



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES PARA OBRAS HIDRÁULICAS

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

DANIEL IGNACIO CERONI GUTIÉRREZ

PROFESOR GUÍA:
ADOLFO OCHOA LLANGATO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE PULGAR ALLENDES
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

POR: DANIEL CERONI GUTIÉRREZ

FECHA: ENERO 2018

PROFESOR GUÍA: ADOLFO OCHOA LLANGATO

Aplicación de la Evaluación de Riesgos en la construcción de túneles para obras hidráulicas

Cualquier proyecto está sujeto al acontecimiento de eventos de riesgo, que interfieren en el normal desarrollo de lo planificado. Por ende, la materialización de los túneles en Obras Hidráulicas no está exenta de estos, que como consecuencia, pueden modificar los costos y plazos que se estiman previo al comienzo de la construcción; además de ocasionar problemas en la calidad y/o seguridad de la obra, y en otras variables del proyecto. Esto indica que es preciso invertir recursos para gestionar los riesgos en las próximas obras.

Este Trabajo de Título se enmarca en la evaluación de riesgos (una parte del proceso de gestión de riesgos) en este tipo de obras subterráneas, basándose en la metodología propuesta por el PMBOK® y utilizando como referencia las técnicas de evaluación que recomienda la norma NCh-ISO 31010:2013.

La Evaluación de Riesgos consiste en identificar los riesgos y analizarlos, para luego establecer planes de respuesta frente a los potenciales eventos críticos, es decir, aquellos con mayor probabilidad de ocurrencia e impacto sobre la construcción.

Para el proceso de identificación, se realizaron cinco entrevistas a profesionales con experiencia en el rubro, con el objetivo de obtener un registro de riesgos. Posteriormente, se analizaron exclusivamente los que tienen relación directa con la etapa de construcción del túnel, mediante una matriz de riesgos que considera una escala cualitativa de probabilidad e impacto, de forma independiente.

Finalmente, se elaboraron los planes de respuesta a los riesgos analizados que presentan un nivel de importancia alto y medio. Estos entregan sugerencias para enfrentar los distintos eventos, ya sea mitigando, evitando, aceptando o transfiriendo los riesgos.

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a Dios, por toda la ayuda y oportunidades que me ha brindado a lo largo de mi vida.

También quiero agradecer al Profesor Adolfo Ochoa, quien siempre estuvo dispuesto a responder mis preguntas sobre el Trabajo. Así también al Profesor Jorge Pulgar, quien me ayudó desde un principio, cuando no tenía tema de memoria.

Gracias al Profesor Edgardo González, quien amablemente se ofreció para ser el tercer integrante de la comisión.

Finalmente, dar gracias a quienes me ayudaron a lo largo del desarrollo del presente trabajo, ya sea con dudas de formato o redacción.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo general.....	1
1.2.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Metodología	2
1.4. Resultados esperados	3
2. MARCO CONCEPTUAL	4
2.1. Gestión de riesgos	4
2.1.1. Metodologías de gestión del riesgo	6
2.1.2. Técnicas de Evaluación de Riesgos.....	19
2.2. Construcción de túneles para obras hidráulicas.....	21
2.2.1. Principales tipos de excavaciones subterráneas en obras hidráulicas	21
2.2.2. Métodos constructivos de túneles.....	22
3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	34
3.1. Antecedentes	34
3.2. Levantamiento de riesgos	37
4. ANÁLISIS DE LOS RIESGOS.....	48
4.1. Valoración cualitativa de los riesgos	51
5. PLAN DE RESPUESTA A LOS RIESGOS	54
6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.....	67
7. GLOSARIO	69
8. BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. RESUMEN DE ENTRADAS, HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS, Y SALIDAS DEL PROCESO DE GESTIÓN DE RIESGOS SEGÚN PMBOK®.....	16
TABLA 2-2. RESUMEN DE ENTRADAS, HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS, Y SALIDAS DEL PROCESO DE GESTIÓN DE RIESGOS SEGÚN PMBOK® (CONTINUACIÓN).....	17
TABLA 2-3. MÉTODOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES EN BASE AL TIPO DE EXCAVACIÓN.....	22
TABLA 2-4. TIPOS DE MÁQUINAS TUNELERAS TBM.....	27
TABLA 2-5. TABLA COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS D&B Y TBM.....	33
TABLA 3-1. COMPENDIO DE RIESGOS IDENTIFICADOS A TRAVÉS DE LAS ENTREVISTAS A LOS PROFESIONALES.....	38
TABLA 3-2. COMPENDIO DE RIESGOS IDENTIFICADOS A TRAVÉS DE LAS ENTREVISTAS A LOS PROFESIONALES (CONTINUACIÓN).....	39
TABLA 3-3. COMPENDIO DE RIESGOS IDENTIFICADOS A TRAVÉS DE LAS ENTREVISTAS A LOS PROFESIONALES (CONTINUACIÓN).....	40
TABLA 3-4. COMPENDIO DE RIESGOS IDENTIFICADOS A TRAVÉS DE LAS ENTREVISTAS A LOS PROFESIONALES (CONTINUACIÓN).....	41
TABLA 3-5. MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS.....	42
TABLA 3-7. COMPENDIO DE RIESGOS INTERIORES A LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES, IDENTIFICADOS A TRAVÉS DE LAS ENTREVISTAS.....	46
TABLA 3-8. COMPENDIO DE RIESGOS INTERIORES A LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES, IDENTIFICADOS A TRAVÉS DE LAS ENTREVISTAS (CONTINUACIÓN).....	47
TABLA 4-1. CATEGORIZACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL RIESGO.....	48
TABLA 4-2. CATEGORIZACIÓN DEL IMPACTO DEL RIESGO SOBRE LOS OBJETIVOS.....	49
TABLA 4-3. MATRIZ DE PROBABILIDAD E IMPACTO.....	49

TABLA 4-4. CATEGORIZACIÓN DE IMPORTANCIA DE LOS RIESGOS.	50
TABLA 4-5. MATRIZ DE PROBABILIDAD E IMPACTO POR CADA RIESGO INTERNO IDENTIFICADO Y POR CADA ENTREVISTA.	51
TABLA 4-6. PRODUCTO DE PROBABILIDAD E IMPACTO POR CADA RIESGO INTERNO IDENTIFICADO Y POR CADA ENTREVISTA.	52
TABLA 4-7. ANÁLISIS DE LOS RIESGOS INTERNOS IDENTIFICADOS.	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 2-1. ESQUEMA DE LA INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO A ALGUNOS DE LOS PROCESOS NECESARIOS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS DE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN.....	5
FIGURA 2-2. ESQUEMA DEL PROCESO DE GESTIÓN DE RIESGOS SEGÚN AS/NZS. (2004).....	8
FIGURA 2-3. ESQUEMA DEL PROCESO DE GESTIÓN DEL RIESGO SEGÚN FERMA.....	9
FIGURA 2-4. ESQUEMA DEL MARCO DE TRABAJO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO SEGÚN NCH-ISO 31000:2012.....	11
FIGURA 2-5. ESQUEMA DEL PROCESO DE GESTIÓN DEL RIESGO SEGÚN NCH-ISO 31000:2012.....	12
FIGURA 2-6. ESQUEMA DEL PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS SEGÚN PMBOK®.....	17
FIGURA 2-7. ETAPAS DE GESTIÓN DEL RIESGO A CONSIDERAR EN EL PRESENTE TRABAJO DE TÍTULO.....	18
FIGURA 2-8. ESQUEMA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO EN BASE AL MÉTODO DE PERFORACIÓN Y TRONADURA.....	23
FIGURA 2-9. ESQUEMA DE TIRO O DISPARO.....	24
FIGURA 2-10. EJEMPLO DE EQUIPO DE PERFORACIÓN FRONTAL.....	24
FIGURA 2-11. EQUIPO SCALETEC UV2, ÚTIL PARA LA ETAPA DE ACUÑADURA.....	25
FIGURA 2-12. CARGADOR DE BRAZO RECOLECTOR O PALA SCHAEFF.....	26
FIGURA 2-13. CARGADOR FRONTAL.....	26
FIGURA 2-14. REPRESENTACIÓN DE UNA TOPO, JUNTO A SU MECANISMO DE EMPUJE.....	28
FIGURA 2-15. ESQUEMA DE UNA ESCUDO SIMPLE.....	28
FIGURA 2-16. ESQUEMA DE MÁQUINA DOBLE ESCUDO.....	29

FIGURA 2-17. ESQUEMA DE UNA HIDROESCUDO DE BENTONITA.	30
FIGURA 2-18. MAQUETA DE UNA ESCUDO EPB.	30
FIGURA 2-19. DOVELAS DE HORMIGÓN PREFABRICADO.....	31
FIGURA 2-20. MÁQUINA PERFORADORA PARA APLICAR EL MÉTODO RAISE BORING.	32
FIGURA 3-1. HISTOGRAMA CON CANTIDAD DE RIESGOS INTERIORES Y EXTERIORES.	44
FIGURA 3-2. HISTOGRAMA CON RIESGOS INTERIORES POR CATEGORÍA DE RIESGOS.....	44
FIGURA 4-1. HISTOGRAMA DE CANTIDAD DE RIESGOS INTERNOS POR NIVEL DE IMPORTANCIA.	54
FIGURA 5-1. UBICACIÓN DEL SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN EN TÚNELES.	62

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En la actualidad, en Chile se están desarrollando diversos proyectos de obras hidráulicas, en particular las centrales hidroeléctricas “Alto Maipo” y “Los Cóndores”, que abastecerán a parte del territorio chileno con energía eléctrica. Anteriormente, fueron materializados otros proyectos, tales como “Angostura”, “Colbún”, “San Clemente”, “Rapel”, “Antuco”, “Pehuenche”, entre otros. Estas obras, generalmente se emplazan en sectores de la Cordillera de los Andes, constituida en su mayor parte por zonas rocosas.

Es sabido que todo proyecto de ingeniería presenta riesgos en su desarrollo, especialmente en la etapa de construcción, y los túneles no quedan exentos de éstos, que pueden provocar atrasos y aumento de costos. Un caso actual, es el de la Central Hidroeléctrica Alto Maipo, que por problemas en la construcción de un túnel de 67 kilómetros presenta altos sobrecostos. En Noviembre del 2017, basado en las condiciones del proyecto en tal fecha, se estimó que el costo total del proyecto superaría los 3 mil millones de dólares (Weissman, 2017), siendo que antes del comienzo de la construcción se estimó un costo total de 700 millones de dólares (Servicio de Evaluación Ambiental, 2008), cantidad mucho menor a la que se ha gastado y se espera desembolsar para completar la materialización del proyecto.

Por lo anteriormente mencionado, resulta imprescindible contar con un sistema de evaluación de riesgos para identificarlos previamente y crear planes de respuesta, que permitan reducir los plazos y costos. En consecuencia, en este Trabajo de Título se propone obtener un compendio de riesgos potenciales en este tipo de obras, su análisis cualitativo y planes de respuesta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar los Riesgos en la construcción de túneles para Obras Hidráulicas, creando sus respectivos planes de respuesta.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar diversas metodologías de gestión de riesgos que se encuentran en la literatura, tales como las normas NCh-ISO 31000:2012 y AS/NZS 4360:2004, la metodología CRMS, el estándar de gerencia de riesgos del FERMA y la Guía del PMBOK®, perteneciente al Project Management Institute (PMI).

- Conocer los métodos constructivos típicos utilizados para construir los túneles en obras hidráulicas, asumiendo que se excava en roca.
- Identificar y analizar cualitativamente los riesgos asociados a este tipo de obras subterráneas, con el fin de obtener una jerarquía en base al grado en que afectan a la construcción.
- Hacer un plan de respuesta ante los riesgos más importantes que se identificaron, con el fin de prevenirlos, eliminarlos o reducir su impacto en los proyectos futuros.

1.3 Metodología

Para el desarrollo del tema propuesto se realizaron las siguientes etapas:

- Se estudiaron algunas metodologías de gestión de riesgos, con el fin de escoger una y aplicarla a la construcción de túneles en obras hidráulicas. En particular, se estudió la gestión de riesgos que establece el Project Management Institute; la norma NCh-ISO 31000:2012 y AS/NZS 4360:2004; la metodología CRMS; además del estándar de gerencia de riesgos del FERMA.
- Posteriormente, se estudiaron los métodos constructivos utilizados en este tipo de obras mediante la lectura de bibliografía acorde, con especial atención en la construcción de túneles en roca.
- Se procedió a identificar los riesgos típicos que producen problemas en la materialización de estas obras, mediante cinco entrevistas a ingenieros que tienen una vasta experiencia en el rubro. Estas fueron semiestructuradas, pues solamente se introdujo la temática del Trabajo de Título, dando libertad al entrevistado para que describiera los riesgos que presencié en proyectos anteriores en los que participé. Por cada uno de los riesgos que surgieron, se solicitó al entrevistado entregar un valor estimativo de la probabilidad e impacto del evento, de forma independiente, según una escala con valores del 1 al 5 (véase el comienzo del capítulo 4). Finalmente, se agruparon los riesgos similares en uno solo, con el fin de obtener un compendio de riesgos en que no se repita uno con otro.
- Teniendo la probabilidad e impacto de los riesgos registrados, se realizó un análisis cualitativo, según la escala anteriormente mencionada. Para esto, se calculó el valor del producto entre la probabilidad e impacto en cada riesgo identificado y, para cada uno de ellos, se determinó el valor promedio entre los productos obtenidos. Al calcular los promedios, no siempre se contó con un valor por informante, pues no todos identificaron la totalidad de los riesgos del compendio. En estos casos sólo se consideraron los valores existentes.

- Para finalizar, se escribió un plan de respuesta ante los riesgos de mayor nivel de importancia (alta y media), con el fin de prevenirlos, eliminarlos o reducir su impacto. Esto se hizo pensando en su aplicación en proyectos posteriores, con el fin de obtener mejores resultados.

1.4. Resultados esperados

El resultado esperado de este Trabajo de Título fue obtener planes de respuesta ante los riesgos potenciales, típicos e importantes; que ocurren en la construcción de túneles para obras hidráulicas. Estos planes podrían ser considerados como un aporte en futuros proyectos de esta índole, para reducir o eliminar la mayor parte de los riesgos.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Gestión de riesgos

Toda empresa que construye está sometida a la incertidumbre en el logro de sus metas, ya sea cumplir con el plazo que fue programado, no sobrepasar los costos estimados, lograr los requisitos de calidad y también los alcances previstos. Según Al-Bahar & Crandall (1990), el riesgo se define como la exposición a la posibilidad de ocurrencia de eventos que afectan adversa o favorablemente los objetivos de un proyecto, como una consecuencia de la incertidumbre. Además, puede representarse simbólicamente por medio de una función que considera la incertidumbre o probabilidad de ocurrencia de un evento y el impacto que puede generar sobre el proyecto.

Por otra parte, gestión de riesgos se define como un proceso ordenado y formal para identificar, analizar y responder sistemáticamente a eventos de riesgo a lo largo de la vida de un proyecto, con el fin de obtener el grado óptimo o aceptable de eliminación o control del riesgo (Al-Bahar & Crandall, 1990). En el presente Trabajo de Título, tal definición se extiende a la etapa de construcción del proyecto entero, asumiéndola como un subproyecto.

Se considera que los proyectos de construcción (entiéndase como la etapa de materialización de un proyecto) tienen más riesgos inherentes debido a la participación de los “stakeholders¹” durante el desarrollo de un contrato (mandantes, diseñadores, contratistas, subcontratistas, entre otros) (El-Sayegh, 2008).

Choudhry e Iqbal (2013), a través de un estudio, concluyen que algunas de las principales barreras en la implementación de una gestión de riesgos efectiva son la falta de un sistema formal y la carencia de mecanismos de gestión conjunta por las distintas partes participantes del proyecto.

En Chile, la gestión de riesgos en la construcción es incipiente y realizada de una manera muy limitada e inefectiva. La principal causa de esta situación es la falta de conocimiento para su aplicación y la falta de capitalización de la información durante la ejecución de cada proyecto, que sería útil en futuras experiencias. La ausencia de una función de gestión de riesgos efectiva en un proyecto tiene varias consecuencias negativas para sus participantes, debido a la carencia de acciones preventivas² en contra de los riesgos e incertidumbres a las que cualquier obra está sometida (Serpell, Ferrada, Howard y Rubio, 2014).

¹ Ver Glosario

² Ver Glosario

Los objetivos de la construcción son múltiples, abarcando costos, plazos, calidad, alcances, seguridad, entre otros. Los riesgos pueden impactar en cualquiera de ellos, por lo tanto, se recomienda que su gestión sea integrada a cada uno de los procesos que realiza la empresa constructora, como muestra el siguiente esquema:



Figura 2-1. Esquema de la integración de la gestión del riesgo a algunos de los procesos necesarios para lograr los objetivos de la etapa de construcción.

Fuente: Elaboración Propia.

El esquema anterior sólo muestra algunos procesos principales, pudiendo existir otros, dependiendo del tipo de proyecto y de su complejidad.

2.1.1. Metodologías de gestión del riesgo

A continuación, se describen cinco metodologías para gestionar los riesgos.

1) Construction Risk Management System (CRMS)

Este modelo fue propuesto por Jamal F. Al-Bahar y Keith C. Crandall en un artículo del Journal of Construction Engineering and Management, perteneciente al ASCE (Al-Bahar & Crandall, 1990). Entrega un marco sistemático para identificar, analizar cuantitativamente y responder a los riesgos presentes en la construcción de un proyecto. Está compuesta por cuatro procesos, que se enuncian a continuación, junto a sus subprocesos.

- Identificación de riesgos
 - Lista preliminar de verificación
 - Identificación de eventos de riesgo/escenarios de consecuencia
 - Mapeo de riesgos
 - Clasificación de riesgos
 - Resumen de categorización de riesgos

- Análisis y Evaluación de riesgos
 - Recopilación de datos
 - Modelo de incertidumbre
 - Evaluación del impacto potencial del riesgo

- Gestión de la respuesta
 - Desarrollo de estrategias alternativas de gestión de riesgos
 - Asignación de estrategias alternativas al proyecto de riesgos

- Administración del sistema
 - Política de gestión de riesgos corporativos
 - Registros e informes
 - Evaluación y revisión del proceso de gestión de riesgos

2) Risk management standards AS/NZS 4360:2004

Norma propuesta tras un trabajo conjunto entre la Standards Australia y Standards New Zealand.

Standards Australia es la organización no gubernamental más grande de dicha nación, sin fines de lucro. Su misión y principal responsabilidad es el fomento y adopción de estándares en Australia. También, facilita la participación de su país en el desarrollo de normas internacionales (Standards Australia, s.f.).

Por otra parte, Standards New Zealand es la organización de normalización de Nueva Zelanda, que gestiona el desarrollo de normas, las edita y publica; proporcionándolas a Nueva Zelanda y al conjunto Nueva Zelanda – Australia; además de desarrollar normas internacionales (Standards New Zealand, 2017).

Esta norma entrega una guía genérica para la gestión de riesgos. Puede ser aplicada a un amplio rango de actividades, decisiones u operaciones de una empresa (pública, privada o comunitaria), grupo o individuo (AS/NZS, 2004). Propone un proceso compuesto por las siguientes etapas:

- Comunicar y consultar
- Establecer el contexto
- Identificar riesgos
- Analizar los riesgos
- Valorar los riesgos
- Tratar los riesgos
- Monitorear y revisar

A continuación, se presenta un esquema con las etapas anteriores de forma interrelacionada.

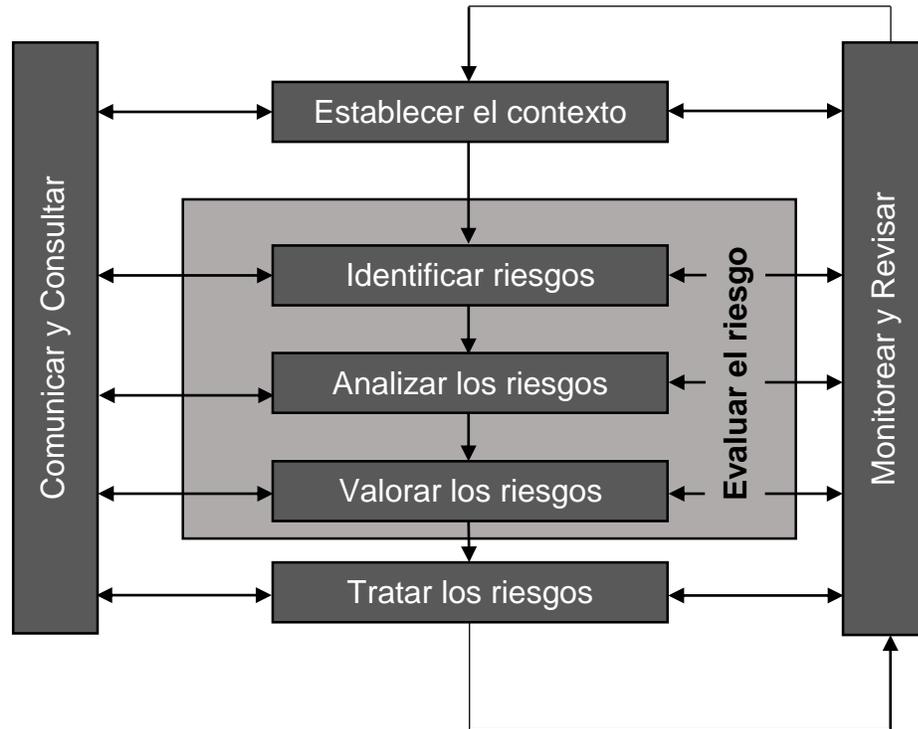


Figura 2-2. Esquema del proceso de gestión de riesgos según AS/NZS. (2004).

Fuente: Adaptado de AS/NZS. (2004).

3) Estándares de gerencia de riesgos según FERMA

Son el resultado del trabajo de las principales organizaciones de gerencia de riesgos del Reino Unido, en particular, el Institute of Risk Management (IRM), la Association of Insurance and Risk Managers (AIRMIC) y ALARM, que corresponde al National Forum for Risk Management in the Public Sector (Federation of European Risk Management Associations [FERMA], 2003). Esta metodología considera que los riesgos que puede enfrentar una empresa provienen de factores internos y/o externos a la organización.

El siguiente esquema establece el proceso de gestión de riesgos que plantea.

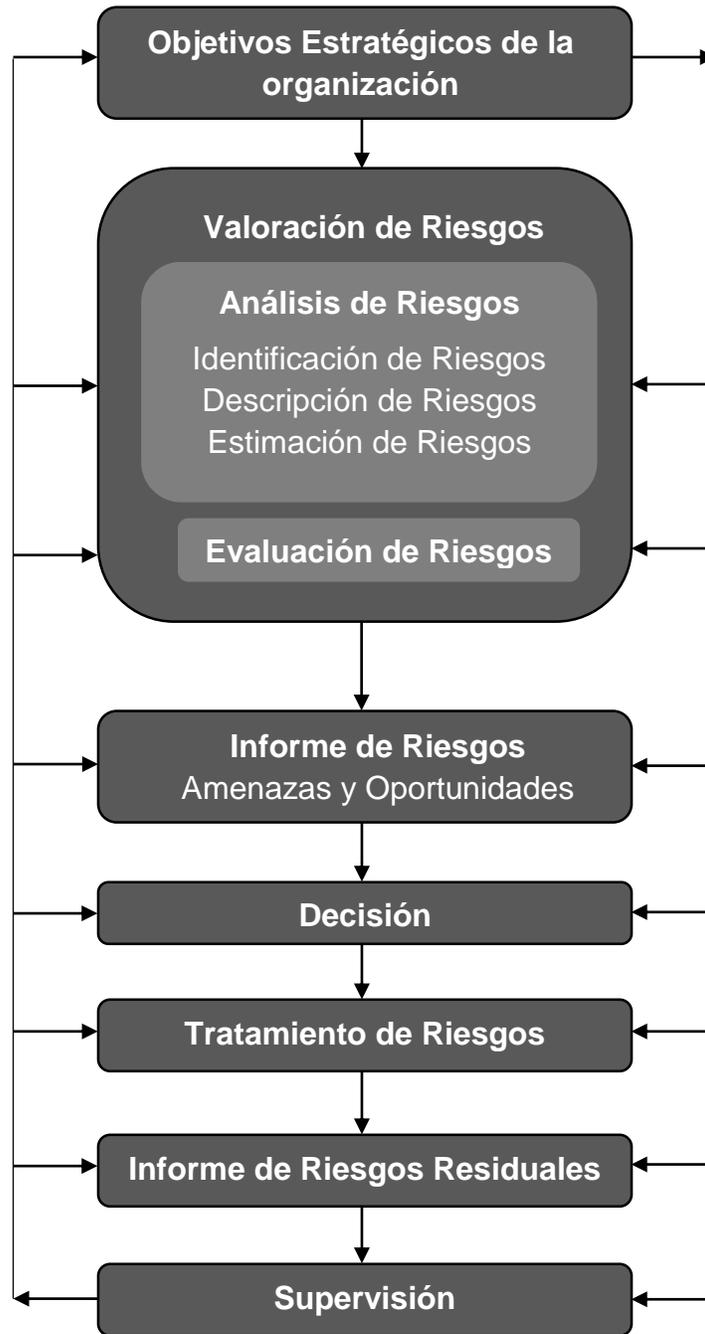


Figura 2-3. Esquema del proceso de gestión del riesgo según FERMA.

Fuente: Adaptado de Ferma (2003).

4) Gestión del riesgo según NCh-ISO 31000:2012.

Norma publicada por el International Organization for Standardization, organización internacional, independiente y no gubernamental; con una membresía de 162 organismos nacionales de normalización (International Organization for Standardization [ISO], s.f.). Esta norma corresponde a la traducción de la ISO 31000:2009, oficializada en Chile el 21 de diciembre del 2012 (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2012). A grandes rasgos, entrega orientaciones de la gestión del riesgo y establece una serie de principios que deben satisfacerse para que sea eficaz.

Recomienda que las organizaciones desarrollen, implementen y mejoren de manera continua un marco de trabajo cuya finalidad sea integrar la gestión del riesgo en todos los procesos aplicados para lograr sus objetivos, así como en las políticas, valores y cultura de la organización. No es específica a una industria o sector concreto y puede ser usada por cualquier empresa (pública, privada o social), asociación, grupo o individuo. Permite ser aplicada a lo largo de toda la vida de una firma y a una amplia gama de actividades.

▪ Principios

La gestión de riesgos:

- Crea y protege el valor
- Es una parte integral de todos los procesos de la organización
- Es parte de la toma de decisiones
- Trata explícitamente la incertidumbre
- Es sistémica, estructurada y oportuna
- Se basa en la mejor información disponible
- Se adapta
- Integra los factores humanos y culturales
- Es transparente y participativa
- Es dinámica, iterativa y responde a los cambios
- Facilita la mejora continua de la organización

▪ Marco de trabajo

Se describen los componentes necesarios del marco de trabajo para la gestión del riesgo y la forma en que se interrelacionan, de una manera iterativa, como muestra el siguiente esquema:

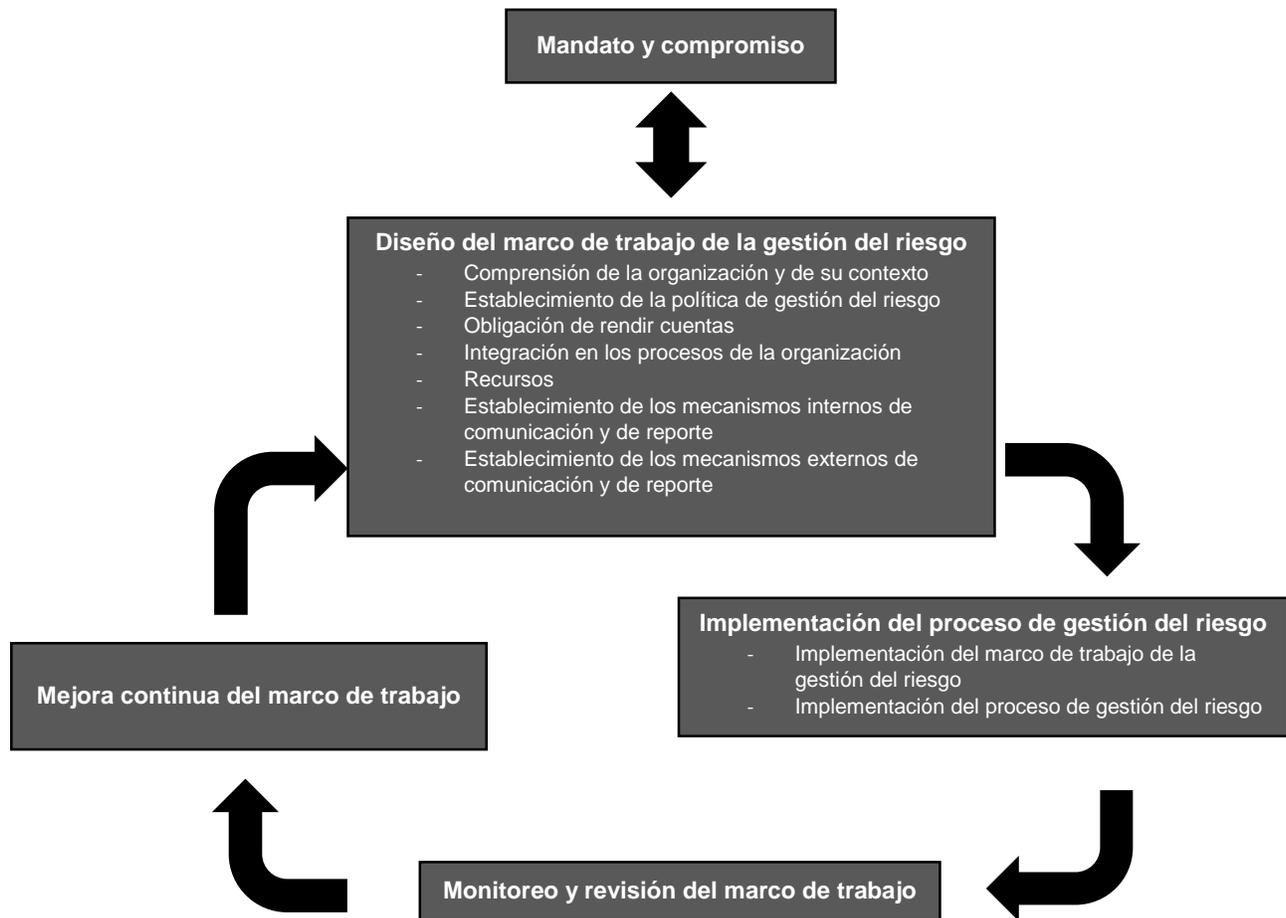


Figura 2-4. Esquema del Marco de Trabajo para la Gestión del Riesgo según NCh-ISO 31000:2012.

Fuente: Adaptado de INN (2012).

▪ Proceso

Se recomienda que el proceso de gestión del riesgo se integre en toda la gestión, cultura y prácticas de la empresa, además de adaptarse a los procesos de negociación de la organización.

A continuación, se presenta un esquema del proceso de gestión del riesgo.

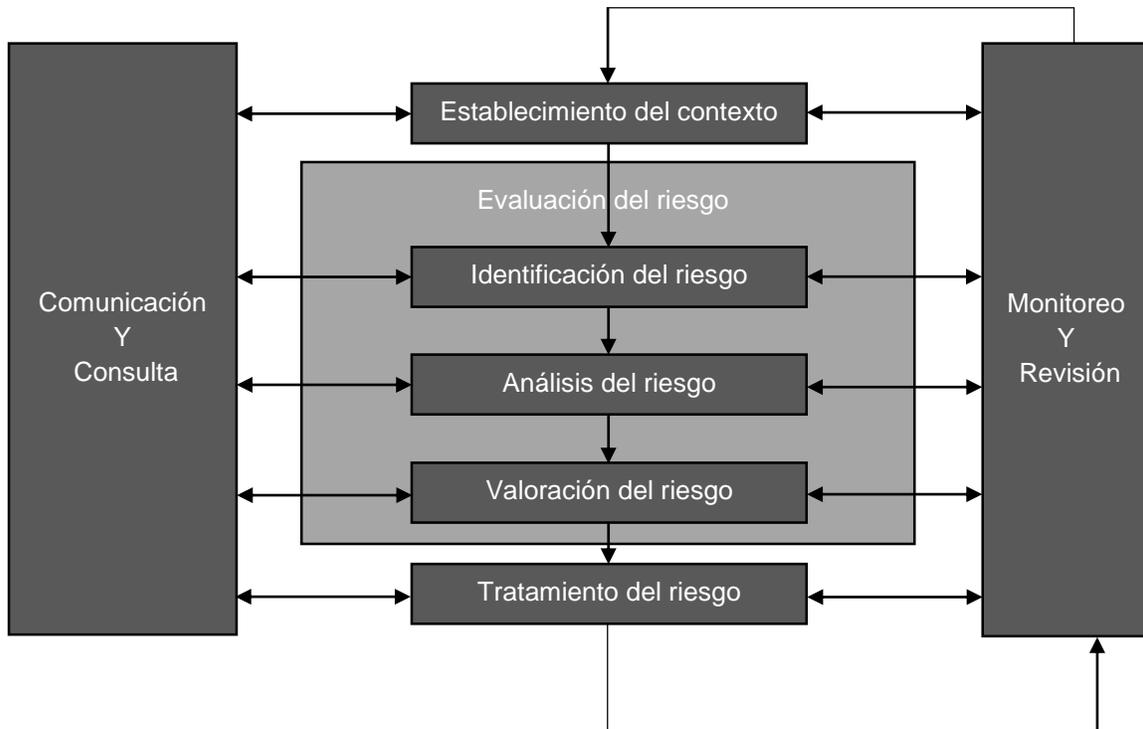


Figura 2-5. Esquema del Proceso de Gestión del Riesgo según NCh-ISO 31000:2012

Fuente: Adaptado de INN (2012).

5) Gestión del riesgo según PMBOK®

El Project Management Institute (PMI) es una organización internacional sin fines de lucro, que promueve el uso de la dirección de proyectos con el fin de lograr buenos resultados en el desarrollo de los negocios. A continuación, se presenta la metodología de gestión de riesgos que establece en su Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®), quinta edición (PMI, 2013); junto a su guía de extensión a la construcción, Construction extension to the PMBOK® guide, tercera edición (PMI, 2007).

En el capítulo 11 del PMBOK® se entregan buenas prácticas para la gestión de riesgos orientada a los proyectos, desde el punto de vista del mandante. El proceso de

aplicación se divide en seis grandes etapas: Plan de la gestión de riesgos, Identificación del riesgo, Análisis cualitativo del riesgo, Análisis cuantitativo del riesgo, Plan de respuesta a los riesgos y Control de los riesgos.

A continuación, se describe cada una de sus etapas:

- **Planificar la Gestión de los Riesgos:** Proceso en que se define cómo se realizarán las actividades de la gestión de riesgos de un proyecto, permitiendo que sea ideal para el tipo de riesgos y proyecto al que se aplicará, según la importancia que le asigne la empresa u organización.

En esta etapa debe comunicarse y obtenerse el acuerdo de todas las partes interesadas, para respaldar e implementar eficazmente el proceso de gestión del riesgo a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Además, se considera que una planificación cuidadosa aumenta la probabilidad de que el resto de las etapas del proceso sean más eficaces y eficientes.

La salida de esta etapa es el plan de gestión de riesgos. Este incluye la metodología; roles y responsabilidades; presupuesto; calendario; categoría de riesgos; definiciones de probabilidad e impacto de los riesgos; matriz de probabilidad e impacto; tolerancias de los interesados; formatos de los informes y seguimiento.

El Project Management Institute, en su guía de extensión a la construcción del PMBOK® (PMI, 2007), recomienda tener como entradas las lecciones aprendidas y utilizar el juicio de expertos en proyectos similares, en las reuniones de planificación. Señala que los riesgos individuales, ya sea de construcción o ingeniería, deben integrarse en la gestión de riesgos total del proyecto. Por otra parte, aconseja que el plan de gestión de riesgos deje registro de los umbrales³, contingencias⁴ y reservas de gestión⁵ para el proyecto de construcción.

Basándose en lo anterior, se recomienda que la constructora que quiera realizar gestión de riesgos en la ejecución de una obra, considere los riesgos individuales de los subcontratistas.

- **Identificar los Riesgos:** Se determinan los riesgos potenciales a afectar el proyecto y se documentan sus características. Es un proceso iterativo, pues los riesgos pueden variar a medida que avanza el proyecto.

³ Ver Glosario

⁴ Ver Glosario

⁵ Ver Glosario

La salida de esta etapa corresponde a una lista con los riesgos identificados y su potencial respuesta en caso de que se pueda establecer. Esta será una de las entradas principales para el registro de riesgos y otorga la oportunidad de anticiparse a los eventos.

En la extensión a la construcción del PMBOK (PMI, 2007) se señala que deben revisarse documentos tales como planos de diseño, plantas de ubicación y acceso, además de especificaciones de equipos de construcción; pues podrían incluir requisitos que añaden riesgos al proyecto.

- **Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos:** Proceso de priorizar los riesgos para acciones posteriores, evaluando su probabilidad de ocurrencia e impacto sobre los objetivos del proyecto, de forma combinada. Su beneficio es permitir a la dirección reducir la incertidumbre, pudiendo concentrarse sólo en los riesgos de alta prioridad. Se lleva a cabo a lo largo del ciclo de vida del proyecto, pudiendo conducir al análisis cuantitativo de riesgos o directamente a la planificación de la respuesta a los riesgos.

Las principales salidas de esta etapa son las actualizaciones al registro de riesgos y registro de supuestos⁶.

En la extensión a la construcción (PMI, 2007), se recomienda ayudarse de consultores independientes y del juicio de expertos, teniendo cuidado en qué expertos considerar, para evitar sesgos debido a sus intereses en caso de que representen a stakeholders.

- **Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos:** Proceso para analizar de forma numérica el efecto que los riesgos identificados traen sobre los objetivos del proyecto. Se aplica a los riesgos priorizados previamente, en el análisis cualitativo, y se puede utilizar para evaluar el efecto acumulativo de todos los riesgos que afectan al proyecto.

A través de este proceso se puede obtener información cuantitativa de los riesgos, apoyando así la toma de decisiones, con el fin de reducir aún más la incertidumbre en el proyecto. Su principal salida corresponde a la actualización del registro de riesgos, incluyendo el análisis probabilístico para el proyecto, la probabilidad de alcanzar los objetivos de costo y tiempo, la lista priorizada de riesgos cuantificados y las tendencias del análisis cuantitativo de riesgos.

⁶ Ver Glosario

- **Planificar la Respuesta a los Riesgos:** Proceso en que se desarrollan alternativas para mejorar oportunidades y reducir amenazas a los objetivos generales del proyecto. A través de esta etapa, se pueden abordar los riesgos, priorizando aquellos de mayor importancia, además de introducir recursos y actividades al presupuesto y cronograma, respectivamente.

Dentro de las principales salidas de esta etapa se encuentran las actualizaciones del plan para la dirección de proyectos⁷, registro de supuestos, documentación técnica y solicitudes de cambio⁸.

En la extensión a la construcción del PMBOK® (PMI, 2007) se recomienda dejar cláusulas escritas ante eventos de fuerza mayor, para dividir la responsabilidad entre el dueño y el contratista. Además, se señala que las técnicas de evitar los riesgos son de utilidad antes o durante el período de licitación del contratista y no después. Por otro lado, se aconseja utilizar los subcontratos como técnica de transferencia de riesgos, planificándolo antes de su licitación, con el fin de lograr mejores resultados.

- **Controlar los Riesgos:** Proceso de aplicar los planes de respuesta, seguir los riesgos identificados, monitorear los residuales, además de identificar los nuevos riesgos que aparecen y evaluar la efectividad de su proceso de gestión. También, permite determinar si los supuestos continúan siendo válidos, si los riesgos han cambiado, si se respeta su política de gestión y si las reservas de contingencia para costo y tiempo deben modificarse.

Esta etapa permite mejorar la eficiencia de la gestión de riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto, optimizando de manera continua la respuesta a éstos. Sus principales salidas son la información de desempeño del trabajo de gestión de riesgos, acciones correctivas⁹ y/o preventivas recomendadas, junto a la actualización del plan para la dirección del proyecto y sus documentos.

En cada una de las etapas se entregan las entradas, herramientas y técnicas, y salidas que se recomienda considerar. A continuación, se presenta una tabla que resume esta información.

⁷ Ver Glosario

⁸ Ver Glosario

⁹ Ver Glosario

Tabla 2-1. Resumen de Entradas, Herramientas y Técnicas, y Salidas del proceso de gestión de riesgos según PMBOK®.

Fuente: Adaptada de PMI (2013).

Entradas	Herramientas y Técnicas	Salidas
1. Plan de gestión de los riesgos		
<ul style="list-style-type: none"> -Plan para la dirección del proyecto -Acta de constitución del proyecto -Registro de interesados -Factores ambientales de la empresa -Activos de los procesos de la organización 	<ul style="list-style-type: none"> -Técnicas analíticas -Juicio de expertos -Reuniones 	<ul style="list-style-type: none"> -Plan de gestión de riesgos
2. Identificación de los riesgos		
<ul style="list-style-type: none"> -Plan de gestión de riesgos -Plan de gestión de costos -Plan de gestión del cronograma -Plan de gestión de la calidad -Plan de gestión de recursos humanos -Línea base del alcance -Estimación de costos de actividades -Estimación de la duración de actividades -Registro de interesados -Documentos del proyecto -Documento de las adquisiciones -Factores ambientales de la empresa -Activos de los procesos de la organización 	<ul style="list-style-type: none"> -Revisiones a la documentación -Técnicas de recopilación de información -Análisis con lista de verificación -Análisis de supuestos -Técnicas de diagramación -Análisis FODA -Juicio de expertos 	<ul style="list-style-type: none"> -Registro de riesgos
3. Análisis cualitativo de riesgos		
<ul style="list-style-type: none"> -Plan de gestión de riesgos -Línea base del alcance -Registro de riesgos -Factores ambientales de la empresa -Activos de los procesos de la organización 	<ul style="list-style-type: none"> -Evaluación de probabilidad e impacto de los riesgos -Matriz de probabilidad e impacto -Evaluación de la calidad de los datos sobre los riesgos -Categorización de riesgos -Evaluación de la urgencia de los riesgos -Juicio de expertos 	<ul style="list-style-type: none"> -Actualizaciones a los documentos del proyecto

Tabla 2-2. Resumen de Entradas, Herramientas y Técnicas, y Salidas del proceso de gestión de riesgos según PMBOK® (continuación).

Fuente: Adaptada de PMI (2013).

Entradas	Herramientas y Técnicas	Salidas
4. Análisis cuantitativo de riesgos		
-Plan de gestión de riesgos -Plan de gestión de costos -Plan de gestión del cronograma -Registro de riesgos -Factores ambientales de la empresa -Activos de los procesos de la organización	-Técnicas de recopilación y representación de datos -Técnicas de análisis cuantitativo de riesgos y de modelado -Juicio de expertos	-Actualizaciones a los documentos del proyecto
5. Plan de respuesta a los riesgos		
-Plan de gestión de los riesgos -Registro de riesgos	-Estrategias para riesgos negativos o amenazas -Estrategia para riesgos positivos u oportunidades -Estrategias de respuesta a contingencias -Juicio de expertos	-Actualización al plan para la dirección del proyecto -Actualizaciones a los documentos del proyecto
6. Control de riesgos		
-Plan para la dirección del proyecto -Registro de riesgos -Datos de desempeño del trabajo -Informes de desempeño del trabajo	-Reevaluación de los riesgos -Auditorías de los riesgos -Análisis de variación y tendencias -Medición del desempeño técnico -Análisis de reservas -Reuniones	-Información de desempeño del trabajo -Solicitudes de cambio -Actualizaciones al plan para la dirección del proyecto -Actualizaciones a los documentos del proyecto -Actualizaciones a los activos de los procesos de la organización

Finalmente, en el siguiente esquema, se presenta el orden en que se desarrolla cada una de las etapas.

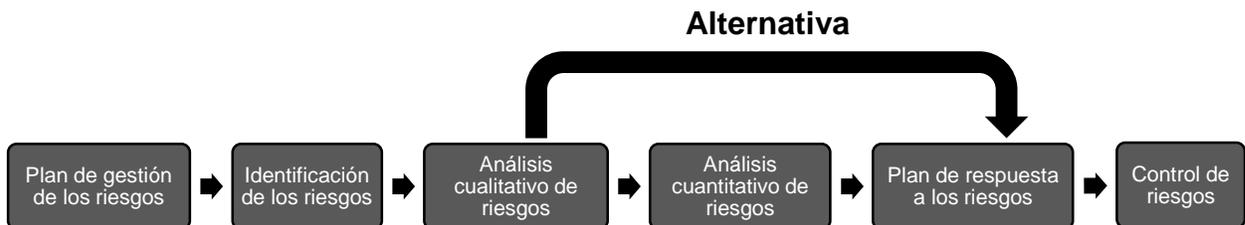


Figura 2-6. Esquema del proceso de implementación de la gestión de riesgos según PMBOK®.

Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones especiales

Para efectos del presente Trabajo de Título se considera la metodología establecida por el Project Management Institute, a través de su Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos, quinta edición (PMI, 2013); junto a su extensión a la construcción (PMI, 2007), con algunas modificaciones. Se prefiere utilizar ésta, pues las otras metodologías revisadas están mayormente orientadas a la implementación de la gestión de riesgos en las empresas y no en un proyecto propiamente tal. Una que también se acomoda a los proyectos es la CRMS, pero no se utiliza porque plantea sólo un análisis cuantitativo, requiriendo datos estadísticos que no se disponen.

Debido a que la etapa de Planificación de la Gestión de Riesgos debe realizarla la empresa u organización que desea gestionar los riesgos de un proyecto en particular, no se considera dentro de los alcances del presente Trabajo de Título, pues aquí se recopila información estándar obtenida a través de la experiencia y participación en distintas obras hidráulicas, por parte de los entrevistados. Dado que también se aleja de los alcances aplicar la gestión de riesgos a un proyecto en especial y a que esto debe realizarse cuando la obra está en ejecución, no se desarrolla la etapa de Control del Riesgo.

A pesar de que el análisis cuantitativo es más certero y objetivo que el cualitativo (Buchtik, 2012), en el presente Trabajo de Título sólo se desarrolla este último, enfocado a la construcción de túneles en obras hidráulicas; pues como se mencionó anteriormente, no se dispone de datos estadísticos para realizar uno cuantitativo.

En el siguiente esquema se presenta un resumen de las etapas a considerar.

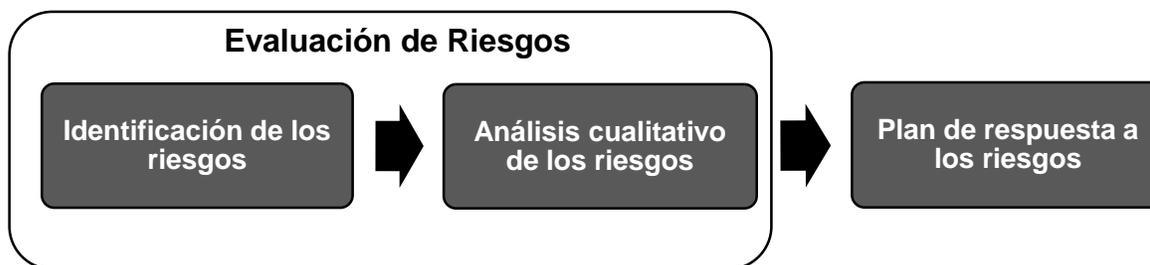


Figura 2-7. Etapas de Gestión del Riesgo a considerar en el presente Trabajo de Título.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se deja en claro que algunas de las entradas, herramientas y técnicas, y salidas de las tres etapas del proceso de gestión de riesgos a considerar en el presente trabajo, no se desarrollan, pues existen sólo en la ejecución de un proyecto real. Además, se debe recalcar que este Trabajo de Título no sólo se enfoca en los riesgos que afectan a la constructora, sino también, en aquellos que perjudican al mandante.

2.1.2. Técnicas de Evaluación de Riesgos

Se denomina Evaluación de Riesgos, el subproceso de la Gestión de Riesgos, que considera la identificación de éstos y su análisis (valoración) cualitativa y/o cuantitativa, tanto del impacto que causa, como de su probabilidad de ocurrencia.

A continuación, se presentan algunas técnicas utilizadas para identificar los riesgos, como también para analizarlos.

1) Técnicas de Identificación de Riesgos

La Norma NCh-ISO 31010:2013 corresponde a la traducción oficial en Chile, de la Norma ISO 31010:2009 (INN, 2013), que se enfoca en las técnicas de evaluación del riesgo, es decir, en su identificación, análisis y valoración. Detalla una lista extensa de técnicas con sus respectivas definiciones, usos, elementos de entrada, procesos de aplicación, resultados, fortalezas y limitaciones.

Basado en el criterio del autor de este trabajo, a continuación, se presenta una lista con las técnicas establecidas en la norma anterior, que más se acomodan al Trabajo de Título, considerando que se quieren identificar los riesgos potenciales en la construcción de túneles para obras hidráulicas.

- Tormenta de Ideas
- Entrevistas estructuradas o semiestructuradas
- Delphi
- Listas de verificación
- Estructura “¿y si ...?” (SWIFT)
- Análisis de escenario
- Análisis del árbol de fallas
- Análisis del árbol de eventos
- Análisis de causa-consecuencia
- Análisis de causa y efecto

A su vez, del PMBOK®, se pueden rescatar las siguientes técnicas recomendadas, considerando el enfoque del presente Trabajo de Título.

- Técnicas de recopilación de información:
 - Tormenta de ideas
 - Técnica Delphi
 - Entrevistas
 - Análisis de causa raíz

- Análisis con Lista de Verificación
- Técnicas de Diagramación
 - Diagramas de causa y efecto
 - Diagramas de flujos de procesos o de sistemas
 - Diagramas de Influencias
- Análisis FODA
- Juicio de Expertos

Para evitar una extensión innecesaria del trabajo, sólo se enuncian las técnicas, sin definir las.

2) Técnicas de Análisis de Riesgos

El PMI, a través del PMBOK® (PMI, 2013), recomienda técnicas para el análisis de riesgos, ya sea cualitativa o cuantitativamente. Como dentro de los alcances de este Trabajo de Título sólo se encuentra el análisis cualitativo de los riesgos, a continuación, se enuncian las técnicas recomendadas para tales fines.

- Evaluación de Probabilidad e Impacto de los riesgos
- Matriz de Probabilidad e Impacto
- Evaluación de la Calidad de los datos sobre riesgos
- Categorización de riesgos
- Evaluación de la urgencia de los riesgos
- Juicio de Expertos

Dentro de las técnicas de análisis que plantea la ISO, a través de la norma NCh-ISO 31010:2013 (INN, 2013), algunas de las que podrían ser útiles para el Trabajo de Título se presentan a continuación:

- Estructura “¿y si ...? “ (SWIFT)
- Análisis de escenario
- Análisis de la causa raíz
- Análisis del árbol de fallas
- Análisis de causa – consecuencia
- Matriz de consecuencia/probabilidad

2.2. Construcción de túneles para obras hidráulicas

Los primeros túneles fueron construidos por civilizaciones antiguas como los Babilónicos, Egipcios, Mesopotámicos y Romanos. Un caso particular son los qanats¹⁰, que se construyeron entre los ríos Tigris y Éufrates durante el siglo X a.C, con el fin de transportar agua desde acuíferos a sectores desiertos (International Tunnelling and Underground Association [ITA], s.f.). Luego, comenzó la época en que se materializaron túneles para canales y posteriormente, se inició la construcción de túneles ferroviarios, continuando hasta el presente.

Hoy en día, existen diversos túneles, con distintas funciones y características (Soto, 2004), tales como:

- Túneles para ferrocarril
- Túneles de carretera
- Túneles de transporte urbano
- Túneles para conducción de agua
- Túneles de centrales hidroeléctricas
- Túneles para sistemas de alcantarillado
- Túneles de servicios
- Túneles de almacenamiento

Sin embargo, es útil indicar explícitamente que este Trabajo de Título sólo se enfoca en aquellos túneles que son para obras hidráulicas.

2.2.1. Principales tipos de excavaciones subterráneas en obras hidráulicas

En la actualidad, es habitual la ejecución de obras subterráneas dentro de las centrales hidroeléctricas. Basado en AES Gener (s.f.), las principales son:

- **Túnel de aducción:** Cuando no es factible la construcción de un canal para transportar el agua desde la bocatoma¹¹ o si se quiere acortar la longitud de una obra de aducción¹², se opta por utilizar túneles para desviar el agua, llamados túneles de aducción.
- **Caverna de máquinas:** Corresponde a un espacio excavado y construido a gran profundidad, que alberga las instalaciones de control, junto a la maquinaria de generación eléctrica y apoyo para su mantención.

¹⁰ Ver Glosario

¹¹ Ver Glosario

¹² Ver Glosario

- **Chimeneas de equilibrio:** Piques verticales que amortiguan el efecto de las variaciones de presión, originadas por fluctuaciones de demanda de agua en las turbinas.
- **Piques de presión:** Excavación vertical o inclinada que transporta el agua a presión creciente, desde el túnel de aducción hasta la caverna de máquinas, para alimentar los inyectoros que accionan las turbinas.
- **Túnel de descarga:** Conduce el agua que pasa por las turbinas hacia la obra de descarga.

2.2.2. Métodos constructivos de túneles

A medida que comenzó a desarrollarse la tecnología para ejecutar las excavaciones, los métodos constructivos de túneles comenzaron a sofisticarse, hasta el día de hoy, en que se cuenta con tuneleras.

En la actualidad, los métodos empleados para construir diversos tipos de túneles son variados. A continuación, se presentan los más utilizados, basándose en el tipo de terreno y forma de excavar.

Tabla 2-3. Métodos constructivos de túneles en base al tipo de excavación.

Fuente: Elaboración Propia.

Tipo de excavación	Tipo de terreno	Método
Mecanizada	Roca y Suelo	TBM
	Roca	Raise Boring
Convencional	Roca Dura	Perforación y Tronadura (Drill and Blast)
	Roca Blanda	- Rozadoras - Martillos hidráulicos
	Suelo	- Retroexcavadoras - NATM (New Austrian Tunneling Method)

Generalmente, las obras hidráulicas son emplazadas en zonas rocosas. Por esta razón, en este trabajo sólo se describen los métodos constructivos empleados en roca, en particular el de Perforación y Tronadura, Raise Boring y el que utiliza TBM; por ser los que se han aplicado en Chile.

A) Excavación convencional

La excavación convencional se define como la construcción de cavidades subterráneas de forma arbitraria, pero utilizando un proceso cíclico que se compone de Excavación, Desescombro y Colocación de revestimientos (ITA, s.f.).

Según lo indicado en la Tabla 2-3, para excavación convencional en roca se pueden utilizar martillos hidráulicos, rozadoras y/o método de Perforación y Tronadura. Considerando la experiencia chilena, en esta sección, sólo se describe el de Perforación y Tronadura.

Perforación y Tronadura (Drill & Blast)

Corresponde a un método cíclico de construcción, compuesto por una serie de etapas. La cantidad de ciclos empleados en la excavación de un determinado túnel depende de su longitud. En el siguiente esquema, se dan a conocer sus principales etapas.

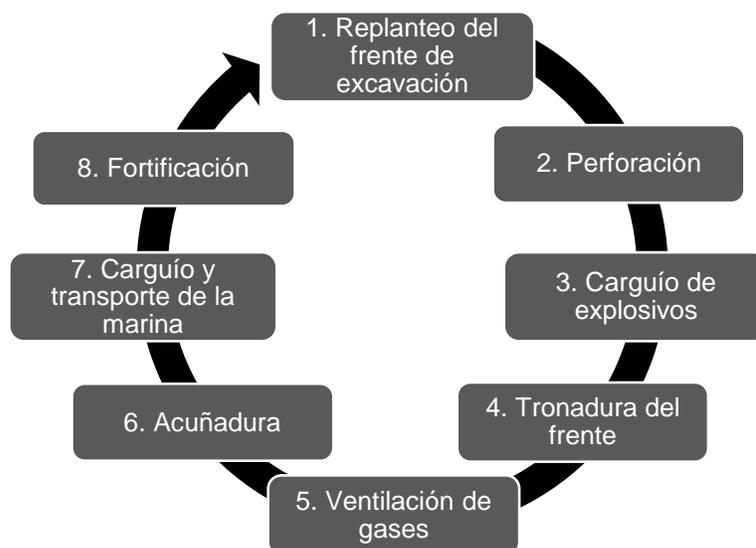


Figura 2-8. Esquema del proceso constructivo en base al método de Perforación y Tronadura.

Fuente: Adaptado de Pozo (2017a) y Nielsen (2016).

- 1) **Replanteo del frente de excavación:** En esta etapa se debe replantear la ubicación de los puntos que se perforarán, para posteriormente instalar los explosivos. La distribución de puntos se denomina *esquema de disparo*, como se aprecia en la siguiente figura.

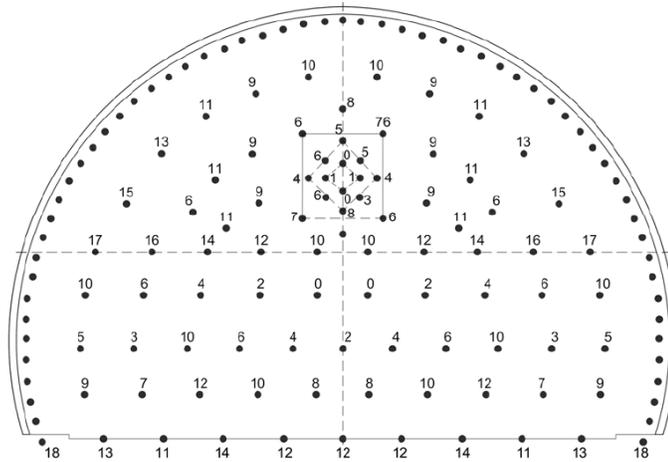


Figura 2-9. Esquema de tiro o disparo.

Fuente: Dirección General de Servicios Técnicos (2016a).

- 2) **Perforación:** Corresponde a la etapa en que se procede a perforar los puntos anteriormente replanteados, mediante el uso de maquinaria especializada. Generalmente, se utiliza un Jumbo¹³ para su ejecución. La siguiente imagen muestra un Jumbo.



Figura 2-10. Ejemplo de Equipo de perforación frontal.

Fuente: Atlas Copco (s.f.)

¹³ Equipo de perforación frontal

- 3) **Carguío de explosivos:** En esta etapa se cargan y transportan los explosivos hasta el frente del túnel que se excava. El tipo de maquinaria a utilizar es relativo.
- 4) **Tronadura del frente:** En esta etapa se procede a detonar los explosivos anteriormente transportados hacia el frente, con el objetivo de desprender el material que está por delante.
- 5) **Ventilación de gases:** A través de esta etapa se disipan los gases y humos producidos en la explosión del material, para proseguir con el ciclo de excavación. Generalmente, se utilizan mangueras que conducen el gas desde el frente del túnel hacia el exterior.
- 6) **Acuñadura:** Una vez tronado el frente, es habitual que queden cuñas no desprendidas tras la explosión. En esta etapa se remueven, para trabajar de manera segura y continuar avanzando. Puede realizarse de forma manual, semi mecanizada o mecanizada.

La siguiente imagen muestra un equipo utilizado en la etapa de acuñadura.



Figura 2-11. Equipo Scaletec UV2, útil para la etapa de acuñadura.
Fuente: Grängesberg Iron and Atlas Copco (s.f.)

7) **Carguío y transporte de la marina:** Luego de la acuñadura, continúa el retiro del material desprendido. Para esto, se utilizan equipos tales como cargadores de brazo(s) recolector(es), cargadores frontales, cargador LHD y camión bajo perfil¹⁴, para cargar; mientras que para trasladar se utilizan camiones articulados de bajo perfil, correas transportadoras y vagones o tuberías, entre otras opciones (Pozo, 2017a). Las siguientes dos figuras muestran equipos útiles para cargar y transportar los escombros.



Figura 2-12. Cargador de brazo recolector o Pala Schaeff.
Fuente: Atlas Copco (s.f.).



Figura 2-13. Cargador frontal.
Fuente: Atlas Copco (s.f.).

8) **Fortificación:** Corresponde a la última etapa del ciclo, en que se instalan los soportes y revestimientos en la sección excavada, con el fin de sostener y reforzar el macizo rocoso. Existen diversos tipos de fortificación, pero en general, en túneles de obras hidráulicas en Chile, se utilizan marcos reticulados de acero embebidos en hormigón; hormigón proyectado con o sin pernos; hormigón insitu con o sin armadura; así como otras combinaciones de éstos.

¹⁴ Dumper

B) Excavación mecanizada

“La excavación mecanizada engloba todas las técnicas de construcción de túneles en que la excavación se realiza mecánicamente mediante dientes, picas o discos” (ITA, s.f.). En este trabajo, se define el método de excavación mecanizada Raise Boring y el que utiliza máquinas tuneladoras (TBM) no presurizadas y presurizadas.

Tuneladoras TBM

Las tuneladoras son máquinas de excavación a sección completa, es decir, perforan toda la sección a la vez; y se fabrican según sea el tamaño y forma que se le quiere dar al túnel. Algunas son capaces de colocar un sostenimiento o revestimiento a medida que cavan. Existen diversos tipos y cada uno de ellos es especial para un tipo de terreno en particular, ya que presentan distintos métodos de funcionamiento. A grandes rasgos, se encuentran divididas en dos grupos: *Presurizadas* y *No Presurizadas*.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los tipos de máquinas y el terreno para el cual son aptas.

Tabla 2-4. Tipos de máquinas tuneladoras TBM.

Fuente: Adaptada de Pozo (2017b).

Tipo	Nombre	Terreno
No Presurizadas	Topo	Roca muy dura
	Escudo simple	Roca dura a suelo estable
	Doble escudo	Roca dura a suelo estable
Presurizadas	Hidroescudos	Suelos no cohesivos con carga de agua
	Escudos EPB	Terrenos cohesivos con carga de agua
	Escudos de doble tecnología Hidro/EPB	Suelos variables

1) Tuneladoras No Presurizadas

- **Topos:** Poseen discos que penetran la roca hasta sobrepasar su resistencia, generando fisuras que al unirse, fragmentan el material rocoso. No presenta escudo en su cabeza y su mecanismo de avance utiliza grippers o codales que se apoyan en las paredes del túnel ya excavado, para impulsarse (Pozo, 2017b). La siguiente imagen muestra un ejemplo de una topo.

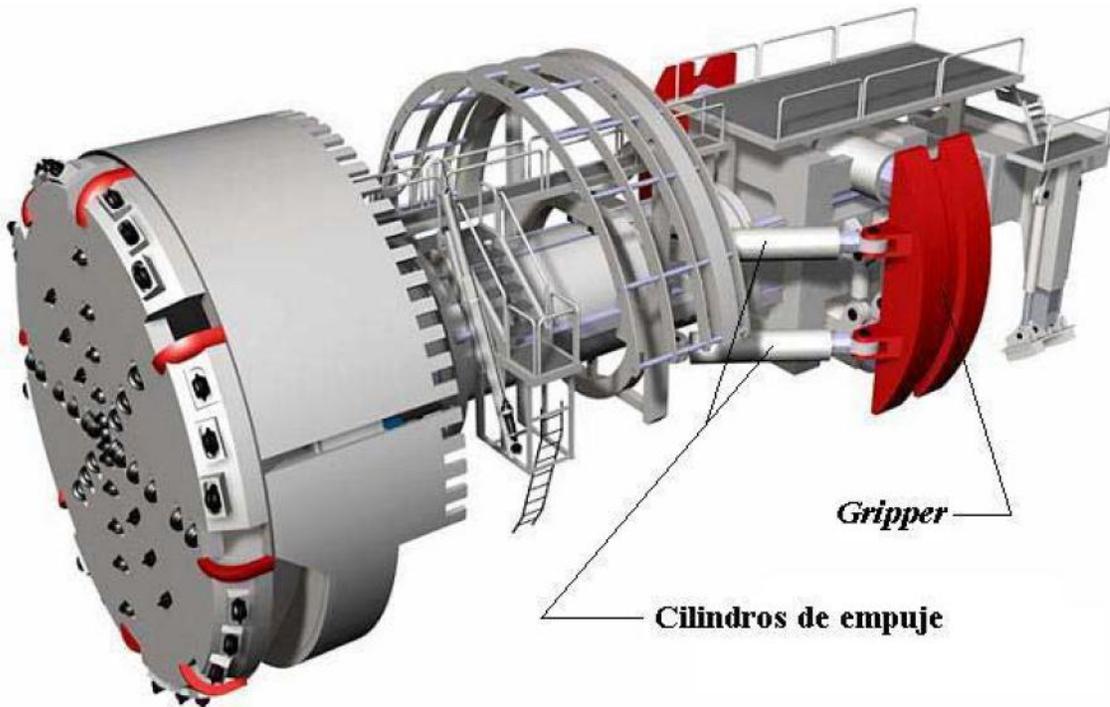


Figura 2-14. Representación de una Topo, junto a su mecanismo de empuje.
Fuente: E.T.S.E.C.C.P.B. (s.f.)

- **TBM con escudo simple:** En general, son utilizadas para excavar rocas frágiles y blandas. Poseen un cabezal de corte y un escudo simple con gatos hidráulicos. Una vez que avanzan, colocan anillos de sostenimiento-revestimiento, añadiendo tiempo extra al ciclo de avance. Cuentan con gatos perimetrales que se apoyan en el revestimiento colocado, para impulsarse y avanzar. En la Figura 2-15 se muestra un esquema de la tunelera con escudo simple.

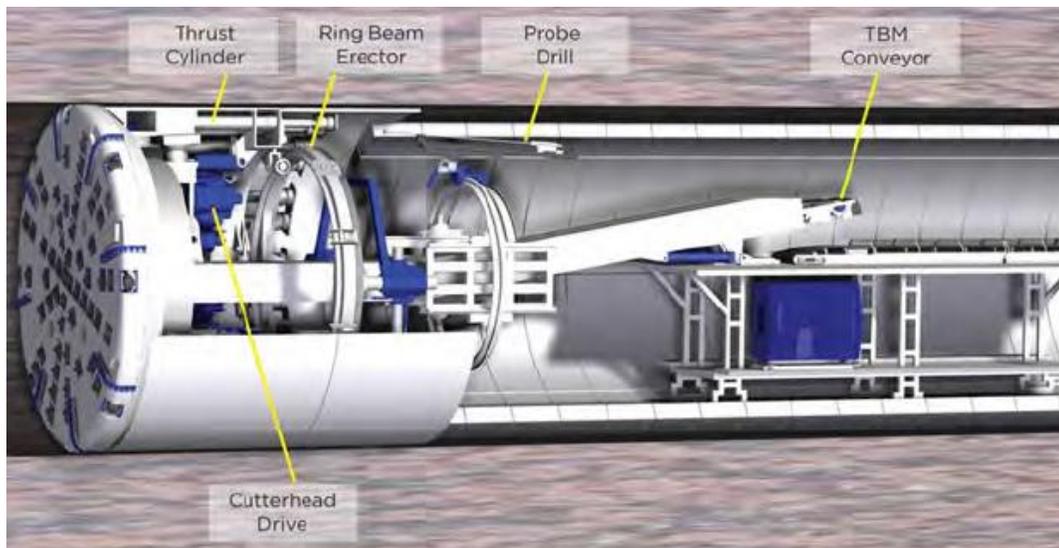


Figura 2-15. Esquema de una Escudo Simple.
Fuente: Dirección General de Servicios Técnicos (2016a).

- **TBM con doble escudo:** Son utilizadas en roca de buena calidad que tiene sectores con suelo o roca de mala calidad. Utiliza un sistema dual para empujarse: *mordazas* y *gatos perimetrales*. A medida que avanza, coloca los anillos de sostenimiento-revestimiento, no añadiendo tiempo extra al ciclo de avance. En general, presenta características combinadas de una Topo y una Escudo simple. En la Figura 2-16 se presenta un esquema de ésta.

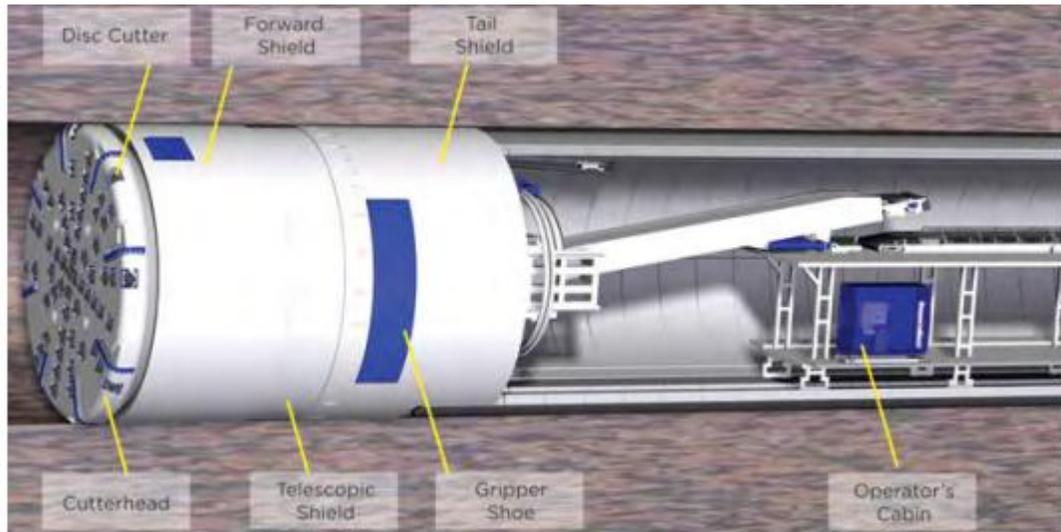


Figura 2-16. Esquema de máquina Doble Escudo.
Fuente: Dirección General de Servicios Técnicos (2016a).

2) Tuneladoras Presurizadas

- **Hidroescudos:** Máquinas que bombean lodo arcilloso en el frente, contrarrestando la presión de agua del terreno, generando además, un fluido denso que es más fácil bombear. Colocan anillos de sostenimiento-revestimiento, añadiendo tiempo extra al de excavación. Poseen gatos perimetrales que se apoyan al revestimiento para impulsarse. En la Figura 2-17 se presenta un esquema de ésta.

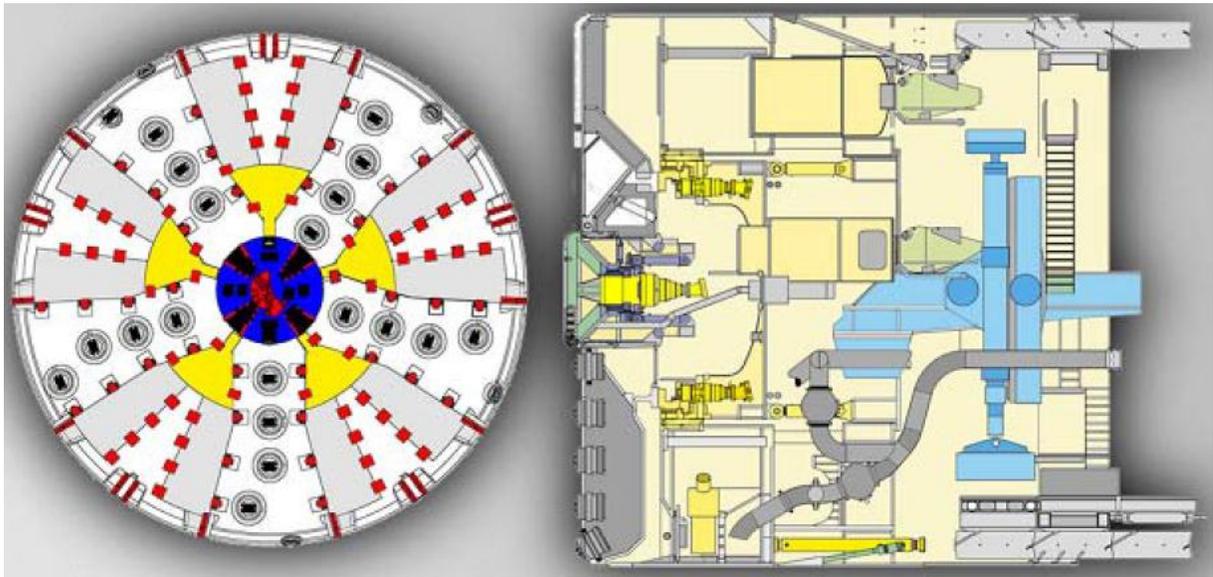


Figura 2-17. Esquema de una Hidroescudo de bentonita.

Fuente: E.T.S.E.C.C.P.B. (s.f.)

- Escudos EPB:** Lleva este nombre por sus siglas en inglés (Earth pressure balanced). Se encarga de comprimir la masa de suelo del frente, generando mayor estabilidad, además de extraerla sin perder presión en la cámara, con el fin de no desestabilizar el terreno. Colocan los anillos de sostenimiento-revestimiento sumando tiempo extra al de avance. Es a través de estos revestimientos, que la máquina logra impulsarse mediante gatos perimetrales. Los escombros, en una primera instancia, se retiran por medio de un *tornillo sin fin* y luego, mediante cintas transportadoras o vagones, al alcanzar la presión atmosférica (E.T.S.E.C.C.P.B., s.f.). La Figura 2-18 muestra un esquema de ésta máquina.



Figura 2-18. Maqueta de una Escudo EPB.

Fuente: E.T.S.E.C.C.P.B. (s.f.)

- **Escudos de doble tecnología Hidro/EPB:** Corresponden a una combinación de las tuneleras EPB e Hidroescudos. Son útiles para terrenos en que es probable encontrar suelos variables, pues trabajan con ambas metodologías, según sea conveniente. Además, colocan anillos de sostenimiento-revestimiento utilizando tiempo extra al de excavación. También, utilizan gatos perimetrales que se apoyan en el revestimiento colocado, como su mecanismo de avance.

La mayoría de las tuneleras que colocan la fortificación en el interior del túnel, utilizan dovelas de hormigón prefabricado para tales fines, que cumplen la función de soporte y revestimiento a la vez. En la Figura 2-19 se aprecia un grupo de dovelas de este tipo.



Figura 2-19. Dovelas de hormigón prefabricado.
Fuente: Adaptada de Eurohinca (s.f).

Método Raise Boring

Se utiliza para unir dos niveles de excavación, ya sea desde uno subterráneo a uno superficial o entre dos subterráneos. En centrales hidroeléctricas, generalmente, se emplea con el objetivo de excavar los piques verticales. Esta técnica usa un equipo que realiza una perforación piloto descendente hasta el punto más bajo del pique y luego, se retira la broca y se fija una cabeza escariadora¹⁵ que amplía la perforación hacia arriba (Yepes, 2014). La Figura 2-20 muestra una máquina perforadora comúnmente utilizada en ejecución del Raise Boring.



Figura 2-20. Máquina perforadora para aplicar el método Raise Boring.

Fuente: Atlas Copco (s.f.).

¹⁵ Ver Glosario

Comparación entre métodos D&B y TBM

En la siguiente tabla se resumen algunas propiedades y características de los métodos Drill & Blast y TBM.

Tabla 2-5. Tabla comparativa de los métodos D&B y TBM.

Fuente: Adaptada de Macias y Bruland (2014).

Objeto a comparar	Método D&B	Método TBM
Geometría	Cualquiera	Circular
Tiempo de Iniciación	Corto	Largo
Excavaciones laterales (extras)	Menos problemática	Más problemática
Seguridad	Baja	Alta
Instalación de Soportes	Área no protegida	Área protegida
Influencia del macizo rocoso en la velocidad de avance	Baja	Alta
Avance en zonas de fractura	Fácil	Muy difícil
Variabilidad de la sección	Alta	Muy limitada
Riesgos geológicos	Bajo	Alto
Condiciones del macizo rocoso en que excava	Cualquiera	Rango óptimo
Estabilidad del terreno	Baja	Alta
Ingreso de agua	Alta	Baja
Influencia de presión del agua	Baja	Alta
Condiciones de tensiones de la roca	Riesgo de atrasos bajo	Riesgo de atrasos alto
Requerimiento de soportes	Incrementados y menos predecibles	Reducidos y más predecibles
Variación de la excavación	Gran variabilidad	No presenta variabilidad
Soportes Auxiliares	Más fácil y rápido	Más difícil y lento
Operación	Cíclica	Continua
Excavación/Soporte	Interferencia	No presenta interferencia
Mano de Obra	Requiere más experiencia	Requiere menos experiencia
Inversión inicial	Baja	Alta
Sobre excavación	Alta (15-25 cm)	Mucho más baja (< 10 cm)
Acceso temporal	Necesario	Omitido o reducido
Razón de avance	Más Lento	Más Rápido

3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

3.1. Antecedentes

Para la identificación de riesgos se considera la siguiente estructura, establecida por el Project Management Institute, en su guía del PMBOK® (PMI, 2013):

“A causa de una fuente de riesgo X, podría ocurrir un riesgo Y, que genera un impacto Z en uno o más de los objetivos del proyecto”.

Un evento incierto, pero que ocurre con certeza, no debe considerarse como un riesgo. Como ejemplo se puede mencionar la lluvia, que si bien, no se sabe con exactitud cuándo caerá, tarde o temprano podría impactar la obra. Sin embargo, en lugares desérticos en que estudios estadísticos muestran que no llueve en muchos años, no sería necesario considerar su efecto.

Para el desarrollo de este Trabajo de Título sólo se consideran los riesgos negativos o amenazas, que pueden perjudicar a la construcción de túneles para obras hidráulicas, dejando de lado las oportunidades o riesgos positivos.

En cuanto a las técnicas de Identificación de Riesgos que fueron expuestas en la sección 2.1.2., la que se escoge para el desarrollo del presente trabajo corresponde a la *Entrevista* a expertos, que está ligada a la recomendación de aplicar el Juicio de Expertos, establecida en el PMBOK® (PMI, 2013). Se decide esto, pues se considera que para tener información valiosa y fidedigna es imprescindible obtenerla de entendidos en el tema. Por otra parte, con éstas no se necesita coordinar reuniones en conjunto, basta con que se encuentre el Experto con el Entrevistador. Se opta por hacerlas semiestructuradas, de modo que los entrevistados tengan libertad en las respuestas, identificando la mayor cantidad de riesgos posibles.

▪ Clasificación de Riesgos

Los riesgos identificados mediante las entrevistas a profesionales con experiencia en la construcción de obras hidráulicas se categorizan según dos criterios:

- a) El primero depende de la fuente de riesgo que lo origina y puede ser interior o exterior al túnel. Si la fuente de riesgo proviene directamente de la materialización del túnel o está relacionada con ésta, el riesgo es *interior*; por otra parte, si afecta a la construcción del túnel, pero no procede de su ejecución, es *exterior*.

b) El segundo criterio de clasificación consiste en agrupar los riesgos según su fuente, en una de las siguientes categorías:

- **Personal:** Considera los riesgos cuya causa está relacionada con los trabajadores profesionales o de apoyo, que no están directamente relacionados con la materialización de la obra, es decir, personas que no constituyan la mano de obra.
- **Contratos:** Incluye todos los riesgos que se originan por temas contractuales entre mandante y contratista.
- **Subcontratos:** Incluye los riesgos que son causados por temas contractuales entre contratista y sus subcontratos, ya sean técnicos o de provisiones.
- **Materiales:** Considera todos los riesgos que pueden ser causados por eventos vinculados con los materiales utilizados en la construcción del túnel.
- **Equipos y Maquinarias:** Se incluyen todos aquellos riesgos producidos por sucesos relacionados con los equipos y/o maquinarias utilizados(as) en la construcción del túnel.
- **Mano de obra:** Aquí se incluyen los riesgos originados por algún acontecimiento vinculado a la mano de obra.
- **Climático:** Considera los riesgos que tienen una causa sujeta al cambio climático o cambios bruscos del estado atmosférico.
- **Geológico:** Incluye los riesgos que poseen una causa originada por la geología del terreno en donde se emplaza el túnel.
- **Hidrogeológico:** Considera todo aquél riesgo causado por temas hidrogeológicos del terreno donde se emplaza el túnel.
- **Hidrológico:** Reúne los riesgos originados por motivos hidrológicos en la zona de localización del túnel.

- **Terreno:** Incluye los riesgos que provienen de sucesos relacionados con el terreno en donde se ubica el túnel, que no sean geológicos, hidrológicos o hidrogeológicos.

- **Administración:** Aquí se consideran los riesgos que surgen por efectos de la administración de la construcción del túnel, por parte de la empresa adjudicada para tales fines.

- **Relaciones:** Reúne los riesgos causados por temas de relaciones entre contratista-comunidades aledañas o contratista-trabajadores.

- **Fuerza mayor:** Categoriza los riesgos originados por efectos de la naturaleza y que no pueden evitarse.

- **Diseño e Ingeniería:** Considera los riesgos producidos por efectos del diseño e ingeniería, ya sean relacionados a sus entregables o a la ingeniería de terreno.

- **Seguridad:** Incluye los riesgos originados por errores en la normal ejecución de la construcción del túnel.

- **Legales:** Considera aquellos riesgos causados por motivos legales que puedan afectar directa o indirectamente el normal desarrollo de la construcción del túnel.

3.2. Levantamiento de riesgos

Las entrevistas realizadas no fueron completamente estructuradas, sino que se dio libertad a cada entrevistado para expresar sus conocimientos relativos a los riesgos en la construcción de túneles en obras hidráulicas, por lo que ninguno definió algún riesgo exactamente igual que otro experto. Por lo tanto, en el presente Trabajo de Título se opta por identificar los riesgos que son similares en las distintas entrevistas, describiéndolos de una forma general, con el fin de que reflejen la descripción brindada por cada uno de los entrevistados y además, se les asignan nombres que los identifiquen claramente. Es habitual nombrarlos según el detalle del evento de riesgo; sin embargo, aquí también puede hacerse basándose en la fuente de riesgo, si ésta lo describe mejor.

A continuación, se presenta el conjunto de riesgos identificados a través de todas las entrevistas realizadas a profesionales con experiencia en el rubro, también llamado registro de riesgos. En este, se decide añadir sólo los efectos principales que produce cada riesgo, además del objetivo impactado (costo, plazo, calidad y/o seguridad). Sin embargo, se debe tener en cuenta que también existen efectos secundarios (por ejemplo: si se perjudica el plazo, indirectamente se aumentan los costos).

Por otra parte, los retrasos y sobrecostos se refieren a desviaciones de tiempo y costo con respecto a la Línea Base de la etapa de construcción del proyecto, respectivamente.

Tabla 3-1. Compendio de riesgos identificados a través de las entrevistas a los profesionales.

Título del Riesgo	Categorías	Fuente de Riesgo	Riesgo	Objetivo principal Impactado	Efecto Principal	Potencial Respuesta
Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar	Geológico - Interior	Incertidumbre en información geológica	Reducción de rendimientos previstos y cambio en cantidad de soportes planeados	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar
Elección del contratista inapropiado	Contratos - Interior	Elección de contratista inapropiado	Mala reacción del contratista ante problemas	Costos, Plazos, Calidad	Sobrecostos, retrasos, falta de calidad	Evitar
Encontrar Fósiles	Terreno - Interior	Encontrar fósiles	Paralización de la obra	Plazos	Retrasos	Aceptar
Condiciones climáticas desfavorables	Climático - Exterior	Cambios en condiciones climáticas	Acceso al túnel inhabilitado	Plazos	Retrasos	Mitigar
Remoción en grandes masas y avalanchas	Geológico - Exterior	Remoción en grandes masas y avalanchas	Problemas de seguridad e inaccesso a la obra	Seguridad y Plazos	Accidentes y retrasos	Mitigar
Falta de mantención de Equipos de Perforación y Tronadura	Eq. y Maq. - Interior	Falta de mantención de equipos de Perforación y Tronadura	Paralización de la excavación	Plazos	Retrasos	Evitar
Falta de mantención de Tuneleras	Eq. y Maq. - Interior	Falta de mantención de TBM	Paralización de la excavación	Plazos	Retrasos	Evitar

Tabla 3-2. Compendio de riesgos identificados a través de las entrevistas a los profesionales (*continuación*).

Título del Riesgo	Categorías	Fuente de Riesgo	Riesgo	Objetivo principal Impactado	Efecto Principal	Potencial Respuesta
Falta de mantención de Rozadoras	Eq. y Maq. – Interior	Falta de mantención de Rozadoras	Paralización de la excavación	Plazos	Retrasos	Evitar
Amenazas sindicales	Relaciones – Exterior	Trato inadecuado a trabajadores	Reclamaciones sindicales y paralización de la obra	Plazos	Retrasos	Mitigar
Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos	Adminis. – Interior	Incumplimiento de lo previsto en la RCA	Paralización de la obra	Plazos	Retrasos	Evitar
Malas relaciones con la comunidad	Relaciones – Exterior	Malas relaciones con la comunidad cercana a la obra	Altercados, quema de equipos, corte de caminos, apedreos, entre otros	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar
Erupción volcánica	Fuerza Mayor- Exterior	Erupción volcánica	Paralización de la obra y pérdida del avance	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Transferir
Crecida de ríos	Hidrológico – Exterior	Crecida de ríos	Ingreso de agua al túnel	Costos y plazos	Sobrecostos y retrasos	Mitigar

Tabla 3-3. Compendio de riesgos identificados a través de las entrevistas a los profesionales (*continuación*).

Título del Riesgo	Categorías	Fuente de Riesgo	Riesgo	Objetivo principal Impactado	Efecto Principal	Potencial Respuesta
Mano de obra no calificada	Mano de Obra – Exterior	Mano de obra no calificada	Descenso de rendimientos	Plazos	Retrasos	Evitar
Cambios en el diseño	Diseño e Ingeniería – Interior	Cambios de diseño a medida que se excava	Reclamaciones de la constructora al mandante	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar
No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación	Diseño e Ingeniería – Interior	Mal equipo de geólogos	Mala clasificación de roca e instalación de soportes extremadamente conservadores	Costos	Sobrecostos	Evitar
Modificación en leyes laborales	Legales – Exterior	Modificación de leyes laborales	Solicitud de aumento de sueldo de trabajadores	Costos	Sobrecostos	Aceptar
Personal inapropiado	Personal – Exterior	Personal inadecuado para ejecutar la obra	Problemas en la ejecución normal de la obra	Costos, plazos, calidad y seguridad	Sobrecostos, retrasos, falta de calidad y accidentes	Evitar
Inundación y filtraciones de agua	Hidrogeo. – Interior	Fallas geológicas, rocas permeables, lluvias fuertes y presencia de bolsones de agua	Filtración de agua al túnel e inundaciones	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar

Tabla 3-4. Compendio de riesgos identificados a través de las entrevistas a los profesionales (*continuación*).

Título del Riesgo	Categorías	Fuente de Riesgo	Riesgo	Objetivo principal Impactado	Efecto Principal	Potencial Respuesta
Rock Bursting	Geológico – Interior	Rock Bursting	Daño de maquinaria y trabajadores	Seguridad y Costos	Accidentes y sobrecostos	Mitigar
Riesgo de accidentes en el túnel	Seguridad – Interior	Problemas de terreno y/o ejecución de la obra subterránea	Accidentes de trabajadores	Seguridad y Plazos	Accidentes y retrasos	Mitigar
Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas	Diseño e Ingeniería – Interior	Capacidad insuficiente en plantas de tratamiento de agua	Paralización de obra	Plazos	Retrasos	Mitigar
Encontrar aguas ácidas y termales	Terreno – Interior	Encontrar aguas ácidas y/o termales y no tratarlas	Paralización de obra	Plazos	Retrasos	Mitigar
Evento sísmico	Fuerza Mayor – Exterior	Terremoto	Paralización de obra y daños	Plazos, costos y seguridad	Retrasos, sobrecostos y accidentes	Mitigar
Desprendimiento de rocas	Geológico – Interior	Desprendimiento de rocas al interior del túnel	Daño de equipos, paralización de la obra y daños a trabajadores	Plazos, costos y seguridad	Retrasos, sobrecostos y accidentes	Mitigar
Ruido por Tronaduras	Legales – Interior	Ruido excesivo por tronaduras cuando existen comunidades cercanas	Trabajar bajo horario restringido	Plazos	Retrasos	Mitigar
Atrasos en planos de diseño	Diseño e Ingeniería - Interior	Atrasos en planos de diseño de los túneles	Imposibilidad de avanzar con la construcción del túnel	Plazos	Retrasos	Mitigar

En la siguiente tabla se aprecia en qué entrevistas se identificó cada uno de los riesgos. El símbolo ✓ indica que el riesgo fue identificado en dicha entrevista, mientras que el símbolo ✗ señala lo contrario. En la primera fila, la letra “E” equivale a “Entrevista”.

Tabla 3-5. Matriz de Identificación de Riesgos.

Riesgo	E1	E2	E3	E4	E5
Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar	✓	✓	✓	✓	✓
Elección del Contratista inapropiado	✓	✗	✓	✗	✗
Encontrar Fósiles	✓	✗	✗	✗	✗
Condiciones climáticas desfavorables	✓	✓	✓	✓	✗
Remoción en grandes masas y avalanchas	✓	✗	✗	✓	✗
Falta de mantención de Equipos de Perforación y Tronadura	✓	✗	✗	✓	✗
Falta de mantención de Tuneleras	✓	✗	✗	✓	✗
Falta de mantención de Rozadoras	✓	✗	✗	✓	✗
Amenazas sindicales	✓	✗	✗	✗	✗
Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos	✓	✓	✓	✗	✓
Malas relaciones con la comunidad	✓	✗	✓	✓	✗
Erupción volcánica	✓	✗	✗	✗	✗
Crecida de ríos	✓	✗	✗	✗	✗
Mano de obra no calificada	✓	✗	✗	✗	✗
Cambios en el diseño	✓	✗	✗	✓	✗
No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación	✓	✗	✗	✗	✗
Modificación en leyes laborales	✓	✗	✗	✗	✗
Personal inapropiado	✗	✓	✗	✗	✗

Tabla 3-6. Matriz de Identificación de Riesgos (*continuación*).

Riesgo	E1	E2	E3	E4	E5
Inundación y filtraciones de agua	✗	✓	✓	✓	✓
Rock Bursting	✗	✓	✓	✗	✓
Riesgo de accidentes en el túnel	✗	✓	✗	✗	✓
Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas	✗	✗	✓	✗	✓
Encontrar aguas ácidas y termales	✗	✗	✓	✗	✗
Evento sísmico	✗	✗	✗	✓	✗
Desprendimiento de rocas	✗	✗	✗	✓	✗
Ruido por tronaduras	✗	✗	✗	✗	✓
Atrasos en planos de diseño	✗	✗	✗	✗	✓

Dentro de los riesgos identificados, los más repetidos en las entrevistas son los siguientes:

- *Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar*. Fue identificado en las cinco entrevistas realizadas.
- *Condiciones climáticas desfavorables*, que fue identificado en cuatro entrevistas.
- *Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos*. Al igual que el anterior, fue identificado en cuatro entrevistas.
- *Inundación y filtraciones de agua*, identificado en cuatro de las entrevistas.
- *Malas relaciones con la comunidad*, identificado en tres entrevistas.
- *Rock Bursting*, identificado en tres entrevistas.

Los siguientes histogramas grafican la cantidad de riesgos exteriores e interiores a la construcción del túnel, que fueron identificados, además del número de riesgos por categoría.

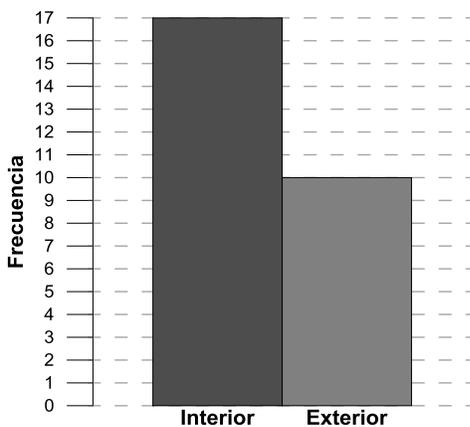


Figura 3-1. Histograma con cantidad de riesgos Interiores y Exteriores.

De la Figura 3-1 se desprende que la cantidad de riesgos interiores al túnel es mayor que la de exteriores, lo que indica que la mayoría de los eventos de riesgos tienen directa relación con las obras subterráneas.

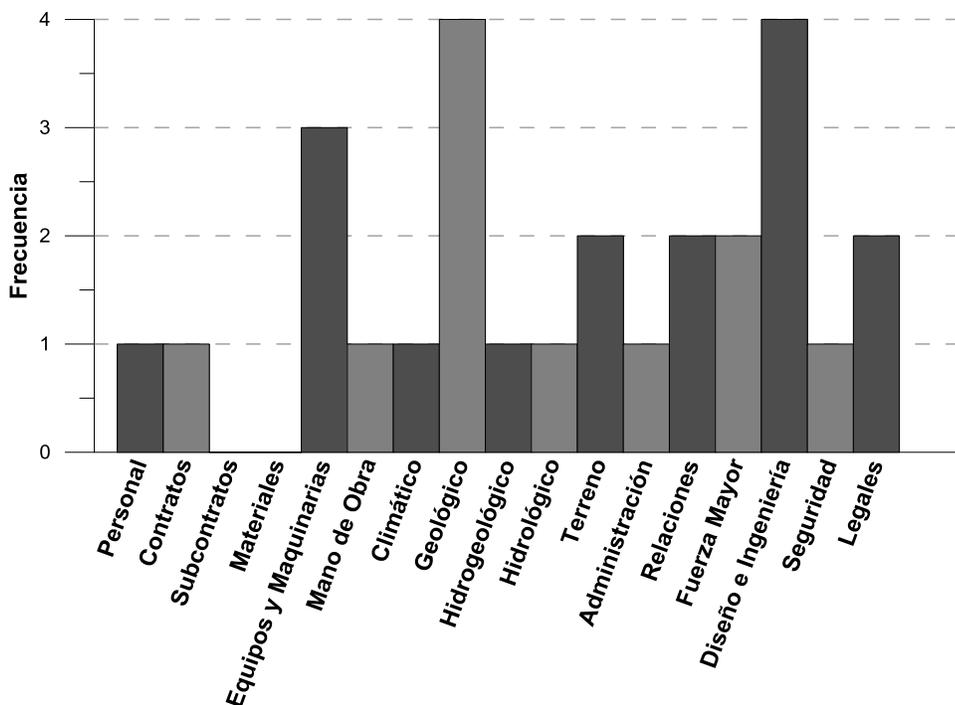


Figura 3-2. Histograma con riesgos interiores por categoría de riesgos.

Del histograma de la Figura 3-2 se desprende que los riesgos que predominan son los que vienen de causas *Geológicas* y por efectos del *Diseño e Ingeniería*.

Considerando que este Trabajo de Título está enfocado a los riesgos de la construcción de túneles para obras hidráulicas, sólo se tienen en cuenta los riesgos interiores, que tienen directa relación con la construcción del túnel en sí y no aquellos que lo pueden perjudicar, pero están vinculados indirectamente.

Por otra parte, los riesgos *Falta de mantención de Equipos de Perforación y Tronadura*, *Falta de mantención de Tuneleras* y *Falta de mantención de Rozadoras* se descartan, pues en la práctica es común realizar mantenciones a las maquinarias utilizadas en la construcción de túneles y además, basta cumplir con los planes de mantención y se descarta el riesgo. También se excluye el riesgo *Ruidos por Tronaduras*, pues sólo puede presentarse en caso de que la obra esté emplazada cerca de una comunidad, lo que generalmente no sucede en este tipo de proyectos, por estar en zonas cordilleranas y no urbanas.

En la siguiente tabla se presentan los riesgos interiores a la construcción de túneles.

Tabla 3-7. Compendio de riesgos interiores a la construcción de túneles, identificados a través de las entrevistas.

Título del Riesgo	Categoría	Fuente de Riesgo	Riesgo	Objetivo Impactado	Efecto	Potencial Respuesta
Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar	Geológico	Incertidumbre en información geológica	Reducción de rendimientos previstos y cambio en cantidad de soportes planeados	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar
Elección del contratista inapropiado	Contratos	Elección de contratista inapropiado	Mala reacción del contratista ante problemas	Costos, Plazos, Calidad	Sobrecostos, retrasos, falta de calidad	Evitar
Encontrar Fósiles	Terreno	Encontrar fósiles	Paralización de la obra	Plazos	Retrasos	Aceptar
Incumplimiento de la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos	Administración	Incumplimiento de lo previsto en la RCA	Paralización de la obra	Plazos	Retrasos	Evitar
Cambios en el diseño	Diseño e Ingeniería	Cambios de diseño de los túneles a medida que se excava	Reclamaciones de la constructora al mandante	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar
No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación	Diseño e Ingeniería	Mal equipo de geólogos	Mala clasificación de roca e instalación de soportes extremadamente conservadores	Costos	Sobrecostos	Evitar

Tabla 3-8. Compendio de riesgos interiores a la construcción de túneles, identificados a través de las entrevistas
(continuación).

Título del Riesgo	Categoría	Fuente de Riesgo	Riesgo	Objetivo Impactado	Efecto	Potencial Respuesta
Inundación y filtraciones de agua	Hidrogeológico	Fallas geológicas, rocas permeables, lluvias fuertes y presencia de bolsones de agua	Filtración de agua al túnel e inundaciones	Plazos y Costos	Retrasos y sobrecostos	Mitigar
Rock Bursting	Geológico	Rock Bursting	Daño de maquinaria y trabajadores	Seguridad y Costos	Accidentes y sobrecostos	Mitigar
Riesgo de accidentes en el túnel	Seguridad	Problemas de terreno y/o ejecución de la obra subterránea	Accidentes de trabajadores	Seguridad y Plazos	Accidentes y retrasos	Mitigar
Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas	Diseño e Ingeniería	Capacidad insuficiente en plantas de tratamiento de agua	Paralización de obra	Plazos	Retrasos	Mitigar
Encontrar aguas ácidas y termales	Terreno	Encontrar aguas ácidas y/o termales y no tratarlas	Paralización de obra	Plazos	Retrasos	Mitigar
Desprendimiento de rocas	Geológico	Desprendimiento de rocas al interior del túnel	Daño de equipos, paralización de la obra y daños a trabajadores	Plazos, costos y seguridad	Retrasos, sobrecostos y accidentes	Mitigar
Atrasos en planos de diseño	Diseño e Ingeniería	Atrasos en planos de diseño de los túneles	Imposibilidad de avanzar con la construcción del túnel	Plazos	Retrasos	Mitigar

4. ANÁLISIS DE LOS RIESGOS

Para efectos de este Trabajo de Título se realiza un análisis cualitativo de los riesgos previamente identificados, en particular, de los directamente relacionados con la construcción de túneles. Con el fin de priorizarlos, se considera su probabilidad de ocurrencia e impacto sobre los objetivos de la construcción.

▪ Probabilidad de ocurrencia

El PMI (2013) señala que la probabilidad e impacto de los riesgos se califica según se define en la planificación de la gestión de los riesgos, por lo tanto, permite a quien quiere evaluar los riesgos, definir una escala según estime conveniente. Para estimar la probabilidad de los riesgos en este Trabajo de Título se utiliza una escala cualitativa que divide la incertidumbre en cinco categorías, a las cuales se asigna un nivel de probabilidad representativo. Si bien, una probabilidad se representa matemáticamente por un valor entre 0 y 1; en este caso se considera una escala del 1 al 5 con sus respectivos porcentajes, desde probabilidad muy baja a muy alta, considerando que el análisis es sólo cualitativo. La siguiente tabla muestra la escala de probabilidad que se utiliza.

Tabla 4-1. Categorización de la Probabilidad de ocurrencia del riesgo.

Fuente: Elaboración propia.

Categoría de Probabilidad	Nivel de Probabilidad	Probabilidad [%]
Muy baja	1	[0 – 20]
Baja	2	(20 – 40]
Media	3	(40 – 60]
Alta	4	(60 – 80]
Muy Alta	5	(80 – 100]

▪ Impacto

Es complejo categorizar cualitativamente los impactos que generan los riesgos, pues dependen del objetivo que se afecta. Si se perjudican los costos, se debe utilizar una categorización distinta a si se impactan los plazos, calidad, entre otros. Por lo anterior y considerando que sólo se realiza un análisis cualitativo, se decide utilizar una única escala de impacto. Esta se usa para cualquier objetivo afectado y posee valores entre 1 y 5; en donde 1 corresponde a un impacto muy bajo y 5 a uno muy alto. La siguiente tabla muestra la escala de impacto que se utiliza.

Tabla 4-2. Categorización del Impacto del riesgo sobre los objetivos.

Fuente: Elaboración Propia.

Categoría de Impacto	Nivel de Impacto
Muy Bajo	1
Bajo	2
Moderado	3
Alto	4
Muy Alto	5

De las Tablas 4-1 y 4-2 se desprende que la categorización del impacto y la de probabilidad poseen la misma escala. Esto indica que se le asigna la misma importancia al efecto que un riesgo puede producir y a su probabilidad de ocurrencia, lo cual tiene sentido, considerando que sólo se está desarrollando un análisis cualitativo. Si se quiere lograr mayor precisión, debe realizarse el análisis cuantitativo mediante datos estadísticos.

A cada uno de los riesgos identificados se les asigna una categoría de probabilidad y de impacto.

- **Matriz de Probabilidad e Impacto**

A continuación, se define la matriz de probabilidad e impacto que se utiliza para priorizar los riesgos identificados.

Tabla 4-3. Matriz de Probabilidad e Impacto.

Fuente: Adaptada de PMI (2013).

		IMPACTO				
		MB	B	M	A	MA
PROBABILIDAD	MB	1	2	3	4	5
	B	2	4	6	8	10
	M	3	6	9	12	15
	A	4	8	12	16	20
	MA	5	10	15	20	25

Finalmente, las categorías del nivel de importancia de cada riesgo se presentan a continuación:

Tabla 4-4. Categorización de Importancia de los Riesgos.

Fuente: Elaboración propia.

Importancia	Rango de Pxl
Baja	1 – 7,9
Media	8 – 14,9
Alta	15 - 25

De las técnicas expuestas en la sección 2.1.2, se utiliza el *Juicio de Expertos*, la *Categorización de riesgos*, *Evaluación de Probabilidad e Impacto de los riesgos* y la *Matriz de Probabilidad e Impacto* (también llamada *Matriz de consecuencia/probabilidad*). Se espera obtener una evaluación de la probabilidad e impacto de los riesgos identificados, mediante el juicio de los expertos entrevistados.

Previamente, se seleccionan algunas categorías para clasificar los riesgos y finalmente, se clasifican según las Tablas 4-3 y 4-4, con el objetivo de priorizarlos.

4.1. Valoración cualitativa de los riesgos

Una vez identificados los riesgos mediante las entrevistas, se procede a valorarlos cualitativamente en base a su probabilidad de ocurrencia e impacto. En la siguiente tabla, se resume la valoración del compendio de riesgos interiores al túnel, separados por entrevistas. Se añade una “x” cuando alguno no fue identificado en alguna entrevista en especial y una “D” cuando su probabilidad y/o impacto dependen del lugar donde se materializa el proyecto.

Tabla 4-5. Matriz de Probabilidad e Impacto por cada riesgo interno identificado y por cada entrevista.

Riesgo	E1		E2		E3		E4		E5	
	P	I	P	I	P	I	P	I	P	I
Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar	5	5	1	5	2	3	5	4	3	5
Elección del Contratista inapropiado	3	5	x	x	4	5	x	x	x	x
Encontrar Fósiles	1	5	x	x	x	x	x	x	x	x
Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos	3	5	5	5	1	2	x	x	2	2
Cambios en el diseño	3	3	x	x	x	x	5	3	x	x
No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación	3	3	x	x	x	x	x	x	x	x
Inundación y filtraciones de agua	x	x	3	4	2	4	4	3	3	5
Rock Bursting	x	x	D	5	1	5	x	x	D	4
Riesgo de accidentes en el túnel	x	x	2	4	x	x	x	x	2	4
Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas	x	x	x	x	4	4	x	x	4	4
Encontrar aguas ácidas y/o termales	x	x	x	x	1	3	x	x	x	x
Desprendimiento de rocas	x	x	x	x	x	x	3	3	x	x
Atrasos en planos de diseño	x	x	x	x	x	x	x	x	4	2

Basándose en la Tabla 4-5, se calcula el producto entre la probabilidad e impacto de cada riesgo, en cada una de las entrevistas. Luego, se determina un valor final por riesgo, que corresponde al promedio de los valores anteriores, y se le asigna un nivel de importancia según indica la matriz de riesgos (Ver Tablas 4-3 y 4-4); como muestra la siguiente tabla.

Tabla 4-6. Producto de Probabilidad e Impacto por cada riesgo interno identificado y por cada entrevista.

Riesgo	E1	E2	E3	E4	E5	Final	Importancia
	P x I	P x I	P x I	P x I	P x I		
Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar	25	5	6	20	15	14,2	Media
Elección del Contratista inapropiado	15	x	20	x	x	17,5	Alta
Encontrar Fósiles	5	x	x	x	x	5	Baja
Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos	15	25	2	x	4	11,5	Media
Cambios en el diseño	9	x	x	15	x	12	Media
No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación	9	x	x	x	x	9	Media
Inundación y filtraciones de agua	x	12	8	12	15	11,8	Media
Rock Bursting	x	D	5	x	D	5	Baja
Riesgo de accidentes en el túnel	x	8	x	x	8	8	Media
Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas	x	x	16	x	16	16	Alta
Encontrar aguas ácidas y termales	x	x	3	x	x	3	Baja
Desprendimiento de rocas	x	x	x	9	x	9	Media
Atrasos en planos de diseño	x	x	x	x	8	8	Media

A continuación, se presenta el valor final del producto Pxl para cada riesgo, de forma descendente, es decir, desde el más al menos importante.

Tabla 4-7. Análisis de los Riesgos internos Identificados.

Riesgo	P x I	Importancia
Elección del Contratista inapropiado	17,5	Alta
Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas	16	Alta
Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar	14,2	Media
Cambios en el diseño	12	Media
Inundación y filtraciones de agua	11,8	Media
Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos	11,5	Media
No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación	9	Media
Desprendimiento de rocas	9	Media
Riesgo de accidentes en el túnel	8	Media
Atrasos en planos de diseño	8	Media
Encontrar Fósiles	5	Baja
Rock Bursting	5	Baja
Encontrar aguas ácidas y termales	3	Baja

En el siguiente histograma se grafica la cantidad de riesgos según su nivel de importancia.

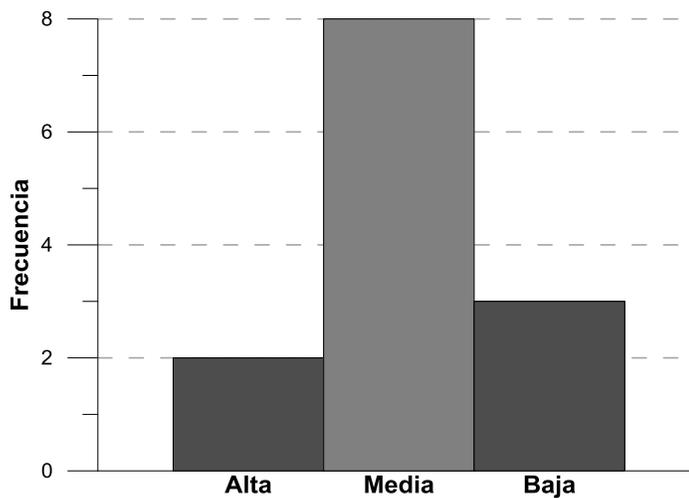


Figura 4-1. Histograma de cantidad de riesgos internos por Nivel de Importancia.

En la Figura 4-1 se aprecia que la mayor cantidad de riesgos identificados poseen un nivel de importancia media, mientras que la minoría posee una importancia alta. En el presente Trabajo de Título sólo se realizan planes de respuesta para los riesgos de importancia Alta y Media.

5. PLAN DE RESPUESTA A LOS RIESGOS

Como se mencionó anteriormente, el presente Trabajo de Título sólo se enfoca en los riesgos negativos o amenazas. El Project Management Institute, a través de su guía del PMBOK® (PMI, 2013), establece cuatro estrategias para tratar los riesgos negativos. Estas son las siguientes:

- **Evitar**: Estrategia en que el equipo del proyecto actúa para eliminar la amenaza o protegerse de su impacto.
- **Transferir**: Estrategia de respuesta al riesgo, en que se traspasa el impacto de una amenaza a un tercero, entregándole la responsabilidad de respuesta. No elimina el riesgo, sólo lo transfiere.
- **Mitigar**: El equipo del proyecto actúa reduciendo la probabilidad de ocurrencia y/o impacto de un riesgo.

- **Aceptar:** El equipo del proyecto decide reconocer el riesgo y no tomar acciones, a menos que el riesgo se materialice. Puede ser pasiva¹⁶ o activa¹⁷.

A continuación, se desarrollan los planes de respuesta a los riesgos que se categorizan en un nivel alto y medio.

1) Elección del contratista inapropiado

Si bien, todas las empresas constructoras están sujetas al suceso de eventos inciertos que pueden alterar sus objetivos esperados en cuanto a la materialización de los proyectos de centrales hidroeléctricas, no todas tienen la misma capacidad de reacción ante éstos.

Considerando que la etapa de construcción es una de las que utiliza la mayor cantidad de recursos económicos, es de suma importancia realizarla exitosamente y sin mayores inconvenientes.

Ante esto, la elección de contratistas inapropiados podría conllevar a malas respuestas frente a los eventos de riesgo que suceden durante la materialización del proyecto, deteniendo el avance y por lo tanto, aumentando sus plazos y costos.

Plan de respuesta

Se recomienda **evitar** este riesgo, estableciendo un proceso de licitación más exhaustivo, en que se considere de forma especial la experiencia del contratista, su capacidad de respuesta ante eventos inciertos, como también sus valores éticos para evitar actos de corrupción.

Podría pedirse antecedentes a los mandantes anteriores, con que cada candidato se adjudicó la construcción de algún proyecto de túneles en obras hidráulicas, con el fin de crear historiales del comportamiento de cada postulante y considerarlo para la elección. Esto, pues en estas obras de gran envergadura, el contratista debe tener capacidad suficiente para dirigir la construcción.

Por otra parte, se aconseja considerar las competencias profesionales y éticas del personal (de la empresa constructora) que es responsable de la ejecución de las obras. También, es de utilidad definir previo al inicio del proceso de licitación, el equipo clave que se necesita, especificando el perfil y años de experiencia que se requiere para cada cargo.

¹⁶ Ver Glosario

¹⁷ Ver Glosario

2) Falta de capacidad en plantas de tratamiento de aguas

En las centrales hidroeléctricas, deben existir plantas de tratamiento de aguas mientras se construyen los túneles. Estas plantas de tratamiento se usan para descontaminar tanto el agua que sale del túnel (agua industrial, usada en las operaciones de construcción), como la que viene del terreno, determinada previamente tras estudios hidrogeológicos. Cabe destacar que estos estudios pueden llegar a ser muy imprecisos, pues en experiencias previas se ha notado que el caudal que se espera discrepa con el que realmente se observa.

Eventualmente, el caudal de agua que sale del túnel podría ser mayor al que se considera para diseñar las plantas, conllevando problemas de capacidad insuficiente y por lo tanto, contaminación de los cuerpos de aguas superficiales en caso de no detenerse la ejecución de la obra subterránea. Este aumento puede provenir de un ascenso en la cantidad de agua utilizada en las distintas operaciones aplicadas en la construcción de los túneles, como también por las incertezas intrínsecas a los estudios hidrogeológicos.

En esos casos, el agua sin tratamiento no puede verterse a los cauces naturales o puntos de descarga establecidos. Esto genera una paralización de actividades y cambios en el diseño de las plantas para aumentar su capacidad, incrementando los plazos previstos, así como los costos de la etapa de construcción.

Plan de Respuesta

Ante este suceso, el contratista debe paralizar la obra y agrandar las piscinas de tratamiento hasta una capacidad que dé abasto a la demanda de agua a tratar.

Como plan de respuesta se recomienda **mitigar** el riesgo, sobredimensionando las plantas de tratamiento en la etapa de diseño. Se aconseja estimar el caudal de agua que saldrá del túnel, considerando aguas contaminadas tras operación y/o mantención de equipos, como también la que se determina en el estudio hidrogeológico; para luego establecer un porcentaje de sobredimensionado, basándose en datos estadísticos de proyectos antiguos. Con esto se espera aumentar el volumen y por lo tanto, la capacidad de las piscinas.

Se considera que el costo extra por efectos del sobredimensionado es despreciable, en comparación al costo que produce una paralización de la obra en la etapa de construcción de los túneles, como consecuencia de no contar con la capacidad suficiente en las piscinas de tratamiento de aguas.

3) Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar

En el ámbito de las obras hidráulicas, en particular de las centrales hidroeléctricas en Chile, es común que predomine el material rocoso en el terreno, dado que en general se emplazan en zonas cordilleranas. No obstante, no se debe descartar la posibilidad de encontrar suelo.

Antes de la construcción de un túnel, en la etapa de exploraciones, se realizan estudios geológicos y geotécnicos con el fin de determinar las condiciones del terreno. A grandes rasgos, estas son útiles para detectar la presencia de fallas geológicas y fracturas, además de clasificar el macizo rocoso y diagnosticar la permeabilidad de las rocas.

Basándose en los resultados de los estudios geológicos, en particular la clasificación de rocas, se seleccionan preliminarmente los soportes y revestimientos que se utilizarán en el túnel, además de estimar los rendimientos de avance en la excavación.

La precisión en los resultados de los estudios depende de la cantidad de pruebas que se realizan, tanto en terreno, como en laboratorio. Si se decide realizar menos sondajes y ensayos, existe mayor probabilidad de encontrarse con singularidades y condiciones distintas a las previstas, que en el caso de realizarse una exploración más exhaustiva.

Mientras más detallado es el estudio geológico, más costosa resulta la etapa de exploración, por lo que en general, se tiende a disminuir la cantidad de ensayos y sondajes para ahorrar dinero. Por otra parte, generalmente se realizan ensayos a las rocas superficiales o testigos en un lugar determinado, asumiendo su caracterización como figurativa a los sectores aledaños, sin embargo, en terreno es probable encontrarse con condiciones distintas, pues pueden existir diferencias notables entre una zona y otra cercana. Comúnmente, es difícil tener una investigación geológico-geotécnica altamente representativa, considerando las grandes longitudes que pueden poseer los túneles, las enormes alturas de cobertura y la ubicación del trazado. Esta incertidumbre no es deseable, pero es intrínseca a los túneles.

Los distintos métodos de excavación se realizan a diferentes rendimientos según sea el tipo de roca que se cava, por lo que, encontrarse con zonas de roca desiguales a las pronosticadas podría alterar completamente los plazos de construcción.

Al encontrarse roca de muy buena calidad, es probable que no se necesite colocar soporte alguno, no así si es muy mala, donde podría requerirse la instalación de soportes más resistentes. Esto también produce impactos en los plazos estimados, así como en los costos del mandante.

Plan de Respuesta

Dentro de las cuatro estrategias para tratar los riesgos, establecidas previamente, se recomienda **mitigar** este riesgo reduciendo su probabilidad de ocurrencia y/o efecto negativo generado sobre los objetivos, donde prevalece el costo y plazo previsto, junto a la seguridad en la operación.

Reducir su probabilidad de ocurrencia requiere disminuir la incertidumbre de los estudios geológicos, lo que se realiza aumentando la cantidad de sondajes y ensayos dentro de la etapa de exploración. Sin embargo, debe considerarse que a través de esto nunca se tendrá tanta exactitud, al compararse con lo realmente encontrado en el sitio, pues en general, los estudios no se hacen hasta el eje del túnel. Otra alternativa, si bien, aplicada en la etapa de construcción, pero más precisa, es perforar con un Jumbo el frente del túnel antes de excavarse. Las perforaciones que se ejecutan tienen entre 25 y 30 metros de longitud, aproximadamente y otorgan mayor información del terreno que está por delante del frente de excavación.

Por otra parte, para reducir el impacto generado al ocurrir el riesgo, se debe buscar alguna alternativa con el fin de no alterar los plazos y costo previstos en la construcción del túnel.

En base a la información presente en la Tabla 2-5, se propone el siguiente plan:

- **Excavar por dos frentes. En el delantero con un método de excavación híbrido, con *TBM* como método principal y *Perforación y Tronadura* como alternativa ante contingencias; mientras que en el frente trasero se avanza con *Perforación y Tronadura*.**

Se recomienda excavar por dos frentes, uno principal y otro trasero. En este último se excava con *Perforación y Tronadura* para disminuir los plazos, pues necesita menos tiempo para la adquisición y traslado de equipos a obra, en comparación con las tuneladoras.

En el frente principal se aconseja excavar con una *TBM*, porque presenta un rendimiento más alto y además, se recomienda estar preparado para ejecutar *Perforación y Tronadura* en caso de que las condiciones del terreno no permitan continuar con la tuneladora, pues no es flexible a los cambios drásticos del sitio a excavar (zonas de fractura, cambio en características del macizo rocoso, estados de tensión en la roca, entre otros), a diferencia del *Drill & Blast*. Así se disminuye el impacto negativo que generan las incertezas en las condiciones geológicas, mientras se aprovecha la mayor seguridad y velocidad de avance que presentan las tuneladoras.

Si bien, lo anterior pareciera ser eficaz y eficiente, considerando los aspectos teóricos que se encuentran en la literatura, la realidad Chilena ha sido distinta. En los proyectos contemporáneos en que se ha utilizado TBM para excavar y construir los túneles en centrales hidroeléctricas, se han tenido inconvenientes complejos por causa de esta maquinaria, quedando paralizadas las obras, a causa de que las tuneleras no pueden seguir excavando debido a los cambios drásticos en el terreno.

Considerando la situación Chilena, se aconseja utilizar sólo el método de Perforación y Tronadura, que ha demostrado ser efectivo en los proyectos ejecutados con esta técnica. Por lo anterior, el plan de respuesta final que se recomienda aplicar es el siguiente:

- **Excavar los túneles con el método de Perforación y Tronadura, considerando tres frentes de excavación.**

Para aplicarlo se recomienda ejecutar la excavación por un frente principal al inicio del túnel, por uno trasero al final de éste, además de uno intermedio al que se llega mediante una ventana de acceso lateral o vertical, que intersecta el eje longitudinal del túnel. Estos se excavan utilizando el método Drill & Blast y permiten obtener un mejor rendimiento conjunto, pues desde el frente intermedio se comienza a excavar hacia el frente delantero y trasero, de forma alternada.

De esta forma se aplica un método que ha mostrado eficacia en obras subterráneas de centrales hidroeléctricas chilenas, disminuyendo los plazos de construcción, al considerar tres frentes de excavación distintos.

En cuanto a los costos extras que vienen por cambios en los soportes al encontrar condiciones de terreno distintas a las previstas, no se crea plan de respuesta alguno, debido a que las circunstancias exigen utilizar los adecuados para obtener obras de calidad y no puede hacerse nada al respecto más que instalar los que corresponden. De todas formas, en general la cantidad de soportes se cobra mediante precios unitarios, por lo que el contratista debe procurar asignar precios realistas desde el proceso de licitación, entendiendo estos problemas, con el fin de evitar reclamaciones posteriores.

Además, se recomienda planificar la mantención de equipos de Perforación y Tronadura según las indicaciones del proveedor, con el objetivo de evitar problemas en los rendimientos de avance. Es útil realizar las mantenciones en los instantes en que se cambia de turno y salen los obreros para dar acceso a otras cuadrillas, de esta forma se evitan tiempos muertos.

4) Cambios en el diseño

A medida que se excava el túnel, es necesario realizar el reconocimiento de roca con el fin de decidir qué clase de soporte se debe instalar. En general, se utiliza una categorización de rocas que las divide en cinco grupos o clases, según su calidad. Para cada uno de estos, se propone un tipo de soporte en particular.

Cuando se encuentran zonas del terreno que presentan propiedades intermedias entre dos clases de rocas, se modifica el diseño del soporte para ese tramo, no seleccionando ninguno de los predefinidos por categorías, sino que se añaden pernos u otros elementos según sea necesario. Lo anterior podría generar reclamaciones por parte del contratista al mandante, debido al aumento del uso de soportes más costosos y/o que requieren mayor tiempo de instalación. Esto retarda el avance en la ejecución de la obra.

Plan de Respuesta

Se recomienda **mitigar** este riesgo estableciendo una cláusula especial en el contrato de construcción, que indique que la constructora debe someterse a lo que decida el equipo de geólogos y diseñador estructural. De esta forma, se vela por la seguridad de la obra. Por otro lado, si la modalidad de pago por la instalación de soportes es a Precios Unitarios (recomendado en obras subterráneas), no debiesen existir reclamos. Esto, debido a que los precios unitarios por elemento extra (es decir, elementos que modifiquen alguno de los cinco soportes predefinidos) se definen previamente en la oferta económica. Además, a estos valores, el contratista puede añadir los sobrecostos por efectos de materiales y tiempo extra en su ejecución.

5) Inundación y Filtraciones de agua

Son varias las condiciones de terreno que pueden provocar filtraciones de agua, llegando incluso a inundar el frente de excavación. Dentro de ellas se encuentran las fallas geológicas, fractura de rocas, presencia de rocas permeables y bolsones de agua, además de lluvias intensas.

La filtración de agua en grandes caudales inhabilita el continuo avance en la construcción de los túneles, llegando a paralizarla en caso de ser muy pronunciada. Por otro lado, quizá produzca daños en parte del trabajo realizado (oxidación de sostenimientos de acero antes de ser cubiertos con hormigón, por ejemplo), así como en los equipos utilizados. Esto aumenta los plazos por efectos de atrasos y reparaciones, como también los costos.

Plan de Respuesta

Se recomienda **mitigar** este riesgo, disminuyendo su probabilidad de ocurrencia y/o impacto. Si se desea reducir los impactos será necesario estar preparado ante tales sucesos, de forma tal que puedan abordarse rápidamente cuando comience a filtrar agua, evitando que llegue a transformarse en una inundación. Para esto, se sugiere contar con fácil acceso a una cantidad de bombas suficientes y con potencia adecuada, en caso de necesitarse.

Una manera de chequear estos sucesos con anticipación es aplicar perforaciones horizontales con los Jumbos a medida que se avanza en la excavación (en caso de que se aplique el método de Perforación y Tronadura), detectando la presencia de agua antes de tronar. De esta forma, se puede evacuar rápidamente, al estar con las bombas instaladas. Haciendo esto, se reduce el impacto negativo sobre la construcción del túnel.

Por otra parte, para reducir la probabilidad de ocurrencia de filtraciones se pueden aplicar distintas técnicas. Como solución, aquí se enuncian dos de ellas: *Impermeabilización* y *Drenaje*.

- 1. Impermeabilización:** para permitir que el agua no ingrese al túnel, se puede impermeabilizar. Con el fin de lograr esto, se recomienda colocar geotextiles y geomembranas, que canalizan el agua filtrada hacia fuera de la impermeabilización y hacen frente a condiciones adversas, respectivamente (Dirección General de Servicios Técnicos, 2016b).

Una de las ventajas de utilizar geomembranas es que se adaptan a las irregularidades del terreno y a cualquier obra subterránea, independiente del tipo de revestimiento. Así también, el geotextil ayuda a proteger la impermeabilización en su etapa de instalación (Dirección General de Servicios Técnicos, 2016b).

Por último, se recomienda utilizar hormigón proyectado o *in situ* (ambos de alta permeabilidad), para evitar el ingreso del agua al túnel. Estos también sirven de revestimiento final.

El orden recomendado de instalación se aprecia en la siguiente figura:

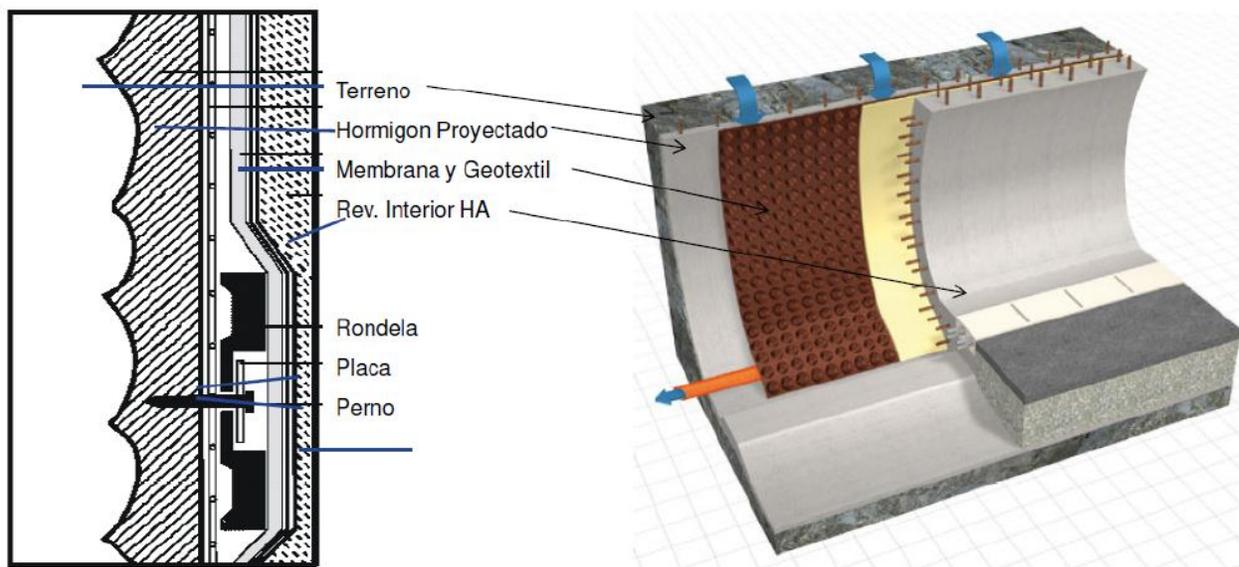


Figura 5-1. Ubicación del sistema de impermeabilización en túneles.

Fuente: (Pozo, 2017c).

- **Drenaje:** permite el paso del agua por vías de escurrimiento, pudiendo ser exteriores o interiores al túnel. Cuando la pendiente de la obra subterránea lo permita, se aconseja dejar canaletas en sus bordes, para desviar el agua que filtra o proviene del tratamiento y limpieza de equipos. Por otra parte, se recomienda tener tuberías fuera del túnel, que conduzcan el agua y, en consecuencia, esta no se acumule a los costados. También, se debe dirigir las aguas hacia colectores o piscinas para ser tratadas antes de evacuarse como afluente.

Sólo se mencionan dos posibles soluciones, pero existen varias más, como son el congelamiento del agua y el agotamiento del nivel freático, entre otras. Sin embargo, se sugiere tasar el costo de las soluciones, escogiendo la más económica y que se ajuste a las características particulares de la obra.

6) Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos

La Resolución de calificación ambiental (RCA) es un documento administrativo que se obtiene al culminar el proceso de evaluación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Establece si el proyecto presentado ha

sido aprobado o rechazado (Gestión en Recursos Naturales [GRN], s.f.). Si es aprobado, debe cumplirse todo lo que ésta contempla.

En ella se encuentran las obligaciones que se deben cumplir en la materialización del proyecto, con el fin de no impactar negativamente al medioambiente. En particular, en el ámbito de la construcción de los túneles en obras hidráulicas, uno de los temas tratados son las medidas a tomar con respecto al botadero de marina.

Se debe tener la precaución de que el material no se bote donde no corresponde, sino en un lugar predefinido. Por otra parte, en caso de existir cerros de marina, es necesario que cumplan con las pendientes máximas, con el fin de asegurar su estabilidad; además, deben ser compactados.

Faltas al cumplimiento de la RCA podrían causar la paralización de la obra, gestionada por entes externos, como el Sernageomin. Con esto se impactan enormemente los plazos y por lo tanto, los costos de la construcción de los túneles.

Plan de Respuesta

Se recomienda que el contratista sea precavido y ético en sus acciones, respetando lo que se previó en la Resolución de Calificación Ambiental. De esta forma cuida el medio ambiente de la zona en donde se materializa el proyecto, además de evitar una paralización de la obra por infracciones a la RCA.

El tiempo y costo extra sobre el proyecto por efectos de tener botaderos de marina y cumplir lo acordado en la RCA, son despreciables si se comparan con los que genera una paralización de la construcción. Por lo tanto, se recomienda **evitar** este riesgo, ejecutando la obra como se postula en la resolución. Además, se aconseja preocuparse de que los caminos de acceso a los botaderos no se interfieran, para prevenir que restos del material excavado se acumulen o sean depositados en lugares diferentes.

7) No tener buen equipo de geólogos a medida que se avanza en la excavación

A medida que se excavan túneles en roca, es considerable que un equipo de geólogos analice el terreno mientras el frente de excavación avanza. Según sea el tipo de roca encontrado, se escogen los soportes a instalarse, basándose en el criterio del equipo. Es posible que la roca sea resistente y estable, por lo que no se necesita soporte alguno, como puede darse el caso de que sea muy mala y se precise de muchos pernos, hormigón proyectado, paraguas de acero, entre otros.

Es válido pensar que si no se cuenta con un buen equipo de geólogos, con vasta experiencia en el rubro de reconocimiento de rocas en Chile, es probable que sean muy conservadores y las asignen en categorías inferiores, cuando en realidad son de mejor calidad. En este caso, los soportes indicados serán más costosos y complejos de instalar, lo que aumenta los costos y plazos de la construcción del túnel. Por otra parte, su inexperiencia podría llevar a sobrestimar su calidad, provocando posibles problemas de seguridad, lo que puede producir accidentes y daño de equipos, que conllevan aumentos de costos y plazos.

Plan de Respuesta

Se recomienda **evitar** este riesgo. Para esto, es de utilidad cerciorarse de que el equipo de geólogos contratados tenga una sólida experiencia. Es aconsejable que el proceso de selección sea más profundo, analizando su participación en proyectos anteriores y valorando su trayectoria en Chile, país que posee condiciones geológicas distintas a las de otros lugares.

8) Desprendimiento de Rocas

Cuando se excava grandes longitudes de un túnel en terrenos rocosos sin instalar el soporte adecuado, es probable que ocurra desprendimiento de rocas debido a la presencia de fracturas en éstas, ya sea naturales o provocadas por la tronadura.

Este riesgo podría ocasionar accidentes, dañar las maquinarias cercanas al frente de excavación, como también generar pérdidas en la sección ya excavada. Esto aumenta los costos y plazos por efectos de reparación del túnel, reposición de maquinaria y limpieza del material desprendido.

Plan de Respuesta

Se recomienda que el contratista **mitigue** este riesgo instalando los soportes cuando sea necesario, no avanzando más de la cuenta con la perforación y tronadura. Así se reduce su probabilidad de ocurrencia.

Para controlar esto, es de utilidad que el mandante tenga fiscalización continua de la ejecución del túnel, ya sea propia o por medio de la Inspección Técnica de Obras (ITO). Por otra parte, se recomienda que el contratista tenga fácil acceso a elementos estructurales de soporte, para utilizarlos en caso de encontrar zonas de roca o suelo de mala calidad, en que se necesite brindar estabilidad inmediata al frente de excavación. Es de utilidad contar con pernos de acero, marchi avantis, marcos de acero, materiales para hormigonado, entre otros elementos de soporte, según establezca el diseño.

9) Riesgo de accidentes en el túnel

Mientras se ejecuta la construcción de los túneles pueden existir problemas de terreno al no instalar los soportes aprisa y avanzar más de la cuenta sin sostenimientos. Estos, junto a los inconvenientes que podrían surgir por efectos de errores en la ejecución, se consideran riesgos que podrían generar accidentes, incluso fatales.

Si bien, lo primordial es que no se produzcan accidentes, en caso de que sucedan, se corre el riesgo de que paralicen la obra, lo que aumenta los plazos y costos de la etapa de construcción.

Plan de Respuesta

Se recomienda **mitigar** este riesgo tras la implementación de un sistema de prevención de accidentes eficaz, lo que reduce su probabilidad de ocurrencia.

Es de utilidad programar capacitaciones para los obreros, tanto en temas de prevención de accidentes como en el uso correcto de maquinarias. Por otra parte, es necesaria la contratación de un equipo de prevención de riesgos¹⁸ que se dedique a analizar todos los peligros potenciales, además de estar de continuo en terreno, inspeccionando que se cumplan los requisitos de seguridad.

10) Atrasos en los planos de diseño

Cuando el diseño y construcción del túnel se adjudican a empresas distintas, es probable que existan atrasos en la entrega de planos, con respecto al plazo acordado. Esto imposibilita el comienzo de la construcción y podría alterar los plazos acordados, postergando la etapa de materialización de la obra subterránea.

Plan de respuesta

Se recomienda **mitigar** este riesgo, disminuyendo su probabilidad y/o impacto sobre la construcción de los túneles.

Contratando ambos servicios por separado es complejo disminuir el impacto que genera un atraso en los planos, pues para no alterar los plazos y cumplir con la entrega del túnel terminado cuando se planificó, tendrían que aumentarse los rendimientos de construcción, lo que no siempre es posible.

¹⁸ Se refiere a prevención de riesgos de accidentes.

Para reducir la probabilidad de ocurrencia de este riesgo es aconsejable asignar plazos más realistas en la entrega del diseño, evitando los atrasos en los entregables de ingeniería. De esta forma, el mandante puede programar el comienzo de la construcción del túnel con el contratista, no impactando los plazos acordados previamente.

También, es de utilidad que el mandante multe a la empresa diseñadora en caso de atrasos irresponsables, con el fin de recuperar parte del dinero que se pierde por la incapacidad de ejecutar la construcción cuando fue previsto.

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El objetivo de este Trabajo de Título fue evaluar los riesgos potenciales en la construcción de túneles para Obras Hidráulicas y generar planes de respuesta a los más críticos. Esto fue llevado a cabo eficazmente y sin mayores inconvenientes.

La mayoría de los riesgos identificados son interiores al túnel, es decir, sus causas y/o eventos de riesgo tienen directa relación con la construcción de la obra subterránea. Estos pueden ser tratados con mayor facilidad que los riesgos exteriores, que se alejan más del alcance del contratista que ejecuta la construcción del túnel.

Se elaboró una lista jerarquizada con los riesgos interiores a los túneles, desde el más crítico al de menos importancia, determinados mediante las entrevistas a cinco expertos en el rubro. Dentro de ellos, los cuatro que más destacan son la *Elección del Contratista inapropiado* y la *Falta de capacidad en las plantas de tratamiento de aguas*, con nivel de importancia alta; además de la *Incertidumbre en las condiciones geológicas del terreno a excavar* y el *Incumplimiento de lo previsto en la Resolución de Calificación Ambiental, en cuanto a acopios de marina y botaderos*, con nivel de importancia medio.

Existe la limitación de que el análisis realizado fue sólo cualitativo, lo que si bien, da una primera aproximación del nivel de importancia de cada riesgo identificado, no es suficiente para obtener resultados más precisos ni estimar el impacto real sobre el proyecto. Ante esto, se manifiesta el beneficio que tiene realizar un análisis cuantitativo, para lo cual se recomienda que las constructoras o mandantes registren las lecciones aprendidas en cada proyecto, en un solo documento. En este deben quedar explícitos los eventos perjudiciales ocurridos, las soluciones tomadas para resolverlos y los impactos reales que generó (tiempo de atraso, monto del sobre costo, problemas de calidad y seguridad, entre otros).

Por otra parte, una gran barrera en la confección de los planes de respuesta es la inexperiencia del autor del Trabajo de Título en proyectos tan complejos como estos. Por lo tanto, los planes elaborados podrían ser básicos.

También, es necesario considerar que la evaluación de riesgos y la implementación de los planes de respuesta necesitan de recursos para su ejecución, ya sea tiempo o dinero. Es recomendable, siempre realizar una evaluación de riesgos, es decir, una identificación y análisis (cualitativo y/o cuantitativo). Sin embargo, la implementación de cada plan de respuesta debe tasarse, pues los costos de su ejecución podrían ser superiores al sobre costo generado si el evento de riesgo impacta, por lo cual, no existe beneficio en utilizar dicho plan. Asimismo, es necesario que la empresa que desea evaluar sus riesgos se preocupe de planificar este proceso, brindando los tiempos y recursos necesarios para implementar los planes de respuesta y realizar un seguimiento

y control de los riesgos, a medida que la materialización del proyecto es realizada. Esto quiere decir que no basta con aplicar una evaluación de riesgos, sino que se necesita una gestión de estos.

Es normal que las constructoras y mandantes de proyectos de Centrales Hidroeléctricas se enfoquen netamente en los costos, plazos, seguridad, alcances y calidad de ésta. Sin embargo, a través de algunos de los riesgos identificados (por ejemplo: *Elección del contratista inapropiado, amenazas sindicales, malas relaciones con la comunidad, no encontrar mano de obra calificada, modificación en leyes laborales y personal inapropiado*), se desprende que existen otros aspectos que deben ser complementados con una correcta gestión de riesgos, con el fin de lograr una materialización del proyecto más exitosa. Dentro de éstos se puede considerar una gestión de comunicaciones (que incluya a todos los Stakeholders, sin dejar de lado a la mano de obra y a la comunidad cercana) y una gestión de contratos eficaces, además de considerar los efectos que pueden ocasionar sobre la construcción del proyecto, algunos cambios en las leyes.

A modo de proyecciones, se sugiere utilizar el registro de riesgos interiores al túnel, confeccionado en este Trabajo de Título, y realizar un análisis cuantitativo, con el fin de obtener una precisión mayor en los impactos que cada uno genera. Para esto, es necesario que el alumno u organización tengan acceso a información del control de la construcción de túneles en proyectos anteriores de obras hidráulicas, con el fin de utilizarla como datos estadísticos. En caso de aplicar los planes de respuesta aquí entregados o llevar a cabo una evaluación de riesgos más exhaustiva (generando sus respectivos planes de respuesta) para la construcción de túneles en una obra hidráulica en particular; se recomienda comparar sus resultados con proyectos anteriores, que no realizaron una evaluación de riesgos. Esto, con el fin de corroborar si efectivamente se obtienen mejores resultados al gestionar los riesgos.

7. GLOSARIO

- **Acciones correctivas:** Se realizan después de ocurrido un evento perjudicial, con el fin de reparar o restituir el daño realizado, sea tangible o no.
- **Acciones preventivas:** Se realizan antes de ocurrido un evento perjudicial, con el objetivo de prevenirlo.
- **Aceptación Activa:** Consiste en disponer contingencias de tiempo, dinero o recursos; necesarias para manejar los riesgos.
- **Aceptación Pasiva:** Sólo se documenta la estrategia y se revisan las amenazas periódicamente, respondiendo a los riesgos a medida que se presentan.
- **Bocatoma:** Obra que permite desviar del cauce, el caudal que se utilizará para la generación de electricidad. Incluye también, mecanismos de control para devolver los sedimentos al cauce. En caso de tratarse de una bocatoma profunda se capta agua de un embalse o lago.
- **Cabeza Escariadora:** Pieza que rota y posee discos de corte que fisuran la roca hasta superar su resistencia.
- **Contingencia:** Reserva de dinero que se deja para los riesgos conocidos (identificados y analizados) que no se pueden gestionar de forma proactiva.
- **Obras de Aducción:** Conducen el agua desde la bocatoma hasta las turbinas.
- **Plan para la dirección del proyecto:** Plan general que considera las distintas aristas del proyecto, tales como costos, tiempo, calidad, alcance, riesgos, recursos humanos, entre otras.
- **Qanats:** Canal subterráneo con una serie de pozos verticales de acceso, utilizados para el transporte de agua desde un acuífero bajo una colina hacia zonas desérticas. Fueron y aún son utilizados en Irán, desde tiempos antiguos.
- **Registro de Supuestos:** Documento en que se registran los supuestos tomados en cuenta para la gestión de riesgos. Puede ser incorporado al enunciado del alcance del proyecto o ser un documento independiente.

- **Reserva de gestión:** Reserva de dinero que se deja para los riesgos desconocidos, que no se pueden gestionar de manera proactiva.
- **Solicitudes de cambio:** Proceso para realizar un control integrado de cambios, cuando se identifican recomendaciones de variaciones en los recursos, actividades, estimaciones de costos, entre otros.
- **Stakeholders:** Individuo, grupo u organización que puede afectar, verse afectado o considerarse afectado por una decisión, actividad o resultado de un proyecto.
- **Umbral del Riesgo:** Límite bajo el cual una organización aceptará un riesgo y sobre el que no lo tolerará.

8. BIBLIOGRAFÍA

- AES Gener (s.f.). Proyecto Alto Maipo. Recuperado de: <http://www.altomaipo.com/proyecto-alto-maipo/Paginas/default.aspx>
- Al-Bahar, J., & Crandall, K. (1990). Systematic Risk Management Approach For Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(3), 533-546.
- AS/NZS. (2004). Risk Management (AS/NZS 4360:2004). Sydney, Australia & Wellington, New Zealand.
- Atlas Copco (s.f.). Atlas Copco. Recuperado de: <https://www.atlascopco.com/es-cl>
- Buchtik, L. (2012). Secretos para dominar la gestión de riesgos en proyectos. Paraguay: Buchtik Global.
- Choudhry, R. & Iqbal, K. (2013). Identification of Risk Management System in Construction Industry in Pakistan. *Journal of Management in Engineering*, 29(1), 42-49.
- Dirección General de Servicios Técnicos (2016a). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera: Métodos de Excavación. Recuperado de: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP07.pdf
- Dirección General de Servicios Técnicos (2016b). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera: Drenaje e Impermeabilización. Recuperado de: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP012.pdf
- Weissman, I. (28 de Noviembre de 2017). AES Gener pestaña primero y hace concesiones para salvar a Alto Maipo de la quiebra. *El Mostrador*. Recuperado de: <http://www.elmostrador.cl/mercados/2017/11/28/aes-gener-pestanea-primero-y-hace-concesiones-para-salvar-a-alto-maipo-de-la-quiebra/>
- El-Sayegh, S. (2008). Risk assessment and allocation in the UAE construction industry. *International Journal of Project Management*, 26, 431-438.

Eurohinca (s.f.). Tuneladoras. Recuperado de: <http://www.eurohinca.com/tuneladoras.html#>

E.T.S.E.C.C.P.B. (s.f.). Excavación con Máquinas Integrales: Topos y Escudos. Recuperado de: https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-01-28_04-0648114366.pdf

FERMA. (2003). Estándares de Gerencia de Riesgos. Bruselas, Bélgica.

Grängesberg Iron and Atlas Copco (s.f.). Scaletec UV2. Recuperado de: <http://news.cision.com/se/grangesberg-iron---atlas-copco/i/scaletec-uv2,c1246734>

GRN. (s.f.). Resolución de Calificación Ambiental RCA. Recuperado de: <http://www.grn.cl/permiso-ambiental-sectorial-pas/permiso-ambiental/resolucion-de-calificacion-ambiental-rca.html>

INN. (2012). Gestión del riesgo - Principios y orientaciones (NCh-ISO 31000). Santiago, Chile

INN. (2013). Gestión del riesgo - Técnicas de evaluación del riesgo (NCh-ISO 31010). Santiago, Chile.

ISO (s.f.). About us. Recuperado de: <https://www.iso.org/about-us.html>

ITA (s.f.). ABOUT TUNNELLING. Recuperado de: <http://tunnel.ita-aites.org/es/>

Macias, F.J. and Bruland, A. (2014). D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method. The 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2014), Vigo, Spain.

Nielsen, S. (2016). *Aplicación del Método de Monte Carlo para Programación de Túneles en Roca*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

PMI. (2007). Construction extension to the PMBOK® guide (3th ed.). Newtown Square, Pennsylvania: PMI Publications.

PMI. (2013). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®). Newton Square, Pennsylvania: PMI Publications.

- Pozo, J. (2017a). Excavación Convencional de Túneles en Roca (presentación de diapositivas para el curso CI5534-1 Construcción de Túneles, otoño 2017). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Pozo, J. (2017b). Excavación Mecanizada de Túneles en Suelo y Roca (presentación de diapositivas para el curso CI5534-1 Construcción de Túneles, otoño 2017). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Pozo, J. (2017c). Control del Agua: Drenaje e Impermeabilización (presentación de diapositivas para el curso CI5534-1 Construcción de Túneles, otoño 2017). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Serpell, A., Ferrada, X., Howard, R., and Rubio, L. (2014). Risk management in construction projects: a knowledge based approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 653-662.
- Servicio de Evaluación Ambiental (2008). Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo Exp. N°105. Recuperado de: <http://seia.sea.gob.cl/busqueda/buscarProyectoAction.php?nombre=Alto%20Maipo>
- Soto, P. (2004). Construcción de Túneles. Tesis para optar al Título de Constructor Civil. Escuela de Construcción Civil, Universidad Austral de Chile.
- Standards Australia (s.f.). What We Do. Recuperado de: <http://www.standards.org.au/OurOrganisation/AboutUs/Pages/default.aspx>
- Standards® New Zealand (2017). About us. Recuperado de: <https://www.standards.govt.nz/about-us/>
- Yepes, V. (2014). *Maquinaria para sondeos y perforaciones*. Apuntes de la Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

ANEXOS

En los anexos se presentan los riesgos determinados por cada entrevista, como se muestra en las siguientes tablas.

1) Entrevista 1 – Luis Uribe

Ingeniero Civil con 23 años de experiencia en el área de construcción de Centrales Hidroeléctricas. Dentro de su carrera profesional ha ocupado cargos de Ingeniero de Proyectos Hidroeléctricos, Director de Proyectos Hidroeléctricos y Jefe del área de Energías renovables no convencionales (ERNC).

Riesgos Identificados mediante entrevista a don Luis Uribe.

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
1	La incertidumbre en la información geológica del sector puede provocar problemas de seguridad al escoger soportes inapropiados, además de reducir los rendimientos previstos; lo que impacta en los costos y plazos estimados	Riesgo geológico	Geológico	Interior
2	Elegir a contratistas inapropiados puede traer una reducción del rendimiento a causa de su inexperiencia, lo que impacta en los costos y plazos	Elección del contratista inapropiado	Contratos	Interior
3	Encontrarse con fósiles podría generar una paralización de la obra, lo que impacta enormemente los plazos	Encontrar fósiles	Terreno	Interior
4	Cambios en condiciones climáticas podrían perjudicar la logística de la obra, impactando los plazos	Condición climática desfavorable	Climático	Exterior
5	La remoción en grandes masas y avalanchas pueden traer graves problemas de seguridad, además de perjudicar la logística de la obra, impactando los plazos	Remoción en grandes masas y avalanchas	Geológico	Exterior
6	La falta de mantención a los equipos de Perforación y Tronadura puede detener la obra de excavación, retrasando los plazos previstos	Falta de mantenimiento de equipos de construcción para utilizar el método de Perforación y Tronadura	Equipos y Maquinarias	Interior

Riesgos Identificados mediante entrevista a don Luis Uribe (*continuación*).

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
7	La falta de mantención a la TBM puede causar su falla y detención de la excavación, lo que impacta enormemente los plazos	Falta de mantenimiento de Tuneladoras	Equipos y Maquinarias	Interior
8	La falta de mantención de las máquinas rozadoras puede causar detención de la excavación y por lo tanto, impactar negativamente los plazos	Falta de mantenimiento de Rozadoras	Equipos y Maquinarias	Interior
9	El trato inadecuado de los trabajadores puede causar reclamaciones sindicales, impactando los plazos y por lo tanto, los costos de la obra	Amenaza sindical	Relaciones	Exterior
10	Falta de cumplimiento de la RCA puede producir paralización de la obra por parte del SERNAGEOMIN, impactando enormemente los plazos	Incumplimiento de lo previsto en la RCA	Administración	Interior
11	Malas relaciones con la comunidad cercana podrían producir altercados y quema de equipos, corte de caminos, apedreos, entre otros; lo que genera daños e imposibilidad de avanzar, impactando los costos y plazos	Malas relaciones con la comunidad	Relaciones	Exterior
12	El riesgo de erupciones volcánicas depende de la ubicación de la obra y podría traer problemas al detener los trabajos, impactando los plazos. Por otra parte, podría impactar en la pérdida total del avance	Riesgo volcánico	Fuerza mayor	Exterior
13	La crecida de los ríos podría producir el ingreso de agua a la obra, siempre que tenga ventanas de acceso a baja altura. Esto podría impactar negativamente los costos, calidad y plazos; al tener que sacar el agua, pudiendo producirse pérdidas en equipos, materiales y obra avanzada	Crecida de ríos	Hidrológico	Exterior
14	No encontrar mano de obra calificada podría disminuir los rendimientos de avance, impactando negativamente los plazos previstos	No encontrar mano de obra calificada	Mano de obra	Exterior

Riesgos Identificados mediante entrevista a don Luis Uribe (*continuación*).

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
15	Cambios en el diseño de los túneles a medida que se excava, por efecto de encontrar roca de mala calidad, podrían aumentar los costos y plazos estimados previamente	Cambios en el diseño del túnel	Diseño e Ingeniería	Interior
16	El no tener un buen equipo de geólogos que registre eficazmente la calidad de la roca a medida que avanza el frente de excavación, podría producir la instalación de soportes extremadamente conservadores, aumentando los costos	No tener buena clasificación de rocas a medida que se avanza en la excavación	Diseño e Ingeniería	Interior
17	Las modificaciones de leyes laborales podrían solicitar aumento de sueldo de trabajadores, aumentando los costos	Modificación en leyes laborales	Legales	Exterior

2) Entrevista 2 – Luis Pinilla

Ingeniero Civil con más de 45 años de experiencia en construcción y diseño de obras civiles; administración y dirección de construcciones; y docencia universitaria. Su especialidad principal son las obras subterráneas, represas y centrales hidroeléctricas. A lo largo de su trayectoria ha tenido a su cargo: diseños; planificación y control de diseños; y contratación y administración de contratos de construcción y adquisición de equipos de centrales hidroeléctricas.

Riesgos Identificados mediante entrevista a don Luis Pinilla.

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
1	La incertidumbre en la información geológica del terreno en donde se emplaza el túnel, podría modificar los rendimientos previstos, la cantidad y tipo de soporte a utilizar. Esto impacta en los plazos y costos estimados	Riesgo geológico	Geológico	Interior
2	No encontrar al personal adecuado y calificado para desempeñarse en la ejecución de la obra, podría traer problemas en su normal desarrollo, lo que impacta los costos, plazos, calidad, entre otros	No encontrar personal adecuado	Personal	Exterior

Riesgos Identificados mediante entrevista a don Luis Pinilla (*continuación*).

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
3	La ocurrencia de temporales, ya sea de lluvia o nieve, podría detener la obra y destruir algunas instalaciones, lo que impacta los plazos y costos.	Condición climática desfavorable	Climático	Exterior
4	La ocurrencia de filtraciones dentro del túnel podría inundar el frente de excavación, imposibilitando su avance, lo que impacta principalmente los plazos previstos.	Filtraciones	Hidrogeológico	Interior
5	La existencia de mucha sobrecarga sobre las rocas muy buenas que atraviesa el túnel, podría generar la explosión de estas, lo que impacta a la maquinaria y/o trabajadores, provocando daño de equipos y/o accidentes graves	Rock bursting	Geológico	Interior
6	Problemas de terreno y/o ejecución de la obra podrían producir accidentes de los trabajadores, generando incapacidad o daños graves, además de paralizar la obra. Esto impacta principalmente los plazos	Riesgo laboral	Seguridad	Interior
7	Al no cumplir lo previsto en la RCA, se podría paralizar la obra, impactando enormemente los plazos	Incumplimiento de lo previsto en la RCA	Administración	Interior

3) Entrevista 3 – Adolfo Ochoa

Ingeniero Civil con 39 años de experiencia profesional, especialmente en el rubro de Embalses y Centrales Hidroeléctricas. Dentro de su trayectoria ocupó cargos de administrador de contratos de construcción de obras civiles, obras subterráneas y montaje; en centrales hidroeléctricas. También, presenta experiencia en la construcción y montaje de plantas de tratamiento de aguas servidas, como también en la construcción de obras civiles y terminaciones de arquitectura en una de las líneas del metro de Santiago.

Riesgos identificados mediante la entrevista a don Adolfo Ochoa.

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
1	La presencia de bolsones de agua podría causar una filtración con un elevado caudal, inhabilitando el avance de la excavación y dañando parte de ésta	Riesgo hidrogeológico	Hidrogeológico	Interior
2	La incertidumbre en la información de la geología del sector puede reducir los rendimientos previstos, además de modificar la cantidad y tipo de soportes a utilizar; lo que impacta en los plazos y costos estimados, respectivamente.	Riesgo geológico	Geológico	Interior
3	El no tener la capacidad suficiente en las plantas de tratamiento de agua conlleva a que se devuelva sin tratamiento al cauce, por lo que se paraliza la obra, impactando en plazos y costos.	Riesgo medio ambiental	Diseño e Ingeniería	Interior
4	El riesgo de encontrar aguas ácidas y/o termales, y no tratarlas, podría provocar que paralicen la obra, impactando en plazos y costos.	Encontrar aguas ácidas y/o termales	Terreno	Interior
5	Contratista podría no cumplir lo definido en la RCA, en cuanto al acopio de marina, lo que podría provocar que paralicen la obra, impactando los plazos y costos	Riesgo por acopios de marina	Administración	Interior

Riesgos identificados mediante la entrevista a don Adolfo Ochoa (*continuación*).

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
6	La existencia de mucha sobrecarga sobre las rocas muy duras y cercanas al eje del túnel, podría generar la explosión de ellas, impactando maquinaria y/o trabajadores. Esto se traduce en daño de equipos y/o accidentes fatales	Rock bursting	Geológico	Interior
7	Malas relaciones con la comunidad cercana podrían producir altercados y quema de equipos, corte de caminos, apedreos, entre otros; lo que genera daños e imposibilidad de avanzar, impactando los costos y plazos	Reclamaciones de la comunidad	Relaciones	Exterior
8	La falta de competencia en la dirección de la construcción por parte del contratista, podría desenvolver una mala reacción ante situaciones adversas, impactando plazos y costos, así como todos los objetivos de la obra	Falta de competencia de la dirección de la construcción	Administración	Interior
9	Cambios en condiciones climáticas, ya sea temporales de lluvia o nieve, podrían inhabilitar el acceso al túnel o perjudicar la logística de la obra, impactando los plazos y costos	Riesgos de la naturaleza	Climático	Exterior

4) Entrevista 4 – Anónima

Riesgos identificados mediante la entrevista cuatro.

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
1	La inundación del túnel o frente de excavación podría generar pérdida de trabajo y daño de equipos, impactando en plazos y costos	Inundación	Hidrogeo.	Interior
2	Cambios en condiciones climáticas podrían perjudicar la logística de la obra, impactando los plazos y costos	Condiciones climáticas desfavorables	Climático	Exterior
3	Encontrarse con condiciones geológicas menos favorables que las previstas podría generar descensos en los rendimientos de excavación y costos extras por mayores cantidades de soportes, impactando los plazos y costos estimados.	Condiciones de roca desfavorables	Geológico	Interior
4	Las fallas geológicas, rocas permeables y lluvias fuertes; podrían generar ingreso de agua en túneles con pendientes elevadas, provocando inundación de equipos e impactos en los plazos y costos	Ingreso de agua al túnel	Geológico	Interior
5	Remociones en masa a lo largo de la ruta de acceso a la obra podrían interferirla, impactando en los plazos y costos, por efectos de inaccessión y reparaciones	Remoción en masa a lo largo de la ruta de acceso	Geológico	Exterior
6	Un terremoto durante la construcción podría paralizar la obra u ocasionar daños, impactando en los plazos y costos	Evento sísmico	Fuerza Mayor	Exterior
7	Cambios en el diseño podrían generar reclamaciones por parte del contratista, impactando en costos adicionales	Cambios de diseño	Diseño e Ingeniería	Interior
8	Disturbios sociales podrían parar la construcción, debido al bloqueo de las carreteras de acceso, impactando en los plazos	Disturbios sociales	Relaciones	Exterior
9	El desprendimiento de rocas al interior del túnel podría generar daño en equipos y paralización de la obra, impactando en los plazos y costos, debido a la reconstrucción de la sección del túnel, reposición de equipos dañados y limpieza de rocas	Desprendimiento de rocas	Geológico	Interior

Entrevista 5 - Juan Rioseco

Ingeniero Civil con 45 años de experiencia, especialmente en construcción de Centrales Hidroeléctricas y Termoeléctricas; tanto en el área de Inspección como en la de Construcción. Dentro de su trayectoria profesional ocupó cargos de Administración de Contratos de Construcción y Montaje, además de ser Administrador de Contratos de túneles por un tiempo.

Riesgos identificados mediante la entrevista a don Juan Rioseco.

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
1	La incertidumbre en la geología del terreno, así como la presencia de fallas e inundaciones, podrían afectar los rendimientos de avance en la excavación, aumentando los plazos y costos	Riesgos de la naturaleza	Geológico e Hidrogeológico	Interior
2	El incumplimiento de lo previsto en la RCA, en cuanto a los acopios del material extraído de la excavación, podría paralizar la obra, impactando negativamente a los plazos y costos	Incumplimiento de lo previsto en la RCA	Administración	Interior
3	Los errores en metodologías y procedimientos, como la colocación de sostenimientos, velocidad de avance adecuada, movilización de maquinaria y ventilación apropiada; podrían causar accidentes y la paralización de la obra, impactando en los plazos y costos	Riesgos de ejecución	Seguridad	Interior
4	Una carga excesiva en las rocas muy duras que están cercanas al eje del túnel, podría generar la explosión de ellas, lo que puede provocar daño de equipos y/o accidentes	Rock bursting	Geológico	Interior
5	El mal manejo de las aguas que salen del túnel durante la etapa de construcción podría provocar la paralización de la obra, impactando plazos y costos	Riesgo ambiental	Administración	Interior

Riesgos identificados mediante la entrevista a don Juan Rioseco (*continuación*).

N°	Descripción del Riesgo	Nombre del Riesgo	Categoría	Ext. / Int. al túnel
6	Generar mucho ruido por efectos de la tronadura, al trabajar cerca de una comunidad, podría traer reclamaciones y limitaciones en horarios de trabajo, lo que impacta los plazos y costos	Ruido por tronaduras	Legales	Interior
7	Los atrasos en los planos de diseño del túnel podrían incapacitar su construcción, impactando en los plazos y costos	Atrasos en planos de diseño	Diseño e Ingeniería	Interior