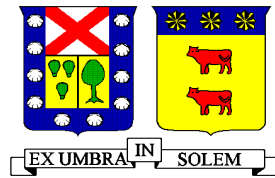


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



EVALUACIÓN DEL RIESGO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES
UTILIZANDO SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Memoria de titulación presentada por
CRISTIAN GUERRERO LOYOLA

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
RAUL GALINDO, MARCOS VALDEBENITO

Septiembre del 2019

AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer a todas
las personas que me apoyaron
en este largo camino, de fracasos y triunfos,
,principalmente de lecciones de vida.
Este logro forma parte
de cada uno de ustedes que me alentaron
y me dieron su apoyo para continuar,
con perseverancia y esfuerzo,
Sobre todo a mi familia por
ese apoyo incondicional que he tenido
todos estos años.*



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

INDICE

RESUMEN.....	1
SUMMARY	2
1 INTRODUCCIÓN.....	3
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivos generales	5
2.2 Objetivos específicos	5
3 REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1 Los Proyectos	6
3.2 La Dirección de Proyectos	6
3.3 El ciclo de vida de los proyectos.....	7
3.3.1 Características del ciclo de vida del proyecto	7
3.4 Riesgos en los Proyectos	8
3.5 Gestión de Riesgos.....	9
3.5.1 Planificar la Gestión de Riesgos.....	9
3.5.2 Identificar los Riesgos.....	10
3.5.3 Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos:	11
3.5.4 Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos:	12
3.5.5 Planificar la Respuesta a los Riesgos:	15
3.5.6 Monitorear y Controlar los Riesgos:	17
3.6 Incertezas en la construcción de túneles.....	17
3.7 Incertezas de la Excavación en suelos.....	21
4 PROYECTO EN ESTUDIO.....	25
4.1 Metodologías de Construcción:	25
4.1.1 Acceso a Túneles interestación.....	25
4.1.2 Secuencia constructiva:	26
4.1.2.1 Secuencia Constructiva de Revestimiento Primario:	26
4.1.2.2 Secuencia Constructiva de Revestimiento Secundario:	29
4.2 Descripción General de las obras.....	30
4.2.1 Recursos Asociados.	33
4.2.2 Planificación de la obra.	34
4.2.2.1 Planificación física y temporal	34
4.2.2.2 Planificación Económica:	36
5 METODOLOGIA DE SIMULACIÓN	38

5.1	¿Qué es la simulación Monte Carlo?	38
5.2	El proceso de Simulación Monte Carlo	38
5.3	Modelo de riesgo	39
5.4	Selección de las funciones de Probabilidad.	41
5.5	Identificación de las variables sobre las cuales medir el riesgo.	42
5.6	Simulación	42
5.7	Generación de informes y obtención del Perfil de Riesgo	43
5.7.1	Histograma:	43
5.7.2	Análisis de Sensibilidad	44
5.7.3	Valor en riesgo (VaR)	45
6	SELECCIÓN DE LAS VARIABLES	47
6.1	Variables Geotécnicas o geométricas	47
6.2	Variables de medición	48
6.3	variables de tiempo	49
6.4	Rendimientos	49
6.4.1	Selección de las distribuciones de probabilidades.	50
6.5	Diagrama de flujo	65
7	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE OBRA.	66
8	ESTUDIO DE COSTOS	70
8.1	Introducción	70
8.2	Algoritmo de Costo	70
8.3	Detalle de costos	72
8.3.1	Costo directo	72
8.3.2	Costo Indirecto	76
9	RESULTADOS	80
9.1	Estudio de las variables de entrada	80
9.2	Plazo del Proyecto	82
9.3	Costo del proyecto	83
9.4	Riesgo del Proyecto	86
10	CONCLUSIÓN	90
	REFERENCIA	91
	ANEXO 1	93
	ANEXO 2	103
	ANEXO 3	108
	ANEXO 4	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplos de Distribuciones de Probabilidad Comúnmente Utilizadas	13
Figura 2: Vista en Corte vertical y corte transversal de piques.....	25
Figura 3: Diagrama del Ciclo de Construcción del Túnel.....	26
Figura 4: Frente de Excavación	27
Figura 5: Colocación de Sello (Hormigón Proyectado)	27
Figura 6: Colocación de Malla electrosoldada	28
Figura 7: Colocación de marco metálico	28
Figura 8: Colocación Revestimiento Primario	29
Figura 9: Colocación de Malla Electrosoldada.....	30
Figura 10: Túnel 1	31
Figura 11: Túnel 2	31
Figura 12: Sección Típica de Túnel Interestación.....	32
Figura 13: Carta Gantt Túnel 1, en color rojo la ruta crítica.....	35
Figura 14 : Carta Gantt Túnel 2, en color rojo la ruta crítica.....	35
Figura 15: Diagrama de flujo, pasos del modelo de riesgo.....	40
Figura 16: Distribución de Probabilidades.....	41
Figura 17: Histograma.....	43
Figura 18: Tornado de Sensibilidad	44
Figura 19: Diagrama de Flujo, del modelo para los cálculos de los tiempos y costos de la obra.....	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de Probabilidad de Impacto.....	12
Tabla 2: Rango de Estimación de Costos.....	12
Tabla 3: Clasificación de frecuencias para distintos eventos.....	19
Tabla 4: Clasificación de riesgos.....	19
Tabla 5: Resumen de distancias y longitud de los túneles 1 y 2.....	32
Tabla 6: Mano de Obra Directa.....	33
Tabla 7: Maquinaria.....	34
Tabla 8: Rendimientos Planificados.....	36
Tabla 9: Planificación Venta, Costo y Resultado.....	37
Tabla 10: Geometría de túneles.....	47
Tabla 11: Cantidades de obra por sección.....	48
Tabla 12: Tiempos de trabajo disponibles.....	49

Tabla 13: Obtención de parámetros relevantes en situ de las obras.....	49
Tabla 14: Ajuste de distribución Beta a la excavación.....	51
Tabla 15: Ajuste de distribución Beta al Sello.....	52
Tabla 16: Ajuste de distribución Weibull a la colocación de malla.....	53
Tabla 17: Ajuste de distribución Log Normal a la colocación del marco.....	54
Tabla 18: Ajuste de distribución Log Normal a la Proyección de HP-1.	55
Tabla 19: Ajuste de distribución Weibull a la colocación de malla.....	56
Tabla 20: Ajuste de distribución Log Normal a la Proyección de HP-1.	57
Tabla 21: Control de Producción, mínimo, máximo, y promedio.	58
Tabla 22: Ajuste distribución Beta a la Eficiencia del sistema [%].....	59
Tabla 23: Ajuste distribución Uniforme a las pérdidas de shotcrete [%].....	59
Tabla 24: Ajuste distribución Uniforme a las pérdidas de shotcrete [%].....	60
Tabla 25: Extracto de informe de avances.....	60
Tabla 26: Distribución del espaciamiento entre marcos.	61
Tabla 27: Ajuste distribución discreta al espaciamiento de marcos.	61
Tabla 28: Extracto de control de desprendimientos.....	62
Tabla 29: Distribución uniforme de espaciamiento de marcos.	63
Tabla 30: Distribuciones de desprendimiento según espaciamiento de marco.....	63
Tabla 31: Resumen de Variables en estudio.	64
Tabla 32: Espaciamiento de marcos [m].....	67
Tabla 33: Distribución de Desprendimiento.	67
Tabla 34: Distribución triangular.....	71
Tabla 35: Costos de Mano de Obra, Dependientes del tiempo.	73
Tabla 36: Costos de Mano de Obra, Independientes del tiempo.....	73
Tabla 37: Costos de Materiales.....	74
Tabla 38: Costo de la Maquinaria alquilada.	74
Tabla 39: Costo de la Maquinaria propia.	75
Tabla 40: Costos de Subcontratos.	75
Tabla 41: Costos Industriales.....	76
Tabla 42: Costos Pendientes o por Definir.	76
Tabla 43: Otros Costos.	76
Tabla 44: Costos de Mano de Obra Indirecta.	77
Tabla 45: Costos de Maquinaria y elementos auxiliares alquilados.	78
Tabla 46: Costos de Liquidación de la Obra.	78
Tabla 47: Costos de Tasas y tributos.....	78
Tabla 48: Otros Costos Indirectos.....	79

Tabla 49: Costos de Estructura.....	79
Tabla 50: Ciclo de construcción del túnel en horas.	80
Tabla 51: Resumen de rendimientos por tramos de túnel 1.	83
Tabla 52: Resumen de la duración de la Obra.	83
Tabla 53: Ponderación del costo dependiente (DT) e independiente del tiempo (IT), respecto al total.	84
Tabla 54: Costos resumen del túnel 1.	85
Tabla 55: Costo vs Tiempo Túnel 1.	87
Tabla 56: Resumen de Perfil de Riesgo.	89

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Niveles Típicos de costos y dotación de personal durante el Ciclo de vida de Proyectos	7
Gráfico 2: Impacto de la variable en función del tiempo del proyecto	8
Gráfico 3: Ejemplo de Diagrama con Forma de Tornado	14
Gráfico 4: Resultados de Simulación de los Riesgos Relativos a los Costos	15
Gráfico 5: Colapsado en la construcción de túneles, en los últimos 80 años.....	18
Gráfico 6: Gráfico de dispersión costo - Tiempo.....	20
Gráfico 7: VaR	45
Gráfico 8: Rendimiento en excavar una sección tipo [m ³ /hr].	51
Gráfico 9: Rendimiento en la proyección de sello [m ³ /hr].	52
Gráfico 10: Rendimiento en la colocación de Malla Acma C-335 [m ² /hr].	53
Gráfico 11: Rendimiento en la colocación de marco metálico [un/hr].	54
Gráfico 12: Rendimiento en la proyección de shotcrete (HP-1) en [m ³ /hr].	55
Gráfico 13: Rendimiento en la colocación de Malla Acma C-335 [m ² /hr].	56
Gráfico 14: Rendimiento en la proyección de shotcrete (HP-2) en [m ³ /hr].	57
Gráfico 15: Producción de [%] del Proceso Constructivo.	58
Gráfico 16: Producción y detención.	59
Gráfico 17: Distribución Discreta del espaciamiento entre marcos.	61
Gráfico 18: Desprendimientos v/s espaciamiento marcos.	62
Gráfico 19: Tiempo de ejecución, del ciclo de producción.....	81
Gráfico 20: Análisis de sensibilidad de las variables de entrada.....	81
Gráfico 21: Costo vs Tiempo Túnel 1.....	84
Gráfico 22: Resumen del Costo del túnel 1.	85
Gráfico 23: Costos según su naturaleza.	86
Gráfico 24: Ajuste del costo a distribución logaritmo-Normal.	87
Gráfico 25: Ajuste del tiempo a distribución logaritmo-Normal.	88

Gráfico 26: Frecuencia Acumulada, Perfil del riesgo del costo en millones de pesos. 88

GLOSARIO

Clave: También conocido como corona o bóveda, corresponde al techo del túnel. Generalmente posee forma curva.

Contrabóveda: Corresponde a un elemento ubicado bajo el piso del túnel. Generalmente posee forma curva y se coloca en secciones geológicas de calidad baja, para evitar la deformación del túnel.

Determinístico: Un modelo determinístico es un modelo matemático donde las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas, no contemplándose la existencia del azar ni el principio de incertidumbre.

Estocada: La primera sección del túnel de unos 15 a 30 m que se construyen a continuación de los piques de acceso.

Frente o frente de avance: Determina la dirección del túnel y de la excavación.

ITO: La inspección técnica de obra es la etapa que sigue y consiste básicamente en representar al propietario durante la ejecución del proyecto

Malla Acma o electrosoldada: Barras de acero soldadas que forma paños de 2,6 x 5,0m en su formato estándar.

Marcos metálicos: Estructuras metálicas, en forma de la sección de túnel, que sirven para dar estabilidad estructural a la sección.

Marina: Material resultante del proceso de excavación del túnel.

Monte Carlo: Método no determinista que se utiliza para aproximar expresiones de matemáticas complejas de evaluar con exactitud.

N.A.T.M: Nuevo método Austriaco de construcción de túneles, para suelos blandos. Metodología utilizada en la construcción del metro en Santiago de Chile.

Pique: Es una perforación en forma vertical en la cual se puede utilizar como acceso de maquinaria y de personal, para la construcción de túneles.

Prueba de ajuste de bondad chi-cuadrado: Sirve para someter a prueba hipótesis referidas a distribuciones de frecuencias. Probar la bondad de un ajuste es ver en qué medida se ajustan los datos observados a una distribución teórica o esperada.

Pseudo-aleatorio: es un número generado en un proceso que parece producir números al azar, pero no lo es realmente. Las secuencias de números pseudo-aleatorios no muestran ningún patrón o regularidad aparente desde un punto de vista estadístico, a pesar de haber sido generadas por un algoritmo completamente determinista.

RCA: Resolución de calificación Ambiental, es el documento administrativo, que una vez culminado el proceso de evaluación, del estudio de impacto ambiental, establece si éste ha sido aprobado, rechazado o aprobado con condiciones.

Sección Túnel: Forma geométrica transversal que posee un túnel.

Sello Excavación: Primera cama de hormigón proyectado, cuya finalidad es, evitar desmoronamiento de terreno, por lo que se considera un elemento de seguridad para los trabajadores. Se aplica preferentemente en método N.A.T.M.

Shotcrete: Hormigón proyectado.

Sobre excavación: Excavación adicional, a la propia sección del túnel, producida por varios factores como por ejemplo desprendimientos o errores en la excavación produciendo un aumento de ésta.

Sostenimiento: Elemento de protección de la roca viva del túnel que puede estar compuesto de distintos elementos dependiendo del proyecto, por ejemplo, pernos de fortificación, mallas, hormigón proyectado, marcos reticulados, entre otros.

RESUMEN

El trabajo tiene como finalidad proponer una metodología para calcular los costos de un proyecto de construcción, y se presenta como ejemplo la construcción de 2 túneles interestación del Metro de Santiago, considerando la incertidumbre asociada a los procesos constructivos y cuantificando su impacto en tiempo y costo de construcción. Para esto se utilizó el método Monte Carlo que incorpora la incertidumbre, asignando valores de manera aleatoria, obteniendo como resultado diferentes escenarios, y con esto representar un modelo que se ajuste mejor a la realidad, ya que ningún proceso es perfecto.

La metodología que se presenta consta, de la creación de un modelo que tiene como finalidad determinar en un principio el tiempo que se demora la construcción del túnel y por último el costo del proyecto.

El modelo tiene como punto de partida, la obtención de datos en terreno, con los cuales se determinan funciones de probabilidad y rendimientos, que mejor se ajuste a cada variable que intervienen en el proceso constructivo. Con estos rendimientos se obtiene el tiempo de ejecución del proyecto de construcción.

Los costos del proyecto se diferencian en independientes y dependientes del tiempo, los cuales se determinarán con variables aleatorias triangulares. Este último se relaciona directamente con el tiempo, obteniendo el costo total del proyecto.

Ya obteniendo el tiempo y costo total, se determina el riesgo económico del proyecto, lo que permitirá mejores decisiones a la hora de ejecutar el proyecto.

SUMMARY

This work has the purpose to propose a methodology in order to calculate the costs of a construction project and it is exemplified by analyzing the construction of two tunnels of Santiago subway interstation, considering the uncertainty known to the construction processes and quantifying their impact in time and cost of construction. For this purpose it was used the Monte Carlo method that incorporates uncertainty, assigning values randomly, obtaining as a result different scenarios and with this represent a model that best fits to the reality, as no process is perfect.

The methodology presented, consists in the creation of model that aims at determining the duration of the tunnel construction and the project cost.

The model has as a starting point, the collection of field data are which determine probability functions and performance that fits each variable that intervene in the constructive process. With these performances the execution time of the construction project is obtained.

The project costs differ between dependent and independent of time, which are determined with triangular random variables. This last point is directly related to the time, obtaining the total project cost.

Finally obtained the time and the total cost, the economic risk associated with the project is determined, which will allow better decisions when executing the project.

1 INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo se gesta a través de la inquietud de la empresa Dragados (responsable de la construcción de 2 tramos de túneles del metro en Santiago), en determinar los plazos y costos finales de las obras.

Hoy en día, la estimación de costos y plazos en la construcción de túneles, se generan a través de valores deterministas o promedios, lo que normalmente no reflejan la realidad, por no considerar las situaciones particulares de cada proyecto. Por ejemplo, en la construcción de túneles, hay que tener en cuenta: tipo de terreno; grava, mixto o fino, tipos de secciones; recta o curva, y la ocurrencia de imprevistos como son los desprendimientos, que hacen variar de forma significativa los plazos de construcción y por consiguiente los costos.

Es importante destacar que la información de los plazos y costos es de vital importancia para etapas tempranas de los proyectos, donde se evalúan las inversiones tanto de parte del mandante como del contratista. En esta etapa es donde existen las mayores incertidumbres, obligando a quienes toman las decisiones considerar escenarios desfavorables, lo que genera proyectos más costosos y con mayores plazos.

En cuanto a la realidad nacional, las construcciones de túneles, están tomando un papel fundamental para el sistema de transporte público. No solo por las grandes inversiones involucradas en este tipo de construcciones, sino también a la expectativa de la población en general, por sus beneficios directos e indirectos, como sería el mejoramiento de la calidad del transporte público, que conlleva una reducción de las congestiones en las vías, disminución de los tiempos de viajes y accidentabilidad de tránsito, entre otras cosas.

Tomando en cuenta la problemática planteada y la importancia de estas obras, el objetivo de este trabajo es proponer una metodología para determinar los plazos y costos, involucrados en la construcción de túneles que se realizan con el método N.A.T.M. (New Austrian Tunelling Method).

Para conseguir información fidedigna de la realidad nacional, se realizó una recopilación in situ, en un tiempo de alrededor de un año, de dos tramos de túneles que corresponden a la Línea 6 del Metro de Santiago. Donde se obtuvieron; plazos de construcción, tasas de avance, mano de obra, turnos, materiales, maquinaria e imprevistos ocurridos en el proceso de construcción.

Esta metodología incorpora el método Monte Carlo, con el cual se pretende incorporar la incertidumbre o riesgo inherente en todo proceso constructivo. Monte Carlo es útil para ámbitos

donde el comportamiento aleatorio de sus variables, desempeña un papel fundamental y que permite simular todo el espectro de soluciones probables, con un nivel de confiabilidad determinada.

La metodología consiste en entregar los pasos necesarios, para identificar, seleccionar y cuantificar las variables más importantes que intervienen en el proceso constructivo, y por otro lado, dar herramientas para el análisis y discusión de los resultados. En este último se coloca énfasis en determinar el riesgo económico asociado a este tipo de construcción.

El resultado final será la propuesta de una metodología, la cual determina a través de un modelo los tiempos y finalmente los costos de la construcción de túneles para trenes subterráneos en Chile, incorporando los riesgos inherentes de su proceso constructivo.

2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es implementar una metodología que permita poder estimar los costos y plazos de proyectos de construcción de túneles en Chile considerando el nivel de riesgo asociado a la construcción.

Se utilizarán datos de proyectos ejecutados en Chile, para así obtener resultados aplicables a la realidad nacional. La estimación entregará costos y plazos con un margen de error conocido.

La metodología considera el uso del método de Monte Carlo para la simulación de eventos futuros, basados en información recopilada en terreno.

2.1 OBJETIVOS GENERALES

Establecer una metodología para la estimación de tiempos y costos en la construcción de túneles en Chile utilizados para la construcción del metro en Santiago, con sistema N.A.T.M.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar información de proyectos construidos en Chile con la metodología de excavación N.A.T.M.
- Determinar las variables más importantes que afectan los tiempos y costos en la construcción de túneles.
- Implementar una metodología utilizando el método Monte Carlo, que permita estimar plazos y costos en la construcción de túneles.
- Identificar de forma cualitativa y cuantitativa el riesgo o incertidumbre a estos tipos de proyectos.
- Determinar el nivel de riesgo de construcción del proyecto.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo tiene la finalidad de dar contexto y sustento al presente trabajo, además de detectar y consultar con las fuentes bibliográficas, información relevante y necesaria relacionada a las variables bajo investigación. Con esto se desarrollará un marco teórico, sobre la base de estudios e investigaciones que se han realizado sobre el problema planteado.

3.1 LOS PROYECTOS

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único. La naturaleza temporal de los proyectos indica un principio y un final definidos. El final se alcanza cuando se logran los objetivos del proyecto o cuando se termina el proyecto porque sus objetivos no se cumplirán o no pueden ser cumplidos, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al proyecto. Debido a la naturaleza única de los proyectos, puede existir incertidumbre respecto de los productos, servicios o resultados que el proyecto genera [PMBOK].

3.2 LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS

La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo. Se logra mediante la aplicación de las siguientes etapas [PMBOK].

- Iniciación,
- Planificación,
- Ejecución,
- Seguimiento y Control, y
- Cierre.

Dirigir un proyecto por lo general implica:

- Identificar requisitos,
- Abordar las diversas necesidades, inquietudes y expectativas de los interesados según se planifica y efectúa el proyecto,
- Equilibrar las restricciones contrapuestas del proyecto que se relacionan, entre otros aspectos, con:
 - El alcance,
 - La calidad,
 - El cronograma,

- El presupuesto,
- Los recursos y
- El riesgo.

3.3 EL CICLO DE VIDA DE LOS PROYECTOS

El ciclo de vida del proyecto es un conjunto de fases, generalmente secuenciales y en ocasiones superpuestas, cuyo nombre y número se determinan por las necesidades de gestión control de la organización u organizaciones que participan en el proyecto, la naturaleza propia del proyecto y su área de aplicación. Un ciclo de vida puede documentarse con ayuda de una metodología. Mientras que cada proyecto tiene un inicio y un final definidos, los entregables específicos y las actividades que se llevan a cabo entre éstos variarán ampliamente de acuerdo con el proyecto. El ciclo de vida proporciona el marco de referencia básico para dirigir el proyecto, independientemente del trabajo específico involucrado.

3.3.1 Características del ciclo de vida del proyecto

Los proyectos varían en tamaño y complejidad. Todos los proyectos, sin importar cuán pequeños o grandes, o cuán sencillos o complejos sean, pueden configurarse dentro de la siguiente estructura del ciclo de vida:

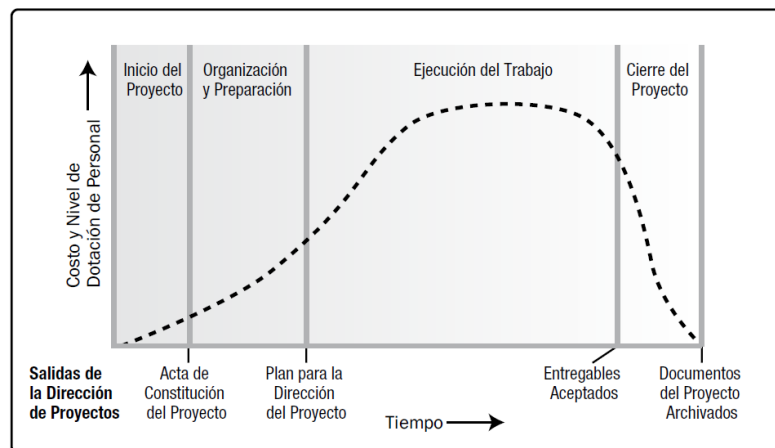


Gráfico 1: Niveles Típicos de costos y dotación de personal durante el Ciclo de vida de Proyectos

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

Esta perspectiva general puede proporcionar un marco de referencia común para comparar proyectos, incluso si son de naturaleza diferente.

La estructura genérica del ciclo de vida presenta por lo general las siguientes características:

- Los niveles de costo y dotación de personal son bajos al inicio del proyecto, alcanzan su punto máximo según se desarrolla el trabajo y caen rápidamente cuando el proyecto se acerca al cierre. Este patrón típico está representado en el Gráfico 1.
- La influencia de los interesados, al igual que los riesgos y la incertidumbre (según lo ilustrado en el Gráfico 2) son mayores al inicio del proyecto. Estos factores disminuyen durante la vida del proyecto.
- La capacidad de influir en las características finales del producto del proyecto, sin afectar significativamente el costo, es más alta al inicio del proyecto y va disminuyendo a medida que el proyecto avanza hacia su conclusión. El Gráfico 2 ilustra la idea de que el costo de los cambios y de corregir errores suele aumentar sustancialmente según el proyecto se acerca a su fin.

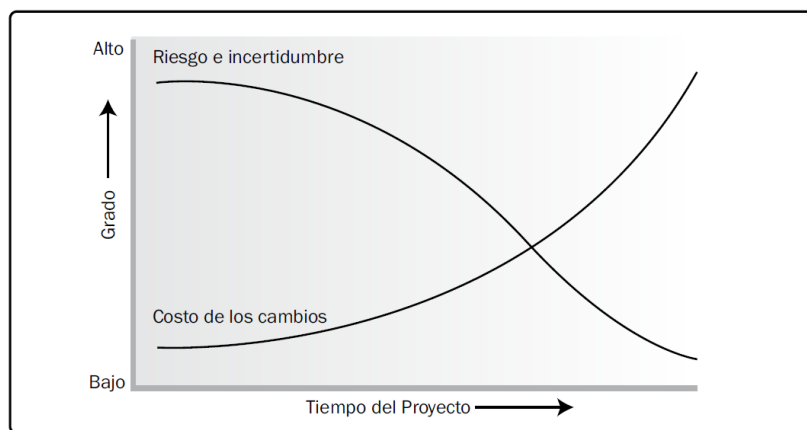


Gráfico 2: Impacto de la variable en función del tiempo del proyecto

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

3.4 RIESGOS EN LOS PROYECTOS

Los riesgos de un proyecto se ubican siempre en el futuro. Un riesgo es un evento o condición incierta que, si sucede, tiene un efecto en por lo menos uno de los objetivos del proyecto. Los objetivos pueden incluir el alcance, el cronograma, el costo y la calidad. Un riesgo puede tener una o más causas y, si sucede, uno o más impactos. Una causa puede ser un requisito, un supuesto, una restricción o una condición que crea la posibilidad de consecuencias tanto negativas como positivas. Por ejemplo, las causas podrían ser el requisito de obtener un permiso ambiental para realizar el trabajo, o contar con una cantidad limitada de personal asignado para el diseño del

proyecto. El evento de riesgo es que la agencia que otorga el permiso puede tardar más de lo previsto en emitir el permiso o, en el caso de una oportunidad, que la cantidad limitada de personal disponible asignado al proyecto pueda terminar el trabajo a tiempo y, por consiguiente, realizar el trabajo con una menor utilización de recursos. Si alguno de estos eventos inciertos se produce, puede haber un impacto en el costo, el cronograma o el desempeño del proyecto. Las condiciones de riesgo podrían incluir aspectos del entorno del proyecto o de la organización que pueden contribuir a poner en riesgo el proyecto, tales como prácticas deficientes de dirección de proyectos, la falta de sistemas de gestión integrados, la concurrencia de varios proyectos o la dependencia de participantes externos que no pueden ser controlados.

3.5 GESTIÓN DE RIESGOS

La Gestión de los Riesgos del Proyecto incluye los procesos relacionados con llevar a cabo la planificación de la gestión, la identificación, el análisis, la planificación de respuesta a los riesgos, así como su monitoreo y control en un proyecto. Los objetivos de la Gestión de los Riesgos del Proyecto son aumentar la probabilidad y el impacto de eventos positivos, y disminuir la probabilidad y el impacto de eventos negativos para el proyecto.

3.5.1 Planificar la Gestión de Riesgos

Es el proceso por el cual se define cómo realizar las actividades de gestión de los riesgos para un proyecto.

- **Técnicas Analíticas:** Las técnicas analíticas se utilizan para entender y definir el contexto general de la gestión de riesgos del proyecto. El contexto de la gestión de riesgos es una combinación entre las actitudes de los interesados frente al riesgo y la exposición al riesgo estratégico de un determinado proyecto sobre la base del contexto general del proyecto. Por ejemplo, se puede realizar un análisis del perfil de riesgo de los interesados a fin de clasificar y calificar el apetito y la tolerancia al riesgo de los interesados del proyecto. Otras técnicas, como el uso de hojas de calificación del riesgo estratégico, se utilizan para proporcionar una evaluación de alto nivel de la exposición al riesgo del proyecto sobre la base del contexto general del proyecto. En función de estas evaluaciones, el equipo del proyecto puede asignar los recursos adecuados y centrarse en las actividades de gestión de riesgos.
- **Juicio de Expertos:** Para asegurar una definición exhaustiva del plan de gestión de los riesgos se debe recabar el juicio y la experiencia de grupos o individuos con capacitación o

conocimientos especializados en el tema en cuestión, como por ejemplo: directores de proyectos en el mismo ámbito, expertos en la materia.

- **Reuniones:** Los equipos del proyecto celebran reuniones de planificación para desarrollar el plan de gestión de los riesgos. Los participantes de estas reuniones pueden ser, entre otros, el director del proyecto, miembros del equipo del proyecto e interesados seleccionados, cualquier persona de la organización con la responsabilidad de gestionar la planificación y ejecución de actividades relacionadas con los riesgos, así como otras personas, según sea necesario.

3.5.2 Identificar los Riesgos

Es el proceso por el cual se determinan los riesgos que pueden afectar el proyecto y se documentan sus características.

Entre los ejemplos de técnicas de recopilación de información utilizadas en la identificación de riesgos se cuentan:

- **Tormenta de ideas:** El objetivo de la tormenta de ideas es obtener una lista completa de los riesgos del proyecto. Por lo general, el equipo del proyecto efectúa tormentas de ideas, a menudo con un grupo multidisciplinario de expertos que no forman parte del equipo. Bajo el liderazgo de un facilitador, se generan ideas acerca de los riesgos del proyecto, ya sea por medio de una sesión tradicional y abierta de tormenta de ideas, o en una sesión estructurada donde se utilizan técnicas de entrevista masiva. Como marco de referencia pueden utilizarse categorías de riesgo, como en una estructura de desglose de riesgos. Posteriormente se identifican y categorizan los riesgos según su tipo, y se refinan sus definiciones.
- **Técnica Delphi:** La técnica Delphi es una manera de lograr un consenso de expertos. Los expertos en riesgos del proyecto participan en esta técnica de forma anónima. Un facilitador utiliza un cuestionario para solicitar ideas acerca de los riesgos importantes del proyecto. Las respuestas son resumidas y posteriormente enviadas nuevamente a los expertos para recabar comentarios adicionales. En pocas rondas de este proceso se puede lograr el consenso. La técnica Delphi ayuda a reducir sesgos en los datos y evita que cualquier persona ejerza influencias indebidas en el resultado.

- **Entrevistas:** La realización de entrevistas a los participantes experimentados del proyecto, a los interesados y a los expertos en la materia ayuda a identificar los riesgos.
- **Análisis de causa raíz:** El análisis de causa raíz es una técnica específica para identificar un problema, determinar las causas subyacentes que lo ocasionan y desarrollar acciones preventivas.
- **Análisis FODA:** Esta técnica examina el proyecto desde cada uno de los aspectos FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas) para aumentar el espectro de riesgos identificados, incluidos los riesgos generados internamente. La técnica comienza con la identificación de las fortalezas y debilidades de la organización, centrándose ya sea en el proyecto, en la organización o en el negocio en general.
- **Juicio de Expertos:** Los expertos con la experiencia adecuada, adquirida en proyectos o áreas de negocio similares, pueden identificar los riesgos directamente. El director del proyecto debe identificar a dichos expertos e invitarlos a considerar todos los aspectos del proyecto, y a sugerir los posibles riesgos basándose en sus experiencias previas y en sus áreas de especialización. En este proceso se deben tener en cuenta los sesgos de los expertos.

3.5.3 Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos:

Es el proceso que consiste en priorizar los riesgos para realizar otros análisis o acciones posteriores, evaluando y combinando la probabilidad de ocurrencia y el impacto de dichos riesgos.

- **Matriz de Probabilidad e Impacto:** Los riesgos se pueden priorizar con vistas a un análisis cuantitativo posterior y a la planificación de respuestas basadas en su calificación. Las calificaciones se asignan a los riesgos en base a la probabilidad y al impacto previamente evaluados. Por lo general, la evaluación de la importancia de cada riesgo y de su prioridad de atención se efectúa utilizando una Tabla de búsqueda o una matriz de probabilidad e impacto. La matriz de la Tabla 1 especifica las combinaciones de probabilidad e impacto que llevan a calificar los riesgos con una prioridad baja, moderada o alta. Dependiendo de las preferencias de la organización, se pueden utilizar términos descriptivos o valores numéricos.

Matriz de Probabilidad e Impacto										
Probabilidad	Amenazas					Oportunidades				
0,90	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72	0,72	0,36	0,18	0,09	0,05
0,70	0,04	0,07	0,14	0,28	0,56	0,56	0,28	0,14	0,07	0,04
0,50	0,03	0,05	0,10	0,20	0,40	0,40	0,20	0,10	0,05	0,03
0,30	0,02	0,03	0,06	0,12	0,24	0,24	0,12	0,06	0,03	0,02
0,10	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01
	0,05/ Muy Bajo	0,10/ Bajo	0,20/ Moderado	0,40/ Alto	0,80/ Muy Alto	0,80/ Muy Alto	0,40/ Alto	0,20/ Moderado	0,10/ Bajo	0,05/ Muy Bajo

Impacto (escala numérica) sobre un objetivo (p.ej., costo, tiempo, alcance o calidad)

Cada riesgo es calificado de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia y el impacto sobre un objetivo en caso de que ocurra. Los umbrales de la organización para riesgos bajos, moderados o altos se muestran en la matriz y determinan si el riesgo es calificado como alto, moderado o bajo para ese objetivo.

Tabla 1: Matriz de Probabilidad de Impacto

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

3.5.4 Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos:

Es el proceso que consiste en analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos generales del proyecto.

Técnicas de Recopilación y Representación de Datos

Entrevistas: Las técnicas de entrevistas se basan en la experiencia y en datos históricos para cuantificar la probabilidad y el impacto de los riesgos sobre los objetivos del proyecto. La información necesaria depende del tipo de distribuciones de probabilidad que se vayan a utilizar. Por ejemplo, para algunas distribuciones comúnmente usadas, la información se podría recopilar agrupándola en escenarios optimistas (bajo), pesimistas (alto) y más probables, como se muestra en la Tabla 2.

Elemento de la EDT/WBS	Baja	Más Probable	Alta
Diseñar	US\$ 4M	US\$ 6M	US\$ 10M
Construir	US\$ 16M	US\$ 20M	US\$ 35M
Probar	US\$ 11M	US\$ 15M	US\$ 23M
Proyecto Total	US\$ 31M	US\$ 41M	US\$ 68M

Tabla 2: Rango de Estimación de Costos

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

Distribuciones de probabilidad: Las distribuciones continuas de probabilidad, utilizadas ampliamente en el modelado y simulación, representan la incertidumbre en valores tales como las duraciones de las actividades del cronograma y los costos de los componentes del proyecto. Las distribuciones discretas pueden emplearse para representar eventos inciertos, como el resultado de una prueba o un posible escenario en un árbol de decisiones. Estas distribuciones describen formas que son compatibles con los datos que se generan habitualmente durante el análisis cuantitativo de riesgos.

Las distribuciones uniformes se pueden emplear cuando no hay un valor obvio que sea más probable que cualquier otro entre los límites superior e inferior especificados, como ocurre en la etapa inicial de concepción de un diseño, en la Figura 1, se muestran dos distribuciones de probabilidades más utilizadas.

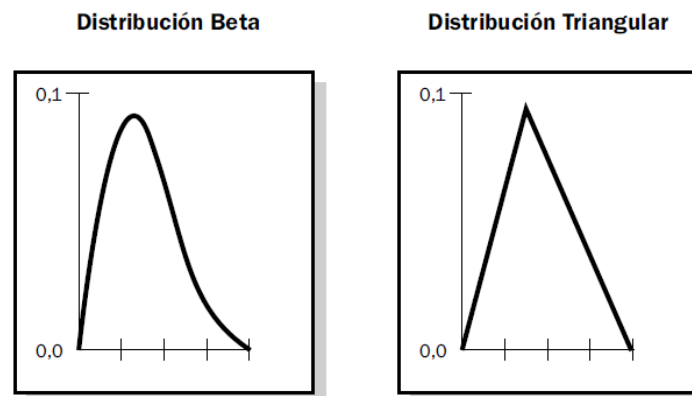


Figura 1: Ejemplos de Distribuciones de Probabilidad Comúnmente Utilizadas

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

Análisis de sensibilidad: El análisis de sensibilidad ayuda a determinar qué riesgos tienen el mayor impacto potencial en el proyecto. Ayuda a comprender la correlación que existe entre las variaciones en los objetivos del proyecto y las variaciones en las diferentes incertidumbres. Por otra parte, evalúa el grado en que la incertidumbre de cada elemento del proyecto afecta al objetivo que se está estudiando cuando todos los demás elementos inciertos son mantenidos en sus valores de línea base. Una representación típica del análisis de sensibilidad es el diagrama con forma de tornado, el cual resulta útil para comparar la importancia y el impacto relativos de las variables que tienen un alto grado de incertidumbre con respecto a las que son más estables. El diagrama con forma de tornado también resulta útil a la hora de analizar escenarios de riesgos basados en riesgos específicos cuyo análisis cuantitativo pone de relieve posibles beneficios superiores a los impactos negativos correspondientes. Un diagrama con forma de tornado es un tipo especial de diagrama de barras que se utiliza en el análisis de sensibilidad para comparar la importancia relativa de las

variables. En un diagrama con forma de tornado (Gráfico 3), el eje Y representa cada tipo de incertidumbre en sus valores base, mientras que el eje X representa la dispersión o correlación de la incertidumbre con la salida que se está estudiando. En esta figura, cada incertidumbre contiene una barra horizontal y se ordena verticalmente para mostrar las incertidumbres con dispersión decreciente con respecto a los valores base.

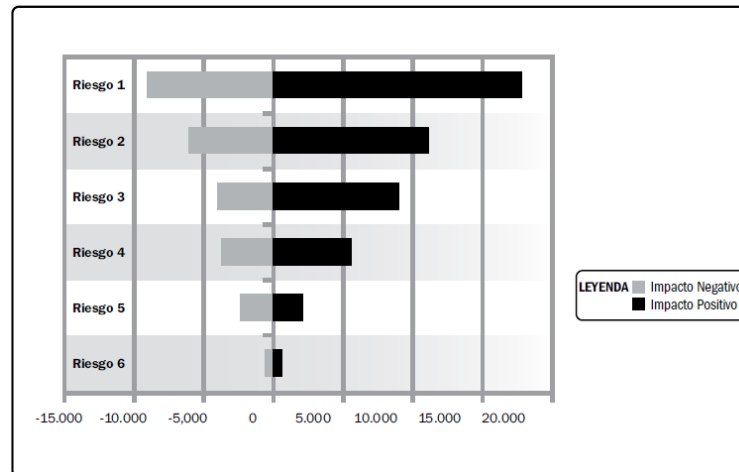


Gráfico 3: Ejemplo de Diagrama con Forma de Tornado

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

Modelado y simulación: Una simulación de proyecto utiliza un modelo que traduce las incertidumbres detalladas especificadas para el proyecto en su impacto potencial sobre los objetivos del mismo. Las simulaciones se realizan habitualmente mediante la técnica Monte Carlo. En una simulación, el modelo del proyecto se calcula muchas veces (mediante iteración) utilizando valores de entrada (p.ej., estimaciones de costos o duraciones de las actividades) seleccionados al azar para cada iteración a partir de las distribuciones de probabilidad para estas variables. A partir de las iteraciones se calcula un histograma (p.ej., costo total o fecha de finalización). Para un análisis de riesgos de costos, una simulación emplea estimaciones de costos (Gráfico 4). Para un análisis de los riesgos relativos al cronograma, se emplean el diagrama de red del cronograma y las estimaciones de la duración.

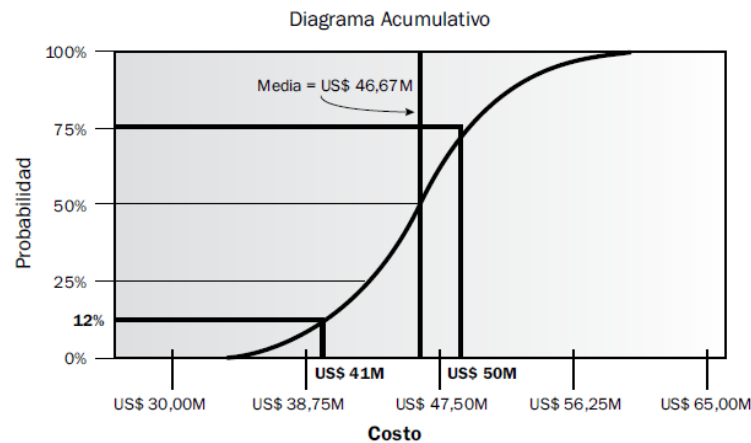


Gráfico 4: Resultados de Simulación de los Riesgos Relativos a los Costos

Referencia: PMBOK, Quinta Edición, 2013.

3.5.5 Planificar la Respuesta a los Riesgos:

Es el proceso por el cual se desarrollan opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas a los objetivos del proyecto.

Estrategias para Riesgos Negativos o Amenazas

Las tres estrategias que normalmente abordan las amenazas o los riesgos que pueden tener impactos negativos sobre los objetivos del proyecto en caso de materializarse, son: evitar, transferir y mitigar. La cuarta estrategia, aceptar, puede utilizarse para riesgos negativos o amenazas así como para riesgos positivos u oportunidades. Cada una de estas estrategias de respuesta a los riesgos tiene una influencia variada y única sobre la condición del riesgo. Estas estrategias deben seleccionarse en función de la probabilidad y el impacto del riesgo sobre los objetivos generales del proyecto.

- **Evitar:** Evitar el riesgo es una estrategia de respuesta a los riesgos según la cual el equipo del proyecto actúa para eliminar la amenaza o para proteger al proyecto de su impacto. Por lo general implica cambiar el plan para la dirección del proyecto, a fin de eliminar por completo la amenaza.
- **Transferir:** Transferir el riesgo es una estrategia de respuesta a los riesgos según la cual el equipo del proyecto traslada el impacto de una amenaza a un tercero, junto con la responsabilidad de la respuesta. La transferencia de un riesgo simplemente confiere a una tercera parte la responsabilidad de su gestión; no lo elimina.

- **Mitigar:** Mitigar el riesgo es una estrategia de respuesta a los riesgos según la cual el equipo del proyecto actúa para reducir la probabilidad de ocurrencia o impacto de un riesgo. Implica reducir a un umbral aceptable la probabilidad y/o el impacto de un riesgo adverso.
- **Aceptar:** Aceptar el riesgo es una estrategia de respuesta a los riesgos según la cual el equipo del proyecto decide reconocer el riesgo y no tomar ninguna medida a menos que el riesgo se materialice. Esta estrategia se adopta cuando no es posible ni rentable abordar un riesgo específico de otra manera.

Estrategias para Riesgos Positivos u Oportunidades

Tres de las cuatro respuestas se sugieren para tratar riesgos con impactos potencialmente positivos sobre los objetivos del proyecto. La cuarta estrategia, aceptar, puede utilizarse para riesgos negativos o amenazas así como para riesgos positivos u oportunidades. Las estrategias descritas a continuación, son explotar, compartir, mejorar o aceptar.

- **Explotar:** La estrategia de explotar se puede seleccionar para los riesgos con impactos positivos, cuando la organización desea asegurarse de que la oportunidad se haga realidad. Esta estrategia busca eliminar la incertidumbre asociada con un riesgo a la alza en particular, asegurando que la oportunidad definitivamente se concrete.
- **Mejorar:** La estrategia de mejorar se utiliza para aumentar la probabilidad y/o los impactos positivos de una oportunidad. La identificación y maximización de las fuerzas impulsoras clave de estos riesgos de impacto positivo pueden incrementar su probabilidad de ocurrencia. Entre los ejemplos de mejorar las oportunidades se cuenta la adición de más recursos a una actividad para terminar más pronto.
- **Compartir:** Compartir un riesgo positivo implica asignar toda o parte de la propiedad de la oportunidad a un tercero mejor capacitado para capturar la oportunidad en beneficio del proyecto.
- **Aceptar:** Aceptar una oportunidad es estar dispuesto a aprovechar la oportunidad si se presenta, pero sin buscarla de manera activa.

3.5.6 Monitorear y Controlar los Riesgos:

Es el proceso por el cual se implementan planes de respuesta a los riesgos, se rastrean los riesgos identificados, se monitorean los riesgos residuales, se identifican nuevos riesgos y se evalúa la efectividad del proceso contra riesgos a través del proyecto.

- **Revaluación de los Riesgos:** Controlar los Riesgos a menudo da lugar a la identificación de nuevos riesgos, la revaluación de los riesgos actuales y el cierre de riesgos obsoletos. Deben programarse periódicamente revaluaciones de los riesgos del proyecto. La cantidad y el nivel de detalle de las repeticiones que corresponda hacer dependerán de la manera en que el proyecto avanza con relación a sus objetivos.
- **Análisis de Variación y de Tendencias:** Numerosos procesos de control utilizan el análisis de variación para comparar los resultados planificados con los resultados reales. Con el propósito de controlar los riesgos, deben revisarse las tendencias en la ejecución del proyecto utilizando la información relativa al desempeño.

3.6 INCERTEZAS EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES

Determinar los riesgos en la construcción de un túnel es de alta complejidad. En un principio esto se debe a que cuando los túneles fallan, la información sobre cómo falló éste es de carácter confidencial y no está disponible hasta varios años después del suceso [Bearne, 2008], generando así mayor dificultad respecto a la recopilación de antecedentes. A esto, hay que añadir la complejidad de los proyectos y la falta de información con que se diseñan, exponiendo así la construcción a diversos riesgos. Pese a esto, hay autores que sí han publicado información relevante a las fallas de túneles. Špačková et al (2010) menciona en su trabajo que las fallas más comunes en túneles son colapsos de frente y de los costados, erosión de material debido a flujos de agua y colapsos globales con chimenea a la superficie.

En el Gráfico 5 se muestra una estadística sobre los métodos constructivos utilizados en 110 túneles que han colapsado en los últimos 80 años. Se puede observar que de los tres métodos más utilizados, el que muestra más colapsos es el NATM (New Austrian Tunnelling Method), a continuación le sigue el método con máquinas tuneladoras (Tunnelling Boring Machine) y finalmente el método por perforación y tronadura (Drill&Blasting). Se puede observar que existen otros métodos de excavación, así como también proyectos en donde se excavan tramos con distintos métodos. Asimismo, se incluyen casos sin información (S/I) sobre el método de excavación.

**Colapso de túneles en los últimos 80 años según
método de construcción**

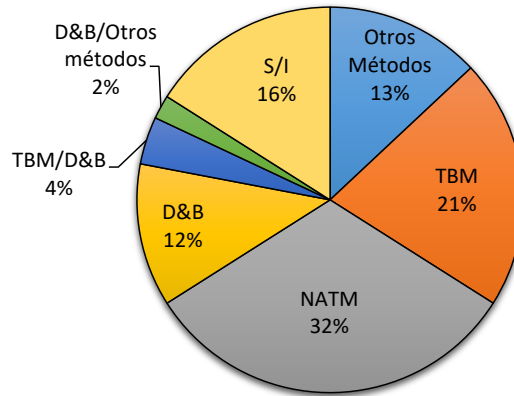


Gráfico 5: Colapsado en la construcción de túneles, en los últimos 80 años.

Referencia: Seindenfuss (2006)

Se estima que en un proyecto de túnel hay alrededor de 500 riesgos asociados a las distintas etapas del proyecto. Estos pueden afectar a los empleados que trabajan en éste, a terceros, a los plazos constructivos del proyecto en general o al presupuesto de éste. Según Špačková et al (2010), los riesgos se pueden dividir en dos grupos:

- Los asociados a incertezas en la estimación de costos unitarios, avances, etc.
- Los asociados a eventos extraordinarios que causen cambios no planificados en el proceso de excavación.

Existen tres fases en las cuales se debe lidiar con los riesgos ya identificados en el proyecto. En la etapa de diseño, de negociación de contrato con la empresa constructora, y de construcción. En la etapa de diseño se establecen los criterios de aceptación de los distintos riesgos, así como también un análisis del riesgo en el proyecto. En la segunda etapa, se establecen los requerimientos para mantener un riesgo bajo lo esperado y en la etapa de construcción se hace una inspección en terreno de los distintos factores para asegurar que estén bajo las condiciones estipuladas.

A lo largo de los años, se ha ido modificando el procedimiento para calcular el riesgo. En un principio, el análisis se realizaba de manera cualitativa. Se analizaban distintos eventos que se producían en una obra, se determinaba la frecuencia de ocurrencia para cada uno (cuantas veces ocurría este evento en un tiempo/distancia determinada), y se clasificaba en categorías [Eskesen et al, 2004]. Como se puede observar en la Tabla 3, dependiendo de la frecuencia con que ocurría un objeto,

éste se clasificaba de 1 a 5, en donde la unidad era un evento muy improbable y 5 era un evento muy frecuente.

Frecuencia de ocurrencia (En el periodo de construcción)			
Clase de frecuencia	Intervalo	Valor central	Descripción de las clases de frecuencia
5	> 0.3	1	Muy probable
4	0.03 a 0.3	0.1	Probable
3	0.003 a 0.03	0.01	Ocasional
2	0.0003 a 0.003	0.001	Improbable
1	< 0.0003	0.001	Muy improbable
El valor central representa el valor medio logarítmico del intervalo dado			

Tabla 3: Clasificación de frecuencias para distintos eventos.

Referencia: Eskesen, 2004.

Una vez determinado esto, se analizaban los efectos de cada variable y nuevamente se clasificaban en categorías (Desastroso, Severo, Grave, Considerable, Insignificante). Finalmente cada variable, la cual estaba asociado a una frecuencia y una consecuencia, se calculaba su riesgo asociado usando una matriz como la de la Tabla 4.

Frecuencia			Consecuencia		
Desastroso	Severo	Grave	Considerable	Insignificante	
Muy probable	Inaceptable	Inaceptable	No deseado	No deseado	
probable	Inaceptable	Inaceptable	No deseado	Aceptable	
Ocasional	Inaceptable	No deseado	Aceptable	Aceptable	
improbable	No deseado	Aceptable	Aceptable	Despreciable	
Muy improbable	No deseado	Aceptable	Despreciable	Despreciable	

Tabla 4: Clasificación de riesgos.

Referencia: Eskesen, 2004.

Para realizar este análisis existen diversos métodos de cálculo, entre los cuales destacan los árboles de decisión, utilizados para evaluar las mejores decisiones ante un problema, simulación de Monte Carlo y Multiriesgo ("Multirisk"), el cual sirve para estimar costos y tiempos del proyecto. El procedimiento para el cálculo de Multiriesgo consiste en identificar ciertos ítems independientes asociados al desarrollo del proyecto, ante las cuales hay que determinar un costo o tiempo aproximado, un mínimo y un máximo. Luego, uniando todas estas variables se calcula un costo o

tiempo esperado y la varianza. Si ésta es muy grande, se toma el ítem con mayor varianza y se divide en 2 para aumentar su precisión. Se calcula nuevamente la suma y la varianza y en caso que se repita el caso anterior, se toma nuevamente el ítem con mayor varianza y se subdivide.

Existe también el método DAT (“Decision Aids for Tunnelling”), desarrollado por investigadores de la Universidad Tecnológica de Michigan el año 1999, el cual predice probabilísticamente los costos de construcción y el programa de la obra en base a estimaciones de condiciones geotécnicas y variabilidad de costos unitarios y avances.

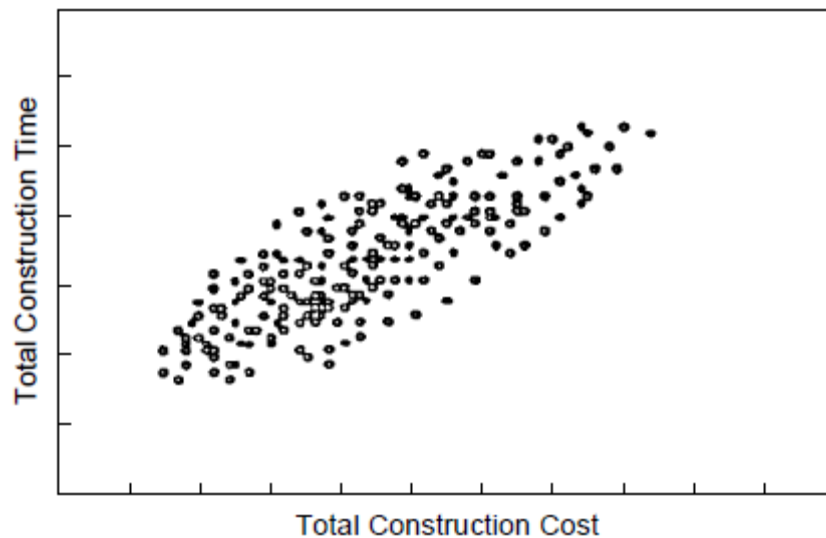


Gráfico 6: Gráfico de dispersión costo - Tiempo.

Referencia: Univ. Michigan, 1999.

En los últimos años se han seguido desarrollando nuevos modelos de mayor complejidad para determinar el riesgo de un proyecto, entre los cuales se pueden nombrar las cadenas de Markov, las redes de Petri y las redes neuronales artificiales [Taroun et al, 2011]. Uno de los métodos más complejos y completos que se utilizan hoy en día para determinar el riesgo en un túnel es usando redes bayesianas [Špačková, Straub. 2011], las cuales se basan en el Teorema de Bayes $p(A/B)$ viene dada por la expresión:

$$p(A/B) = \frac{p(B/A)p(A)}{p(B)}$$

Este método es muy útil para calcular el riesgo asociado a distintas variables que tienen ciertas dependencias entre ellas. Según Nasir et al (2003), las redes bayesianas pueden ser utilizadas para programas de construcción y sobre costos del proyecto.

Generalmente los túneles se analizan por segmentos, debido a ser una obra lineal, en la cual una dimensión es mucho mayor que las otras. Así, para evaluar el riesgo del túnel, se analiza cada sección donde cada una depende de la sección anterior. Para determinar la intensidad de falla y la probabilidad de ésta, se utiliza comúnmente una estimación directa de algún ingeniero experto en el tema, una estimación basada en análisis estadístico de túneles previos o una estimación basada en un cálculo estructural. De éstas, las más utilizadas son las primeras dos opciones [Špačková et al, 2010].

3.7 INCERTEZAS DE LA EXCAVACIÓN EN SUELOS

A continuación se describirán los posibles problemas que se pueden tener durante la construcción de un túnel y que pueden generar demoras no planificadas en el diseño de los plazos del proyecto [José Gacitúa 2012].

- **Demora en la colocación del sello :**

Un factor que afecta la estabilidad del frente y del suelo sin sostenimiento, es pérdida de cohesión del suelo. En algunas ocasiones la cohesión del suelo puede estar incrementada por la humedad natural (suelos finos). Si esta humedad se pierde por evaporación o flujo hacia el interior del túnel, se produce una pérdida de cohesión y por lo tanto de estabilidad. Esta situación se produce con la exposición del frente durante las paradas prolongadas de construcción tales como vacaciones, huelgas, etc. En estos casos es importante colocar un sello y revestimiento armado sobre el frente.

- **Dificultades en la colocación de marcos reticulados:**

Los marcos reticulados son elementos de soporte temporal prefabricados que se colocan por partes con el fin de servir de guía a la excavación, a la colocación de mallas electro-soldadas y barras de refuerzo, y a la colocación del shotcrete. Adicionalmente se consideran una garantía de seguridad para los trabajadores en el frente.

Sin embargo la colocación de los marcos es una tarea que puede tener varias complicaciones. La primera es que tenga fallas de fabricación, geométricas, de materiales o soldaduras. La segunda es la dificultad de transporte y acumulación cerca del frente. Otra es la manipulación con la maquinaria o las cuadrillas disponibles. El ajuste del frente por topografía, el apoyo en el terreno, el ensamble y el apuntalamiento para recibir carga.

- **Demora en la colocación del soporte:**

Siguiendo los principios del NATM es importante reducir al máximo los movimientos del suelo para evitar la desintegración del mismo, por este motivo la colocación del sostenimiento debe ser una labor de rápida ejecución, en particular cuando incluye el cierre de la contrabóveda. Una confirmación de esta afirmación la entrega Karakus et al. (2004) donde demuestra que el cierre del sostenimiento en las primeras horas es de vital importancia para reducir las deformaciones futuras. Sumado a esto existe siempre la posibilidad de que existan nidos de gravas con baja cohesión que generen sobre excavaciones, pudiendo generar una falla local.

- **Problemas relacionados al monitoreo de deformaciones en superficie:**

Al trabajar con el método NATM es necesario monitorear tanto la superficie del terreno como la sección interior del túnel para detectar cualquier anomalía durante su construcción y garantizar su estabilidad.

Los puntos de control colocados en la superficie sirven para medir deformaciones verticales del terreno. Estas deformaciones son indicadores clave sobre la estabilidad del túnel y de cómo se va deformando el terreno cercano a éste. También sirve como indicador para ver si hay deformaciones en estructuras cercanas a la zona de excavación.

Las deformaciones del terreno dependen de los parámetros del suelo y el método constructivo. En general en suelos las deformaciones se deben restringir para conseguir el máximo de su resistencia y colaboración. Pero adicionalmente se deben considerar las estructuras de superficie que se ven afectadas por estas deformaciones o asentamientos. En general las estructuras sufren más por asentamientos diferenciales que por asentamientos uniformes.

Mair et al. (1996), en base a obras de Metro en Londres, concluye que las edificaciones con asentamientos absolutos inferiores a 10 [mm] y distorsiones angulares (β) menores a 1/500 presentan daños despreciables. Por otra parte, Boscardin y Cording (1989) entregan como criterio de referencia, para obtener daños menores en edificios, limitar la distorsión angular (β) a 1/500 y la deformación horizontal admisible a no más de un 1/1000.

Cuando se tienen deformaciones que sobrepasan los límites indicados por el diseño y por las obras cercanas se hace necesario definir un protocolo de alternativas, en Chile se ha realizado reducción el pase de avance de 1,5 a 1 m, excavación bajo la protección de paraguas de pernos

autoperforantes, construcción de una contrabóveda, modificaciones en el método de construcción, aumento de espesor del revestimiento, paralización temporal de la obra, etc.

Otro problema asociado al monitoreo es cuando los puntos de control colocados en la superficie sufren daños o movimientos inesperados que afectan o inutilizan las mediciones. Es por esto que es necesario que se estudie previamente la posición de cada una de los testigos. Al quedar inutilizado un punto de nivel, se pierde la posibilidad de medir deformaciones y controlar éstas a tiempo, aumentando así el riesgo de no detectar asentamientos a tiempo.

- **Problemas por monitoreo dentro del túnel**

El monitoreo dentro del túnel es mucho más complejo y menos preciso que el monitoreo de superficie, ya que se emplean instrumentos distintos (niveles en superficie y teodolitos en el túnel), y porque los puntos del interior son más frágiles y es más difícil protegerlos.

Si se detectan daños en los puntos de control al interior de los túneles también se aumenta la probabilidad de que no se detecten irregularidades a tiempo y se genere inseguridad en la obra. Estos daños pueden ser productos de aguas subterráneas no controladas e incorrecta colocación de shotcrete.

- **Problemas por acumulación de marina dentro de los túneles**

El retiro de marina en los túneles de Metro se ha vuelto un problema singular, debido a que normalmente no se cuenta con una flota de camiones ni rampas de acceso para generar un retiro continuo. Normalmente se emplean grúas y un transporte vertical con capacidad limitada en los piques de acceso. Además, es posible que el pique está situado en medio de la ciudad y el retiro de marina no se puede efectuar de noche por el ruido que genera.

Al no poder extraer toda la marina, esta se acumula en el túnel o en los piques, dificultando el movimiento al interior. Debido a esto, se puede llegar a producir la situación de tener que paralizar la excavación para poder retirar la marina ubicada dentro del túnel, generando demoras en la planificación de la obra.

- **Problemas con el ruido**

En el caso específico de excavación de túneles urbanos, se consideran jornadas de trabajo continuo. Esto puede hacer que los vecinos se quejen de los ruidos nocturnos y la obra se paralice o debe

restringir sus operaciones durante la noche. Actividades particularmente molestas para las zonas urbanas son el tráfico constante de camiones de retiro de marina o camiones mezcladores de hormigón.

- **Problemas con gestión del proyecto**

En obras de excavación de túneles es muy común realizar subcontrataciones, por ejemplo, la colocación de las barras de acero hincadas sobre la clave del túnel que sirven de sostenimiento temporal (paraguas) o la instalación eléctrica de algún tramo. Sin embargo las subcontrataciones generan varios problemas, uno de ellos es que pueden traspasar el incumplimiento de plazos o la calidad del trabajo. Dado que la construcción de túneles es una obra compleja, puede haber empresas o técnicos con poca experiencia en el área, lo cual puede producir problemas de diseño, malas decisiones o demoras en el proyecto.

4 PROYECTO EN ESTUDIO

En el capítulo anterior, se describen las incertidumbres propias en la construcción de túneles, pero para una mejor comprensión de este tipo de obras, en el presente capítulo, se detalla el nuevo método austriaco NATM, utilizado en Chile, en la construcción del metro de Santiago.

4.1 METODOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN:

4.1.1 Acceso a Túneles interestación

Para acceder a los túneles interestación, se construye previamente piques, de 15 a 20 m de diámetro (Figura 2). Estos alcanzan la profundidad de cota de los túneles y sirven como punto de entrada de maquinaria y mano de obra.

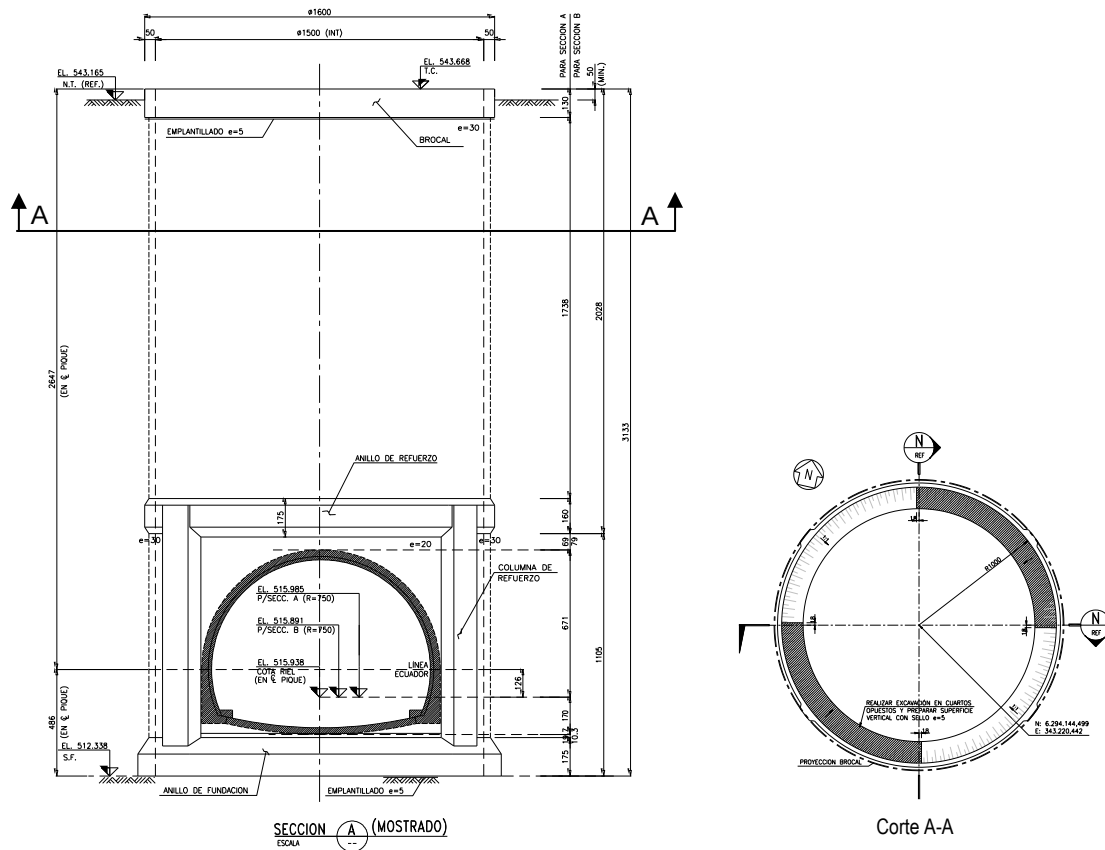


Figura 2: Vista en Corte vertical y corte transversal de piques.

Referencia: Metro Santiago. 2013.

4.1.2 Secuencia constructiva:

Explicado el acceso a los túneles, que es a través de piques, se procede a describir las secuencias constructivas que se utilizan en la construcción del túnel. Esta secuencia utiliza el nuevo método austriaco de construcción de túneles, también conocido por sus siglas NATM (New Austrian Tunneling Method), el cual consta de dos etapas: la primera etapa (revestimiento primario), se ejecuta cerca del frente y tiene como función principal el sostenimiento del suelo en el corto plazo. La segunda etapa (revestimiento secundario), de terminación, se ejecuta dentro de un túnel limpio y seco, y por lo tanto tiene mejor calidad. En la Figura 3 se muestra el ciclo constructivo.

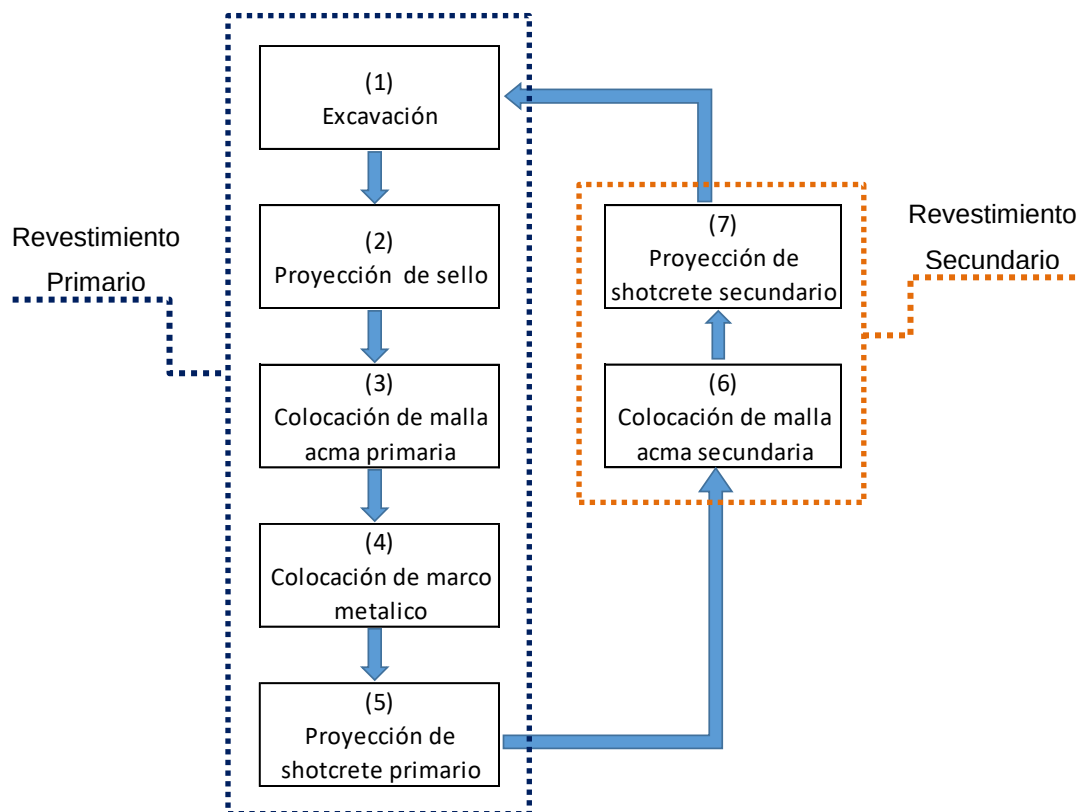


Figura 3: Diagrama del Ciclo de Construcción del Túnel

Referencia: Elaboración Propia

4.1.2.1 Secuencia Constructiva de Revestimiento Primario:

Excavación: La excavación se realiza mediante medios mecánicos con excavadora **tipo PC-120** o similar, Figura 4. En esta actividad se debe tener especial cuidado de no sobre excavar las paredes, para no aumentar el espesor del revestimiento y los costos asociados a este ítem. Por lo tanto la

excavación se realiza lo más cercano al perímetro de excavación, realizando el perfilado o terminación de la excavación en forma manual mediante martillos neumáticos o similares.



Figura 4: Frente de Excavación

Referencia: Elaboración Propia

Sello: El sello se realiza con shotcrete proyectado con un espesor de 5cm, como se observa en la Figura 5. Se realiza una vez efectuada la excavación y sirve para consolidar el terreno excavado.



Figura 5: Colocación de Sello (Hormigón Proyectado)

Referencia: Elaboración Propia

Malla electrosoldada Interior: La malla se coloca inmediatamente después del sello y queda embebida en el hormigón proyectado primario posterior a la colocación del marco (Figura 6).



Figura 6: Colocación de Malla electrosoldada

Referencia: Elaboración Propia

Marco metálico reticulado: La colocación del marco metálico como se muestra en la Figura 7, se realiza una vez colocada la malla electrosoldada. La instalación del marco se realiza de una vez, es decir, el marco se arma en el piso sin uno de sus extremos. Se levanta a través de una plataforma de equipo de levante lo más cercano al eje de la sección, se une mediante separadores con el marco anterior para posteriormente, en forma manual instalar la pieza faltante.



Figura 7: Colocación de marco metálico

Referencia: Elaboración Propia

Revestimiento Primario hormigón Proyectoado (HP-1): La proyección del hormigón de revestimiento primario (Figura 8). Se realiza una vez colocado el marco metálico y al igual que el sello, se hará con shotcretera Bomba TK40 y tiene por objeto crear en conjunto con la malla externa

y el marco metálico reticulado un hormigón estructural que permita continuar el avance de las excavaciones.



Figura 8: Colocación Revestimiento Primario

Referencia: Elaboración Propia

4.1.2.2 Secuencia Constructiva de Revestimiento Secundario:

El revestimiento secundario o sostenimiento se realiza en una etapa posterior al revestimiento primario. Esta actividad se realiza una vez que se termina la primera etapa o en forma paralela con un desfase de la frente tal que permita cumplir en cuanto a geometría, espesores, resistencias y deformaciones.

Las actividades que involucra el revestimiento secundario son:

Malla Electrosoldada Exterior: La malla exterior se coloca en el marco anterior (Figura 9), es decir, se lleva un módulo atrás para permitir el traslapeo respectivo. La malla interior del marco anterior se debe dejar descubierta, es decir, no se cubre con hormigón proyectado la zona correspondiente al futuro traslapeo.



Figura 9: Colocación de Malla Electrosoldada.

Referencia: Elaboración Propia

Proyección de Hormigón de Revestimiento Secundario (HP-2): Al igual que todas las actividades de hormigón proyectado descritas anteriormente. Se realiza por medio de la shotcretera bomba Puztmeister TK40D, pero en el caso que lo amerite, se utilizara robot tipo Alpha 15.

4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS.

Explicado el método NATM, empleado en la construcción de túneles, se describen las características geométricas de los túneles analizados, que servirán de base para su estudio y análisis.

Se utilizan dos tramos de túneles correspondientes a la línea 6 del metro de Santiago, ubicados en la comuna de Cerrillos, los cuales tiene una longitud de 600 y 750 m, como se detalla a continuación en la Figura 10 y 11.

Túnel 1 (Figura 10):

- Construcción estocada del túnel interestación 25 m a eje de pique por lado.
- Construcción del túnel interestación 275 m para cada lado de las estocadas.

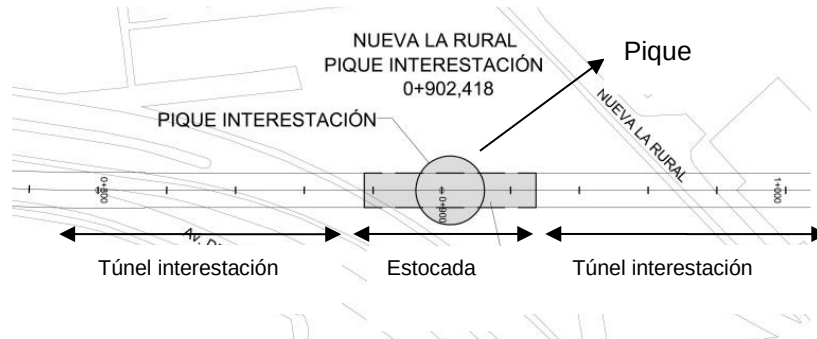


Figura 10: Túnel 1

Referencia: Metro Santiago. 2013.

Túnel 2 (Figura 11):

- Construcción de estocadas del túnel interestación 25 m a eje de pique por lado.
- Construcción del túnel interestación 350 m para cada lado de las estocadas.

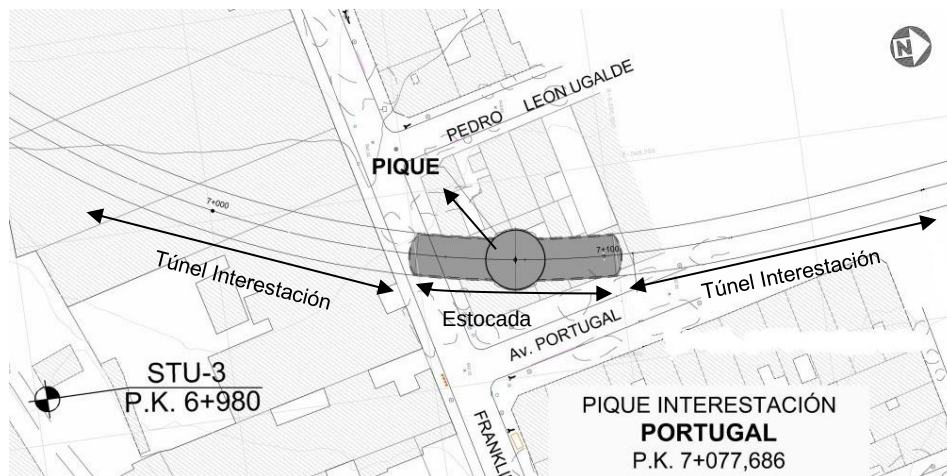


Figura 11: Túnel 2

Referencia: Metro Santiago. 2013.

En la Tabla 5, se resume la distancia y la longitud de cada túnel.

Pique	Longitud estocada		Longitud interestación		Longitud total
Túnel 1	25 m al poniente	25 m al oriente	275 m al poniente	275 m al oriente	600 m
Túnel 2	25 m al poniente	25 m al oriente	350 m al poniente	350 m al oriente	750 m

Tabla 5: Resumen de distancias y longitud de los túneles 1 y 2.

Referencia: Metro Santiago, Línea 6. 2003

La sección típica de los túneles interestación del metro de Santiago, es una sección de herradura, con unas medidas aproximadamente de 7,6 m de alto y 10 m de ancho, como se muestra en la Figura 12.

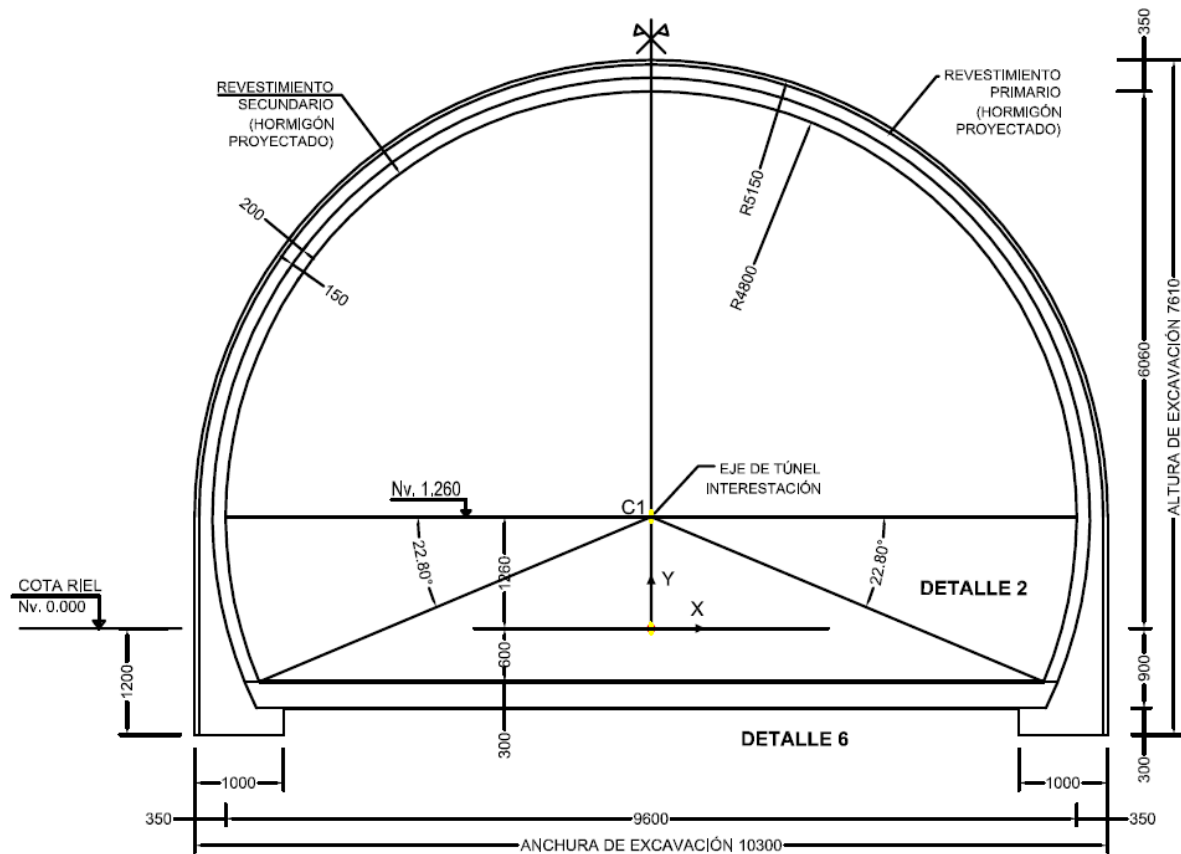


Figura 12: Sección Típica de Túnel Interestación.

Referencia: Metro Santiago. 2013.

4.2.1 Recursos Asociados.

Uno de los aspectos más relevantes son los recursos utilizados en la construcción, que determinan el rendimiento y el costo de las obras, de ellos cabe destacar; el horario de trabajo, personal y maquinaria, toda esta información ha sido extraída de la oferta adjudicada, como de terreno.

Descripción de los turnos de trabajo:

- Turno de trabajo: doble turno de 6x1, día y noche para fortificación, perfilado de taludes y extracción marina. De manera extraordinaria se realizaran trabajos los sábados, hasta medio día.
- Extracción de marina: Sólo turno diurno (8:00 a 20:00), impuesto en la RCA.

El personal directo, que se emplea en cada uno de los túneles, por turno, es el siguiente (Tabla 6):

Personal Directo	Cantidad
Capataz	1
Minero	7
Ayudante	4
Capataz eléctrico	0,5
Eléctrico	1
Mecánico	1
Pitonero	2
Soldador	1
TOTAL	17,50

Tabla 6: Mano de Obra Directa

Referencia: Licitación de La Obra

El personal indirecto lo constituyen 20 profesionales, de los cuales se destacan el administrador, prevencionistas, topógrafos, ingenieros, supervisores, además de alarifes, riggers, bodeguero, administrativos, que suman otras 10 personas.

La maquinaria utilizada por turno, en cada uno de los túneles, se describe en la Tabla 7.

Maquinaria	Cantidad
Excavadora 13 ton	2
Grúa torre 16 ton	1
Bomba TK-40 prop.	1
Bomba TK-40 arre.	1
Cargador frontal	2
Mixer	1,5
Equipo levante	1,5
TOTAL	10

Tabla 7: Maquinaria

Referencia: Licitación de La Obra

4.2.2 Planificación de la obra.

Antes de comenzar cualquier obra, se planifica, tanto en el aspecto físico como económico, a medida que se avanza en los trabajos, se va comparando con lo real incurrido. Este es un proceso que sirve para detectar y solucionar desviaciones durante su construcción.

4.2.2.1 Planificación física y temporal

A continuación se muestra la planificación de los dos túneles, la cual va asociada a los tiempos de ejecución, determinados por los recursos utilizados, con sus respectivos rendimientos. Como se muestra en la Carta Gantt en la Figura 13 y 14. Los tiempos de ejecución de los túneles 1 y 2, son de 6 y 7 meses respectivamente, el color rojo muestra la ruta crítica de las actividades.

La planificación a grandes rasgos se divide en secciones del túnel, como estocada, tramos rectos, tramos curvos y tipo de sostenimiento como M 45 o M 60, que determinan la sección a excavar, espesor de shotcrete y tipo de marco metálico.

Nombre de tarea	Duración	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Túnel 1	155 días						
Túnel Inter Estación Poniente	139 días						
Inicio Túnel	0 días						
Pique 1: Demolición Ojo Túnel	1 día						
Pique 1: Excavación y Sost. Túnel Estocada	23 días						
Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Recta	25 días						
Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Curva	90 días						
Túnel Inter Estación Oriente	133 días						
Pique 1: Demolición Ojo Túnel	1 día						
Pique 1: Excavación y Sost. Túnel Estocada	17 días						
Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Recta	37 días						
Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Curva	78 días						
Fin Túnel	0 días						

Figura 13: Carta Gantt Túnel 1, en color rojo la ruta crítica.

Referencia: Licitación de la Obra

Nombre de tarea	Duración	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Túnel 2	203 días							
Túnel Inter Estación Poniente	162 días							
Inicio de Túnel	0 días							
Pique 2: Demolición Ojo Túnel	1 día							
Pique 2: Excavación y Sost. Túnel Estocada	16 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	38 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, B, 60, Curva	25 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	41 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Curva	5 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Recta	36 días							
Túnel Inter Estación Oriente	181 días							
Pique 2: Demolición Ojo Túnel	1 día							
Pique 2: Excavación y Sost. Túnel Estocada	20 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	36 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Recta	10 días							
Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	114 días							
Fin de Túnel	0 días							

Figura 14 : Carta Gantt Túnel 2, en color rojo la ruta crítica.

Referencia: Licitación de la Obra.

Los rendimientos obtenidos de los recursos y que concuerdan con la planificación física se describen en la Tabla 8:

Ítem	Descripción	Unidad	Rendimiento Cant./día	Cantidad	Duración (Días)
Túnel 1					
Túnel Inter Estación					
1.2	Túnel Inter Estación Poniente				155
1.2.1	Pique 1: Demolición Ojo Túnel	gl	1,000	1,00	1
1.2.2	Pique 1: Excavación y Sost. Túnel Estocada	m	1,304	30,00	23
1.2.3	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Recta	m	2,391	59,78	25
1.2.4	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Curva	m	2,391	215,21	90
1.3	Túnel Inter Estación Oriente				133
1.3.1	Pique 1: Demolición Ojo Túnel	gl	1,000	1,00	1
1.3.2	Pique 1: Excavación y Sost. Túnel Estocada	m	1,765	30,00	17
1.3.3	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Recta	m	2,391	88,47	37
1.3.4	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Curva	m	2,391	186,53	78

Ítem	Descripción	Unidad	Rendimiento Cant./día	Cantidad	Duración (Días)
Túnel 2					
Túnel Inter Estación					
1.2	Túnel Inter Estación Poniente				203
1.2.1	Pique 2: Demolición Ojo Túnel	gl	1,000	1,00	1
1.2.2	Pique 2: Excavación y Sost. Túnel Estocada	m	2,188	35,00	16
1.2.3	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	m	2,414	91,72	38
1.2.4	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, B, 60, Curva	m	2,414	60,34	25
1.2.5	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	m	2,414	98,97	41
1.2.6	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Curva	m	2,414	12,07	5
1.2.7	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 45, Recta	m	2,414	86,90	36
1.3	Túnel Inter Estación Oriente				181
1.3.1	Pique 2: Demolición Ojo Túnel	gl	1,000	1,00	1
1.3.2	Pique 2: Excavación y Sost. Túnel Estocada	m	1,750	35,00	20
1.3.3	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	m	2,188	78,75	36
1.3.4	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Recta	m	2,188	21,88	10
1.3.5	Pique 2: Exc. y Sost. Túnel Interestación, M, 60, Curva	m	2,188	249,38	114

Tabla 8: Rendimientos Planificados.

Referencia: Licitación de la Obra.

4.2.2.2 Planificación Económica:

Una vez determinado el personal directo e indirecto, rendimientos y tiempos de ejecución en la construcción, solo falta la descripción económica de la obra, como se muestra en la Tabla 9.

El valor de venta de la obra se obtiene del contrato adjudicado, por ser un contrato de suma alzada su valor es fijo. Excluyendo aumentos de obra y modificaciones.

El costo se obtiene de la fase de proyecto, donde la obra ha sido estudiada y evaluada, este valor es corroborado con ofertas ya en su fase de construcción, que habitualmente sufre cambios dependiendo de la dirección que se tome, por lo general este valor aumenta por eventualidades no consideradas.

En la Tabla 9, se muestra la venta y costo de la obra.

Descripción	Venta	Costo	Resultado
	CLP	CLP	CLP
Túnel 1	3.155.506.744	3.026.574.663	128.932.081
Túnel 2	4.884.601.852	4.685.020.000	199.581.852

Tabla 9: Planificación Venta, Costo y Resultado.

Referencia: Licitación de la Obra

5 METODOLOGIA DE SIMULACIÓN

El análisis de riesgo forma parte de las decisiones cotidianas. Se convive continuamente con la incertidumbre, la ambigüedad y la variabilidad. Y aunque hoy en día se cuenta con un acceso a la información sin precedentes, no es posible predecir con precisión el futuro. La simulación Monte Carlo permite ver los resultados posibles de las decisiones que se toman y evaluar el impacto del riesgo, lo cual permite tomar mejores decisiones en condiciones de incertidumbre [Javier Faulín 2013].

5.1 ¿QUÉ ES LA SIMULACIÓN MONTE CARLO?

La simulación Monte Carlo es una técnica matemática computarizada que permite tener en cuenta el riesgo en análisis cuantitativos y tomas de decisiones. Esta técnica es utilizada por profesionales de campos tan dispares como los de finanzas, gestión de proyectos, energía, manufacturación, ingeniería, investigación y desarrollo, seguros, petróleo y gas, transporte y medio ambiente.

La simulación Monte Carlo ofrece a la persona responsable de tomar las decisiones una serie de posibles resultados, así como la probabilidad de que se produzcan según las medidas tomadas. Muestra las posibilidades extremas, los resultados de tomar la medida más arriesgada y la más conservadora, así como todas las posibles consecuencias de las decisiones intermedias.

Es un método no determinístico o estadístico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Monte Carlo (Principado de Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoraron enormemente con el desarrollo de la computadora.

El uso de los métodos de Monte Carlo como herramienta de investigación, proviene del trabajo realizado en el desarrollo de la bomba atómica durante la segunda guerra mundial en el Laboratorio Nacional de Los Álamos en EE.UU. Este trabajo conllevaba la simulación de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones en el material de fisión. Esta difusión posee un comportamiento eminentemente aleatorio [Javier Faulín 2013].

5.2 EL PROCESO DE SIMULACIÓN MONTE CARLO

La simulación de Monte Carlo es una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y los ordenadores para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales no dinámicos (por lo general, cuando se trata de sistemas cuyo estado va cambiando con el

paso del tiempo, se recurre bien a la simulación de eventos discretos o bien a la simulación de sistemas continuos).

La clave de la simulación Monte Carlo consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando aquellas variables (inputs del modelo) cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema. Una vez identificados dichos inputs o variables aleatorias, se lleva a cabo un experimento consistente en generar con ayuda del ordenador, muestras aleatorias (valores concretos) para dichos inputs, y analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Tras repetir n veces este experimento, se dispone de n observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual es de utilidad para entender el funcionamiento del mismo. Obviamente, el análisis será tanto más preciso cuanto mayor sea el número n de experimentos que se lleven a cabo [Gestión de Riesgo 2014].

5.3 MODELO DE RIESGO

Es un mecanismo que permite poner en práctica el método cuantitativo de Monte Carlo para el análisis de riesgos.

Es la representación de la realidad a analizar a través de una estructura de cálculos matemáticos, en la cual se detectan las variables significativas de riesgo y se ponen en relación con el resto de variables que afectan al proyecto, y con las variables económicas sobre las que se mide el nivel de riesgo del mismo, costo y tiempo.

Objetivo del Modelo de riesgo:

Para la medición de la probabilidad de ocurrencia del riesgo y el impacto que el mismo tendría en el proyecto, este impacto se mide en el tiempo y costo final del proyecto versus el tiempo y costo final del proyecto planificado o licitado, utilizado como línea base.

De forma adicional, un modelo de riesgos permite realizar un control y seguimiento sobre el mismo, comparando el valor en riesgo de las variables con el valor real incurrido.

Pasos para el desarrollo de un Modelo de Riesgo:

Para el desarrollo de un modelo de riesgo basado (Figura 15), en la medición de las probabilidades de ocurrencia los pasos a seguir son los siguientes:

1. Selección de las variables que influyen en el proyecto
2. Selección de las funciones de probabilidad.
3. Identificar las variables sobre las cuales medir el riesgo.
4. Creación del modelo para el cálculo.
5. Obtención del perfil del riesgo y análisis de los resultados.

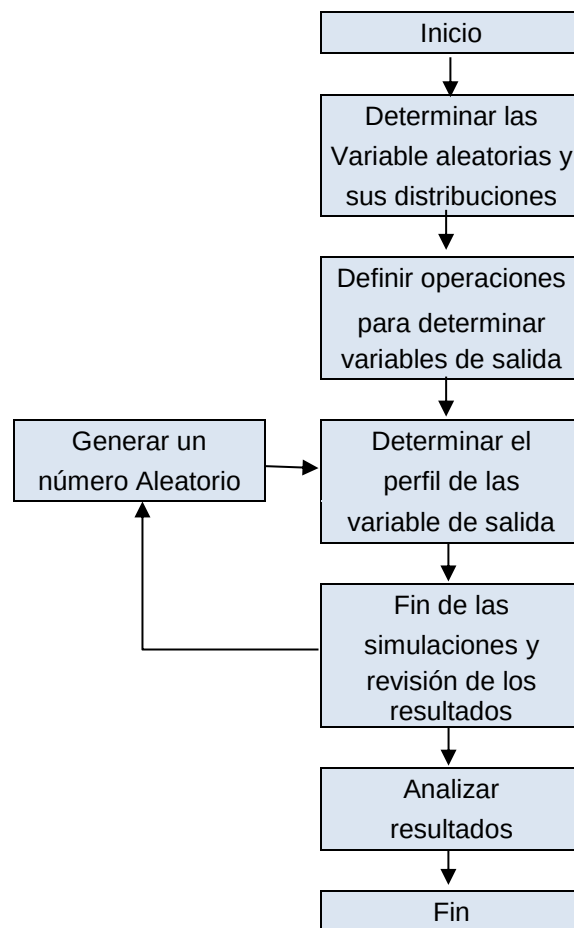


Figura 15: Diagrama de flujo, pasos del modelo de riesgo.

Referencia: Elaboración Propia

5.4 SELECCIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD.

Una vez identificadas las variables de riesgo, que afectan al proyecto, interesa conocer cuál es el comportamiento de dichas variables, es decir, cuál va a ser su rango de variación para cada uno de los periodos de proyección.

Para ello, es necesario identificar la función de probabilidad que se asocia a cada uno de las variables afectadas por el riesgo, es decir, la función que explica y refleja el comportamiento de la variable.

Entre las principales, más comunes y de más sencilla aplicación para el usuario destacamos las siguientes funciones de distribución de probabilidad asignables a las variables de un proyecto, como se muestran en la Figura 16.

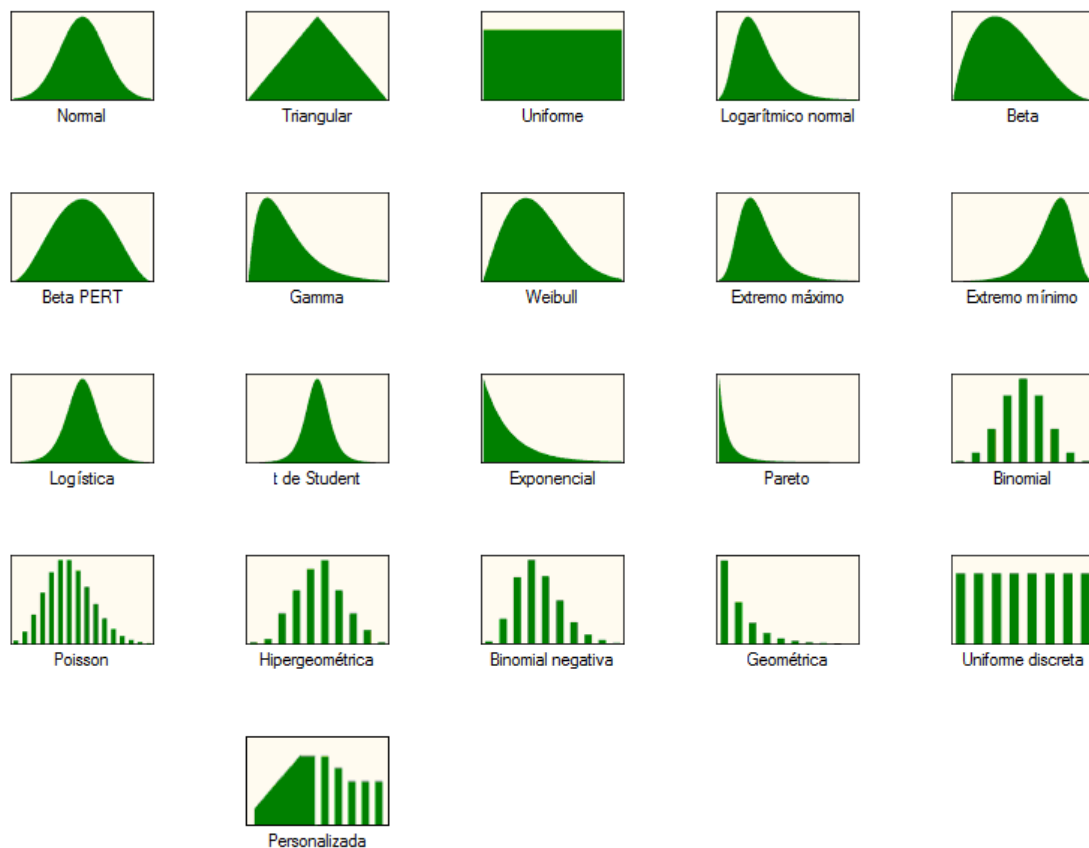


Figura 16: Distribución de Probabilidades.

Referencia: Software, Oracle Crystal Ball.

5.5 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES SOBRE LAS CUALES MEDIR EL RIESGO.

Para cuantificar el riesgo del proyecto, deben identificarse la variable o variables sobre las que se va a medir dicho riesgo.

En proyectos de construcción, las variables que más importan y que se utilizarán como horizonte de variables de salida u output, en las cuales interesa medir el riesgo son:

1. Tiempo de duración del proyecto
2. Costo final del proyecto

5.6 SIMULACIÓN

En resumen, el procedimiento es el siguiente:

- Realizar un ejercicio para identificar los riesgos en función de alguno de los métodos propuestos.
- Seleccionar cuáles son las variables del proyecto que se ven afectadas por el riesgo.
- Introducir los valores identificados para cada una de las variables afectadas por el riesgo. Con ayuda del programa Crystal Ball, se pueden hacer regresiones para determinar su comportamiento y así definir su función de probabilidad.
- Determinar cuál es la variable de salida para la que se va a cuantificar el riesgo total del proyecto.
- Crear un modelo donde intervengan las variables de riesgo y las variables de salida que se han determinado.
- Realizar el proceso de simulación, es decir, efectuar las iteraciones necesarias, a través de un modelo numérico.
- Generar suficientes iteraciones, con objeto de obtener una muestra que sea representativa
- La simulación genera de forma aleatoria, distintos valores dentro de un rango determinado por su comportamiento, para las variables de riesgo, y genera distintos valores para las variables de salida.
- La simulación tiene como objetivo, entregar posibles resultados con cierto grado de ocurrencia o probabilidad, como por ejemplo su valor más probable, valor máximo, desviación etc. para la toma de decisiones.

5.7 GENERACIÓN DE INFORMES Y OBTENCIÓN DEL PERFIL DE RIESGO

Para entender los resultados obtenidos y su comportamiento, existen Gráficos e informes como los que se detallan a continuación:

5.7.1 Histograma:

Un Histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Sirven para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o de la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua (como la longitud o el peso).

El Histograma muestra los posibles valores de las variables en estudio, que podrán ser alcanzados con un nivel de confianza determinado (probabilidad de ocurrencia asociada al valor), como se muestra en la Figura 17.

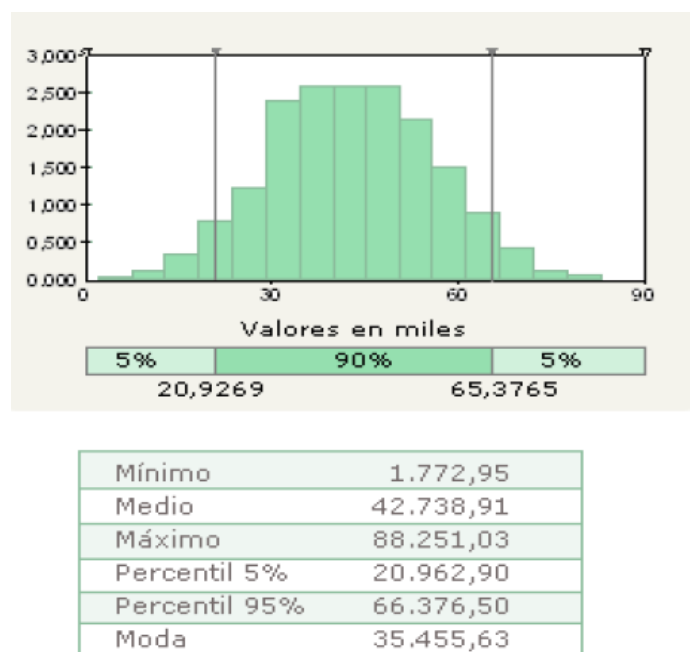


Figura 17: Histograma

Referencia: Gestión de Riesgos, Análisis y Cuantificación. Comunidad de Madrid.

5.7.2 Análisis de Sensibilidad

Con el objeto de facilitar la toma de decisiones, se puede realizar un análisis de sensibilidad, el cual indicará las variables que más afectan el resultado de un proyecto y cuáles son las variables que tienen poca incidencia en el resultado final.

Uno de las herramientas más utilizadas dentro del análisis de sensibilidad, es el Gráfico Tornado (Figura 18), en él, se visualiza de manera ponderada la incertidumbre y proporciona una visión general de los riesgos implicados en un proyecto.

En el Gráfico tornado (Figura 18), se vislumbra la jerarquía relativa de una variable de entrada versus otra al comparar los efectos de todas las variables de entrada por sobre los resultados. Para cada variable de entrada, la longitud de la barra indica la cantidad de cambio que tal variable de entrada causó por sobre los resultados.

El Gráfico Tornado se interpreta de la siguiente manera:

- Las barras horizontales del Gráfico, informan sobre el posible rango de variación de la variable
- La longitud de las barras representará los diferentes valores que puede tomar la variable ante variaciones en la variable de riesgo asociada.

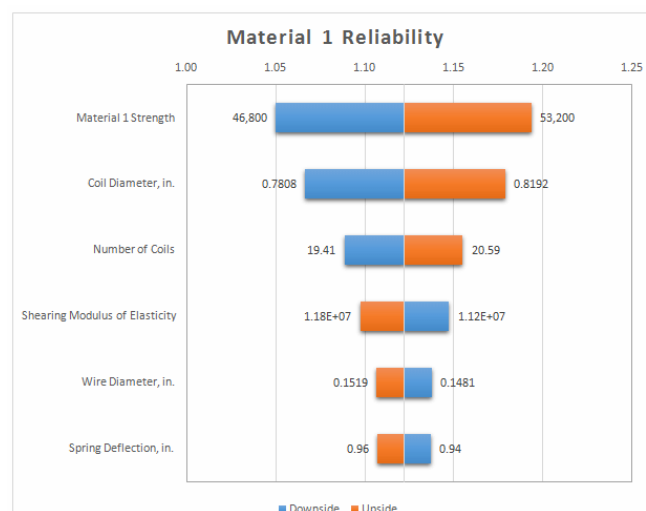


Figura 18: Tornado de Sensibilidad

Referencia: Gestión de Riesgos, Análisis y Cuantificación. Comunidad de Madrid.

5.7.3 Valor en riesgo (VaR)

El VaR es un método para cuantificar el riesgo, cuyas siglas en inglés significan “Value at Risk” (Valor en Riesgo), que mide la peor pérdida esperada por el emprendedor durante un periodo de tiempo, bajo condiciones normales y con un nivel de confianza dado.

Esta cifra sola, resume la exposición de un proyecto al riesgo en condiciones normales, sin considerar situaciones extremas que podrían llegar a producirse en el proyecto.

El VaR es útil para una serie de propósitos:

- Presentación de la información. Es útil como medida para evaluar los riesgos y aporta una mayor transparencia para realizar el seguimiento y control de los riesgos.
- Asignación de recursos. Puede emplearse para decidir donde es más conveniente dedicar los recursos.
- Evaluación del desempeño. Puede utilizarse para ajustar el desempeño por riesgo, y evitar que se tome un riesgo extra a la hora de gestionar el proyecto.

El Valor en Riesgo del Proyecto (VaR), se determina para un nivel de confianza determinado, por ejemplo del 95%, se calcula como la diferencia entre el valor que tiene una probabilidad de ocurrencia del 95% y el valor medio de ocurrencia, como se observa en el Gráfico 7.

$$VaR = Valor P(95\%) - Valor P(50\%)$$

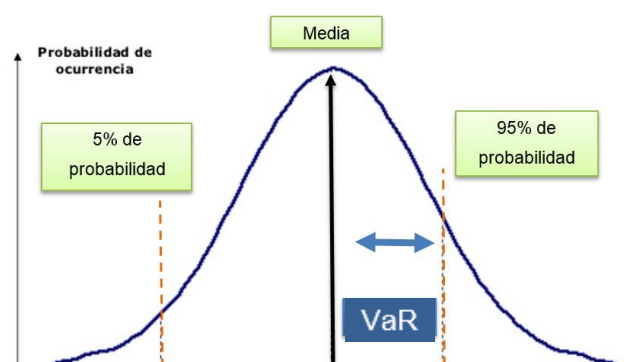


Gráfico 7: VaR

Referencia: Gestión de Riesgos, Análisis y Cuantificación. Comunidad de Madrid.

El Valor del riesgo Porcentual (%): se calcula dividiendo el valor con una probabilidad de ocurrencia al 95% y el valor con una probabilidad de ocurrencia al 50% o la media

$$VaR \% = \frac{VaR}{Media}$$

6 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES

Como se definió en el Capítulo anterior, el primer pasó de un modelo de riesgo, es identificar las variables relevantes del proyecto.

Por consiguiente, las variables que influyen en la construcción de túneles y que determinan el tiempo y costos de construcción, se agrupan de la siguiente manera.

6.1 VARIABLES GEOTÉCNICAS O GEOMÉTRICAS

Estas variables son determinadas por el tipo de sección a excavar, son entregadas desde el proyecto de ingeniería, son:

- Geometría de la planta: Esto determina el tipo de sección si es curva o recta.
- Longitud de túnel: medida en metros
- Tipo de suelo: Determina si el tipo de suelo a excavar, grava, mixto o fino.
- Tipo de sección: Determinar si la sección es túnel o estocada.

Para el proyecto en estudio se obtuvieron, ver Tabla 10:

		Túnel 1					
Descripción	Unid.	Poniente			Oriente		
TIPO SECCIÓN		Túnel	Túnel	Estocada	Estocada	Túnel	Túnel
TIPO SUELO		Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto
GEOM. PLANTA		Curva	Recta	Recta	Recta	Recta	Curva
LONG (m)	m	215	60	25	25	89	186
Plano	N°	738	736	450	450	736	738
		Total					

		Túnel 2									
Descripción	Unid.	Poniente					Oriente				
TIPO SECCIÓN		Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Túnel	Estocada	Estocada	Túnel	Túnel	Túnel
TIPO SUELO		Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto	Mixto
GEOM. PLANTA		Recta	Curva	Curva	Curva	Curva	Curva	Curva	Curva	Recta	Curva
LONG (m)	m	86	11	100	60	93	25	25	80	21	250
Plano	N°	714	712	714	451	451	714	726	714	738	736
		Total									

Tabla 10: Geometría de túneles

Referencia: Elaboración Propia.

6.2 VARIABLES DE MEDICIÓN

Una vez determinadas las variables geométricas se procede a cubicar las secciones de acuerdo a los planos. Las cantidades obtenidas se resumen en la Tabla 11, estas cantidades están respaldadas en los planos referenciales adjuntados en el Anexo 1.

Descripción	Unid.	Túnel 1					
		Poniente			Oriente		
Secciones	N°	738	736	450	450	736	738
Excavación	m ³ /ml	67,1	60,0	67,5	67,5	60,0	67,1
Sello (5cm)	m ² /ml	21,3	20,2	20,8	20,8	20,2	21,3
Sello de Frente (3cm)	m ² /ml	67,1	60,0	6,8	6,8	60,0	67,1
Malla Primario C-335	m ² /ml	21,3	20,2	20,3	20,3	20,2	21,3
Revestimiento Primario (15cm)	m ³ /ml	4,2	4,1	2,8	2,8	4,1	4,2
Malla Secundario C-335	m ² /ml	19,7	18,6	18,7	18,7	18,6	19,7
Revestimiento Secundario (15cm)	m ³ /ml	2,9	2,8	1,7	1,7	2,8	2,9

Descripción	Unid.	Túnel 2									
		Poniente					Oriente				
Plano	N°	736	738	714	726	714	451	451	714	712	714
Excavación	m ³ /ml	60	67,1	68,7	74,2	68,7	67,5	67,5	68,7	61,5	68,7
Sello (5cm)	m ² /ml	20,2	21,3	21,6	21,6	21,6	20,8	20,8	21,6	20,5	21,6
Sello de Frente	m ² /ml	60	67,1	68,7	74,2	68,7	6,8	6,8	68,7	61,5	68,7
Malla Primario C-335	m ² /ml	20,2	21,3	21,6	21,6	21,6	20,3	20,3	21,6	20,4	21,6
Revestimiento Primario (15cm)	m ³ /ml	4,1	4,2	4,4	4,2	4,4	2,8	2,8	4,4	4,2	4,4
Malla Secundario C-335	m ² /ml	18,6	19,7	20	20,5	20	20,1	20,1	20	18,9	20
Revestimiento Primario (15cm)	m ³ /ml	2,8	2,9	2,96	3,04	2,96	2,18	2,18	2,96	2,8	2,96

Tabla 11: Cantidades de obra por sección.

Referencia: Elaboración Propia.

6.3 VARIABLES DE TIEMPO

Una de las variables más importante, es el horario de trabajo del proyecto, que se define una vez estudiado el proyecto (Tabla 12). Determina el tiempo disponible para ejecutar los trabajos.

Tiempo	Utilizados en obra
Turnos	6x1
Días trabajados en el mes [días]	26
Horario Lunes a Viernes [hr]	24
Horario Sábado [hr]	12

Tabla 12: Tiempos de trabajo disponibles.

Referencia: Elaboración Propia.

6.4 RENDIMIENTOS

Para realizar la metodología en estudio, es imprescindible la obtención de los rendimientos de cada uno de los parámetros relevantes, y que sean lo más representativos posibles, tanto de la realidad chilena como del método constructivo empleado.

La obtención de datos se realiza a través de hojas prediseñadas (Tabla 13), en las cuales los jefes de turno, son los responsables de llenar, colocando el tiempo en realizar cada etapa de los trabajo, del mismo modo también se registran las horas perdidas, o no ocupadas. Registrado el tiempo y avance es posible calcular los rendimientos, con lo cual se detectan las desviaciones y por último la eficiencia del proceso constructivo. El respaldo de los tiempos de ejecución se encuentra en Anexo 2.

TURNO	FECHA	Avance [m]	HORAS x TURNO	HORAS DEMOLICIÓN SELLO FRENTE	HORAS EXCAVACIÓN	HORAS SELLO	HORAS MALLA PRIMARIO	HORAS MARCO	HORAS HP1	HORAS LIMPIEZA MARCO	HORAS MALLA SECUNDARIO	HORAS HP2	HORAS COLACIÓN	HORAS PARADAS DEMORA HORMIGÓN	HORAS PARADAS PROBLEMAS MECÁNICOS	HORAS PARADAS CHARLA DE 5 MIN.	HORAS PARADAS OTROS
A																	
B																	

Tabla 13: Obtención de parámetros relevantes en situ de las obras.

Referencia: Elaboración Propia.

De la Tabla 13, se detallan las celdas de color amarillo, que se utilizaron para obtener los tiempos de ejecución para las diferentes etapas. Las celdas de color celeste son las horas no trabajadas, en la cual se detallan las causas.

Obteniendo la relación entre las horas trabajadas y horas paradas, se puede obtener la eficiencia del proceso constructivo, como se verificara más adelante es uno de los parámetros que más intervienen en el tiempo de ejecución del proyecto.

Una vez obtenido el tiempo de ejecución de cada actividad y el avance o cantidad realizada, se puede calcular el rendimiento, de las siguientes actividades:

- Excavación con PC 130
- Proyección sello
- Colocación malla primario C-335
- Colocación malla secundario C-335
- Colocación marco
- Proyección revestimiento primario (HP-1)
- Proyección revestimiento secundario (HP-2)
- Eficiencia
- Pérdidas en el shotcrete sello
- Pérdidas en el shotcrete HP-1 y HP-2
- Espaciamiento entre marcos
- Desprendimiento

6.4.1 Selección de las distribuciones de probabilidades.

Obtenidos los rendimientos, de las variables que interviene en el proceso constructivo, el siguiente paso es determinar su comportamiento, asignar una distribución de probabilidad a cada variable.

Con la ayuda del software Crystal Ball, se realiza las regresiones y ajustes que más representen tanto matemáticamente como físicamente a través de la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado.

A continuación se muestran las distribuciones asignadas a cada variable:

- **Excavación con PC 130:** Rendimiento en [m³/hr].

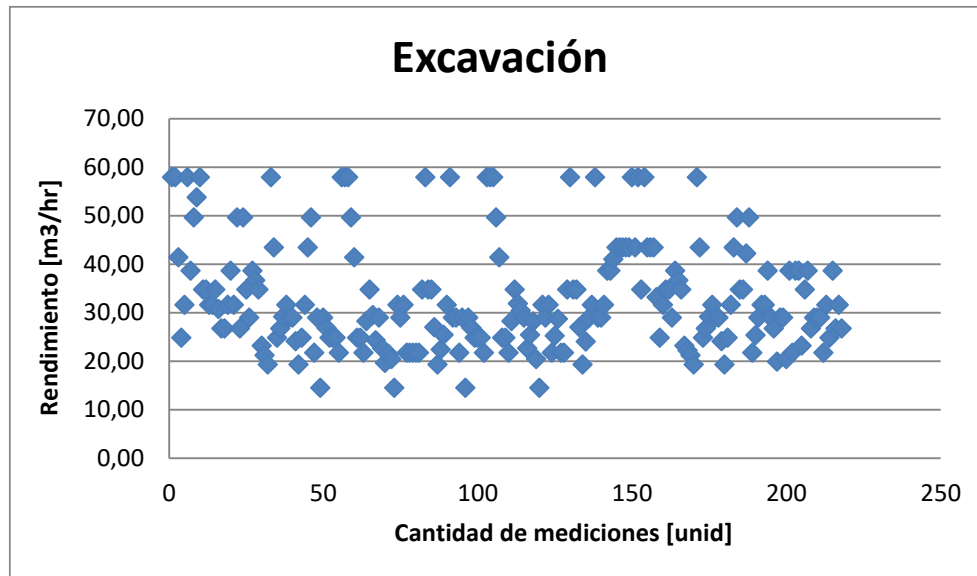


Gráfico 8: Rendimiento en excavar una sección tipo [m³/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

La excavación muestra en general un rendimiento constante en todas las etapas salvo leves peak y su dispersión fluctúa entre los $\pm 10 \text{ m}^3$, como se muestra en el Gráfico 8.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Beta, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 14:

			Parámetros				
Actividad	Unid	Distribución	A	β	Mínimo	Máximo	Media
Excavación	m ³ /hr	Beta	22,00	100,00	23,63	45,82	35,31

Tabla 14: Ajuste de distribución Beta a la excavación.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Proyección sello:** Rendimiento en [m³/hr]. Espesor de 5 cm.

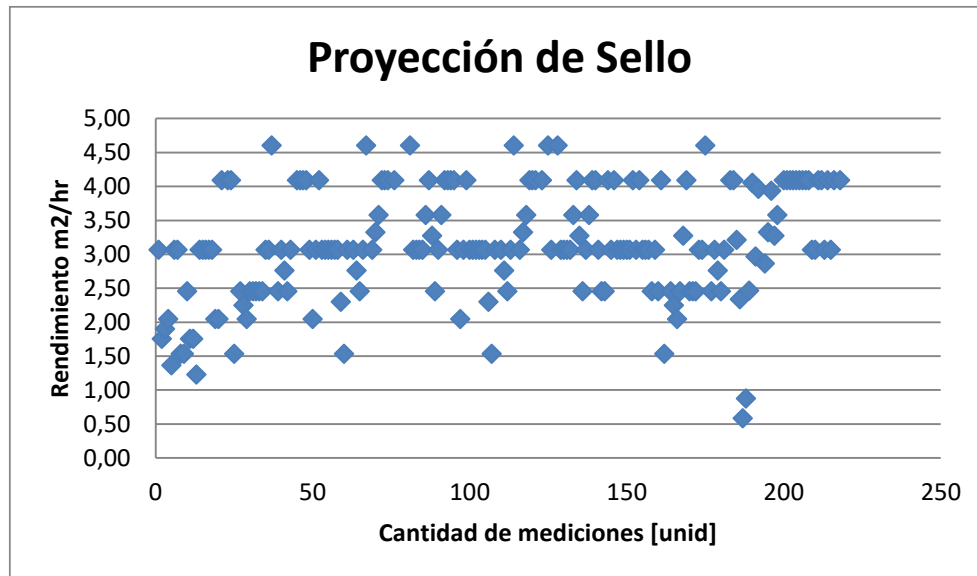


Gráfico 9: Rendimiento en la proyección de sello [m³/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

La proyección de sello muestra una gran dispersión de los datos, como se muestra en el Gráfico 9, acorde a la dificultad de esta actividad producto del rechazo o rebote.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Beta, con los siguientes parámetros, como se muestra en la Tabla 15:

			Parámetros				
Actividad	Unid	Distribución	A	β	Mínimo	Máximo	Media
Proyección sello	m ³ /hr	Beta	3,23	5,45	2,01	5,86	4,05

Tabla 15: Ajuste de distribución Beta al Sello.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Colocación Malla C-335 en revestimiento primario:** Rendimiento en [m²/hr].

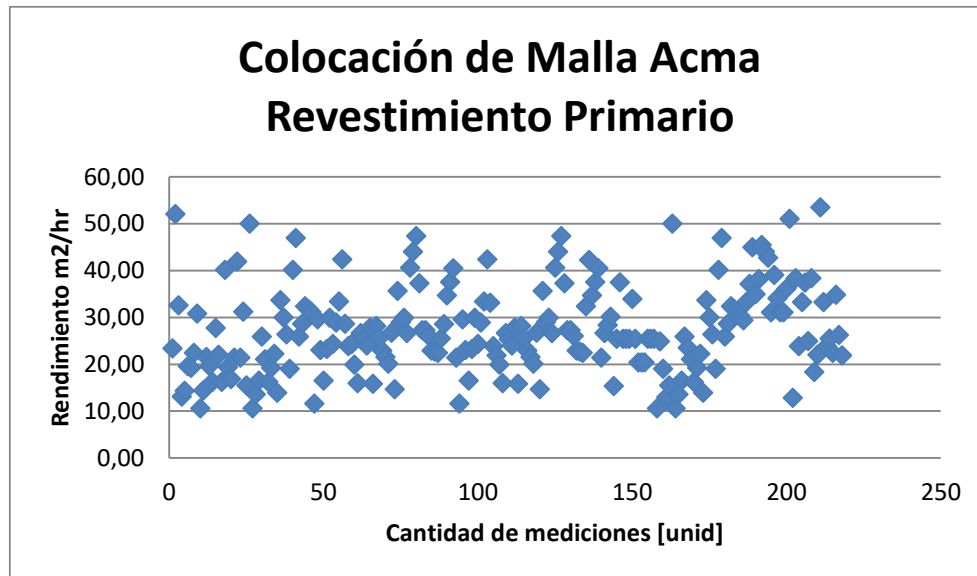


Gráfico 10: Rendimiento en la colocación de Malla Acma C-335 [m²/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

La colocación de Malla Acma en el revestimiento primario como se observa en el Gráfico 10, muestra en rendimiento en general constante como también su dispersión.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Weibull, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 16:

			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Forma	Escala	Media
Colocación malla C-335	m ² /hr	Weibull	2,40	31,80	28,19

Tabla 16: Ajuste de distribución Weibull a la colocación de malla.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Colocación de marco metálico:** Rendimiento en [un/hr].

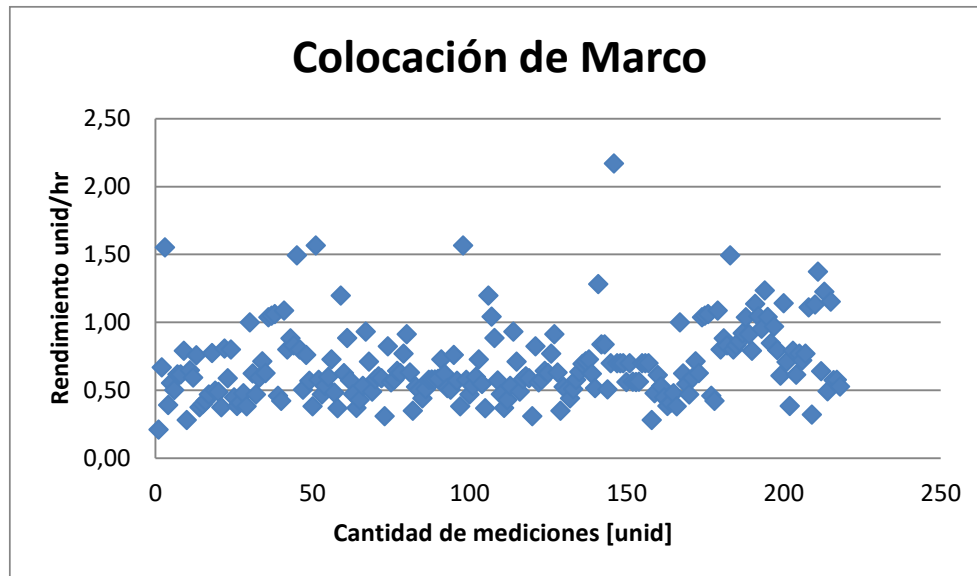


Gráfico 11: Rendimiento en la colocación de marco metálico [un/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

La colocación de marco metálico, como se aprecia en el Gráfico 11, muestra un rendimiento constante con poca dispersión salvo algunos peak.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Log Normal, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 17:

			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Media	D. estándar	Media
Colocación marco	unid/hora	Log Normal	0,68	0,30	0,68

Tabla 17: Ajuste de distribución Log Normal a la colocación del marco.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Proyección shotcrete revestimiento primario (HP-1):** Rendimiento en [m³/hr].

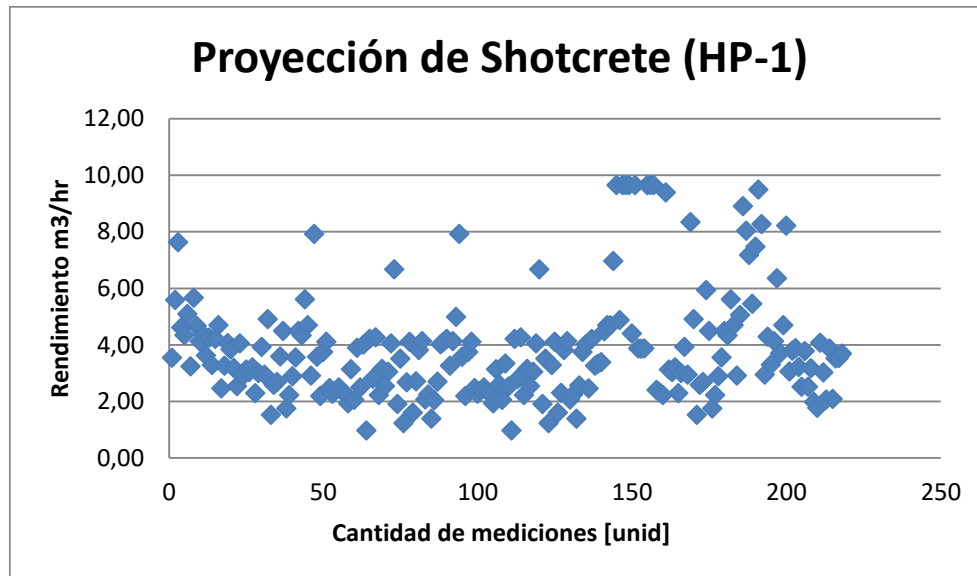


Gráfico 12: Rendimiento en la proyección de shotcrete (HP-1) en [m³/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

La proyección de shotcrete primario, como se observa en el Gráfico 12, muestra en un principio un rendimiento mayor debido a que se encontraban en las secciones de estocada del túnel donde es espesor del revestimiento era mayor. En general la proyección en el resto del túnel se mantuvo constante salvo en algunos peak, debido a que en esas etapas del túnel se produjeron grandes desprendimientos los cuales debían ser rellenos con shotcrete.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Log Normal, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 18:

			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Media	D. estándar	Media
Proyección HP-1	m ³ /hora	Log Normal	4,69	1,08	4,69

Tabla 18: Ajuste de distribución Log Normal a la Proyección de HP-1.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Colocación malla C-335 en revestimiento secundario:** Rendimiento en [m²/hr].

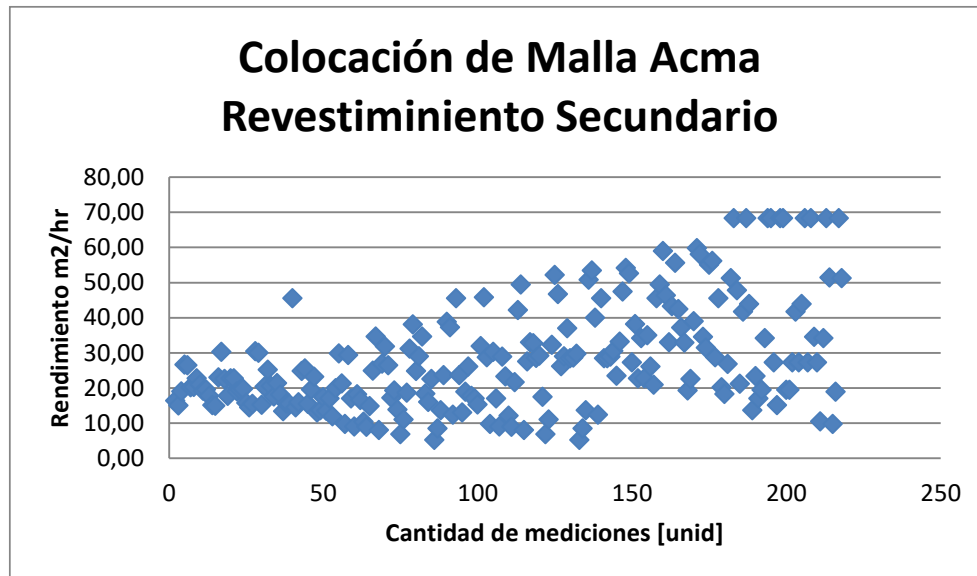


Gráfico 13: Rendimiento en la colocación de Malla Acma C-335 [m²/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

La colocación de Malla Acma del revestimiento secundario (Gráfico 13), muestra un principio un rendimiento parejo, pero a medida que pasa el tiempo este va aumentando igual que su dispersión, debido a que el revestimiento secundario en los últimos tramos del túnel se planifica para realizar el último, teniendo libre grandes secciones para avanzar sin dificultad, aumentando la colocación.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Weibull, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 19:

			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Forma	Escala	Media
Colocación malla C-335	m ² /hr	Weibull	2,40	31,80	28,19

Tabla 19: Ajuste de distribución Weibull a la colocación de malla.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Proyección shotcrete en revestimiento secundario (HP-2):** Rendimiento en [m³/hr].

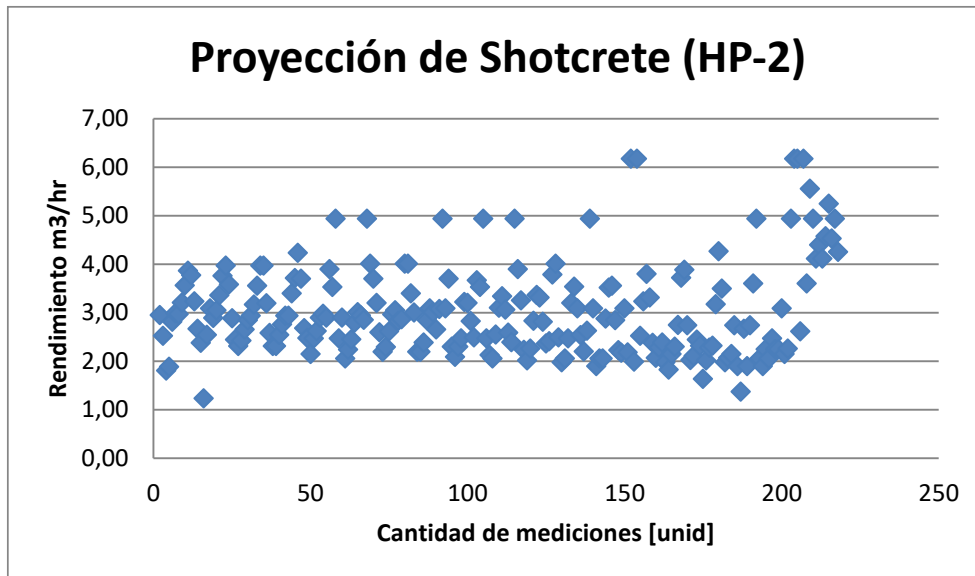


Gráfico 14: Rendimiento en la proyección de shotcrete (HP-2) en [m³/hr].

Referencia: Elaboración Propia.

El rendimiento de la proyección del shotcrete del revestimiento secundario, se mantuvo con un rendimiento y dispersión constante salvo en las últimas etapas de túnel como se aprecia en el Gráfico 14, debido a que en la última etapa del túnel, el revestimiento secundario se dejó para el último, teniendo libre grandes secciones aumentando su rendimiento.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Log Normal, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 20:

			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Media	D. estándar	Media
Proyección HP-1	m ³ /hora	Log Normal	4,19	1,08	4,19

Tabla 20: Ajuste de distribución Log Normal a la Proyección de HP-1.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Eficiencia:** La eficiencia del proceso constructivo [%].

Es otra variable que interviene en forma directa en todas las etapas de la construcción, se determina por horas trabajadas y horas perdidas (Tabla 21), también determina el porcentaje de producción real del proceso constructivo. Esta variable sirve para detectar desviaciones o problemas del sistema constructivo.

HORAS x TURNO	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	TOTAL
	DEMOLICIÓN SELLO FRENTE	EXCAVACIÓN	SELLO	MALLA ACMA EXCAVACIÓN	MARCO	HP1	HORAS PRODUCCIÓN
Min	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	2,75
Esperado	0,40	2,40	1,00	0,75	2,05	2,35	8,95
Max	0,50	3,00	1,05	1,20	2,10	2,90	10,75

HORAS x TURNO	HORAS	HORAS PARADAS	HORAS PARADAS	HORAS PARADAS	HORAS PARADAS	TOTAL
	COLACIÓN	DEMORA HORMIGÓN	PROBLEMAS MECÁNICOS	CHARLA DE 15 MIN.	OTROS	HORAS PRODUCCIÓN
Min	1,00	0,00	0,00	0,25	0,00	1,25
Esperado	1,05	0,58	0,60	0,62	0,20	3,05
Max	1,00	2,35	2,90	1,00	2,00	9,25

Tabla 21: Control de Producción, mínimo, máximo, y promedio.

Referencia: Elaboración Propia.

La eficiencia del proceso constructivo se determina dividiendo las horas efectivamente trabajadas en el turno con las horas disponibles dentro de la jornada laboral, como se muestran en el Gráfico 15 y 16.

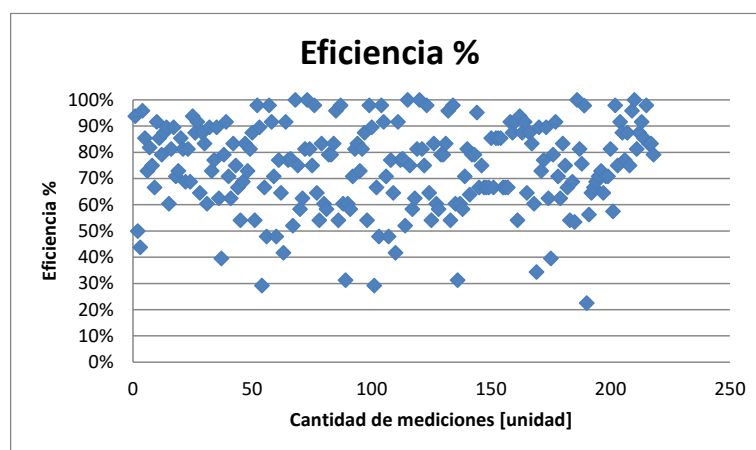


Gráfico 15: Producción de [%] del Proceso Constructivo.

Referencia: Elaboración Propia.

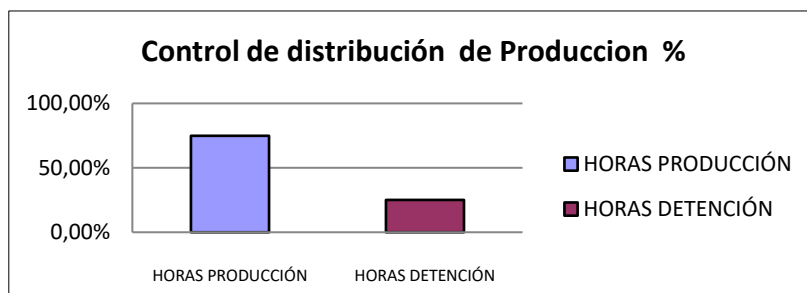


Gráfico 16: Producción y detención.

Referencia: Elaboración Propia.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es la distribución Beta, con los siguientes parámetros, como se muestran en la Tabla 22:

			Parámetros				
Actividad	Unid	Distribución	α	B	Mínimo	Máximo	Medias
Eficiencia	%	Beta	10,74	3,42	0,31	0,88	0,746

Tabla 22: Ajuste distribución Beta a la Eficiencia del sistema [%].

Referencia: Elaboración Propia.

- **Pérdidas en el shotcrete de sello:** Perdidas en la proyección del shotcrete [%] .

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es una distribución Uniforme, con los siguientes parámetros, que se muestran en la siguiente Tabla 23:

Distribución			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Mínimo	Máximo	Medias
Pérdidas en el shotcrete sello	%	Uniforme	80%	120%	100%

Tabla 23: Ajuste distribución Uniforme a las pérdidas de shotcrete [%]

Referencia: Elaboración Propia.

- **Pérdidas en el shotcrete revestimiento HP-1 y HP-2:**

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es una distribución Uniforme, con los siguientes parámetros:

			Parámetros		
Actividad	Unid	Distribución	Mínimo	Máximo	Medias
Pérdidas en el shotcrete HP-1 y HP-2	%	Uniforme	70%	110%	90%

Tabla 24: Ajuste distribución Uniforme a las pérdidas de shotcrete [%].

Referencia: Elaboración Propia.

- **Espaciamiento entre marcos:** Distancia entre marcos de acero consecutivos, en metros.

Por su importancia el espaciamiento entre marcos es controlado de forma continua en todos los tramos del túnel, este control es llevado a cabo por la empresa contratista y la inspección.

En la Tabla 25, se muestra un extracto de los informes realizados para el control de avance y espaciamiento entre marcos. En el informe se detalla fecha de colocación, en qué turno fue realizado (diurno “A” o nocturno “B”), distancia en metros del marco consecutivo, el tipo de marco, y su número correlativo.

Fecha	TUNEL INTERESTACION																							
	16-sep	17-sep	22-sep	23-sep	23-sep	24-sep	24-sep	25-sep	26-sep	26-sep	29-sep	30-sep	30-sep	01-oct	01-oct	02-oct	06-oct	07-oct	08-oct	09-oct	10-oct	13-oct	13-oct	14-oct
Turno	A	A	A	A	B	A	B	B	A	B	A	A	B	A	B	B	A	B	B	B	B	A	B	A
	966,190	967,690	969,190	970,690	972,190	973,690	975,190	976,690	978,190	979,690	981,190	982,690	984,190	985,690	987,190	988,690	990,190	991,690	993,190	994,190	994,690	995,190	995,690	996,390
m	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,70
Marco	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736
N°	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74

Tabla 25: Extracto de informe de avances.

Referencia: Elaboración Propia.

Los datos de espaciamiento obtenidos se ajustan de mejor manera a una distribución discreta, como se muestra en la Tabla 26.

Espaciamiento entre Marcos		
Metros	Cantidad	Probabilidad.
1,5	236	63%
1	92	25%
0,7	32	9%
0,5	12	3%
Total	372	1

Tabla 26: Distribución del espaciamiento entre marcos.

Referencia: Elaboración Propia.

La distribución que mejor se ajusta a su comportamiento, es una distribución Discreta, como se muestran en el Gráfico 17, con los siguientes parámetros:

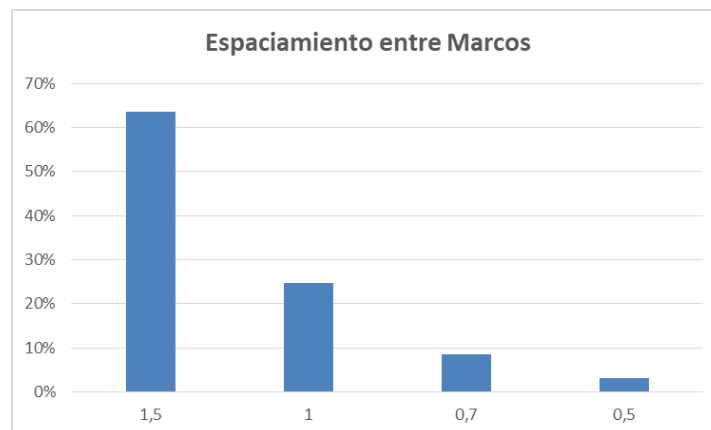


Gráfico 17: Distribución Discreta del espaciamiento entre marcos.

Referencia: Elaboración Propia.

Descripción	Unid	m	Prob	Media
Espaciamiento entre marcos	m	1,5	63%	1,273
Espaciamiento entre marcos	m	1	25%	
Espaciamiento entre marcos	m	0,7	9%	
Espaciamiento entre marcos	m	0,5	3%	

Tabla 27: Ajuste distribución discreta al espaciamiento de marcos.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Desprendimiento [m³]:**

Para los desprendimientos de terreno, se encuentra una correlación entre el espaciamiento entre marcos y volúmenes desprendidos:

En la Tabla 28, se muestra un extracto de los desprendimientos ocurridos en la construcción del túnel.

	túnel Interceptación																	
N° Marco	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Volumen desprendimiento (m³)	5,8	4,4	0,0	3,8	3,5	7,0	6,5	5,2	4,7	3,2	1,8	0,0	1,8	4,4	2,4	4,1	1,3	0,9
Distancia entre marcos (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1

Tabla 28: Extracto de control de desprendimientos.

Referencia: Elaboración Propia.

Agrupando los desprendimientos por el espaciamiento entre marcos se obtiene el siguiente

Gráfico 18:

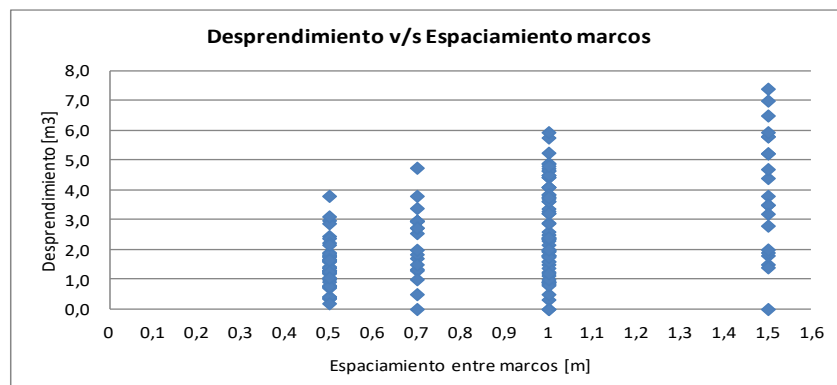


Gráfico 18: Desprendimientos v/s espaciamiento marcos.

Referencia: Elaboración Propia.

Dada la aleatoriedad de los volúmenes desprendidos, se probaron distintas distribuciones sin ajustarse a ninguna, por lo cual se filtró de acuerdo a los volúmenes de excavación y espaciamiento de marco. Y para representar de mejor manera la aleatoriedad de esta variable, fue separada por espaciamiento entre marcos como se muestra a continuación.

Espaciamiento entre Marcos [m]	Minino	Máximo
1,50	0	7,5
1,00	0	6,0
0,70	0	4,9
0,50	0	4,0

Tabla 29: Distribución uniforme de espaciamento de marcos.

Referencia: Elaboración Propia.

La distribución que mejor se ajustaba, a los diferentes espaciamentos entre marcos se muestra a continuación:

Descripción	Unid	Avance	Distribución	Parámetros				
		M		Forma	Escala			Media
Desprendimiento	m ³ /ml	1,5	Weibull	3,54	8,53			7,68
				A	β	Mín.	Máx.	Media
Desprendimiento	m ³ /ml	1	Beta	1,37	1,72	0,16	6,12	2,8
				Forma	Escala			Media
Desprendimiento	m ³ /ml	0,7	Weibull	3,62	4,73			4,26
				A	β	Mín.	Máx.	Medias
Desprendimiento	m ³ /ml	0,5	Beta	3	8,86	0	4,35	1,1

Tabla 30: Distribuciones de desprendimiento según espaciamento de marco.

Referencia: Elaboración Propia.

En la Tabla 31, se resumen las variables utilizadas con su respectiva distribución, además del origen de los datos para su ajuste.

Geométricos	Tipo	Distribución	Obtención de Datos
GEOM. PLANTA	Curva – Recta	Dato	Licitación
LONG (m)	Metros	Dato	Licitación
Tipo de Suelo o Revestimiento	Mixto	Dato	Licitación y estudio de suelo
Cantidades			
Excavación	Mixto	Dato	Licitación y estudio de suelo
Sello (5cm)	Mixto	Dato	Licitación y estudio de suelo
Sello de Frente	Mixto	Dato	Licitación y estudio de suelo
Revestimiento Primario (15cm)	Mixto	Dato	Licitación y estudio de suelo
Malla Primario C-335	Mixto	Dato	Licitación y estudio de suelo
Rendimiento			
Excavación con PC 130	Parámetros	Beta	Terreno
Proyección sello	Parámetros	Beta	Terreno
Colocación malla C-295	Parámetros	Weibull	Terreno
Colocación marco	Parámetros	Log Normal	Terreno
Proyección HP-1	Parámetros	Log Normal	Terreno
Eficiencia	Parámetros	Beta	Terreno
Pérdidas en el shotcrete sello	Parámetros	Uniforme	Terreno y manual Sika
Pérdidas en el shotcrete HP-1	Parámetros	Uniforme	Terreno y manual Sika
Varios			
Espaciamiento de marcos	1,5 - 1 - 0,7 - 0,5	Discreta	Terreno
Desprendimiento	Esp. Marcos 1,5	Weibull	Terreno
	Esp. Marcos 1	Beta	Terreno
	Esp. Marcos 0,7	Weibull	Terreno
	Esp. Marcos 0,5	Beta	Terreno
Tiempo			
Turnos	6x1	Dato	Licitación
Días trabajados	26	Dato	Licitación
Horario Lunes a Viernes	24	Dato	Licitación
Horario Sábado y Domingo	12	Dato	Licitación

Tabla 31: Resumen de Variables en estudio.

Referencia: Elaboración Propia.

6.5 DIAGRAMA DE FLUJO

Para una mejor comprensión de la metodología utilizada en los cálculos, la que tiene como finalidad determinar el tiempo final de construcción con su costo asociado. Se confecciona el diagrama de flujo (Figura 19).

En el diagrama se describe el procedimiento de manera general, de la interdependencia de las variables.

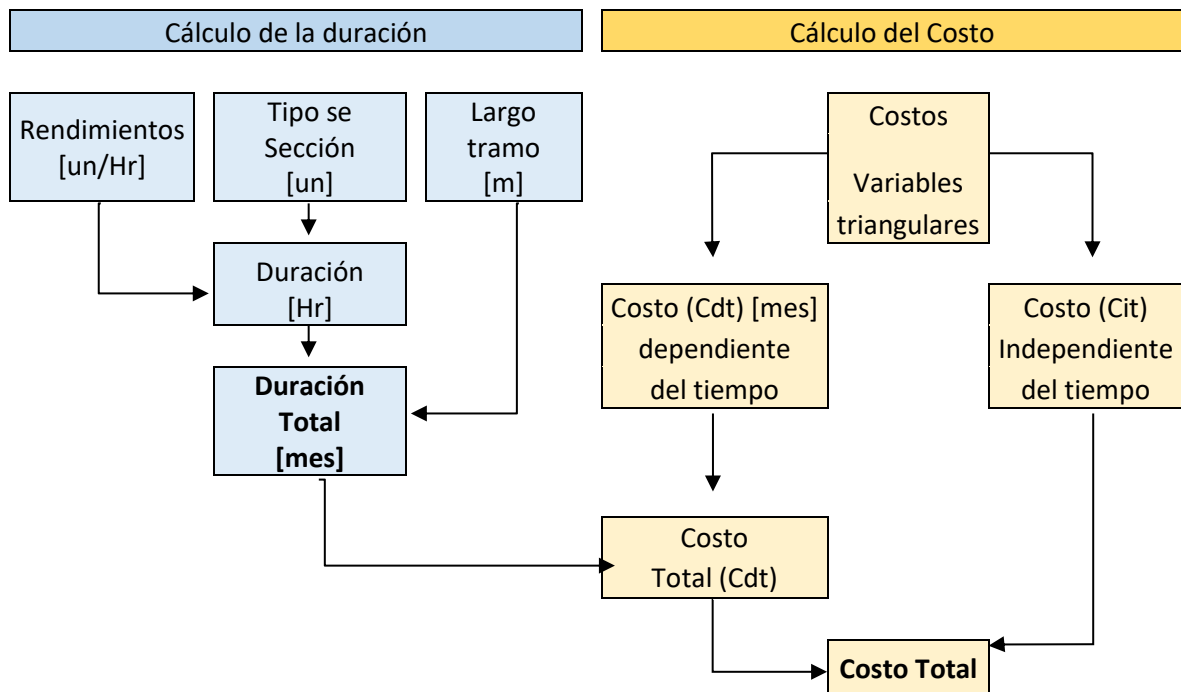


Figura 19: Diagrama de Flujo, del modelo para los cálculos de los tiempos y costos de la obra.

Referencia: Elaboración Propia.

7 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE OBRA.

Determinadas las variables y establecidas sus respectivas distribuciones, el siguiente paso es determinar una metodología para calcular el tiempo final de construcción.

La metodología y un eventual modelo, se realiza en Excel, excelente motor de cálculo. Para lo cual primero, se definirán los datos de entrada, mencionados en el capítulo anterior, de la siguiente manera:

Se obtendrán muestras de cada variable definidos en capítulo 6, con los siguientes algoritmos:

- Excavación [m³/hr]:

$$\text{Excavación (i)} = \text{DISTR.BETA.INV}(\text{ALEATORIO}(); \alpha, \beta, a, b).$$

- Proyección de Sello [m³/hr]:

$$\text{Proyección de Sello (i)} = \text{DISTR.BETA.INV}(\text{ALEATORIO}(); \alpha, \beta, a, b).$$

- Colocación de Malla Acma [m²/hr]:

$$\text{Colocación de Marco (i)} = \text{Forma} * (-\text{LN}(1 - \text{ALEATORIO}()))^{(1/\text{escala})}$$

- Colocación de Marco Primario [un/hr]:

$$\begin{aligned} \text{Colocación de Marco (i)} = & \text{DISTR.LOG.INV}(\text{ALEATORIO}(); \text{LN}(\text{media}) - \\ & 0,5 * \text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2); \text{RAIZ}(\text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2))) \end{aligned}$$

- Proyección de Revestimiento HP-1 [m³/hr]:

$$\begin{aligned} \text{Proyección de HP-1 (i)} = & \text{DISTR.LOG.INV}(\text{ALEATORIO}(); \text{LN}(\text{media}) - \\ & 0,5 * \text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2); \text{RAIZ}(\text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2))) \end{aligned}$$

- Colocación de Marco Secundario [un/hr]:

$$\begin{aligned} \text{Colocación de Marco (i)} = & \text{DISTR.LOG.INV}(\text{ALEATORIO}(); \text{LN}(\text{media}) - \\ & 0,5 * \text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2); \text{RAIZ}(\text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2))) \end{aligned}$$

- Proyección de Revestimiento HP-2 [m³/hr]:

$$\begin{aligned} \text{Proyección de HP-1 (i)} = & \text{DISTR.LOG.INV}(\text{ALEATORIO}(); \text{LN}(\text{media}) - \\ & 0,5 * \text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2); \text{RAIZ}(\text{LN}(1 + (\text{D.est}/\text{media})^2))) \end{aligned}$$

- Eficiencia [%]:

$$\text{Eficiencia (i)} = \text{DISTR.BETA.INV}(\text{ALEATORIO}(); \alpha, \beta, a, b).$$

- Pérdidas en el shotcrete sello [%]:

$$\text{shotcrete sello (i)} = \text{Aleatorio}() * (\text{Max} - \text{Min}) + \text{Min}$$

- Para obtener la muestra (i) de las Pérdidas en el shotcrete HP-1 [%]:

shotcrete HP-1 (i) = Aleatorio() * (Max - Min) + Min

- Pérdidas en el shotcrete HP-1 y HP-2 [%]:

Shotcrete HP-1 (i) = Aleatorio() * (Max - Min) + Min

- Espaciamiento entre marco [m]:

Para el espaciamiento entre marcos, se utilizan variables discretas de la forma:

Espaciamiento marcos				
	Unid	M	Probabilidad	Prob. Acum.
1	[m]	1,5	63%	0,63
2	[m]	1	25%	0,88
3	[m]	0,7	9%	0,97
4	[m]	0,5	3%	1

Tabla 32: Espaciamiento de marcos [m]

Para crear las muestras (i):

Espaciamiento marco (i) = If aleatorio(i) < P. acum (1); metros (1);

If aleatorio(i) < P. acum (2); metros (2);

If aleatorio(i) < P. acum (3); metros (3);

Else metros (4)

- Desprendimiento [m³]:

Para el desprendimiento se utiliza una variable uniforme por tramos, como se muestra en la Tabla 33.

Desprendimiento			
	Unid	Espaciamiento marco	Distribución
1	m ³ /ml	1,50	Weibull (1)
2	m ³ /ml	1,00	Beta (2)
3	m ³ /ml	0,70	Weibull (3)
4	m ³ /ml	0,50	Beta (4)

Tabla 33: Distribución de Desprendimiento.

Referencia: Elaboración Propia.

La creación de las muestras es con el siguiente algoritmo:

Desprendimiento (i) =

*If espac.marco = metros(1); Forma (1) * $(-\text{LN}(1 - \text{ALEATORIO}()))^{\frac{1}{\text{escala}(1)}}$*
If espac.marco = metros(2); DISTR. BETA. INV(ALEATORIO(i); $\alpha(2)$, $\beta(2)$, a(2), b(2))
*If espac.marco = metros(3); Forma(3) * $(-\text{LN}(1 - \text{ALEATORIO}()))^{\frac{1}{\text{escala}(3)}}$*
If espac.marco = metros(4) ; DISTR. BETA. INV(ALEATORIO(i); $\alpha(4)$, $\beta(4)$, a(4), b(4))

Teniendo las muestras (i) de cada uno de los rendimientos se procede a estimar, el tiempo que se ocupa en el ciclo de construcción del túnel, incorporando los datos geométricos, establecidos en el capítulo 6, de la siguiente manera:

(1) Excavación y perfilado [hr] (j) =

$$= \frac{\text{Espaciamiento (i)} * (\text{Volumen Excavacion} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{ml}} \right] + \text{Desprendimiento (i)} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{ml}} \right])}{\text{Excavación (i)} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right] * \text{Eficiencia \% (i)}}$$

(2) Sello excavación (5 cm) [hr] (j)=

$$= \frac{\text{Espaciamiento(i)} * \text{Sello (5cm)} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{ml}} \right] * 0,05 * (1 + \text{Pérdidas en el shotcrete sello\%(i)})}{\text{Proyección sello(i)} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{hora}} \right] * \text{Eficiencia \% (i)}}$$

(3) Sello frente (3cm) [hr] (j)=

$$= \frac{\text{Sello de Frente (3cm)} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{ml}} \right] * 0,03 * (1 + \text{Pérdidas en el shotcrete sello\%(i)})}{\text{Proyección sello} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{hora}} \right] * \text{Eficiencia \% (i)}}$$

(4) Malla [hr] (j)=

$$= \frac{\text{Espaciamiento(i)} * \text{Malla Primario} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{ml}} \right]}{\text{Colocación malla(i)} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{hora}} \right] * \text{Eficiencia \% (i)}}$$

(5) Instalación de Marco [hr] (j)=

$$= \frac{1 \text{ [unid]}}{\text{Colocación de Marco}(i) \left[\frac{\text{unid}}{\text{hora}} \right] * \text{Eficiencia \%}(i)}$$

(6) Shotcrete 1ª Capa (10 cm) [hr] (j)=

$$= \frac{\text{Espaciamiento}(i) * \text{Revestimiento } 1^{\circ} 10\text{cm} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{ml}} \right]}{\text{Proyeccion HP1}(i) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right] * \text{Eficiencia \%}(i) * (1 + \text{perdida shotcrete HP1 \%}(i))}$$

(7) Duración total ciclo avance [hr] (j)=

$$= \sum_{j=1}^6 \text{Formulas } (j)$$

(8) Número de ciclos en un día [1/día]=

$$= \frac{\text{horas trabajadas diarias} \left[\frac{\text{hr}}{\text{día}} \right]}{\text{Duración total ciclo avance [hr]}}$$

(9) Rendimiento Diario [m/día]=

$$= \text{Número de ciclos} \left[\frac{1}{\text{día}} \right] * \text{Espaciamiento entre marcos [m]}$$

(10) Duración tramo (i) [mes]

$$= \frac{\text{Metros del tramo } (j) \text{ [m]}}{\text{Días trabajados mensuales} \left[\frac{\text{día}}{\text{mes}} \right] * \text{Rendimiento diario} \left[\frac{\text{m}}{\text{día}} \right]}$$

(11) Duración Total (i)[mes]

$$= \sum_i^N \text{Duracion Tramo } (i) \text{ [mes]}$$

Este proceso se repetirá, en 2000 iteraciones, obtenido un perfil de tiempo total del proyecto, el cual se multiplicara más adelante con el perfil del costo dependiente del tiempo (Cdt).

8 ESTUDIO DE COSTOS

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe tanto el proceso de documentación llevada a cabo para cuantificar cada uno de los costos como el tratamiento que se les dará. Estos, al ser definidos como variables triangulares, requerirán tres valores: mínimo, esperado y máximo.

Estos valores han sido calculados de acuerdo a condiciones de terreno:

- **Mínimo:** Condiciones ideales de terreno, sin agua.
- **Esperado:** Condiciones normales de terreno, con agua de forma eventual, considerado en la licitación.
- **Máximo:** Condiciones desfavorable del terreno, con agua de forma permanente, bajo nivel freático.

Todos los costos han sido calculados en pesos chilenos [CLP].

8.2 ALGORITMO DE COSTO

Para el desarrollo del modelo, una de las salidas que se espera, es el costo total esperado en una obra de túnel, para lo cual, los costos se dividen en 2 categorías:

Dependientes del tiempo (Cdt): Son los costos en los que se deben incurrir mes a mes en la construcción de un túnel, por ejemplo arriendo de oficinas e instalaciones, costo del personal, maquinaria alquilada, etc.

Independientes del tiempo (Cit): Son los costos que no están relacionados con la duración de la obra, pero dependen de variables físicas del túnel, entiéndase, la geometría, longitud o diámetro del túnel, y los materiales que participan en el proceso de construcción, por ejemplo: materiales de obra, compra de maquinaria, subcontratos, etc.

Como se ha dicho anteriormente los costos se definirán como variables triangulares, requiriendo para ello valores mínimo, esperado y máximo.

Una vez obtenidos estos valores, se obtendrá la media y su desviación estándar, para cada costo en [\$/mes], como se observa en la Tabla 34.

Actividad	Unid	Mínimo	Esperado	Máximo	Media	Desviación estándar
Partida	\$/mes	A	B	C	Mci	σ_{ci}

Tabla 34: Distribución triangular.

Referencia: Elaboración Propia.

Media:

$$Mci = \frac{a + b + c}{3}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_{ci} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 - a * b - a * c - b * c}{18}}$$

Para la creación de las muestras se utilizara la misma metodología que la de los rendimientos:

$$\begin{aligned} \text{Costo}(i) &= \text{Ifaleatorio}() \leq (\text{Esperado} - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{min}) \\ &\text{ThenMin} + \text{Sqr}(\text{aleaorio}() * (\text{Max} - \text{Min}) * (\text{Esperado} - \text{Min})) \\ &\text{ElseMax} - \text{Sqr}((1 - \text{aleatorio}()) * (\text{Max} - \text{Min}) * (\text{Max} - \text{Esperado})) \end{aligned}$$

Luego se agruparan como costos dependientes del tiempo, e independientes del tiempo.

$$Cit(i) = \sum_1^m \text{Costos}(i)_{\text{independientes del tiempo}}$$

$$Cdt(i) = \sum_1^m \text{Costos}(i)_{\text{dependientes del tiempo}}$$

Obteniendo los costos totales dependientes e independientes del tiempo, los primeros se multiplicaran por la duración total del mes y se les sumaran los independientes, para obtener el costo total del proyecto, como se muestra a continuación.

Con lo cual en cada iteración se obtendrá el costo total:

$$\text{Costetotal}(i) = Cdt(i) * \text{Tiempototal}(i) + Cit(i)$$

A partir de estos resultados, se extrae la media y su desviación estándar final del costo mediante:

$$CosteFinal = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CostoTotal(i) \quad , N: \text{Número total de muestras.}$$

$$(\text{Desviación estándar}) s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Cfi - Cf)^2}{N - 1}$$

Definido el tiempo y costo total en forma de distribución, permitirá conocer la incertidumbre en los datos de salida, además de esta forma, no sólo se podrá acotar los resultados, sino además asociarles una probabilidad con lo que en el momento de toma de decisiones se sepa exactamente el riesgo incurrido.

8.3 DETALLE DE COSTOS

8.3.1 Costo directo

Es el costo relacionado con la producción. Recoge todos los costos que intervienen directamente en la ejecución de las unidades de obra.

Los diferentes tipos de costos directos, se podrían agrupar de la siguiente manera:

- **Mano de Obra Directa:**

Es el costo del personal, relacionado con la ejecución de la obra, concretada en unidades producibles, exceptuando los empleados en instalaciones y retirada de obra que se imputarán en la naturaleza correspondiente como se muestra en la Tabla 35 y 36.

Mano de Obra Directa Dependiente del Tiempo								
Excavación Túnel	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cantidad	Esperado	Cantidad	Máximo
Ayudante Minero	820.000	2	4	6.560.000	4	6.560.000	6	9.840.000
Capataz Eléctrico	1.750.000	2	1	3.500.000	1	3.500.000	1	3.500.000
Capataz Minero	1.627.500	2	2	6.510.000	2	6.510.000	2	6.510.000
Eléctrico	1.200.000	2	1	2.400.000	1	2.400.000	1	2.400.000
Minero	1.200.000	2	4	9.600.000	5	12.000.000	7	16.800.000
Mecánico	1.200.000	1	2	2.400.000	2	2.400.000	2	2.400.000
PITONERO/OP. ROBOSHOT	1.275.000	2	2	5.100.000	2	5.100.000	2	5.100.000
Soldador CHICHARRONER	1.200.000	2	2	4.800.000	2	4.800.000	2	4.800.000
Soldador Calificado	1.300.000	2	2	5.200.000	2	5.200.000	2	5.200.000
Operador excavadora	1.000.000	2	3	6.000.000	3	6.000.000	3	6.000.000
OPERADOR GRÚA TORRE ET 16TON	1.078.050	2	1	2.156.100	1	2.156.100	1	2.156.100
RIGGER	1.085.000	2	2	4.340.000	2	4.340.000	2	4.340.000
Total				58.566.100	Total	60.966.100	Total	69.046.100

Tabla 35: Costos de Mano de Obra, Dependientes del tiempo.

Referencia: Elaboración Propia.

Mano de Obra Directa Independiente del Tiempo								
Excavación Túnel	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cantidad	Esperado	Cantidad	Máximo
MANO DE OBRA IF	23.395.000	0,5	0,95	11.112.625	1	11.697.500	1,05	12.282.375
Total				11.112.625	Total	11.697.500	Total	12.282.375

Tabla 36: Costos de Mano de Obra, Independientes del tiempo.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Materiales:**

Recoge el costo de todos los materiales que se utilizan en la obra.

Se excluyen los costos correspondientes a energía y combustibles que serán considerados como otros costos indirectos (Tabla 37). En obras donde estos conceptos tengan gran importancia pueden asignarse a naturalezas específicas.

Materiales Mes Independiente del Tiempo								
Materiales	Costo Mensual	Unid	Cantidad	Min	Cantidad	Esperado	Cantidad	Máximo
ACELERANTE SHOTCRETE	175	kg	242.149	42.376.131	252.239	44.141.803	264.851	46.348.893
ENFIERRADURA A&B	485	Kg	28.264	13.707.908	29.441	14.279.070	30.913	14.993.024
HORMIGÓN H-25	40.849	m3	1.286	52.549.356	1.340	54.738.912	1.407	57.475.858
MORTERO PARA SHOTCRETE	157.489	m3	893	140.704.074	931	146.566.744	977	153.895.081
MANGUITO 22 MM Y PP ROS	20.000	ud	146	2.916.540	152	3.038.063	159	3.189.966
MALLA ACMA	475	kg	185.239	87.988.693	192.958	91.654.888	202.606	96.237.633
SHOTCRETE SH-30 READYMI	72.347	m3	223	16.143.216	232	16.815.850	244	17.656.642
SHOTCRETE SH-35 READYMI	72.839	m3	5.994	436.622.037	6.244	454.814.622	6.556	477.555.353
SUMINISTRO Y TRANS MARC	1.200	kg	177.109	212.530.387	184.488	221.385.820	193.713	232.455.111
SERVICIO BOMBEO HORMIGON	9.843	m3	148	1.458.519	154	1.519.291	162	1.595.256
MANGA VENTILACIÓN TÚNEL	12.500	ml	391	4.883.428	407	5.086.904	427	5.341.249
MAT DESGASTE BOMBEO SHOTCRETE	3.235	m3	8.136	26.319.941	8.475	27.416.605	8.899	28.787.435
PETROLEO	583	lt	203.663	118.735.618	212.149	123.682.936	222.757	129.867.083
MATERIALES IF	48.204.900	gl	0	6.973.787	0	7.264.361	0	7.627.579
SISTEMA AGUA TÚNEL	25.000	ml	391	9.766.855	407	10.173.807	427	10.682.498
SISTEMA AIRE TÚNEL	20.000	ml	391	7.813.484	407	8.139.046	427	8.545.998
ANDAMIO PIQUE	10.950.000	gl	0	1.267.306	0	1.320.111	0	1.386.116
SISTEMA ELÉCTRICO TÚNEL	55.000	ml	408	22.441.978	425	23.377.061	446	24.545.914
CAPACHO 7,5 M3	10.529.868	ud	1	6.093.410	1	6.347.302	1	6.664.667
PEQUEÑO MATERIAL	41.616.546	gl	0	11.382.445	0	11.856.714	0	12.449.550
			Total	1.222.675.114	Total	1.273.619.910	total	1.337.300.906

Tabla 37: Costos de Materiales.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Maquinaria Alquilada:**

Es el valor de la maquinaria alquilada, utilizada en la ejecución de las unidades de obra que componen la producción, como se muestra en la Tabla 38.

Maquinaria Mes Dependiente del Tiempo								
Maq	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cantidad	Esperado	Cantidad	Máximo
BOMBA AGOTAMIENTO TÚNEL	850.000	2,00	1,4	2.380.000	1,6	2.720.000	1,8	3.060.000
CARGADOR FRONTAL L70	4.500.000	1,00	1,0	4.500.000	1,0	4.500.000	1,0	4.500.000
EQUIPO LEVANTE	2.750.000	1,00	1,0	2.750.000	1,0	2.750.000	1,0	2.750.000
EXCAVADORA 12 TON	2.880.000	2,00	1,2	6.912.000	1,3	7.488.000	1,5	8.640.000
EXCAVADORA 20 TON	3.150.000	2,00	2,0	12.600.000	2,0	12.600.000	2,0	12.600.000
MIXER INTERNO TÚNEL	4.030.000	1,00	1,0	4.030.000	1,0	4.030.000	1,0	4.030.000
MOLDAJE ULMA EJECUCIÓN B	1.750.000	0,00	1,0	0	1,0	0	1,0	0
RETROEXCAVADORA	2.050.000	1,00	1,0	2.050.000	1,0	2.050.000	1,0	2.050.000
MAQUINARIA IF PORTUGAL	1.250.000	1,00	1,0	1.250.000	1,0	1.250.000	1,0	1.250.000
GRÚA TORRE 16 TON MAX	4.134.060	1,00	1,0	4.134.060	1,0	4.134.060	1,0	4.134.060
TRANSPORTE A OBRA GRÚA T	1.000.000	1,00	5,0	5.000.000	5,0	5.000.000	5,0	5.000.000
GRÚA 50 TONELADAS	9.000.000	1,00	1,0	9.000.000	1,0	9.000.000	1,0	9.000.000
BOMBA TK-40 ARRENDADA	4.652.815	1,00	1,0	4.652.815	1,0	4.652.815	1,0	4.652.815
ROBOSHOT ARRENDADO	10.500.000	0,00	1,0	0	1,0	0	1,0	0
MAQUINARIA MANTENCION	1.875.000	0,53	1,0	993.750	1,0	993.750	1,0	993.750
			Total	60.252.625	Total	61.168.625	total	62.660.625

Tabla 38: Costo de la Maquinaria alquilada.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Maquinaria Propia:**

Es el valor de la maquinaria propia o comprada, utilizada en la ejecución de las unidades de obra que componen la producción (Tabla 39).

Maquinaria Mes Independiente del Tiempo								
Maquinaria	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cantidad	Esperado	Cantidad	Máximo
BOMBA TK40 RECONDICION	29.000.000	0,00	0,0	0	0,0	0	0,0	0
RECONDICIONAMIENTO COMPRESOR	3.500.000	1,00	1,0	3.500.000	1,0	3.500.000	1,0	3.500.000
RECONDICIONAMIENTO VENTILADOR	2.800.000	1,00	1,0	2.800.000	1,0	2.800.000	1,0	2.800.000
ROBOSHOT	37.100.000	1,00	0,6	22.260.000	0,7	25.970.000	0,8	29.680.000
			Total	28.560.000	Total	32.270.000	Total	35.980.000

Tabla 39: Costo de la Maquinaria propia.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Subcontratistas:**

Recoge el costo de las unidades de obra ejecutadas por subcontratistas.

Los trabajos que se subcontratan son objeto de un contrato entre dos partes, donde deben recogerse tanto los precios de las unidades subcontratadas como cuantas estipulaciones sean necesarias para determinar el alcance y condiciones de los trabajos (Tabla 40).

Subcontratos Independientes del Tiempo								
Partida	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
SUBCONTRATOS IF	7.000.000	1	1	7.000.000	1	7.000.000	1	7.000.000
AUTOPERFORANTE 40/16 L=9	35.466	1	1	35.466	1	35.466	1	35.466
PARAGUAS 88,9 L=12M	90.474	1	1	90.474	1	90.474	1	90.474
RETIRO MARINA	2.400	1	90000	216.000.000	99.500	238.800.000	100.000	240.000.000
			Total	223.125.940	Total	245.925.940	Total	247.125.940

Tabla 40: Costos de Subcontratos.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Industriales:**

Es el costo que está compuesto por el esfuerzo productivo humano de poner operativas las maquinas, equipos y herramientas, y así convertir las materias primas o materiales, en productos que satisfagan las condiciones de clientes potenciales (Tabla 41).

Industriales Independientes del Tiempo								
Partida	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
Industriales	3.700.000	1	1	3.700.000	1	3.700.000	1	3.700.000
			Total	3.700.000	Total	3.700.000	Total	3.700.000

Tabla 41: Costos Industriales.

Referencia: Elaboración Propia.

- Costo pendiente o por definir:**

Es el costo que no se ha definido en la planificación de la obra. Que puede ocuparse para eventualidades (Tabla 42).

Por Definir Dependientes del Tiempo								
Partida	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
Por Definir	3.424.686	1	0,9	3.082.217	1	3.424.686	1,2	4.109.623
			Total	3.082.217	Total	3.424.686	Total	4.109.623

Tabla 42: Costos Pendientes o por Definir.

Referencia: Elaboración Propia.

- Otros Costos directos:**

Incluye los no definidos anteriormente, como se muestra en la Tabla 43.

Otros Costos Dependientes del Tiempo								
Partida	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
Otros Costos	7.577.935	1	1	7.577.935	1	7.577.935	1	7.577.935
			Total	7.577.935	Total	7.577.935	Total	7.577.935

Tabla 43: Otros Costos.

Referencia: Elaboración Propia.

8.3.2 Costo Indirecto.

Son todos los costos que, si bien son costos de la obra y si esta no existiera no existirían, no intervienen directamente en la ejecución de unidades concretas de obra. Los costos indirectos pueden producirse en una obra, aún sin haber producción.

Los diferentes tipos que pueden aplicarse durante el proceso de una obra, son:

- **Mano de Obra Indirecta:**

Recoge el costo de todas las cargas salariales del personal indirecto, que no está adscrito directamente a la ejecución de obra (Tabla 44).

Dependientes del Tiempo								
Mano de Obra Indirecta	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cantidad	Esperado	Cantidad	Maximo
Administrador	10.851.695	1	0,94	10.200.593	1,00	10.851.695	1,05	11.394.280
Alarifes	863.500	1	1,88	1.623.380	2,00	1.727.000	2,10	1.813.350
Asistente Administración	1.262.138	1	0,94	1.186.410	1,00	1.262.138	1,05	1.325.245
Auxiliar Aseo	593.939	1	0,94	558.303	1,00	593.939	1,05	623.636
Ayudante Oficina Tecnica	2.227.307	1	0,94	2.093.669	1,00	2.227.307	1,05	2.338.672
Bodeguero	863.500	1	0,94	811.690	1,00	863.500	1,05	906.675
Chofer Camion	942.000	1	0,94	885.480	1,00	942.000	1,05	989.100
Control Documentos	1.256.000	1	0,94	1.180.640	1,00	1.256.000	1,05	1.318.800
Encargada ambiental	2.402.286	1	0,94	2.258.149	1,00	2.402.286	1,05	2.522.400
Encargado Calidad	2.245.100	1	0,94	2.110.394	1,00	2.245.100	1,05	2.357.355
Especialista Natm	5.939.508	1	0,94	5.583.138	1,00	5.939.508	1,05	6.236.483
Jefe Administrativo	3.350.000	1	0,94	3.149.000	1,00	3.350.000	1,05	3.517.500
Jefe Bodega/compras	1.727.000	1	0,94	1.623.380	1,00	1.727.000	1,05	1.813.350
Jefe Oficina Tecnica	5.160.603	1	0,94	4.850.967	1,00	5.160.603	1,05	5.418.633
Jefe Personal	2.676.093	1	0,94	2.515.527	1,00	2.676.093	1,05	2.809.898
Jefe Prevención	2.590.500	1	0,94	2.435.070	1,00	2.590.500	1,05	2.720.025
Jefe Topografía	3.266.735	1	0,94	3.070.731	1,00	3.266.735	1,05	3.430.072
Jefe turno profesional	4.250.000	1	0,94	3.995.000	1,00	4.250.000	1,05	4.462.500
Niveladores	1.208.900	1	0,94	1.136.366	1,00	1.208.900	1,05	1.269.345
Paramédico	863.500	1	0,94	811.690	1,00	863.500	1,05	906.675
Prevencionistas	1.884.000	2	0,94	3.541.920	1,00	3.768.000	1,05	3.956.400
Programador	2.200.000	1	0,94	2.068.000	1,00	2.200.000	1,05	2.310.000
Rigger Camiones	1.085.000	2	0,94	2.039.800	1,00	2.170.000	1,05	2.278.500
Secretarios tecnicos	863.500	1	0,94	811.690	1,00	863.500	1,05	906.675
Supervisores	2.983.000	2	0,94	5.608.040	1,00	5.966.000	1,05	6.264.300
Topógrafo	1.884.000	2	0,94	3.541.920	1,00	3.768.000	1,05	3.956.400
			Total	69.690.946	Total	74.139.304	Total	77.846.269

Tabla 44: Costos de Mano de Obra Indirecta.

Referencia: Elaboración Propia.

- **Maquinaria y elementos auxiliares alquilados:**

Recoge el costo de aquellas máquinas y elementos auxiliares alquilados, que sirvan para uso general de la obra, y que no estén directamente relacionados con unidades concretas de producción (Tabla 45).

Maq/elem aux Dependientes del Tiempo								
Otros	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
Maq/elem aux	5.112.890	1	0,9	4.601.601	1,0	5.112.890	1,2	6.135.468
			Total	4.601.601	Total	5.112.890	Total	6.135.468

Tabla 45: Costos de Maquinaria y elementos auxiliares alquilados.

Referencia: Elaboración Propia.

- Liquidación de la Obra:**

Recoge el costo correspondiente a la periodificación de gastos futuros, cualquiera que sea su naturaleza, que se generen en la obra después de su terminación y durante el período de garantía (Tabla 46).

Liquidación de la Obra Dependientes del Tiempo								
Otros	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
liquidación de Obra	3.258.268	1	0,9	2.932.441	1,0	3.258.268	1,2	3.909.921
			Total	2.932.441	Total	3.258.268	Total	3.909.921

Tabla 46: Costos de Liquidación de la Obra.

Referencia: Elaboración Propia.

- Tasas, tributos:**

Es el costo asociado a las boletas de garantía, anticipos para dar un respaldo al mandante, para un buen cumplimiento del contrato (Tabla 47).

Tasas y Tributos Dependientes del Tiempo								
Otros	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
Tasas y Tributos	2.236.115	1	0,9	2.012.504	1,0	2.236.115	1,20	2.683.339
			Total	2.012.504	Total	2.236.115	Total	2.683.339

Tabla 47: Costos de Tasas y tributos.

Referencia: Elaboración Propia.

- Otros Costos Indirectos:**

Incluye el resto de costos indirectos no definidos en las naturalezas anteriores (Tabla 48).

Otros Costos Dependientes del Tiempo								
Otros	Costo Mensual	Turnos	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max
Otros Costos	27.593.141	1	0,90	24.833.827	1,0	27.593.141	1,20	33.111.769
			Total	24.833.827	Total	27.593.141	Total	33.111.769

Tabla 48: Otros Costos Indirectos.

Referencia: Elaboración Propia.

- Costos de Estructura:**

Recoge el costo de los centros ajenos a la obra en que se estructura. Se aplica porcentualmente a la producción mensual. Este valor ronda aproximadamente entre el [1; 6] % de la producción. Por lo general son gastos por uso de oficinas territoriales, de empresas extranjeras, como se muestra en la Tabla 49.

Costo de Estructura Independientes del Tiempo								
Partida	Costo Mensual	Cantidad	Min	Cant.	Esperado	Cant.	Max	
Costos de Estructura	3.155.506.744	6%	189.330.405	6%	189.330.405	6%	189.330.405	
		Total	189.330.405	Total	189.330.405	Total	189.330.405	

Tabla 49: Costos de Estructura.

Referencia: Elaboración Propia.

9 RESULTADOS

Para un mejor entendimiento de los resultados, se mostrarán en varios subcapítulos. Los cuales en su mayoría solo están referidos al túnel N°1, ya que se obtienen resultados similares del túnel N°2, así evitando duplicidad de información, de igual forma los resultados del túnel 2, se adjuntan en el Anexo 4.

9.1 ESTUDIO DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Analizando los resultados desde el punto de vista de las variables de entrada, con respecto al tiempo de duración de construcción del túnel se obtiene los siguientes resultados.

En la Tabla 50 se aprecia que los trabajos que más tiempo demoran, en el ciclo de construcción, es la excavación con un 20,7 %, seguido por la proyección de shotcrete con un 19,2% e instalación de marco metálico con 13,6 % del tiempo. Estas son las actividades que más hay que tener en cuenta, al momento de su ejecución. Por ejemplo en la proyección de shotcrete, con una buena aplicación se obtendrá un bajo porcentaje de rebote o rechazo del material, y así disminuir los costos de esta partida. Por otro lado la excavación de debe realizar de forma cuidadosa, para no provocar una sobre excavación, lo que también acrecentaría los costos. Por último la instalación del marco es importante para dar soporte estructural al túnel, y una mala aplicación de éste, perjudicaría de manera sustancial la resistencia y el sostenimiento del túnel.

Revestimiento	Primario	Descripción de los trabajos	[hr]	%
		Excavación y perfilado	3,0	20,7%
		Sello excavación (5 cm)	1,1	7,7%
		Sello frente (3cm)	1,2	8,1%
		Colocación malla C-335	1,2	8,4%
		Instalación de Marco	2,0	13,6%
		Proyección Shotcrete	2,8	19,2%
	Secundario	Colocación de Malla C-335	1,1	7,7%
		Proyección HP-2 (15 cm)	2,1	14,6%
	Total Ciclo		14,6	100,0%

Tabla 50: Ciclo de construcción del túnel en horas.

Fuente: Elaboración Propia

Graficando los resultados anteriores, se aprecia de mejor forma, la influencia de las variables de entrada en el ciclo de producción, como se muestra en el Gráfico 19.

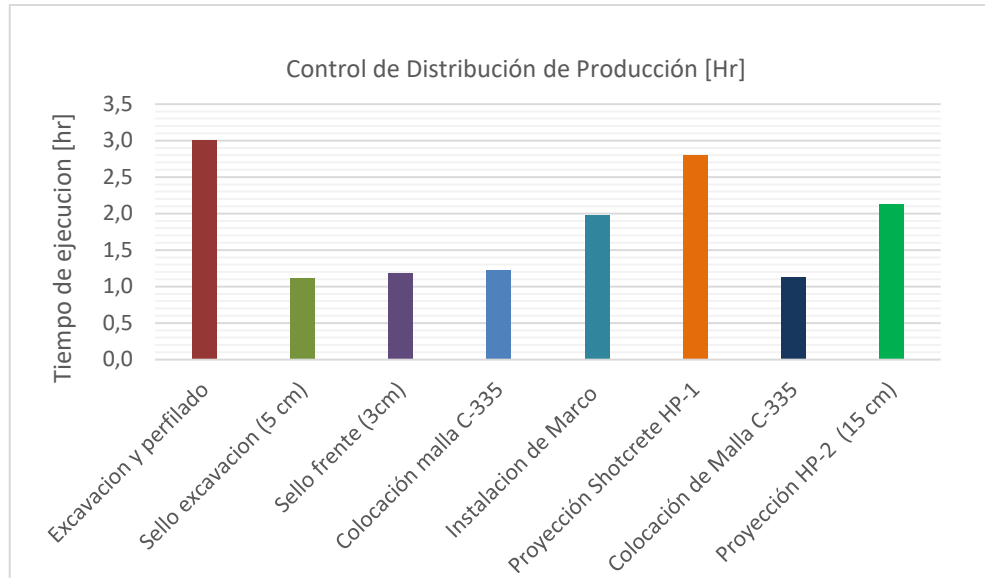


Gráfico 19: Tiempo de ejecución, del ciclo de producción.

Fuente: Elaboración Propia

Para conocer el real aporte de cada variable de entrada en el modelo, que se utilizó para calcular el tiempo final y costo, se realiza un análisis de sensibilidad con los siguientes resultados, que se muestra en el Gráfico 20.

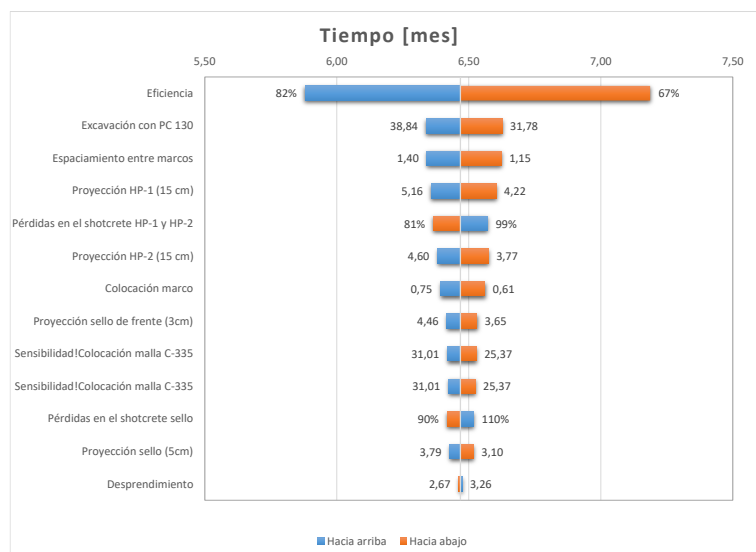


Gráfico 20: Análisis de sensibilidad de las variables de entrada

Fuente: Elaboración Propia

Las variables que más afectan al tiempo de duración del ciclo, y por ende el tiempo final de los trabajos, la eficiencia del proceso productivo, seguido por la excavación y el espaciamiento de marco.

- La eficiencia: es la variable con mayor ponderación dentro del modelo, ya que afecta a todo el ciclo de construcción, lo cual pone énfasis e importancia en la gestión y buena ejecución de trabajos del proyecto.
- La excavación: es la segunda variable, con mayor influencia. Lo cual pone énfasis a la expertis y habilidades de los operadores de la excavadora, y una selección de estos es crucial para minimizar sobre costos y tiempos de trabajos.
- El espaciamiento de marco: como las tareas son cíclicas en los túneles, existe un tiempo muerto entre tareas, que mientras menos sea el espaciamiento de marco, menos producción se realizara, o en otras palabras menos avance se obtendrá. Es importante tener el máximo de metros de espaciamientos entre marcos, para disminuir los tiempos de la obra.
- La proyección de shotcrete: es otra de las variables que más impacta al tiempo de duración, y es indudable la importancia de esta variable, por lo costos que están asociados a esta partida.

9.2 PLAZO DEL PROYECTO

De los resultados obtenidos de la simulación, se pueden obtener nuevos rendimientos y con ello un nuevo plazo final del proyecto, siempre como referencia y base, los datos obtenidos en terreno versus lo planificado.

		Proyectada			Rendimiento
	Nombre de tarea	Duración	Un	Cantidad	Cant./día
Túnel 1 Inter Estación		179			
1.2	Túnel Inter Estación Poniente	162			
1.2.1	Inicio Túnel (Ito)				
1.2.2	Pique 1: Demolición Ojo Túnel	1	gl	1	1,000
1.2.3	Pique 1: Excavación y Sost. Túnel Estocada	18	m	30	1,636
1.2.4	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, Recta	30	m	59,78	1,983
1.2.5	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, Curva	113	m	215,22	1,908
1.3	Túnel Inter Estación Oriente	162			
1.3.1	Pique 1: Demolición Ojo Túnel	1	gl	1	1,000
1.3.2	Pique 1: Excavación y Sost. Túnel Estocada	18	m	30	1,689
1.3.3	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, Recta	46	m	88,47	1,916
1.3.4	Pique 1: Exc. y Sost. Túnel Interestación, Curva	97	m	186,53	1,927
1.3.5	Fin Túnel (Ito)				

Tabla 51: Resumen de rendimientos por tramos de túnel 1.

Fuente: Elaboración Propia

Existe una disminución de los rendimientos y en consecuencia un aumento de plazo del proyecto respecto de la planificación y lo licitado, como se muestra en la Tabla 52.

Descripción Túnel 1	Tiempo [días]
Planificado	155
Simulación	179
Diferencia	24

Tabla 52: Resumen de la duración de la Obra.

Referencia: Elaboración Propia.

El tiempo total de ejecución de los trabajos se determina en 179 días, con una diferencia o atraso de 24 días respecto de la planificación.

9.3 COSTO DEL PROYECTO

Para analizar el costo, es necesario graficar los resultados de la simulación, los que se adjuntan en el Anexo 3, utilizando 2000 iteraciones de las variables de salida que son el costo vs tiempo del proyecto, como se muestra en el Gráfico 21.

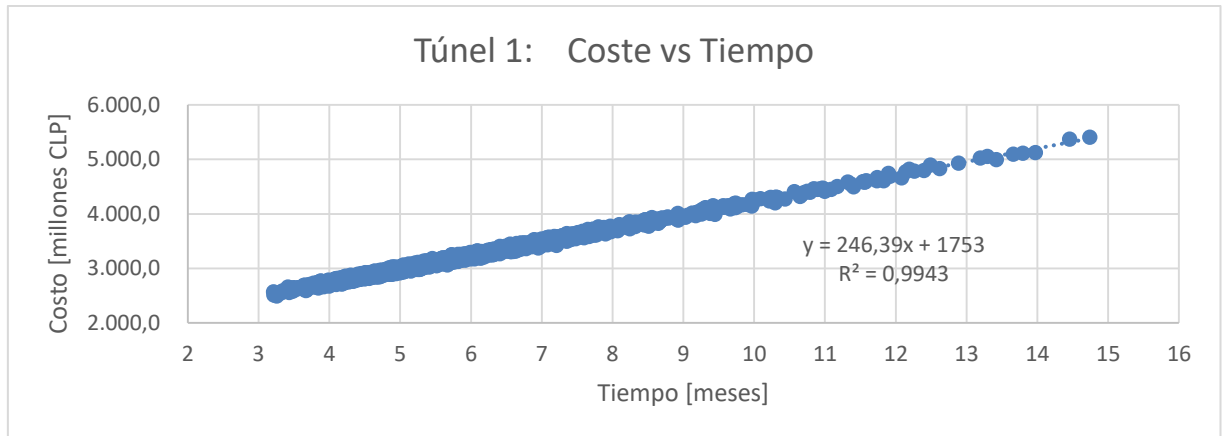


Gráfico 21: Costo vs Tiempo Túnel 1.

Referencia: Elaboración Propia.

Claramente se puede apreciar la linealidad de la relación costo vs tiempo obtenido, de la forma:

$$\text{Costo}[\text{millones}] = 246,39 * [\text{mes}] + 1753$$

La gran linealidad de la simulación es producto del costo independiente del tiempo [IT], que tiene aproximadamente 55% del costo total, como se aprecia en la siguiente Tabla 53.

Costo (DT)	Costo (IT)	Costo Total
[millones CLP]	[millones CLP]	[millones CLP]
1.462.968.348	1.753.643.585	3.216.611.933
45%	55%	100%

Tabla 53: Ponderación del costo dependiente (DT) e independiente del tiempo (IT), respecto al total.

Referencia: Elaboración Propia.

Mayor detalle el costo del proyecto del túnel 1, se indica en la Tabla 54 y en el Gráfico 22.

Tipo de Costo	Descripción	Costo	Costo/ml
Costo Directo	Mano de obra Directa	380.604.415	634.341
	Materiales	1.277.865.310	2.129.776
	Maquinaria Propia	32.270.000	53.783
	Maquinaria Alquilada	361.131.994	601.887
	Subcontratos	238.725.940	397.877
	Industriales	3.700.000	6.167
	Otros Costos Directos	44.599.201	74.713
	Costo Pendiente de Definir	20.827.509	34.713
	Total Costo Directo	2.359.724.369	3.932.874
Costos Indirectos	Mano de Obra Indirecta	434.885.201	724.809
	Maq./elem.Aux.	31.094.464	51.824
	Liquidación de Obra	19.815.425	33.026
	Tasas y tributos	13.599.121	22.665
	Otros	167.809.972	279.683
	Total Costos Indirectos	667.204.184	1.112.007
Costo Estructura	Central	189.683.380	316.139
	Total Costo Estructura	189.683.380	315.139
	Total	3.216.611.933	5.361.020

Tabla 54: Costos resumen del túnel 1.

Referencia: Elaboración Propia.

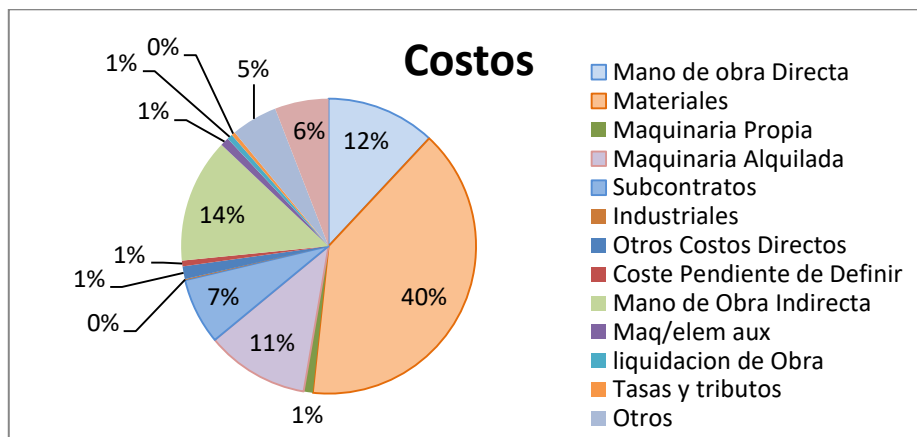


Gráfico 22: Resumen del Costo del túnel 1.

Referencia: Elaboración Propia.

Si se agrupan según tipo de costos directos, indirecto y de estructura, como se aprecia en Gráfico 23.

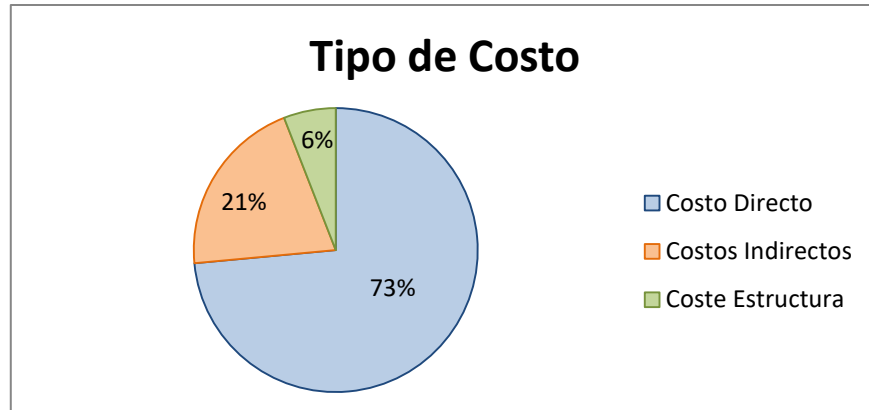


Gráfico 23: Costos según su naturaleza.

Referencia: Elaboración Propia.

Se obtienen aproximadamente el costo por metro lineal de túnel interestación para estas secciones, es de 5.361.020 de pesos, el mayor costo directo es debido a los materiales, seguido de la mano de obra.

En este tipo de obras, pseudo obras mineras, se necesita mano de obra especializada en su realización, lo que explica el alto costo de la misma. Por lo mismo, estas obras son vulnerables al incremento de costos a causa de retrasos en su ejecución.

El mayor costo incurrido es por los materiales, que es de un 40% de la obra, lo que deja poco margen para aumentos en cantidades o desviaciones imprevistas.

La maquinaria también tiene un papel preponderante en este tipo de construcciones, ya que está presente en todo el ciclo de construcción, cualquier avería si no se tiene una auxiliar, influye en retrasos y por consiguiente en aumentos de costos.

9.4 RIESGO DEL PROYECTO

De los resultados de la metodología y a su vez de la simulación, también se pueden obtener los primeros indicadores que serían la media y la desviación estándar, del tiempo y costo (Tabla 55).

Descripción	Unidad	Media	Dest.
Tiempo	[mes]	5,86	1,60
Costo	[millones]	3.216	398

Tabla 55: Costo vs Tiempo Túnel 1.

Referencia: Elaboración Propia.

En la Tabla 55 se aprecia un aumento del tiempo y del costo total del proyecto, la dispersión del tiempo y costo bordea el 10 % y 12 % respectivamente. Si se considera como peor escenario la media más una desviación estándar, estos llegarían a un plazo de 7,46 meses, y 3.614 millones.

Profundizando más aún en los resultados de la simulación y con ayuda del software Crystal Ball, y con ajuste de bondad chi-cuadrado, se determina que las distribuciones que más se ajustan a las variables de salida, son del tipo Logaritmo – Normal. Las que se muestran en Gráfico 24 y 25.

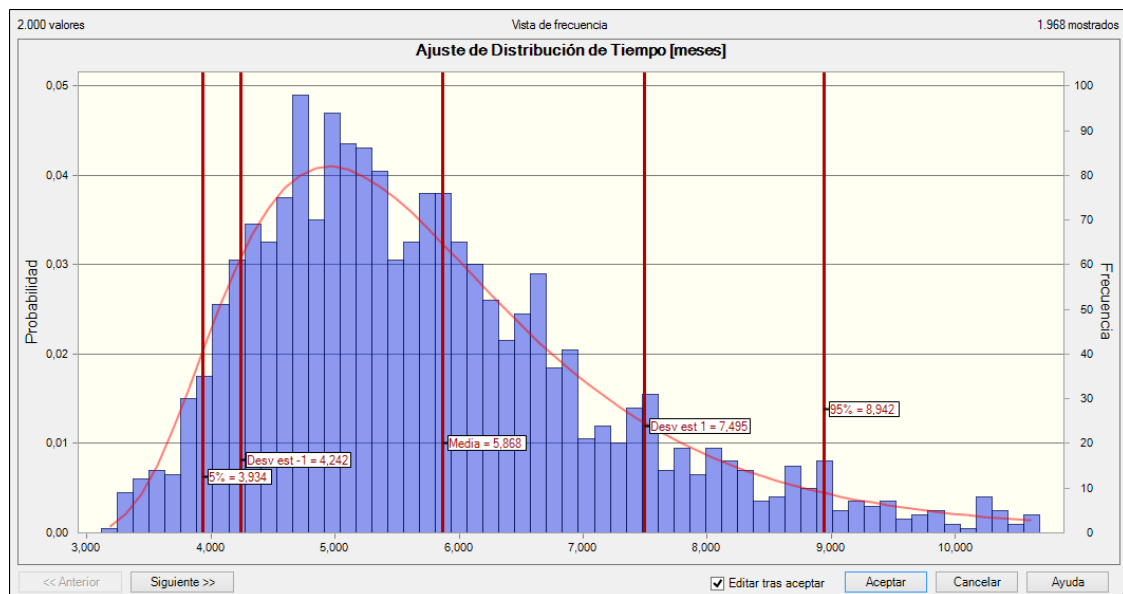


Gráfico 24: Ajuste del costo a distribución logaritmo-Normal.

Referencia: Elaboración Propia.

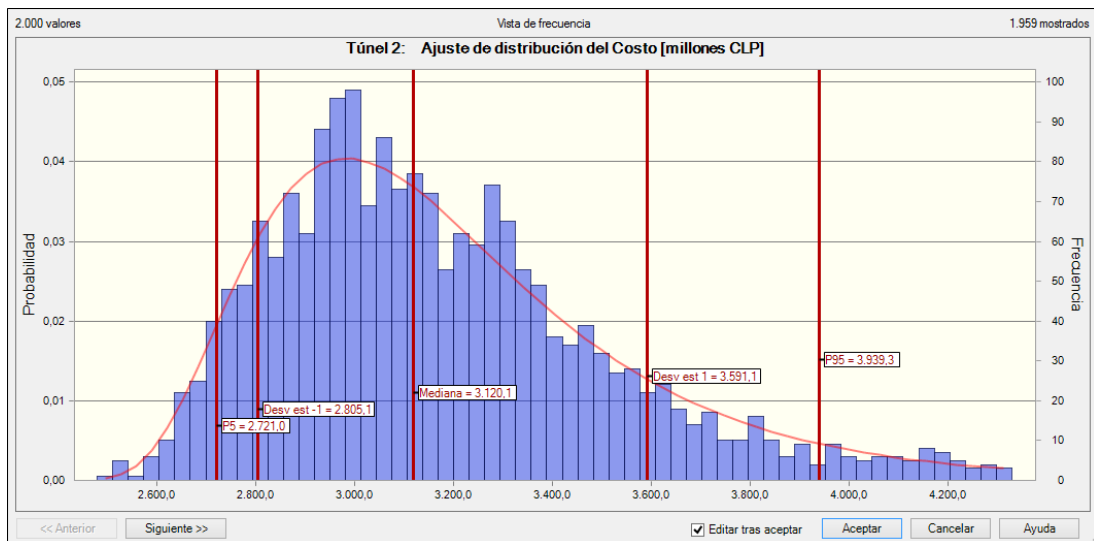


Gráfico 25: Ajuste del tiempo a distribución logaritmo-Normal.

Referencia: Elaboración Propia.

Una vez obtenidas las distribuciones que más se ajustan a las variables de salida, de tipo Log-Normal, se determinan sus respectivos parámetros, para conformar el perfil de riesgo, siempre en comparación nuestra línea base de la obra planificada o licitada. Como se detalla en al Gráfico 26 y Tabla 56.

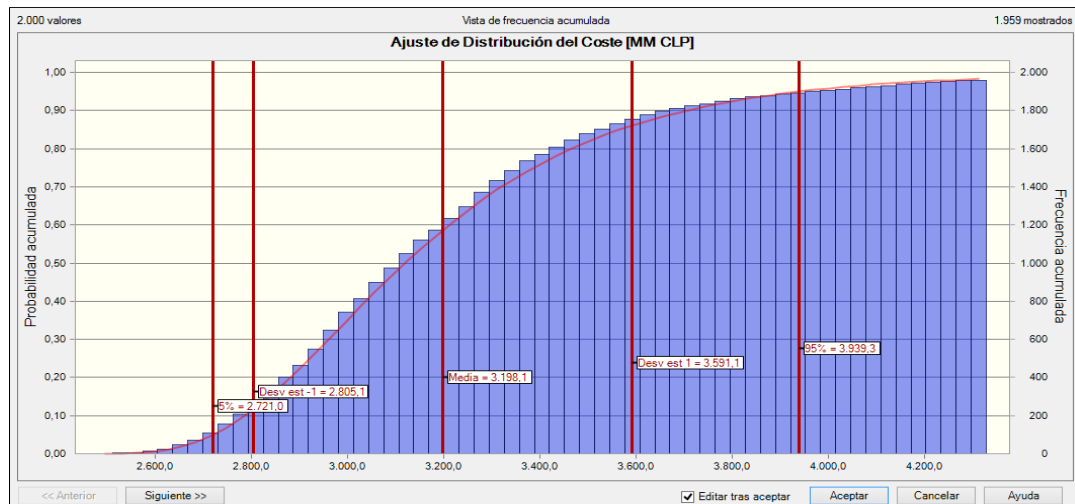


Gráfico 26: Frecuencia Acumulada, Perfil del riesgo del costo en millones de pesos.

Referencia: Elaboración Propia.

Percentil	Tiempo	Costo	Producción	Resultado
[%]	[meses]	[millones]	[millones]	[millones]
P5	3,93	2.721,00	3.155,51	434,51
Planificado	5,17	3.026,57	3.155,51	128,93
P35	5,17	3.002,68	3.155,51	152,82
P50	5,86	3.198,10	3.155,51	- 42,59
P95	8,94	3.939,30	3.155,51	- 783,79

Tabla 56: Resumen de Perfil de Riesgo.

Referencia: Elaboración Propia.

En la Tabla 56, se muestra, que la planificación se encuentra alrededor del percentil 35, esto demuestra el alto nivel de riesgo incurrido para adjudicarse el contrato.

Producto de la gran competencia en la construcción de este tipo de obras, es recurrente tomar grandes riesgos para su adjudicación.

El valor del riesgo del proyecto (VaR) del túnel 1, con una confiabilidad del 95% es:

$$VaR (95) = 3939,3 - 3198,1 = 741,2 \text{ [millones]}$$

El porcentaje de riesgo del proyecto (VaR %):

$$VaR \%(95) = \frac{741,2}{3198,1} = 23,18\%$$

Y si se toma en consideración la planificación con la cual se adjudicó el proyecto este índice aumenta:

$$VaR (95) = 3939,3 - 3026,57 = 912,73 \text{ [millones]}$$

$$VaR \%(95) = \frac{912,73}{3026,57} = 30,15\%$$

Ya con estos datos se puede decir, con un 95 % de confiabilidad, el costo del proyecto sería alrededor de 3.939,3 [millones], con un 50 [%] de confiabilidad es de 3.198,1 [millones], y que el riesgo del proyecto adjudicado es de un 30,15 [%].

10 CONCLUSIÓN

Inicialmente, uno de los objetivos de este trabajo era determinar los plazos y los costos, involucrados para la construcción de túneles interestación realizados en Santiago de Chile, utilizando el método de construcción de túneles N.A.T.M., mediante el método Monte Carlo, logrando lo esperado. Además se aprecia, que el alcance de la metodología propuesta, es extrapolable a cualquier tipo de proyecto de construcción.

El otro objetivo era definir el nivel de riesgo inherente en estos proyectos, como a su vez, que variables intervienen, como están relacionadas, y cuáles son las más importantes. Para ello se utilizaron diferentes herramientas para dar respuestas a estas interrogantes, cuantificando el riesgo del proyecto.

Una vez determinado el riesgo del proyecto, ya se pueden tomar acciones para mitigar, aceptar o evitar, determinando el costo de estas acciones y las medidas a adoptar en cada caso.

Otro factor importante de la gestión de riesgos, es determinar el umbral o nivel de riesgo, que se es capaz de absorber o aceptar, esto último depende de las políticas internas de cada empresa.

La alta competitividad de los tiempos actuales, han llevado a las empresas a llegar al límite, de los recursos, como también de los sistemas de gestión de los proyectos. Cada vez más en la actualidad estas herramientas están siendo incorporadas, no solo en los sistemas de gestión, sino en sus políticas internas de cada empresa, actualmente la planificación de los riesgos está pasando a tener un papel fundamental, dentro la evaluación de los proyectos.

Las herramientas mostradas en este trabajo son de indudable valor, en especial en etapas tempranas de un proyecto, y así poder anticiparse y prevenir, sobre costos no considerados, lo que puede ser la diferencia entre un proyecto exitoso o uno malogrado.

REFERENCIA

Bibliográficas:

Sergio Sebastián Rodríguez, Metodología para la gestión del riesgo en proyectos, Tesis (Ingeniería en Telecomunicaciones), Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, Septiembre 2012.

Luis Fernando Altez Villanueva, Asegurando el Valor en Proyectos de Construcción: Un estudio de Técnicas y Herramientas de Gestión de Riesgos en la Etapa de Construcción, Tesis (Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima, Perú, Marzo 2009.

José Manuel Gacitúa Carafi, Análisis Cualitativo y jerárquico de incertidumbres en la construcción de túneles. Tesis (Ingeniería Civil, Mención Estructuras – Construcción – Geotecnia), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Física y matemáticas, Departamento de Ingeniería, Santiago, Chile, Octubre 2012.

Leonardo Vásquez Samacá, Estimación de la Probabilidad de Costos Adicionales que se puedan presentar en los Proyectos, Banco de interamericano de Desarrollo, Bolivia, Septiembre, 2014.

Ignacio Extremiana Vásquez, Gestión de riesgos en proyectos de túneles, Tesis (Máster Interuniversitario en dirección de proyectos), Escuela Técnica Superior de ingeniería Industrial, Universidad de la Rioja, Departamento de Ingeniería Mecánica, Rioja, Argentina, 2011.

Project Management Institute, Guía de los fundamentos en la dirección de proyectos (PMBOK), 5ta Edición, 2013.

Humberto Daniel Sánchez García, Análisis y Cuantificación del riesgo de sobre costo en la etapa de construcción de los Proyectos, Tesis (Maestro en la Ingeniería), Programa de maestría y doctorado en ingeniería facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de México, México, D. F. 2011.

Metro S.A. Evolución de Métodos Constructivos en el Metro: Tecnología sobre Rieles. Santiago, Chile, 2003.

Jorge Puertas Herranz, Estimación de Coste y Plazo en proyectos de túneles ejecutados mediante convencional y voladura. Tesis (Ingeniero de Caminos), Departamento de Infraestructura del Transport i del Territori (ITT), Universidad Polit cnica de Catalunya, mayo 2010.

Sergio Trelles Costaguta, Metodología Puma para análisis de riesgo en cronogramas de obra. Tesis (Ingeniero Civil), Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Piura, Lima, Perú, Marzo 2010.

Christoph Haas, Herbert H. Einstein, Decision Aids for Tunneling Update, Journal of Construction Engineering and Management, University of Michigan. 2002.

Bibliografías electrónicas:

Comunidad de Madrid, Gestión del Riesgo / Análisis y Cuantificación,[en línea], [http://www.madrid.org/cs/StaticFiles/Emprendedores/Analisis_Riesgos/pages/pdf/metodologia/4AnalisisycuantificaciondelRiesgo\(AR\)_es.pdf](http://www.madrid.org/cs/StaticFiles/Emprendedores/Analisis_Riesgos/pages/pdf/metodologia/4AnalisisycuantificaciondelRiesgo(AR)_es.pdf), España. [consulta octubre 2014]

Crystal Ball, Manual del Software Crystal Ball 7.2 Guía inicio,[en línea],<http://www.docentes.fcefa.edu.bo/imorales/wp-content/uploads/sites/9/2013/09/MANUAL-CRYSTAL-BALLModelos-de-Simulación-4329.pdf>, [consulta enero 2013].

Javier Faulín,  ngel A. Juan, Simulación de Monte Carlo con Excel, Universidad Oberta de Cataluña, [en línea] http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion_MC.pdf, [consulta enero 2013]

Berau: 2011 Informe: Proyecto de ingeniería básica y ejecución de galerías de explotación del túnel de agua negra y sus accesos; Túneles y obras subterráneas Programación general para las obras subterráneas y cronograma para la construcción.

Laureano Cornejo  lvarez, 2009, La industria de la construcción de túneles y la calidad.

German Martinez-Montes, 2007, Risk assessment models for road tunnels in operation, Universidad de Granada España.

Paul J. Atzberger, Strategies for Improving the Efficiency of Monte Carlo Methods

ANEXO 1
(Respaldo de cantidades)

TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

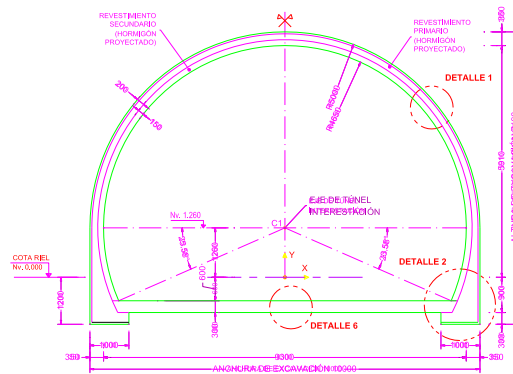
PLANO

PL-712

FECHA:

SOSTENIMIENTO MIXTO-SECCIÓN EN RECTA - RADIER VIAS 60 cm

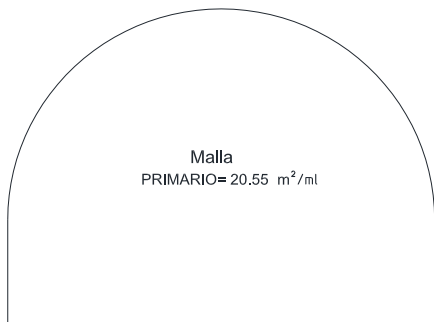
CROQUIS Y DETALLES



EXCAVACIÓN
61.47 m³/ml



SELLO
20.47 m³/ml



Malla
PRIMARIO = 20.55 m²/ml



REVESTIMIENTO
PRIMARIO = 4.24 m³/ml

DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m ² /ml	ÁREA m ³ /ml	
Excavación		61,469	61,469
Sello (5 cm)	20,549		20,549
Sello en la Frente	61,469		61,469
Revestimiento Primario (15cm)		4,238	4,238
Malla Primario C-335	20,371		20,371

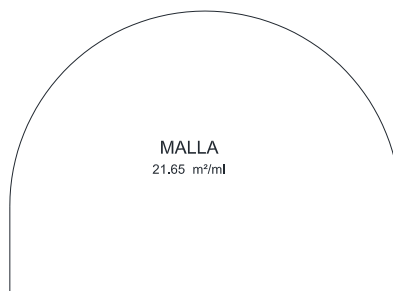
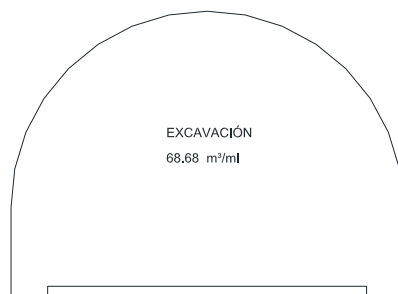
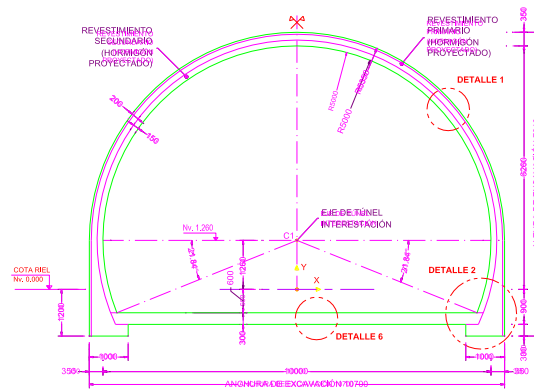
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO : PL-714

FECHA:

SOSTENIMIENTO MIXTO, SECCIÓN EN CURVA $250 \leq r \leq 750$ RADIER VIAS 60 cm

CROQUIS Y DETALLES



DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m²/ml	ÁREA m³/ml	
Excavación		68,672	68,672
Sello (5 cm)	21,649		21,649
Sello en la Frente	68,672		68,672
Revestimiento Primario (15cm)		4,351	4,351
Malla Primario C-335	21,570		21,57

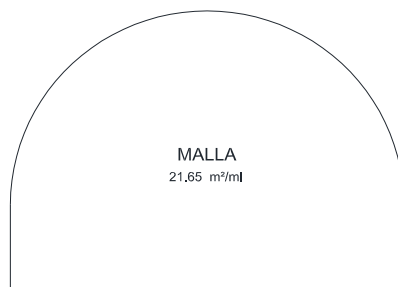
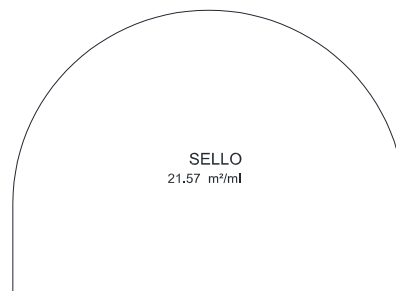
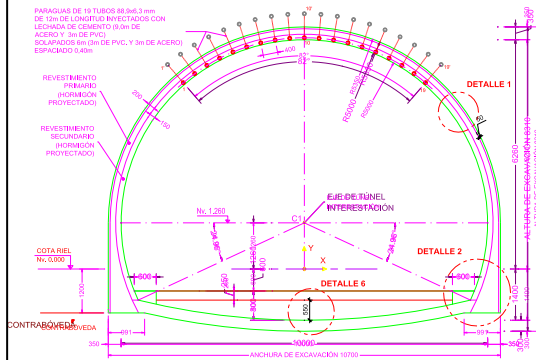
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO: PL-726

FECHA:

SOSTENIMIENTO ESPECIAL "B" SECCIÓN EN CURVA $250 \leq r \leq 750$ RADIER VIAS 60 cm

CROQUIS Y DETALLES



DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m²/ml	ÁREAm³/ml	
Excavación		74,196	74,196
Sello (5 cm)	21,570		21,57
Sello en la Frente	74,196		74,196
Revestimiento Primario (25cm)		4,199	4,199
Malla Primario C-378	21,649		21,649



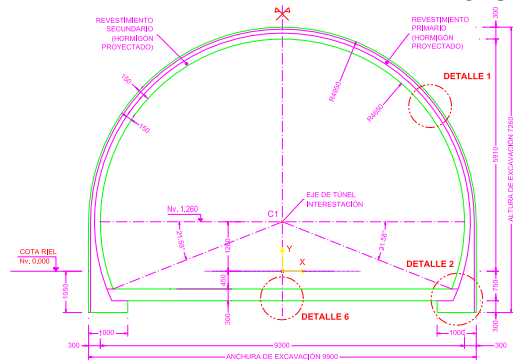
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO : PL-732

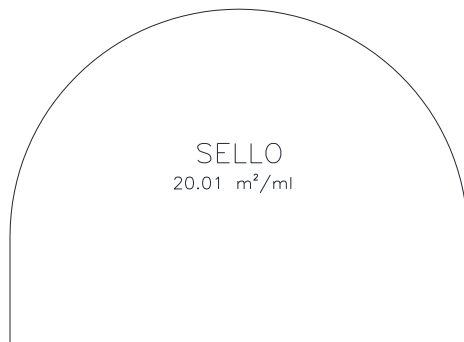
FECHA:

SOSTENIMIENTO EN GRAVAS, SECCIÓN EN RECTA RADIER VIAS 45cm

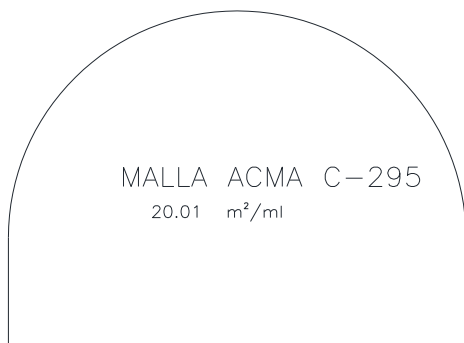
CROQUIS Y DETALLES



EXCAVACIÓN
58.99 m³/ml



SELLO
20.01 m²/ml



MALLA ACMA C-295
20.01 m²/ml



REVESTIMIENTO
3.08 m³/ml

DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m ² /ml	ÁREAm ³ /ml	
Excavación		58,987	58,987
Sello (5 cm)	20,092		20,092
Sello en la Frente	58,987		58,987
Revestimiento Primario (10cm)		3,075	3,075
Malla Primario C-295	20,014		20,014

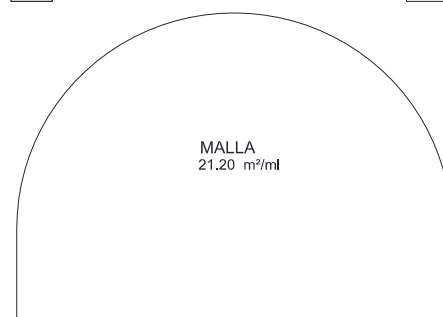
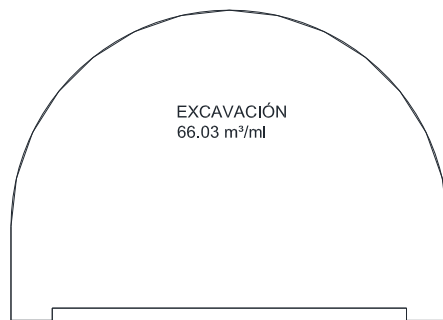
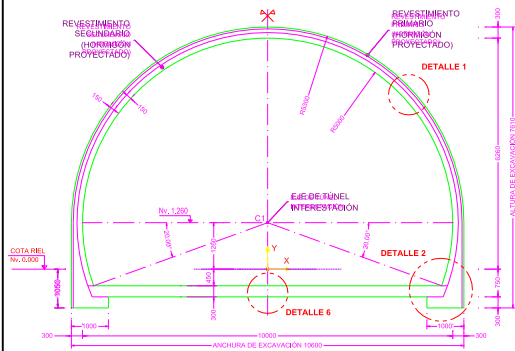
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO : PL-734

FECHA:

SOSTENIMIENTO EN GRAVAS SECCIÓN EN CURVA $250 \leq r \leq 750$ RADIER VIAS 45 cm

CROQUIS Y DETALLES



DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m²/ml	ÁREAm³/ml	
Excavación		66,029	66,029
Sello (5 cm)	21,192		21,192
Sello en la Frente	66,029		66,029
Revestimiento Primario (10cm)		3,144	3,144
Malla Primario C-335	21,113		21,113

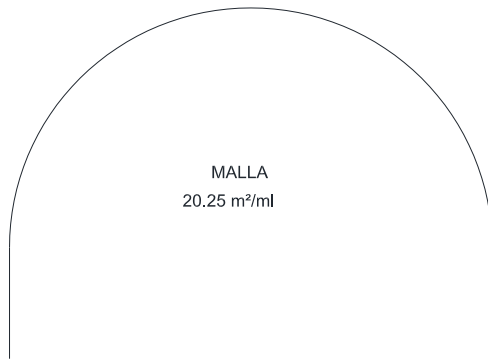
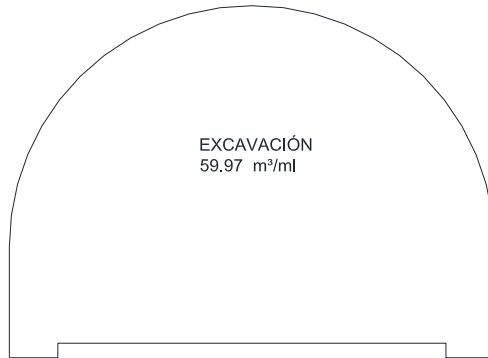
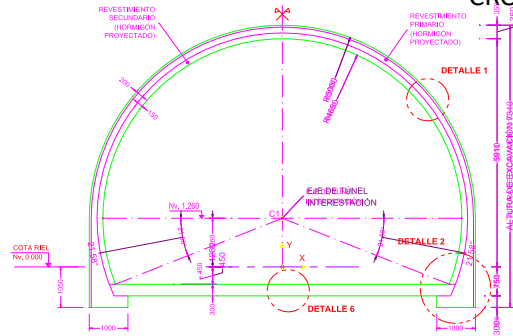
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO : PL-736

FECHA:

SOSTENIMIENTO MIXTO SECCIÓN EN RECTA, RADIER 45 cm

CROQUIS Y DETALLES



DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m ² /ml	ÁREAm ³ /ml	
Excavación		59,969	59,969
Sello (5 cm)	20,249		20,249
Sello en la Frente	59,969		59,969
Revestimiento Primario (15cm)		4,050	4,050
Malla Primario C-335	20,171		20,171

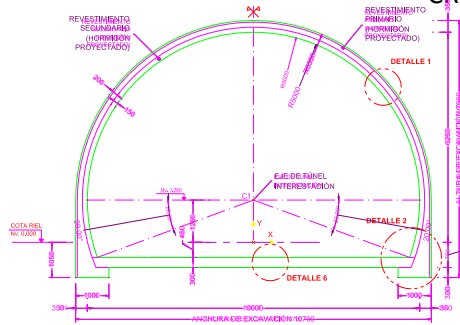
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO :	PL-738
---------	--------

FECHA:

SOSTENIMIENTO MIXTA, SECCIÓN EN CURVA $250 \leq r \leq 750$ RADIER 45 cm

CROQUIS Y DETALLES



EXCAVACIÓN
67.07 m³/ml

SELLO
21.27 m²/ml

MALLA
21.35 m²/ml

REVESTIMIENTO
4.17 m³/ml

	HERRADURA		Total
DETALLE	PERIMETRO m²/ml	ÁREAm³/ml	
Excavación		67,071	67,071
Sello (5 cm)	21,349		21,349
Sello en la Frente	67,071		67,071
Revestimiento Primario (15cm)		4,174	4,174
Malla Primario C-335	21,270		21,27

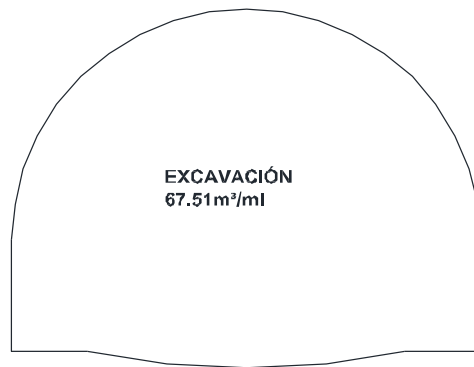
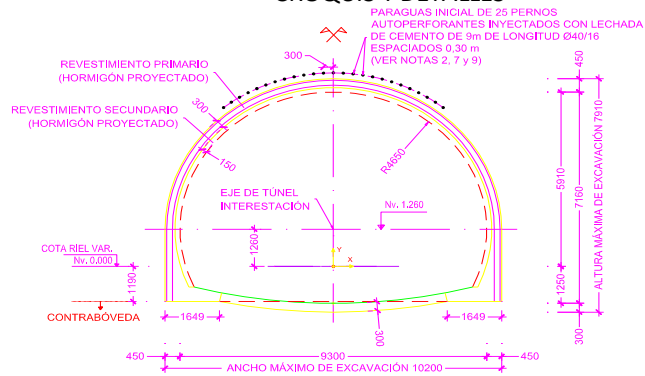
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO : PL-1100-450

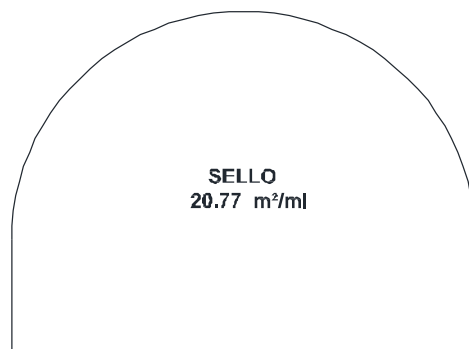
FECHA:

ESTOCADA TÚNEL INTERESTACIÓN MARCOS RETICULADOS Y PARAGUAS

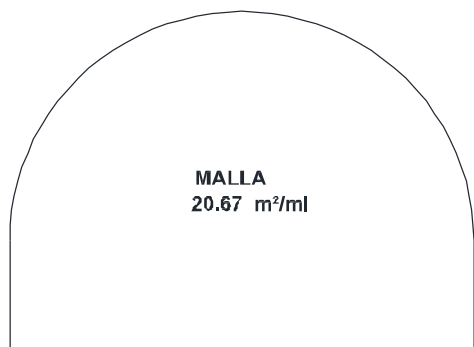
CROQUIS Y DETALLES



EXCAVACIÓN
67.51m²/ml



SELLO
20.77 m²/ml



MALLA
20.67 m²/ml



REVESTIMIENTO
6.83 m²/ml

DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m ² /ml	ÁREAm ³ /ml	
Excavación		67,508	67,508
Sello (5 cm)	20,844		20,844
Sello en la Frente	67,508		67,508
Revestimiento Primario (25cm)		6,831	6,831
Malla Primario C-335	20,666		20,666

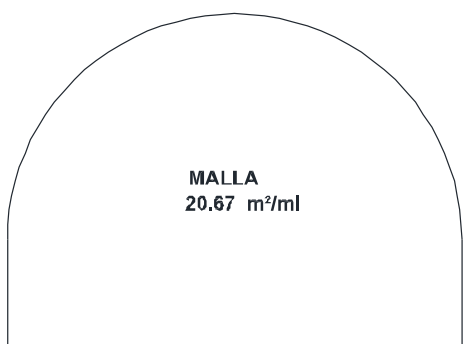
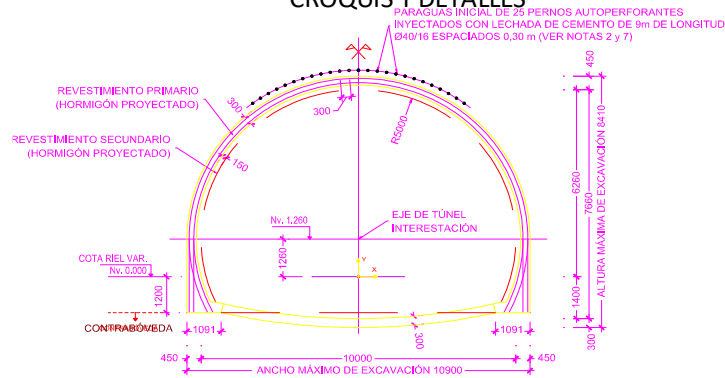
TASAS TÚNEL INTERESTACIÓN

PLANO DE REFERENCIA: PL-5200 - 450

FECHA:

ESTOCADA TÚNEL INTERESTACIÓN MARCOS RETICULADOS Y PARAGUAS

CROQUIS Y DETALLES



DETALLE	HERRADURA		Total
	PERIMETRO m²/ml	ÁREAm³/ml	
Excavación		76,384	76,384
Sello (5 cm)	21,963		21,963
Sello en la Frente	76,384		76,384
Revestimiento Primario (25cm)		6,565	6,565
Malla Primario C-378	21,816		21,816

ANEXO 2

(Respaldo de tiempos de ejecución en obra)



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

HORAS x TURNO	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	TOTAL	TOTAL	DISP / MECA NICA	DISP / REAL	N°	METROS	%
	DEMOLICIÓN SELLO FRENTE	EXCAVACIÓN	SELLO	MALLA ACMA EXCAVACIÓN	MARCO	HP1	HORAS PRODUCCIÓN	HORAS DETENCIÓN			MARCOS		Producción
12,00		1,50	1,00	1,00	4,25	2,00	11,25	0,75	1,00	0,94	0,00		94%
12,00	0,50	0,75	1,75	0,75	2,25		6,00	6,00	1,00	0,50	1,00	0,65	50%
12,00		1,00			1,25	2,00	5,25	6,75	1,00	0,44	1,00	0,50	44%
12,00		3,50	1,50	1,75	2,25	1,50	11,50	0,50	1,00	0,96	1,00	0,50	96%
12,00		2,75	2,25	1,75	1,75	1,75	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,54	85%
12,00		1,50	1,00	1,50	2,25	1,75	8,75	3,25	1,00	0,73	1,00	0,50	73%
11,00		2,25	1,00	1,25	1,50	2,25	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	0,50	82%
12,00		1,75	2,00	1,25	1,75	1,50	9,00	3,00	0,00	0,00	1,00	0,50	75%
12,00	0,75		2,00	1,00	1,50	2,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
12,00		1,50	1,25	2,25	3,25	1,75	11,00	1,00	1,00	0,92	2,00	1,10	92%
12,00		2,50	1,75	1,75	1,50	1,75	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,50	85%
12,00		2,50	1,75	1,25	1,75	2,25	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	0,50	79%
12,00		2,75	2,50	1,25	1,25	1,75	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	0,50	88%
12,00		2,75	1,00	1,50	2,50	2,25	10,75	1,25	1,00	0,90	2,00	1,10	90%
12,00		2,50	1,00	1,25		2,50	7,25	4,75	1,00	0,60	0,00		60%
12,00		0,50				1,75	9,75	2,25	1,00	0,81	0,00		81%
12,00		3,25	1,00	1,50	2,00	3,00	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	0,80	90%
12,00		3,25	1,00	0,75	1,50		8,50	3,50	1,00	0,71	1,00	0,80	71%
12,00		2,75	1,50	1,50	2,25	0,75	8,75	3,25	1,00	0,73	1,00	0,60	73%
12,00		2,25	1,50	1,50	2,00	2,00	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,85	85%
12,00		2,75	0,75	1,25	2,75		9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	0,70	81%
12,00		1,75	0,50	0,75	1,50	3,75	8,25	3,75	1,00	0,69	1,00	0,70	69%
12,00		3,25	0,75	1,25	1,75	2,00	9,75	2,25	1,00	0,81	2,00	1,40	81%
12,00		1,75	0,75	1,00	1,50	3,25	8,25	3,75	1,00	0,69	1,00	0,70	69%
12,00		2,50	2,00	1,50	2,00	2,25	11,25	0,75	1,00	0,94	1,00	1,00	94%
12,00	0,50	3,00	0,50	0,50	2,50	2,50	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,00	88%
12,00		2,25	1,25	2,25	2,25	2,25	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00	0,50				2,75	4,50	7,75	4,25	1,00	0,65	1,00	1,50	65%
12,00		2,50	1,50	1,50	2,50	2,50	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00	0,25	3,75	1,25	1,00	1,00	2,00	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00					2,25	3,75	7,25	4,75	1,00	0,60	0,00	0,00	60%
12,00		4,50	1,25	1,50	2,00	1,50	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	1,50	90%
12,00	0,50	0,75				6,00	8,75	3,25	1,00	0,73	0,00	0,00	73%
12,00		2,00	1,25	1,25	1,50	3,25	9,25	2,75	1,00	0,77	1,00	1,50	77%
12,00	0,25	3,50	1,00	1,75	1,50	2,75	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	1,50	90%
12,00	0,50	3,25	1,00	1,00	1,25	0,50	7,50	4,50	1,00	0,63	1,00	1,50	63%
12,00						3,75	4,75	7,25	1,00	0,40	0,00	0,00	40%
12,00	0,50	2,75	0,50		1,00	4,75	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%
12,00	0,25	3,00	1,25	1,25	2,00	3,25	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00	0,25	3,00	1,00	0,75	2,75		8,50	3,50	1,00	0,71	1,00	1,50	71%
8,00				0,75	1,25	3,00	5,00	3,00	1,00	0,63	1,00	1,50	63%
12,00	0,25	4,50	1,25	1,00	1,25	1,75	10,00	2,00	1,00	0,83	0,00	0,00	83%
12,00	0,25	3,50	1,00	1,00	1,25	2,00	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00	0,50	2,75	0,50	1,00	1,50	1,75	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	1,50	67%
12,00	0,25	2,00	0,75		1,00	2,50	6,50	5,50	1,00	0,54	1,00	1,50	54%
12,00		1,75	0,75	1,00	1,50	3,25	8,25	3,75	1,00	0,69	1,00	1,50	69%
12,00		4,00	0,75	2,25	2,00	1,00	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00		3,00	0,75	1,00	1,50	2,50	8,75	3,25	1,00	0,73	1,00	1,50	73%
12,00		6,00				3,75	9,75	2,25	1,00	0,81	0,00	0,00	81%
12,00		3,00	1,50	1,50	2,50	2,00	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00					1,00	3,00	6,50	5,50	1,00	0,54	1,00	1,50	54%
12,00		3,50	0,75	0,75	1,50	2,75	11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00		3,50	1,00	1,00	2,00	3,25	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	1,50	90%
12,00		3,50					3,50	8,50	1,00	0,29	1,00	1,50	29%
12,00		4,00				4,00	8,00	4,00	1,00	0,67	0,00	0,00	67%
12,00		1,50	1,00	1,00	2,25		5,75	6,25	1,00	0,48	1,00	1,50	48%
12,00		0,75				3,00	11,75	0,25	1,00	0,98	0,00	0,00	98%
12,00		1,50	1,00	1,00	2,50	3,75	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00					1,00	3,00	8,50	3,50	1,00	0,71	0,00	0,00	71%
12,00			2,00				5,75	6,25	1,00	0,48	0,00	0,00	48%



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

HORAS x TURNO	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	TOTAL	TOTAL	DISP / MECA NICA	DISP / REAL	N°	METROS	%
	DEMOLICIÓN SELLO FRENTE	EXCAVACIÓN	SELLO	MALLA ACMA EXCAVACIÓN	MARCO	HP1	HORAS PRODUCCIÓN	HORAS DETENCIÓN			MARCOS		Producción
12,00		3,50	1,00	1,75			9,25	2,75	1,00	0,77	0,00	0,00	77%
12,00	0,25	3,50	0,50	1,25	2,25		7,75	4,25	1,00	0,65	1,00	1,50	65%
12,00		4,00	1,00				5,00	7,00	1,00	0,42	0,00	0,00	42%
12,00				1,00	2,50	7,50	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00		2,50	1,25	1,00	2,50	2,00	9,25	2,75	1,00	0,77	1,00	1,50	77%
10,00			1,00	1,75	2,00	3,00	7,75	2,25	1,00	0,78	1,00	1,50	78%
12,00				1,50	1,75	3,00	6,25	5,75	1,00	0,52	1,00	1,50	52%
12,00		3,00	0,50			3,00	12,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	100%
12,00		1,00	1,00	1,25	2,25	2,75	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00				2,50	4,50	7,00	7,00	5,00	1,00	0,58	1,00	1,50	58%
12,00				1,75	2,25	3,50	7,50	4,50	1,00	0,63	1,00	1,50	63%
12,00		4,25	0,75	1,00	1,75	2,00	9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
12,00		6,00	0,75	1,50	2,75	1,00	12,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,50	100%
12,00		2,75	0,75	0,75	1,25	4,25	9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
12,00		3,00	0,50	1,00	2,00	2,50	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00		2,75	0,75	0,75	1,50	5,50	11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00		4,00	0,50	1,25	2,00		7,75	4,25	1,00	0,65	0,00	0,00	65%
12,00				1,00	2,50	3,00	6,50	5,50	1,00	0,54	1,00	1,50	54%
6,00						5,00	5,00	1,00	1,00	0,83	0,00	0,00	83%
12,00		4,00	0,50	0,75	1,50		7,25	4,75	1,00	0,60	1,00	1,50	60%
12,00		4,00				3,00	7,00	5,00	1,00	0,58	0,00	0,00	58%
12,00		2,50	1,00	1,00	3,00	2,00	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%
12,00		1,50	1,00	1,00	2,00	4,00	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%
12,00		2,50	1,00	1,00	2,00	3,50	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00		2,50	1,00	1,00	2,00	5,00	11,50	0,50	1,00	0,96	1,00	1,50	96%
12,00							6,50	5,50	1,00	0,54	0,00	0,00	54%
12,00		4,50	0,75	1,00	1,50		11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00						2,75	7,25	4,75	1,00	0,60	0,00	0,00	60%
4,00			1,25				1,25	2,75	1,00	0,31	0,00	0,00	31%
12,00		2,75	1,00	1,00		2,50	7,25	4,75	1,00	0,60	1,00	1,50	60%
12,00		1,50			2,00	3,50	7,00	5,00	1,00	0,58	1,00	1,50	58%
12,00		3,00	0,75	0,75			8,50	3,50	1,00	0,71	1,00	1,50	71%
12,00		3,00	0,75	1,25	2,00		9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
12,00		4,00	0,75	2,25	2,00	1,00	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00		3,00	0,75	1,00	1,50	2,50	8,75	3,25	1,00	0,73	1,00	1,50	73%
12,00		6,00				3,75	9,75	2,25	1,00	0,81	0,00	0,00	81%
12,00		3,00	1,50	1,50	2,50	2,00	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00					1,00	3,00	6,50	5,50	1,00	0,54	1,00	1,50	54%
12,00		3,50	0,75	0,75	1,50	2,75	11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00		3,50	1,00	1,00	2,00	3,25	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	1,50	90%
12,00		3,50					3,50	8,50	1,00	0,29	1,00	1,50	29%
12,00		4,00				4,00	8,00	4,00	1,00	0,67	0,00	0,00	67%
12,00		1,50	1,00	1,00	2,25		5,75	6,25	1,00	0,48	1,00	1,50	48%
12,00		0,75				3,00	11,75	0,25	1,00	0,98	0,00	0,00	98%
12,00		1,50	1,00	1,00	2,50	3,75	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00					1,00	3,00	8,50	3,50	1,00	0,71	0,00	0,00	71%
12,00			2,00				5,75	6,25	1,00	0,48	0,00	0,00	48%
12,00		3,50	1,00	1,75			9,25	2,75	1,00	0,77	0,00	0,00	77%
12,00	0,25	3,50	0,50	1,25	2,25		7,75	4,25	1,00	0,65	1,00	1,50	65%
12,00		4,00	1,00				5,00	7,00	1,00	0,42	0,00	0,00	42%
12,00				1,00	2,50	7,50	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00		2,50	1,25	1,00	2,50	2,00	9,25	2,75	1,00	0,77	1,00	1,50	77%
10,00			1,00	1,75	2,00	3,00	7,75	2,25	1,00	0,78	1,00	1,50	78%
12,00				1,50	1,75	3,00	6,25	5,75	1,00	0,52	1,00	1,50	52%
12,00		3,00	0,50			3,00	12,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	100%
12,00		1,00	1,00	1,25	2,25	2,75	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00					2,50	4,50	7,00	5,00	1,00	0,58	1,00	1,50	58%
12,00				1,75	2,25	3,50	7,50	4,50	1,00	0,63	1,00	1,50	63%
12,00		4,25	0,75	1,00	1,75	2,00	9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
12,00		6,00	0,75	1,50	2,75	1,00	12,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,50	100%
12,00		2,75	0,75	0,75	1,25	4,25	9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
12,00		3,00	0,50	1,00	2,00	2,50	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00		2,75	0,75	0,75	1,50	5,50	11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

HORAS x TURNO	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	TOTAL	TOTAL	DISP /MECA NICA	DISP /REAL	N°	METROS	%
	DEMOLICIÓN SELLO FRENTE	EXCAVACIÓN	SELLO	MALLA ACMA EXCAVACIÓN	MARCO	HP1	HORAS PRODUCCIÓN	HORAS DETENCIÓN			MARCOS		Producción
12,00		4,00	0,50	1,25	2,00		7,75	4,25	1,00	0,65	0,00	0,00	65%
12,00				1,00	2,50	3,00	6,50	5,50	1,00	0,54	1,00	1,50	54%
6,00						5,00	5,00	1,00	1,00	0,83	0,00	0,00	83%
12,00		4,00	0,50	0,75	1,50		7,25	4,75	1,00	0,60	1,00	1,50	60%
12,00		4,00				3,00	7,00	5,00	1,00	0,58	0,00	0,00	58%
12,00		2,50	1,00	1,00	3,00	2,00	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%
12,00		1,50	1,00	1,00	2,00	4,00	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%
12,00		2,50	1,00	1,00	2,00	3,50	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00		2,50	1,00	1,00	2,00	5,00	11,50	0,50	1,00	0,96	1,00	1,50	96%
12,00							6,50	5,50	1,00	0,54	0,00	0,00	54%
12,00		4,50	0,75	1,00	1,50		11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00						2,75	7,25	4,75	1,00	0,60	0,00	0,00	60%
4,00			1,25				1,25	2,75	1,00	0,31	0,00	0,00	31%
12,00		2,75	1,00	1,00		2,50	7,25	4,75	1,00	0,60	1,00	1,50	60%
12,00		1,50			2,00	3,50	7,00	5,00	1,00	0,58	1,00	1,50	58%
12,00		3,00	0,75	0,75			8,50	3,50	1,00	0,71	1,00	1,50	71%
12,00		3,00	0,75	1,25	2,00		9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
15,25		2,75	1,00	1,25	1,00	2,25	9,75	2,25	1,00	0,64	1,00	0,70	64%
12,00		2,25	1,25		1,25	1,75	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	0,80	79%
12,00		2,25	1,25		1,25	1,75	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	0,70	79%
5,25			0,75	1,50	1,75	1,00	5,00	0,25	1,00	0,95	1,00	0,80	95%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
5,00			0,75	0,75	0,50	1,75	3,75	1,25	0,00	0,00	1,00	0,60	75%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,60	67%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
12,00		1,50	1,00	0,75	1,75	1,75	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,50	85%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
12,00		1,50	0,75	1,25	1,75	2,00	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,75	85%
12,00		2,50	1,00	1,25	1,75	2,00	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,70	85%
12,00		1,50	0,75	1,25	1,75	2,00	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	0,75	85%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
12,00		2,00	1,00	1,25	1,75	1,00	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	0,50	67%
12,00		0,50	1,25	2,25	3,25	3,00	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	0,50	92%
12,00	0,75	3,50	1,00	1,00	2,00		10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,00	88%
12,00		2,75	1,25	1,25	1,50	3,25	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	92%
12,00	0,50	2,50	0,75	0,50		1,25	6,50	5,50	1,00	0,54	0,00	0,00	54%
12,00		2,50	2,00	1,50	2,00	2,25	11,25	0,75	1,00	0,94	1,00	1,00	94%
12,00	0,50	3,00	0,50	0,50	2,50	2,50	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,00	88%
12,00		2,25	1,25	2,25	2,25	2,25	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00	0,50				2,75	4,50	7,75	4,25	1,00	0,65	1,00	1,50	65%
12,00		2,50	1,50	1,50	2,50	2,50	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00	0,25	3,75	1,25	1,00	1,00	2,00	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00					2,25	3,75	7,25	4,75	1,00	0,60	0,00	0,00	60%
8,00			0,75			2,00	2,75	5,25	1,00	0,34	0,00	0,00	34%
12,00		4,50	1,25	1,50	2,00	1,50	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	1,50	90%
12,00	0,50	0,75				6,00	8,75	3,25	1,00	0,73	0,00	0,00	73%
12,00		2,00	1,25	1,25	1,50	3,25	9,25	2,75	1,00	0,77	1,00	1,50	77%
12,00	0,25	3,50	1,00	1,75	1,50	2,75	10,75	1,25	1,00	0,90	1,00	1,50	90%
12,00	0,50	3,25	1,00	1,00	1,25	0,50	7,50	4,50	1,00	0,63	1,00	1,50	63%
12,00						3,75	4,75	7,25	1,00	0,40	0,00	0,00	40%
12,00	0,50	2,75	0,50		1,00	4,75	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%
12,00	0,25	3,00	1,25	1,25	2,00	3,25	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00	0,25	3,00	1,00	0,75	2,75	8,50	3,50	3,50	1,00	0,71	1,00	1,50	71%
8,00				0,75	1,25	3,00	5,00	3,00	1,00	0,63	1,00	1,50	63%
12,00	0,25	4,50	1,25	1,00	1,25	1,75	10,00	2,00	1,00	0,83	0,00	0,00	83%
12,00	0,25	3,50	1,00	1,00	1,25	2,00	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00	0,50	2,75	0,50	1,00	1,50	1,75	8,00	4,00	1,00	0,67	1,00	1,50	67%
12,00	0,25	2,00	0,75		1,00	2,50	6,50	5,50	1,00	0,54	1,00	1,50	54%
12,00		1,75	0,75	1,00	1,50	3,25	8,25	3,75	1,00	0,69	1,00	1,50	69%
10,75		2,50		0,50		0,50	5,75	5,00		1,25	9,75	13,00	53%
7,25		2,50		0,75		0,75	7,25	0,00		3,00	7,25	10,25	100%



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

HORAS x TURNO	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	HORAS	TOTAL	TOTAL	DISP /MECA NICA	DISP /REAL	N°	METROS	%
	DEMOLICIÓN SELLO FRENTE	EXCAVACIÓN	SELLO	MALLA ACMA EXCAVACIÓN	MARCO	HP1	HORAS PRODUCCIÓN	HORAS DETENCIÓN			MARCOS		Producción
12,00			5,25				9,75	2,25			12,00	12,00	81%
10,25		1,75	3,50		1,00		7,75	2,50		1,75	10,25	12,00	76%
11,75		4,00		0,50		1,25	11,50	0,25		0,25	11,75	12,00	98%
10,00							2,25	7,75		2,00	10,00	12,00	23%
12,00		3,00		0,50		1,25	6,75	5,25			12,00	12,00	56%
12,00		2,75		0,75		1,25	7,75	4,25		0,50	12,00	12,50	65%
12,00		2,75		0,75		0,50	8,00	4,00			12,00	12,00	67%
12,00		2,25		0,75	1,00	0,50	8,25	3,75		1,00	12,00	13,00	69%
12,00	0,50	3,00		1,00		0,75	8,50	3,50			12,00	12,00	71%
12,00		3,25		0,50		0,75	8,75	3,25		0,50	12,00	12,50	73%
12,00		1,00		1,00		1,00	7,75	4,25		4,25	7,75	20,50	65%
12,00	0,50	3,00		1,00		0,75	8,50	3,50		8,50	12,00	20,50	71%
12,00	0,50	3,00		1,00		0,75	8,50	3,50		7,00	12,00	19,00	71%
12,00		4,25		0,75		1,00	9,75	2,25			12,00	12,00	81%
10,00		2,25		0,75		1,00	5,75	4,25		2,00	10,00	12,00	58%
12,00		4,00	0,75	1,75	2,25		11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00		2,25	0,75	0,75		2,25	9,00	3,00	1,00	0,75	1,00	1,50	75%
12,00		2,25	0,75	1,00	1,50	2,25	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00		3,75	0,75	0,75	1,25	3,00	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00		2,50	0,75	0,75	1,50	2,25	9,25	2,75	1,00	0,77	1,00	1,50	77%
12,00		2,25	0,75	1,00	1,25	3,00	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00		3,25	0,75	0,75	1,00	2,75	9,00	3,00	1,00	0,75	0,00	0,00	75%
12,00		3,00	1,00	1,25	2,75	3,50	11,50	0,50	1,00	0,96	2,00	3,00	96%
12,00		3,00	1,00	1,00	0,75	3,75	12,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,50	100%
12,00		3,00	0,75	0,50	0,75		9,75	2,25	1,00	0,81	1,00	1,50	81%
12,00		4,00	0,75	0,75	1,50	2,50	10,50	1,50	1,00	0,88	1,00	1,50	88%
12,00		2,75	1,00	1,00	0,75	3,50	11,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,50	92%
12,00		3,50	0,75	1,00	2,00	2,00	10,25	1,75	1,00	0,85	1,00	1,50	85%
12,00		2,25	1,00	1,00	0,75	3,25	11,75	0,25	1,00	0,98	1,00	1,50	98%
12,00		3,25	0,75	0,75	1,75	2,25	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00		2,75	0,50	1,00	1,75	2,25	10,00	2,00	1,00	0,83	1,00	1,50	83%
12,00		3,25	0,75	1,25	2,00	2,25	9,50	2,50	1,00	0,79	1,00	1,50	79%

ANEXO 3

(Extracto de modelo de tiempo y costo, 2000 iteraciones)



2000 Iteraciones	Excavación con PC 130	Proyección sello	Proyección sello de Frente	Proyección shotcrete HP-1	Colocación malla C-295	Colocación marco	Eficiencia	Pérdidas en el shotcrete sello	Pérdidas en el shotcrete HP-1	Espaciamientos entre marcos	Desprendimientos	Colocación malla 2	Proyección shotcrete (HP-2)	Excavación y perfilado	Sello excavación (5 cm)	Sello frente (3cm)	Malla Primario C-335	Instalación de Marco	Revestimiento 1ª Capa (15 cm)	Malla Secundario C-335	Revestimiento Secundario (15cm)	Suma Hr	Número de ciclos en un día	Rendimiento (m/día)	Mes
Min	34,2	2,1	3,1	2,2	2,6	0,1	0,5	0,8	0,7	0,5	0,2	2,1	1,4	1,1	0,3	0,9	0,3	0,4	0,8	0,2	0,5	6,7	0,6	0,9	2,8
Media	35,3	3,5	4,0	4,7	28,1	0,7	0,7	1,0	0,9	1,3	2,9	28,3	4,2	3,4	1,1	1,4	1,7	2,4	3,1	1,6	2,4	17,2	1,5	1,8	4,4
Max	36,9	5,2	5,6	9,5	70,9	2,7	0,9	1,2	1,1	1,5	7,4	79,5	9,7	6,2	2,3	2,1	26,7	7,9	7,7	18,6	6,3	42,6	3,9	2,7	8,6
Dest	0,4	0,6	0,5	1,1	12,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	1,4	12,8	1,1	0,9	0,3	0,2	1,5	1,1	1,1	1,4	0,9	4,4	0,4	0,3	0,8
1	35,6	3,4	4,5	6,4	39,6	0,8	0,7	1,0	0,9	1,0	5,6	52,0	5,4	4,1	1,3	1,3	0,9	4,0	2,5	1,8	3,0	18,8	1,1	1,7	4,5
2	35,2	3,2	4,1	3,7	5,9	0,3	0,8	1,1	0,9	0,7	1,2	8,2	5,6	3,8	1,3	1,3	1,2	3,8	7,7	1,0	1,3	21,4	2,0	2,0	3,8
3	35,5	4,8	3,6	4,7	18,4	0,8	0,8	1,2	0,8	1,5	4,5	20,8	3,7	3,8	1,0	1,4	1,6	2,5	2,4	0,9	3,0	16,5	1,4	2,2	3,6
4	35,6	3,8	3,8	4,6	45,9	0,4	0,8	1,0	0,8	0,7	1,3	11,8	5,4	3,4	0,9	1,1	1,3	3,2	3,2	1,4	2,3	16,8	1,0	1,5	5,2
5	35,1	4,1	3,5	3,5	20,6	0,4	0,7	1,0	0,9	1,5	2,2	27,6	3,3	4,6	1,2	1,4	2,8	1,1	4,0	1,2	2,9	19,2	1,2	1,8	4,2
6	35,6	3,9	3,5	4,5	38,1	0,6	0,7	0,8	0,7	1,0	5,8	24,4	3,9	3,8	1,0	1,3	1,3	2,4	2,8	2,4	2,8	17,7	1,5	2,3	3,3
7	35,2	2,8	4,4	7,6	40,6	0,5	0,7	1,1	0,9	1,5	2,9	20,7	3,2	4,4	1,4	1,7	1,5	3,5	5,1	1,9	2,9	22,3	1,5	2,2	3,5
8	35,4	2,9	3,8	4,0	22,2	0,9	0,7	1,1	0,9	1,5	3,6	35,6	3,3	4,1	1,3	1,3	1,2	1,5	4,4	2,3	2,5	18,6	2,6	1,9	4,1
9	35,8	3,5	3,3	3,5	42,8	0,5	0,8	0,9	1,0	1,0	2,0	17,1	2,8	1,9	0,8	1,3	0,9	2,1	2,1	1,1	1,5	11,7	3,1	1,6	4,9
10	35,1	4,3	4,4	3,1	23,7	0,3	0,7	1,0	1,0	1,5	1,8	24,3	3,2	3,4	1,1	1,0	1,4	1,0	2,8	0,4	4,1	15,3	1,0	1,6	4,9
11	35,1	3,1	4,5	5,5	47,9	1,0	0,7	0,9	0,7	1,0	0,8	52,7	5,3	4,0	1,5	1,1	1,1	1,0	2,9	0,6	3,2	15,4	1,5	2,3	3,4
12	34,7	3,4	4,1	5,7	17,8	0,9	0,8	1,2	1,1	1,0	5,3	27,2	5,2	3,7	1,0	1,6	0,8	2,9	4,0	2,4	2,5	19,0	1,4	2,1	3,6
13	35,2	3,1	3,8	4,6	31,6	0,9	0,6	1,0	0,7	1,5	3,0	24,8	3,6	4,0	1,4	1,2	1,8	4,0	6,0	1,9	1,8	22,2	2,3	2,3	3,4
14	35,7	2,3	3,7	3,8	41,7	0,9	0,7	1,0	0,9	1,5	2,9	23,7	4,8	2,3	0,8	1,2	1,2	1,4	2,1	0,5	1,2	10,6	1,4	2,1	3,7
15	35,4	2,8	3,4	5,4	25,3	0,5	0,7	1,0	1,0	1,5	1,9	30,3	3,7	2,4	0,8	1,0	0,5	1,5	2,3	0,6	2,4	11,5	1,5	2,3	3,4
16	35,7	3,5	3,7	4,3	22,0	0,6	0,8	1,1	1,0	0,7	2,1	38,7	3,2	3,6	1,1	1,0	1,2	2,2	4,5	1,2	2,5	17,2	1,8	1,8	4,2
17	35,9	3,6	4,5	3,7	18,4	0,5	0,8	1,2	1,0	1,5	5,2	48,7	4,5	2,7	1,0	1,7	1,1	4,8	2,9	1,8	2,3	18,3	2,0	2,0	3,8
18	35,7	3,0	4,0	6,1	20,0	0,7	0,8	1,1	0,7	1,5	2,7	49,3	4,8	4,3	1,7	1,3	4,0	1,9	2,5	1,0	3,1	19,7	1,4	2,1	3,7
19	34,9	3,8	4,6	4,3	13,0	1,0	0,7	1,1	0,8	1,5	1,4	19,6	3,0	1,9	0,5	1,4	0,5	2,1	1,4	0,7	1,6	10,1	0,8	1,2	6,6
20	35,6	4,4	4,4	5,7	54,1	0,3	0,7	1,1	0,9	0,5	1,3	34,3	2,5	4,3	1,9	1,2	2,2	1,6	3,4	1,4	2,5	18,5	2,3	1,6	4,9
21	35,3	2,1	3,6	5,6	42,9	0,7	0,8	1,1	1,1	1,0	5,0	19,4	4,5	3,0	0,7	1,1	3,6	1,8	2,9	1,7	2,9	17,8	1,1	1,7	4,5
22	34,9	4,2	3,9	6,1	39,5	0,4	0,6	1,2	1,0	1,5	5,0	17,5	2,6	2,7	1,1	1,5	1,2	1,7	2,3	1,2	2,0	13,8	1,0	1,5	5,0
23	35,8	3,9	3,5	4,1	14,0	0,6	0,8	1,2	1,0	1,0	1,9	7,3	3,3	4,2	1,2	1,3	1,3	1,8	2,5	1,2	3,0	16,4	2,1	2,1	3,6
24	35,5	3,0	4,4	6,8	41,9	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	4,4	28,6	4,9	3,5	1,0	1,1	0,9	3,4	2,7	1,3	1,5	15,6	1,5	2,3	3,3
25	35,7	3,3	3,1	4,8	37,7	0,3	0,7	1,0	0,8	0,7	2,0	37,2	6,9	1,8	0,6	1,1	1,0	2,5	1,2	2,1	1,3	11,7	1,5	2,3	3,3
26	35,3	4,8	3,6	3,9	32,8	0,3	0,8	1,0	0,9	1,5	1,8	10,5	5,1	2,8	1,0	1,4	1,1	4,5	2,8	0,6	1,2	15,4	1,3	1,9	4,0
27	35,4	3,1	3,5	4,5	10,7	0,9	0,7	1,0	0,9	1,5	1,8	29,6	3,5	4,0	1,2	1,5	1,8	1,7	3,1	0,7	2,9	16,9	0,9	1,3	5,7
28	35,4	3,6	4,5	3,0	34,9	0,9	0,7	1,0	1,0	1,5	5,1	34,5	3,8	3,7	0,9	1,1	1,1	1,6	4,9	2,4	1,8	17,6	1,3	2,0	3,9
29	35,0	3,5	4,2	6,7	15,3	0,7	0,8	1,0	0,8	1,5	3,1	28,5	5,1	4,0	1,2	1,3	0,9	1,9	3,5	1,7	4,4	18,8	1,7	2,5	3,0
30	35,8	4,1	4,1	4,1	6,2	0,8	0,6	1,0	0,8	0,7	0,9	19,6	4,8	1,7	0,6	1,3	0,7	2,5	1,2	2,1	0,9	11,0	1,2	1,8	4,2
31	35,6	2,9	4,2	3,9	35,1	0,3	0,7	1,2	0,8	1,5	3,7	24,0	3,7	4,3	1,0	1,7	1,0	2,1	3,0	4,7	3,0	20,8	1,1	1,6	4,7
32	35,8	3,8	4,8	5,0	44,6	0,7	0,7	1,2	1,0	1,0	4,0	10,9	5,7	2,7	1,0	1,6	0,6	3,0	2,6	0,9	2,5	15,0	1,0	1,5	5,3
33	35,9	4,0	3,6	3,6	25,3	0,8	0,8	0,9	0,9	1,5	3,3	16,7	4,4	3,1	1,2	1,4	1,3	2,3	1,8	1,2	2,0	14,3	1,2	1,8	4,3
34	35,1	4,1	3,9	3,4	42,7	0,5	0,7	0,9	0,9	1,5	0,4	8,6	3,9	4,0	1,2	1,2	1,4	1,9	3,8	1,0	2,0	16,5	2,0	2,0	3,9
35	35,7	2,3	3,6	4,0	29,0	0,4	0,8	0,9	0,9	1,0	3,9	76,2	3,7	3,7	0,8	1,1	1,3	2,8	3,6	2,2	2,2	17,7	3,0	1,5	5,2
36	34,5	2,8	3,5	6,0	19,0	0,5	0,8	1,0	1,1	1,5	4,5	14,5	4,7	3,9	1,0	1,4	1,7	3,8	2,7	1,3	3,2	18,9	1,2	1,8	4,3
37	35,7	3,6	4,9	6,0	14,1	0,5	0,7	1,2	1,0	1,5	1,6	42,1	4,0	4,4	1,1	1,5	1,4	2,6	5,7	1,4	3,8	21,9	1,3	2,0	3,8
38	36,1	3,8	4,4	5,3	36,2	0,7	0,6	0,9	1,0	1,5	4,6	41,0	6,2	4,4	1,2	1,4	1,7	2,5	3,4	1,3	1,6	17,5	1,3	1,9	4,0
39	34,9	3,1	4,0	4,2	31,4	0,4	0,6	1,0	1,1	1,5	3,1	44,7	4,2	3,3	1,0	1,5	1,2	5,0	3,5	0,9	2,4	18,9	1,0	1,5	5,0
40	35,6	4,3	3,2	3,0	23,5	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	36,4	3,5	2,0	1,0	1,2	0,7	4,1	1,7	0,6	1,4	12,9	1,8	1,8	4,3
41	36,0	3,0	4,5	3,7	36,4	1,6	0,8	1,1	1,1	0,7	1,9	38,9	5,1	1,9	0,5	1,5	1,3	1,5	1,2	0,6	1,1	9,7	3,0	1,5	5,1
42	35,0	3,7	4,5	3,6	42,2	0,8	0,7	1,2	0,8	1,5	3,1	19,9	2,3	4,0	1,7	1,3	4,3	2,4	2,5	0,9	3,1	20,2	1,7	2,6	3,0
43	35,8	3,4	3,7	6,5	15,7	1,0	0,8	1,0	0,8	1,5	2,7	25,4	2,9	4,5	1,2	1,4	1,3	3,0	3,8	1,9	3,2	20,3	1,7	1,2	6,3
44	34,6	3,1	3,6	4,3	4,9	1,7	0,8	0,9	1,0	1,5	5,5	56,0	3,1	3,9	1,3	1,3	0,8	3,5	3,5	1,5	2,3	18,0	1,4	2,2	3,6
45	35,6	3,2	3,8	4,7	35,0	0,4	0,8	1,0	0,7	1,0	1,4	38,5	4,5	4,7	1,9	1,7	1,8	2,6	2,9	1,3	1,7	18,6	2,2	2,2	3,5

Tabla: Muestra para el cálculo del tiempo del tramo “i”.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Description	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT
	Mano de Obra		Maquinaria		Materiales		Industriales		Otros Costos		Por Definir		Subcontratos		TOTAL DT		TOTAL IT	
Max	69.046.100	12.282.375	62.660.625	35.980.000	-	1.337.300.906	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	247.125.940	142.709.346	1.636.389.221		
Esp	60.966.100	11.697.500	61.168.625	32.270.000	-	1.273.619.910	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	245.925.940	133.137.346	1.567.213.350		
Min	58.566.100	11.112.625	60.252.625	28.560.000	-	1.222.675.114	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	223.125.940	129.821.346	1.489.173.679		
Prom	62.859.433	11.697.500	61.360.625	32.270.000	-	1.277.865.310	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	238.725.940	135.222.679	1.564.258.750		
Iter																		
1	63.600.957	11.888.804	61.339.336	29.981.820	-	1.274.403.629	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	224.874.973	135.942.913	1.544.849.227		
2	63.836.442	11.892.436	61.004.589	32.947.433	-	1.271.212.477	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	241.935.183	135.843.652	1.561.687.528		
3	64.560.517	11.949.417	60.588.585	33.924.709	-	1.278.743.009	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	237.627.287	136.151.723	1.565.944.423		
4	64.482.067	11.481.461	61.568.892	30.781.519	-	1.297.105.414	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	237.352.826	137.053.579	1.580.421.220		
5	63.893.546	11.576.493	62.270.740	35.377.158	-	1.288.234.169	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.420.733	137.166.907	1.582.308.553		
6	65.357.122	11.865.948	61.345.395	33.799.142	-	1.275.706.643	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	227.687.716	137.705.138	1.552.759.449		
7	60.761.816	11.694.945	61.306.174	33.232.519	-	1.279.165.604	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	227.099.750	133.070.611	1.554.892.818		
8	67.925.995	11.181.972	61.773.220	32.994.713	-	1.299.669.593	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	244.144.356	140.701.835	1.591.690.635		
9	61.721.958	11.518.156	60.872.432	32.842.947	-	1.297.717.564	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.743.799	133.597.011	1.589.522.465		
10	63.002.176	11.567.002	62.412.807	32.055.634	-	1.266.892.009	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	233.132.516	136.417.603	1.547.347.161		
11	61.026.735	11.679.352	60.850.506	29.022.719	-	1.244.285.474	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	239.246.682	132.879.862	1.527.934.228		
25	68.375.887	11.618.495	60.937.270	32.631.910	-	1.248.298.046	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.372.423	140.315.778	1.539.620.874		
26	65.962.414	11.386.718	61.519.928	32.279.082	-	1.283.134.085	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	242.330.531	138.484.963	1.572.830.415		
27	60.428.610	11.896.624	61.436.631	30.918.327	-	1.262.626.240	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	245.886.010	132.867.862	1.555.027.202		
28	63.672.840	11.568.678	60.834.563	29.807.310	-	1.300.810.668	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	229.401.113	135.510.024	1.575.287.769		
29	67.182.448	11.608.049	61.587.487	32.593.388	-	1.280.101.384	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	240.268.492	139.772.556	1.568.271.313		
30	63.305.775	12.011.878	61.705.554	33.914.070	-	1.265.203.654	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.028.999	136.013.950	1.557.858.601		
31	63.435.789	11.886.805	62.412.590	33.418.497	-	1.293.965.328	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	246.261.347	136.851.000	1.589.231.977		
32	61.291.064	11.432.456	60.679.204	30.491.215	-	1.265.674.437	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	233.092.354	132.972.888	1.544.390.462		
33	63.603.841	11.720.164	61.668.651	32.780.178	-	1.296.061.046	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	235.932.714	136.275.112	1.580.194.101		
34	62.265.581	11.310.612	60.697.676	30.996.485	-	1.297.431.436	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	235.556.843	133.965.878	1.578.995.376		
35	61.230.703	11.328.704	60.912.484	29.894.731	-	1.247.065.344	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	241.972.472	133.145.808	1.533.961.250		
36	60.930.058	11.630.198	61.998.579	32.737.089	-	1.294.911.541	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	244.082.864	133.931.257	1.587.061.692		
37	62.727.270	11.659.638	60.790.543	33.555.786	-	1.296.108.591	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.400.224	134.520.434	1.588.424.238		
38	62.180.556	11.300.402	61.188.982	30.900.234	-	1.314.991.791	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	237.416.165	134.372.159	1.598.308.592		
39	61.949.474	11.608.305	61.573.354	31.583.232	-	1.285.396.392	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	245.039.101	134.525.448	1.577.327.030		
40	60.837.772	11.647.672	61.071.904	31.423.577	-	1.290.126.850	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	242.029.795	132.912.296	1.578.927.895		
41	60.942.102	11.760.666	61.128.661	30.608.373	-	1.294.323.897	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	237.534.526	133.073.384	1.577.927.462		
42	61.169.937	11.590.195	61.668.866	31.364.633	-	1.234.641.817	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	242.576.132	133.841.423	1.523.872.777		
43	66.992.859	11.464.763	62.263.974	35.033.279	-	1.281.147.023	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	245.228.906	140.259.453	1.576.573.972		
44	61.457.761	11.707.781	61.591.992	34.841.565	-	1.251.214.317	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	242.201.111	134.052.374	1.543.664.774		
45	62.021.389	11.586.893	60.493.177	31.254.584	-	1.275.252.903	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	238.329.495	133.517.186	1.560.123.875		
46	65.741.932	11.615.470	61.089.513	33.884.198	-	1.260.331.223	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	242.974.438	137.834.066	1.552.505.329		
47	66.749.227	11.402.705	60.979.458	32.747.073	-	1.301.854.591	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	245.625.147	138.731.307	1.595.329.516		
48	59.581.968	11.623.695	61.049.572	32.931.926	-	1.295.321.307	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	246.609.818	131.634.161	1.590.186.746		
49	65.494.471	11.553.666	60.927.298	32.406.216	-	1.305.109.049	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	237.915.027	137.424.389	1.590.683.958		
50	62.647.421	11.632.330	60.878.301	31.425.685	-	1.272.775.063	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	226.021.211	134.528.342	1.545.554.289		
51	62.457.601	11.925.477	61.170.607	32.057.827	-	1.279.415.783	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	236.545.406	134.630.829	1.563.644.493		
52	61.191.792	11.746.011	60.989.766	31.892.355	-	1.242.139.799	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	226.100.398	133.184.179	1.515.578.563		
53	68.217.367	11.693.383	60.960.326	31.115.519	-	1.305.961.507	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	244.946.897	140.180.314	1.597.417.306		
54	61.955.253	11.409.600	61.973.650	35.306.580	-	1.257.694.342	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	235.869.643	134.931.524	1.543.980.165		
55	61.073.971	11.990.668	61.310.624	30.936.270	-	1.298.842.483	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	232.773.882	133.387.215	1.578.243.302		
56	61.278.059	11.721.281	60.831.340	34.851.030	-	1.268.851.051	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	238.668.497	133.112.019	1.557.791.858		
57	60.770.879	11.863.321	61.342.144	34.048.806	-	1.258.311.266	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	230.851.016	133.115.644	1.538.774.408		
58	63.103.745	11.710.312	62.011.266	33.429.209	-	1.252.138.260	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.292.032	136.117.632	1.544.269.812		
59	61.898.193	11.681.926	61.045.889	32.762.990	-	1.275.588.238	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.780.449	133.946.702	1.567.513.604		
60	64.131.632	11.632.705	61.485.209	33.815.221	-	1.252.298.680	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	236.541.421	136.619.461	1.537.988.026		
61	61.650.696	11.757.548	61.061.146	31.977.893	-	1.249.777.905	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	239.820.464	133.714.463	1.537.033.810		
62	66.733.009	11.975.453	61.284.747	32.802.828	-	1.263.031.084	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	244.102.843	139.020.377	1.555.612.208		
63	64.774.909	11.407.034	61.400.406	32.401.750	-	1.317.613.816	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	238.965.207	137.177.936	1.604.087.808		
64	61.525.335	11.560.197	61.479.996	31.884.974	-	1.270.813.194	-	3.700.000	7.577.935	-	3.424.686	-	-	243.556.163	134.007.952	1.561.514.528		
65	63.395.807	11.832.738	61.119.201	3														

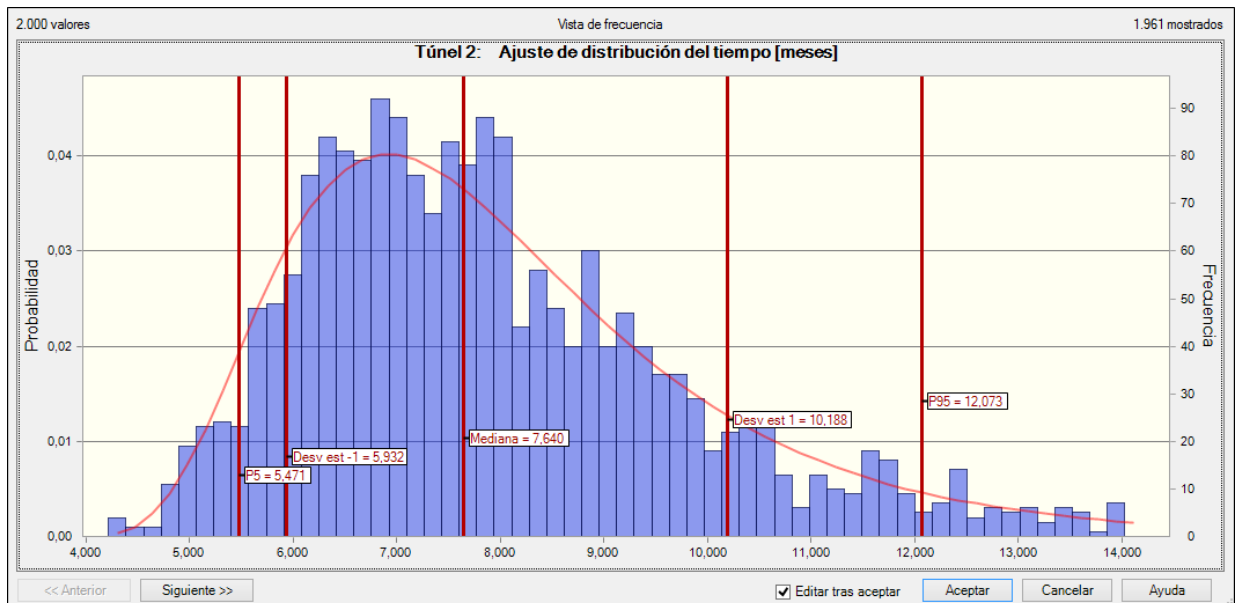
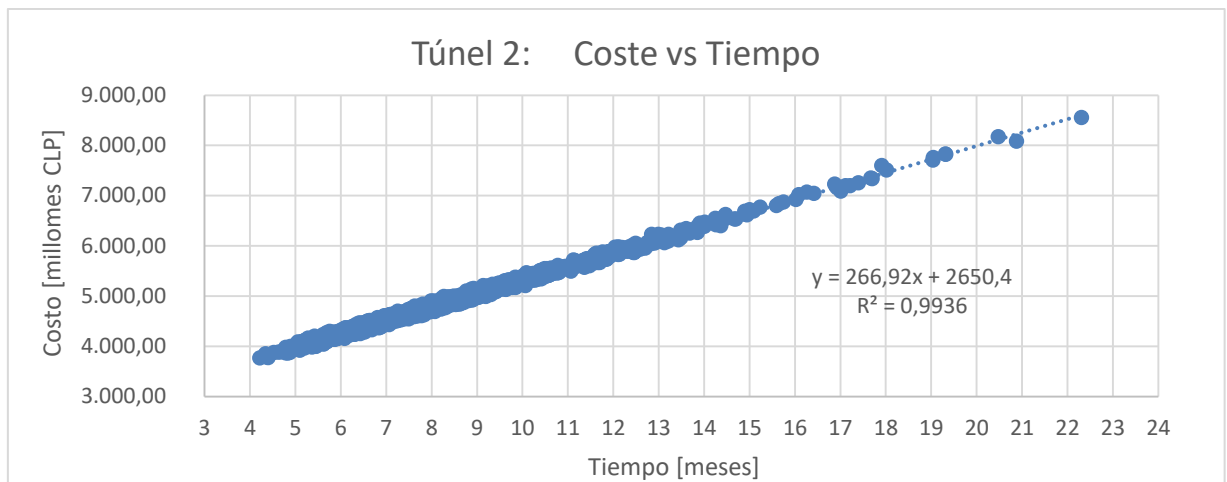
	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT	DT	IT
Descripcion	Mano de Obra		liquidacion de Obra		Maq/elem aux		Tasas y Tributos		Otros Costos		Costos de Estructura		TOTAL DT	TOTAL IT
Max	77.846.269	-	3.258.268	-	8.833.003	-	2.236.115	-	28.972.798	-	-	189.330.405	121.146.453	189.330.405
Esperado	74.139.304	-	3.258.268	-	8.333.022	-	2.236.115	-	27.593.141	-	-	189.330.405	115.559.850	189.330.405
Min	69.690.946	-	3.258.268	-	7.833.041	-	2.236.115	-	26.213.484	-	-	189.330.405	109.231.854	189.330.405
Prom	73.892.173	-	3.258.268	-	8.333.022	-	2.236.115	-	27.593.141	-	-	189.330.405	115.312.719	189.330.405
Iter														
1	74.494.780	-	3.258.268	-	8.388.372	-	2.236.115	-	28.052.163	-	-	189.330.405	116.429.698	189.330.405
2	70.917.744	-	3.258.268	-	8.304.286	-	2.236.115	-	27.677.967	-	-	189.330.405	112.394.380	189.330.405
3	73.059.277	-	3.258.268	-	8.013.999	-	2.236.115	-	27.933.252	-	-	189.330.405	114.500.910	189.330.405
4	71.805.175	-	3.258.268	-	8.347.799	-	2.236.115	-	28.001.687	-	-	189.330.405	113.649.045	189.330.405
5	76.099.178	-	3.258.268	-	8.452.474	-	2.236.115	-	27.148.228	-	-	189.330.405	117.194.263	189.330.405
6	72.516.114	-	3.258.268	-	8.466.381	-	2.236.115	-	27.747.380	-	-	189.330.405	114.224.259	189.330.405
7	74.320.473	-	3.258.268	-	8.463.776	-	2.236.115	-	28.653.167	-	-	189.330.405	116.931.798	189.330.405
8	71.891.643	-	3.258.268	-	8.482.757	-	2.236.115	-	26.979.205	-	-	189.330.405	112.847.988	189.330.405
9	76.676.367	-	3.258.268	-	8.118.181	-	2.236.115	-	28.291.993	-	-	189.330.405	118.580.925	189.330.405
10	73.168.376	-	3.258.268	-	8.273.910	-	2.236.115	-	26.887.729	-	-	189.330.405	113.824.398	189.330.405
11	72.413.616	-	3.258.268	-	8.533.590	-	2.236.115	-	26.776.159	-	-	189.330.405	113.217.749	189.330.405
12	75.035.927	-	3.258.268	-	8.668.096	-	2.236.115	-	27.281.667	-	-	189.330.405	116.480.074	189.330.405
13	74.308.184	-	3.258.268	-	8.460.320	-	2.236.115	-	26.584.131	-	-	189.330.405	114.847.018	189.330.405
14	75.696.194	-	3.258.268	-	8.444.523	-	2.236.115	-	27.273.594	-	-	189.330.405	116.908.693	189.330.405
15	75.604.392	-	3.258.268	-	8.272.708	-	2.236.115	-	26.558.913	-	-	189.330.405	115.930.396	189.330.405
16	74.248.267	-	3.258.268	-	8.578.826	-	2.236.115	-	27.130.395	-	-	189.330.405	115.451.871	189.330.405
17	74.267.858	-	3.258.268	-	8.279.662	-	2.236.115	-	27.872.758	-	-	189.330.405	115.914.661	189.330.405
18	71.359.583	-	3.258.268	-	8.526.540	-	2.236.115	-	26.850.495	-	-	189.330.405	112.231.002	189.330.405
19	71.327.490	-	3.258.268	-	8.613.244	-	2.236.115	-	28.393.738	-	-	189.330.405	113.828.855	189.330.405
20	73.776.461	-	3.258.268	-	8.754.031	-	2.236.115	-	28.838.370	-	-	189.330.405	116.863.246	189.330.405
21	70.465.458	-	3.258.268	-	8.427.029	-	2.236.115	-	28.145.147	-	-	189.330.405	112.532.017	189.330.405
22	74.901.233	-	3.258.268	-	8.364.142	-	2.236.115	-	28.276.440	-	-	189.330.405	117.036.198	189.330.405
23	73.631.237	-	3.258.268	-	8.416.599	-	2.236.115	-	28.480.321	-	-	189.330.405	116.022.541	189.330.405
24	74.871.261	-	3.258.268	-	8.467.599	-	2.236.115	-	27.440.525	-	-	189.330.405	116.273.768	189.330.405
25	72.019.340	-	3.258.268	-	8.241.117	-	2.236.115	-	27.238.409	-	-	189.330.405	112.993.250	189.330.405
26	74.634.283	-	3.258.268	-	8.472.482	-	2.236.115	-	26.566.497	-	-	189.330.405	115.167.645	189.330.405
27	71.758.705	-	3.258.268	-	7.990.156	-	2.236.115	-	27.566.968	-	-	189.330.405	112.810.212	189.330.405
28	73.040.094	-	3.258.268	-	8.701.081	-	2.236.115	-	27.324.048	-	-	189.330.405	114.559.606	189.330.405
29	73.621.450	-	3.258.268	-	8.335.179	-	2.236.115	-	27.355.060	-	-	189.330.405	114.806.073	189.330.405
30	71.828.827	-	3.258.268	-	8.444.542	-	2.236.115	-	28.687.471	-	-	189.330.405	114.455.223	189.330.405
31	71.865.875	-	3.258.268	-	7.972.583	-	2.236.115	-	27.033.855	-	-	189.330.405	112.366.697	189.330.405
32	73.444.050	-	3.258.268	-	8.506.142	-	2.236.115	-	27.992.749	-	-	189.330.405	115.437.324	189.330.405
33	75.953.230	-	3.258.268	-	8.009.069	-	2.236.115	-	27.343.159	-	-	189.330.405	116.799.841	189.330.405
34	74.729.010	-	3.258.268	-	8.235.862	-	2.236.115	-	27.820.052	-	-	189.330.405	116.279.307	189.330.405
35	74.937.846	-	3.258.268	-	8.344.363	-	2.236.115	-	27.777.274	-	-	189.330.405	116.553.867	189.330.405
36	77.054.076	-	3.258.268	-	8.623.479	-	2.236.115	-	27.172.449	-	-	189.330.405	118.344.388	189.330.405
37	71.591.449	-	3.258.268	-	8.486.515	-	2.236.115	-	28.218.302	-	-	189.330.405	113.790.649	189.330.405
38	75.634.877	-	3.258.268	-	8.161.973	-	2.236.115	-	28.144.882	-	-	189.330.405	117.436.114	189.330.405
39	72.924.199	-	3.258.268	-	8.194.148	-	2.236.115	-	27.710.066	-	-	189.330.405	114.322.795	189.330.405
40	74.622.435	-	3.258.268	-	8.738.499	-	2.236.115	-	27.169.524	-	-	189.330.405	116.024.841	189.330.405
41	75.662.954	-	3.258.268	-	8.530.234	-	2.236.115	-	28.273.921	-	-	189.330.405	117.961.492	189.330.405
42	74.379.957	-	3.258.268	-	8.324.539	-	2.236.115	-	27.092.233	-	-	189.330.405	115.291.112	189.330.405
43	73.851.580	-	3.258.268	-	8.409.619	-	2.236.115	-	27.405.141	-	-	189.330.405	115.160.723	189.330.405
44	75.665.220	-	3.258.268	-	8.238.389	-	2.236.115	-	26.450.767	-	-	189.330.405	115.848.760	189.330.405
45	73.730.546	-	3.258.268	-	8.497.151	-	2.236.115	-	27.659.032	-	-	189.330.405	115.381.112	189.330.405
46	75.322.331	-	3.258.268	-	8.016.885	-	2.236.115	-	27.559.399	-	-	189.330.405	116.392.997	189.330.405
47	77.300.160	-	3.258.268	-	7.901.925	-	2.236.115	-	27.517.461	-	-	189.330.405	118.213.928	189.330.405
48	76.712.719	-	3.258.268	-	8.514.760	-	2.236.115	-	26.960.616	-	-	189.330.405	117.682.478	189.330.405
49	74.962.441	-	3.258.268	-	8.294.183	-	2.236.115	-	28.345.876	-	-	189.330.405	117.096.883	189.330.405

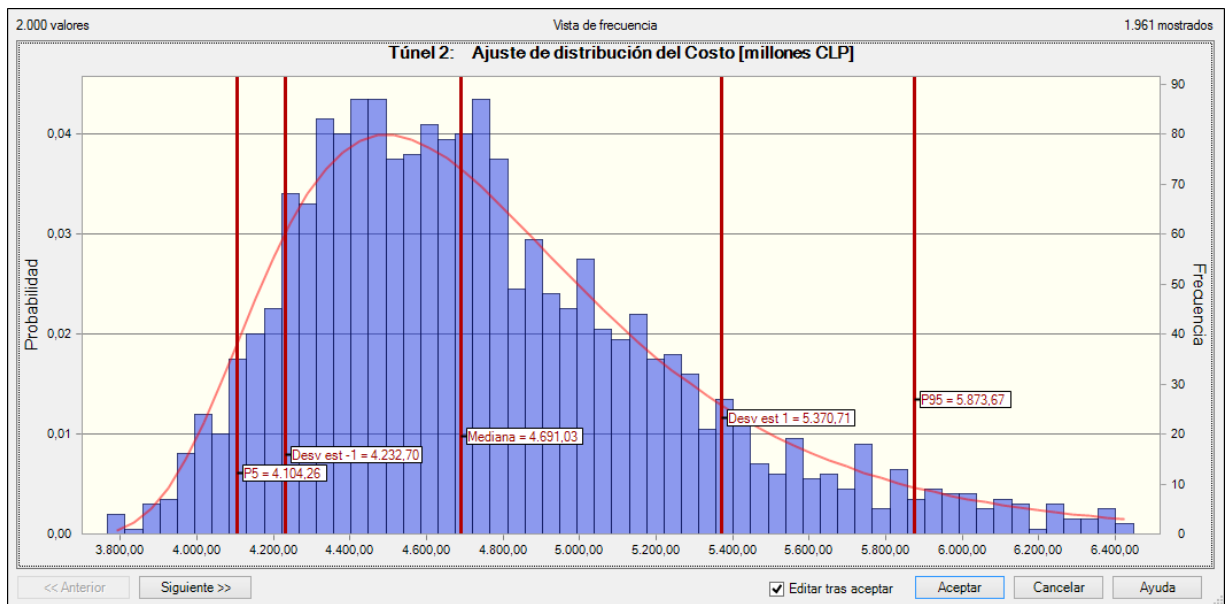
Tabla: Muestra para el cálculo del Costo Indirecto.

	Tiempo	Costo [DT]	Costo [IT]	Costo Total
iteración	[mes]	[CLP]	[CLP]	[CLP]
1	7,178	242.974.329	1.769.749.448	3.513.731.095
2	6,623	242.592.919	1.725.263.106	3.331.876.431
3	7,490	247.737.886	1.724.753.152	3.580.243.842
4	5,917	247.209.964	1.732.336.609	3.194.972.189
5	6,848	253.687.947	1.767.170.790	3.504.488.128
6	4,926	241.577.071	1.753.253.254	2.943.171.491
7	5,293	247.363.174	1.796.047.843	3.105.358.288
8	4,469	248.307.637	1.766.614.105	2.876.316.354
9	5,152	248.997.840	1.732.067.632	3.014.885.187
10	6,267	245.109.653	1.765.465.122	3.301.587.255
11	5,139	248.911.014	1.756.627.151	3.035.711.245
12	6,228	247.558.114	1.737.575.419	3.279.441.303
13	5,937	250.343.539	1.714.355.431	3.200.727.322
14	5,038	246.085.411	1.730.637.401	2.970.459.253
15	5,743	250.212.995	1.727.999.791	3.165.045.405
16	5,700	243.787.417	1.743.321.451	3.132.853.728
17	3,603	247.410.084	1.748.407.311	2.639.776.568
18	4,514	246.104.792	1.711.381.901	2.822.398.799
19	8,650	249.048.180	1.738.726.120	3.892.916.323
20	9,897	247.448.994	1.768.717.792	4.217.603.624
21	5,436	244.684.314	1.737.400.668	3.067.586.054
22	6,008	248.573.331	1.793.761.969	3.287.099.147
23	7,914	245.888.221	1.738.894.284	3.684.974.317
24	7,661	242.921.707	1.719.003.191	3.580.130.373
25	4,820	248.264.901	1.736.204.095	2.932.783.756
26	4,291	252.663.210	1.744.575.257	2.828.861.890
27	5,672	248.480.992	1.748.955.799	3.158.227.998
28	6,906	246.684.780	1.709.531.020	3.413.240.437
29	8,320	248.532.396	1.773.557.627	3.841.270.371
30	6,070	251.002.812	1.744.698.861	3.268.299.489
31	4,666	247.904.699	1.797.620.848	2.954.338.196
32	4,633	241.607.890	1.765.841.680	2.885.117.645
33	6,131	249.741.874	1.758.151.280	3.289.287.309
34	4,928	245.319.526	1.742.535.951	2.951.529.046
35	5,185	250.056.210	1.750.134.303	3.046.633.352

Tabla: Muestra para el cálculo del Costo Total.

ANEXO 4
(Resultados del túnel 2)





Descripción	Unidad	Media	Dest.
Tiempo	[mes]	8,11	2,39
Costo	[millones]	4.814	642

Costo [DT]	Costo [IT]	Costo Total
[MM CLP]	[MM CLP]	[MM CLP]
2.166.371.443	2.647.107.324	4.813.478.767
45%	55%	100%

Percentil	Tiempo	Costo	Producción	Resultado
[%]	[meses]	[millones]	[millones]	[millones]
P5	5,47	4.104,26	4.884,60	780,34
Planificado	6,77	4.685,02	4.884,60	199,58
P38	6,77	4.667,00	4.884,60	217,60
P50	7,66	4.691,03	4.884,60	193,57
P95	12,07	5.873,67	4.884,60	- 989,07