	2 451	2 545	2 034	2 235	1 793	1 972	1 829	2 115	3 216	3 195
Toneladas Marinas (tons)	34 620	34 601	31 370	32 592	25 958	28 574	22 921	25 254	23 446	27 098	41 306	41 045

M. DESGLOSE DE TIEMPOS DE CICLO Y CANTIDAD DE CICLO POR DÍA SEGÚN EQUIPO

Tabla 8.16: Desglose de tiempo de ciclo por nivel y en función del desplazamiento realizado.

Equipo	Mismo Nivel					Compartiendo Recurso en Otros Niveles.				
	UCL	NP	NTI	SNV 1	SNV 2	UCL	NP	NTI	SNV 1	SNV 2
Cargador Frontal	2,68	3,44	5,18	3,60	5,59	2,98	3,78	5,47	3,80	5,79
Scoop	2,68	3,44	5,18	3,60	5,59	2,98	3,78	5,47	3,80	5,79
Acuñador	0,68	0,64	0,69	0,78	0,78	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
Jumbo de Avance	2,79	2,95	4,01	3,43	4,16	3,30	3,50	4,50	3,82	4,54
Jumbo de Fortificación	2,04	2,30	4,05	2,46	6,10	2,54	2,85	4,54	2,85	6,48
Roboshot	0,82	0,91	1,07	0,95	1,30	1,35	1,47	1,58	1,38	1,73

Tabla 8.17: Desglose de cantidad de ciclos por nivel sin considerar fallas graves.

Equipo	Se desplaza en el mismo nivel					Se desplaza entre niveles				
	UCL	NP	NTI	SNV 1	SNV 2	UCL	NP	NTI	SNV 1	SNV 2
Cargador Frontal	4,4	3,4	2,3	3,3	2,1	3,9	3,1	2,1	3,1	2,0
Scoop	4,3	3,3	2,2	3,2	2,1	3,9	3,0	2,1	3,0	2,0
Acuñador	16,7	17,7	16,5	14,7	14,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
Jumbo de Avance	4,0	3,8	2,8	3,2	2,7	3,4	3,2	2,5	2,9	2,4
Jumbo de Fortificación	5,5	4,9	2,8	4,6	1,9	4,4	4,0	2,5	4,0	1,7
Roboshot	14,0	12,7	10,8	12,2	8,9	8,5	7,8	7,3	8,4	6,7

Tabla 8.18: Desglose de cantidad de ciclos por nivel considerando fallas graves.

Equipo	Empírico					Juicio Experto				
	UCL	NP	NTI	SNV 1	SNV 2	UCL	NP	NTI	SNV 1	SNV 2
Cargador Frontal	2,8	2,2	1,4	2,1	1,3	2,5	2,0	1,4	2,0	1,3
Scoop	3,2	2,5	1,7	2,4	1,5	2,9	2,3	1,6	2,3	1,5
Acuñador	12,4	13,2	12,2	10,9	10,9	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Jumbo de Avance	2,9	2,7	2,0	2,3	1,9	2,4	2,3	1,8	2,1	1,8
Jumbo de Fortificación	4,6	4,1	2,3	3,8	1,5	3,7	3,3	2,1	3,3	1,5
Roboshot	10,8	9,8	8,3	9,4	6,8	6,6	6,0	5,6	6,4	5,1

N. CONSTRUCCIÓN DE PLANILLA PARA LA PLANIFICACIÓN DIARIA

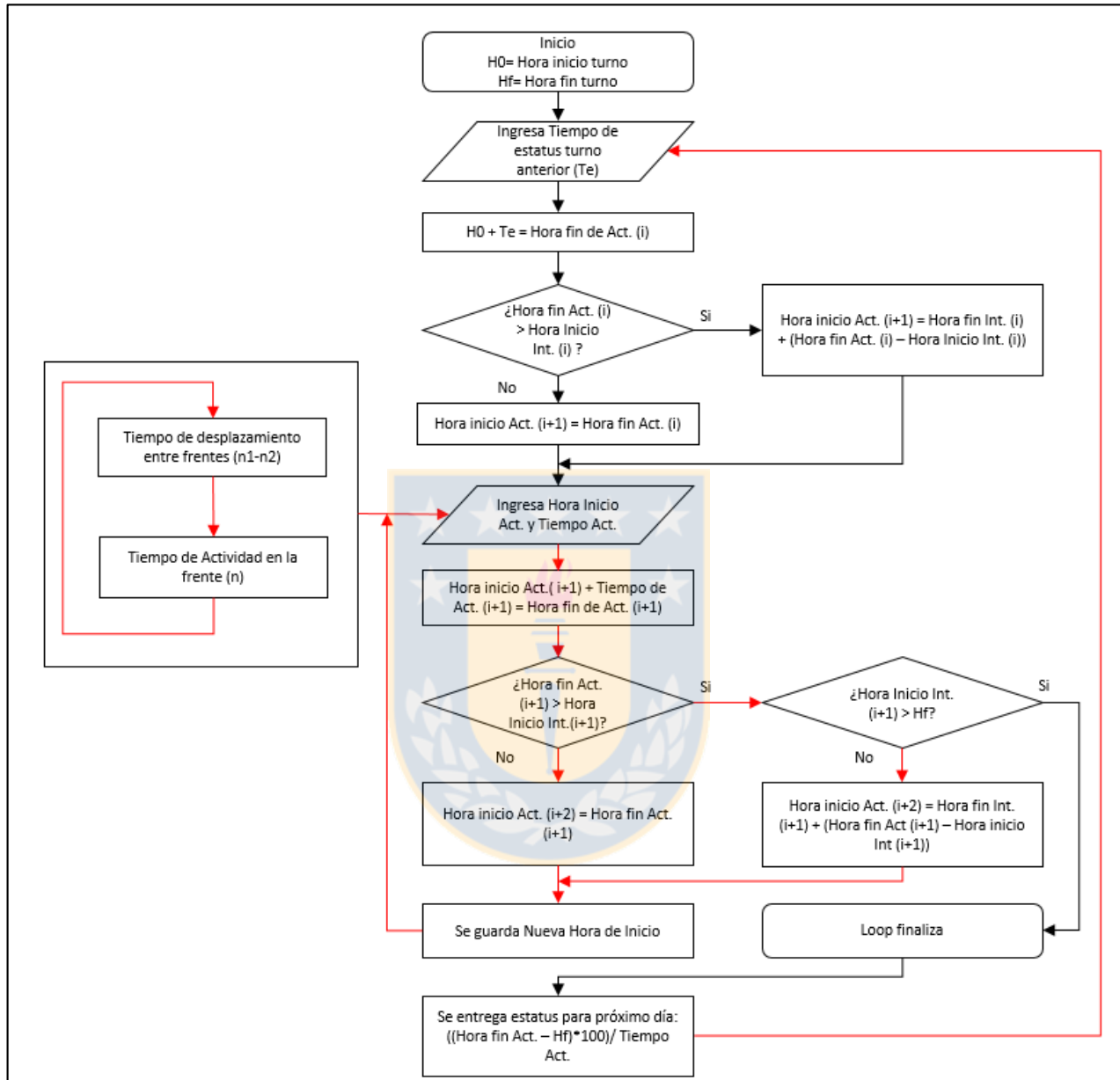


Figura 8.12: Diagrama de flujo macros planilla de planificación, fase 1.

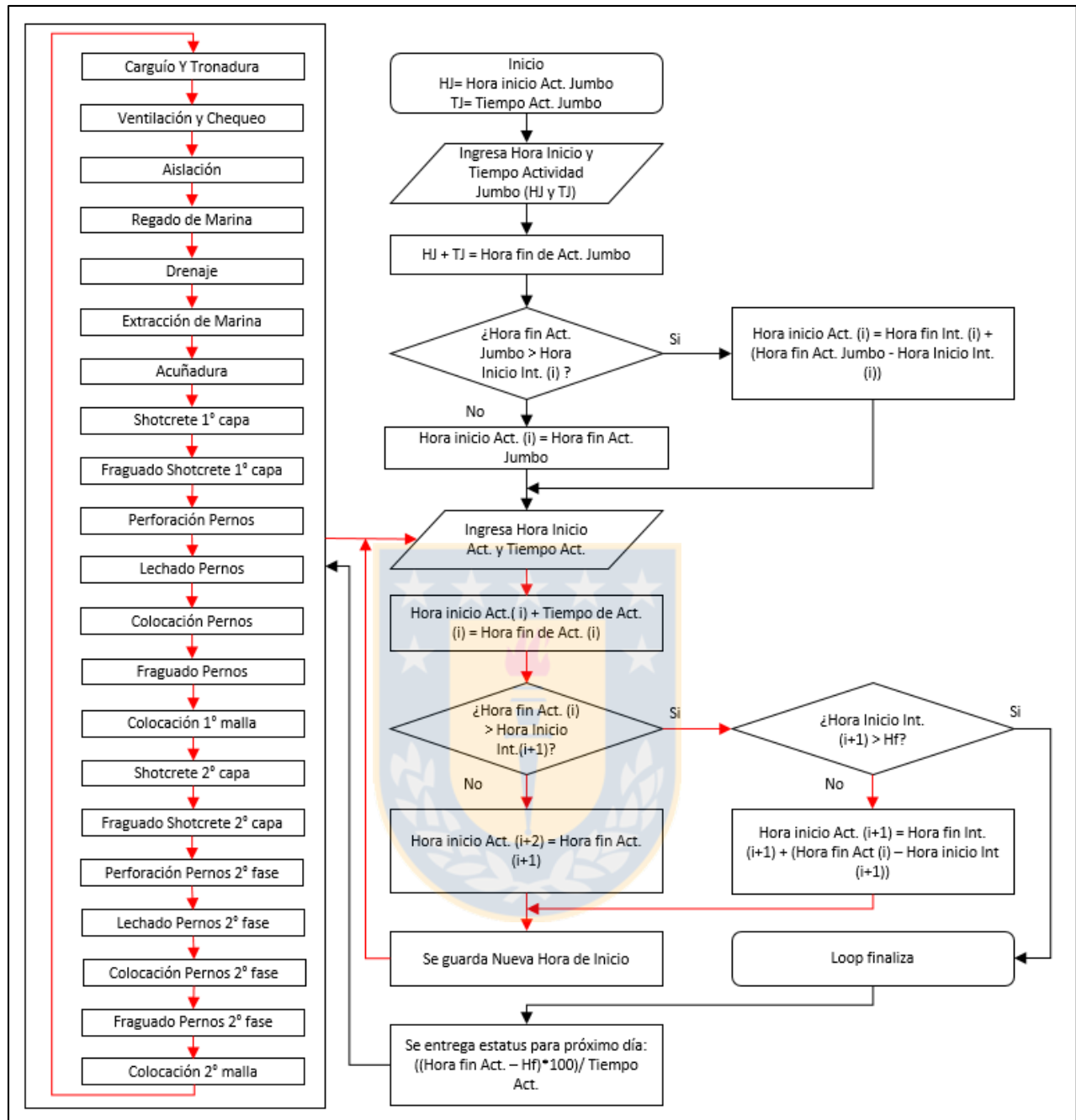


Figura 8.13: Diagrama de flujo macros planilla de planificación, fase 2.

Formulario

Disponibilidad

J-001	J-002	J-003	J-004
☒ Operativo	☒ Operativo	☒ Operativo	☒ Operativo
☐ Fuera de servicio	☐ Fuera de servicio	☐ Fuera de servicio	☐ Fuera de servicio

Estatus turno anterior

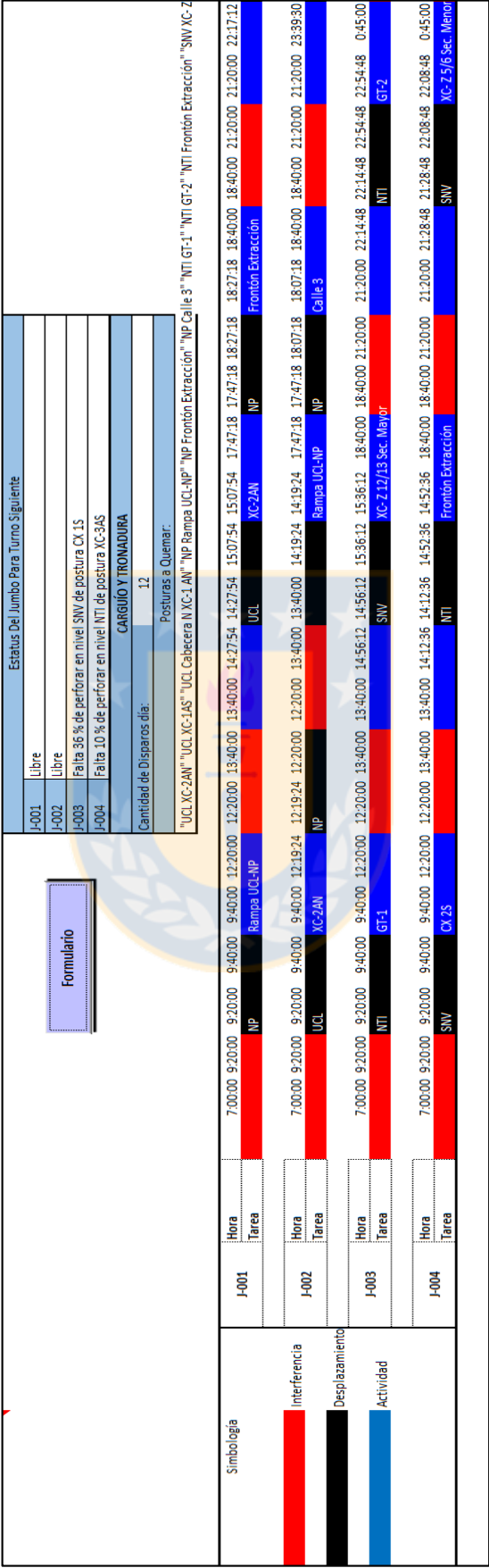
J-001	J-002	J-003	J-004	
Libre	Falta 25%	Falta 50%	Falta 50%	Estatus
	NTI	SNV	NP	Nivel
	Xc 4	Xc 12/13 sec. Mayor	Zanja 1	Postura

Frentes planificados

J-001	J-002	J-003	J-004	
UCL Cale 15	SNV Xc 5/6 sec.	SNV Xc 12/13 se	UCL Cale 12	Frente 1
NP Cale 11	NTI GT 3	NTI GT 3	NP Zanja 3	Frente 2
UCL Xc 1 AS	SNV Cabecera	SNV Cabecera	UCL Xc 2 AS	Frente 3
NP Zanja 5	NTI Xc 3	SNV Conexión	NP Cabecera H	Frente 4
Nivel Postura	Nivel Postura	Nivel Postura	Nivel Postura	

Comenzar

Figura 8.14: Formulario de Iniciación Macros de Planificación.



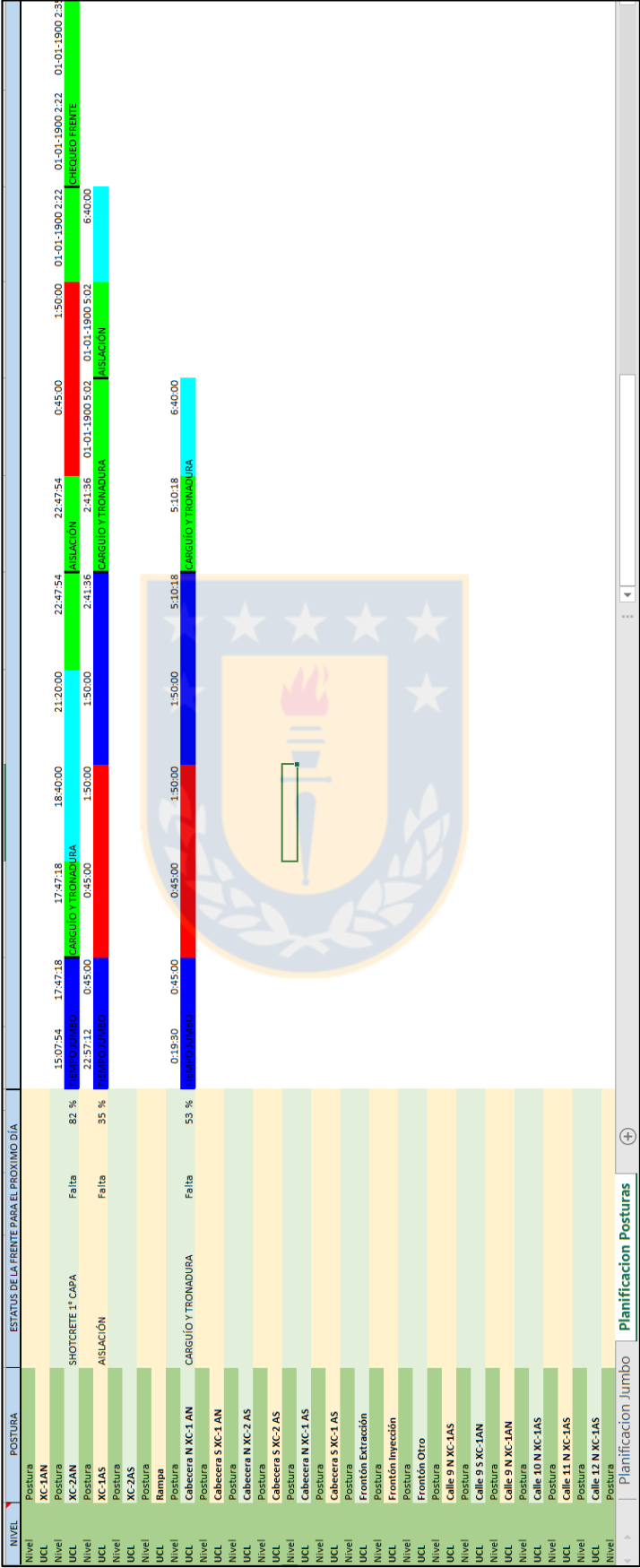


Figura 8.16: Resultado de planilla fase 2, planificación diaria por postura.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: “Efecto de la Constructibilidad en Minería Subterránea Bajo Condición de Altos Esfuerzos: Caso de estudio Proyecto Andes Norte - Nuevo Nivel Mina”													
Nombre Memorista: Cristobal Eduardo Ritter Gutiérrez													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Modalidad</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td>Concepto</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Calificación</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fecha</td> <td></td> </tr> </table>	Modalidad		Concepto		Calificación		Fecha		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Profesor (es) Patrocinante (s)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">René Gómez Puigpinos</td> </tr> <tr> <td>Ingeniero Supervisor: Claudio Paillamán Olivia</td> </tr> <tr> <td>Institución: Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO</td> </tr> </table>	Profesor (es) Patrocinante (s)	René Gómez Puigpinos	Ingeniero Supervisor: Claudio Paillamán Olivia	Institución: Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO
Modalidad													
Concepto													
Calificación													
Fecha													
Profesor (es) Patrocinante (s)													
René Gómez Puigpinos													
Ingeniero Supervisor: Claudio Paillamán Olivia													
Institución: Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Prof. Roberto Fustos Toribio</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> </table>		Prof. Roberto Fustos Toribio											
Prof. Roberto Fustos Toribio													
Comisión (Nombre y Firma)													
----- Prof. Asieh Hekmat	----- Ing. Sebastián Armijo												
Resumen													
Memoria de Título realizada en el Proyecto Andes Norte – Nuevo Nivel Mina en la Gerencia de Operaciones Mina, área de Constructibilidad. En dicho informe se identifican y cuantifican los impactos que la condición de altos esfuerzos tiene en la constructibilidad del proyecto, para luego proponer mejoras operacionales y de planificación que permitan aumentar la performance del desarrollo de las labores. Los objetivos se logran mediante la simulación de la constructibilidad y los plazos de ejecución utilizando las herramientas Deswik® y @Risk®. Además de la realización de benchmarking de costos con las unidades productivas de la división. Como resultado destaca que los tiempos de ciclo minero pueden llegar a ser hasta 4 veces mayores en condición de altos esfuerzos, debido a la aplicación de medidas de mitigación del riesgo sísmico como el preacondicionamiento, el robustecimiento de la fortificación y protocolos de pre y post tronadura. Respecto a los costos se observa que el metro lineal de túnel puede llegar a ser hasta 3,6 veces mayor en condición de altos esfuerzos. Aun cuando los resultados parecen negativos, se proponen una serie de medidas que, si bien no garantizan la competitividad respecto a tiempos de construcción en condiciones favorables, permitirán mejorar el proceso. Por otro lado, se debe recordar que todas las medidas aplicadas validan la constructibilidad del proyecto, por lo que independiente del costo (monetario y de tiempo) se prioriza resguardar la promesa de valor del mismo garantizando su ejecución.													