



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

GESTIÓN DE LOS IMPACTOS DE AGUAS ÁCIDAS DURANTE LA
CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE TÚNELES.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
MINERÍA

LEYLA CATERINE BECERRA CARREÑO

PROFESOR GUÍA:
JACQUES WIERTZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LINDA DANIELE
ANDREINA EVELIN GARCÍA GONZÁLEZ
LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA

SANTIAGO DE CHILE
2021

GESTIÓN DE LOS IMPACTOS DE AGUAS ÁCIDAS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE TÚNELES.

El drenaje ácido es un proceso natural o inducido por la construcción del túnel, debido a la oxidación de sulfuros que genera acidificación del agua y altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos. En el área de estudio, el túnel intercepta agua que ya presenta características de drenaje ácido por un proceso natural de meteorización de minerales sulfurados en superficie o en una formación permeable.

En este trabajo se identifican los impactos de las aguas ácidas en la estabilidad del túnel y en el medio ambiente durante la vida útil, con el fin de proponer medidas de prevención y control o alternativas para tratar las aguas del túnel minero del caso de estudio. Las aguas que salen del túnel son ácidas, de tipo sulfatadas cálcicas, con valores de pH inferiores a 5, con altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos, principalmente hierro, aluminio, manganeso, cobre, arsénico y zinc. Se utilizó la herramienta *ABATES V.1.41* desarrollada por Earth Systems para estimar la acidez total del drenaje a tratar, la carga de acidez y el porcentaje de error del balance de carga iónico.

Durante la construcción del túnel, el drenaje ácido está asociado a la meteorización de las marinas, fuera del túnel y se trata igual que cualquier botadero generador de drenaje ácido. En este caso, la roca es potencial generadora y al excavar o perforar el túnel queda expuesta a la meteorización. Al interior del túnel, la presencia de aguas ácidas oxida los pernos, la malla, los marcos metálicos y deteriora el shotcrete, por esta razón es necesario seleccionar materiales resistentes a la corrosión en toda la vida útil del túnel. Se propone la instalación de pernos de fibra de vidrio que no se corroen con las aguas ácidas, la instalación de mallas electrosoldadas fabricadas con acero de carbono de alta resistencia y el empleo de shotcrete fabricados con cementos que tengan alta resistencia a los sulfatos. Para gestionar el agua, se propone la perforación y habilitación de drenes horizontales con tubería de PVC. Respecto al tratamiento del drenaje ácido del túnel durante la operación, se plantean dos alternativas de tratamiento pasivo y una alternativa de tratamiento activo. La primera alternativa consiste en un pozo de desviación de caliza seguido de una balsa de decantación. La segunda alternativa es un canal de aireación, seguido de un sistema sucesivo de producción de alcalinidad (SAPS) con una balsa de decantación y un lecho de lixiviación de caliza (LLB). La tercera alternativa es la neutralización con cal hidratada mediante el proceso de lodos de alta densidad (HDS).

Finalmente, la medida de cierre propuesta para un túnel con pendiente del 5% y con una alta carga hidráulica es la instalación de un tapón de hormigón de alta resistencia (UCS de 50 MPa) con drenaje permanente de agua. Los resultados obtenidos del dimensionamiento muestran que se requiere una longitud del tapón de 39 m para soportar una carga estática de 550 m, una longitud del tapón de 42 m para soportar una carga hidráulica total de 590,28 m y una la longitud del tapón para el contacto concreto/roca con inyección de 6 m. Otra opción viable es la instalación de varios tapones intermedios para distribuir la presión total a lo largo del túnel y evitar el tratamiento de agua a perpetuidad.

MANAGEMENT OF THE IMPACTS OF ACID WATER DURING CONSTRUCTION, OPERATION AND CLOSURE OF TUNNELS.

Acid drainage is a natural process or induced by the construction of the tunnel, due to the oxidation of sulphides that generates acidification of the water and high concentrations of sulphates and dissolved metals. In the study area, the tunnel intercepts water that already has acid drainage characteristics due to a natural weathering process of sulphide minerals on the surface or in a permeable formation.

In this work, the impacts of acidic waters on the stability of the tunnel and on the environment during its useful life are identified, in order to propose prevention and control measures or alternatives to treat the waters of the mining tunnel in the case study. The waters that come out of the tunnel are acidic, of the calcium sulphate type, with pH values below 5, with high concentrations of sulphates and dissolved metals, mainly iron, aluminum, manganese, copper, arsenic and zinc. The ABATES V.1.41 tool developed by Earth Systems was used to estimate the total acidity of the drainage to be treated, the acidity load and the percentage error of the ionic load balance.

During tunnel construction, acid drainage is associated with weathering of the marinas outside the tunnel and is treated the same as any acid drainage generating dump. In this case, the rock is a potential generator and when excavating or drilling the tunnel it is exposed to weathering. Inside the tunnel, the presence of acidic water oxidizes the bolts, the mesh, the metal frames and deteriorates the shotcrete, for this reason it is necessary to select materials resistant to corrosion throughout the useful life of the tunnel. The installation of fiberglass bolts that do not corrode with acidic waters, the installation of electrowelded meshes made of high-strength carbon steel and the use of shotcrete made with cements that have high resistance to sulfates are proposed. To manage the water, it is proposed to drill and enable horizontal drains with PVC pipe. Regarding the treatment of acid tunnel drainage during the operation, two passive treatment alternatives and an active treatment alternative are proposed. The first alternative consists of a limestone diversion pit followed by a settling basin. The second alternative is an aeration channel, followed by a successive alkalinity production system (SAPS) with a settling basin and a limestone leaching bed (LLB). The third alternative is neutralization with hydrated lime using the high-density sludge (HDS) process.

Finally, the closure measure proposed for a tunnel with a 5% slope and with a high hydraulic loading is the installation of a high-strength concrete plug (UCS of 50 MPa) with permanent water drainage. The results obtained from the sizing show that a plug length of 39 m is required to support a static loading of 550 m, a plug length of 42 m to support a total hydraulic loading of 590.28 m and a plug length for the concrete/rock contact with injection of 6 m. Another viable option is the installation of several intermediate plugs to distribute the total pressure throughout the tunnel and avoid water treatment in perpetuity.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su compañía.

A mi esposo por todo su apoyo y amor incondicional.

A mi familia por motivarme para lograr mis metas.

A Jacques Wiertz por su comprensión, dedicación, colaboración y sus aportes durante la tesis.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Definición del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances.....	3
1.5. Metodología.....	3
1.5.1. Recopilación y revisión de antecedentes de túneles mineros con presencia de aguas ácidas	3
1.5.2. Revisión de la información disponible del caso de estudio	3
1.5.3. Análisis e interpretación de datos estadísticos del agua del túnel y del arroyo.....	4
1.5.4. Identificación de los impactos de las aguas ácidas tanto en la estabilidad del túnel como en el medio ambiente durante la vida útil del túnel y definición de medidas y alternativas de tratamiento	4
2. ANTECEDENTES	7
2.1. Casos internacionales de túneles mineros con presencia de aguas ácidas	7
2.1.1. Caso N°1: Túnel Argo.....	7
2.1.2. Caso N°2: Túnel Koehler.....	13
2.1.3. Caso N°3: Túnel Kingsmill.....	19
2.2. Casos nacionales de túneles mineros con presencia de aguas ácidas	29
2.2.1. Caso N°1: Adit 71	29
2.2.2. Caso N°2: Túneles de exploración y drenaje de la mina Chuquicamata	32
3. MARCO TEÓRICO	33
3.1. Generación de Aguas Ácidas	33
3.1.1. Conceptos Generales.....	33
3.1.2. Reacciones de Generación	33
3.1.3. Reacciones de Oxidación.....	34
3.1.4. Reacciones de Neutralización	34
3.1.5. Etapas en el desarrollo del drenaje ácido	37
3.1.6. Factores que controlan el drenaje ácido	40
3.1.7. Características del drenaje ácido	47
3.1.8. Posibles impactos del drenaje ácido	47
3.2. Gestión del Agua en Túneles	48
3.2.1. Drenaje de túneles	50
3.2.2. Aguas de contacto.....	51
3.2.3. Intercepción de aguas de contacto túnel.....	51
3.3. Gestión y tratamiento de efluentes	51
3.4. Normas de emisión de efluentes	51
3.5. Control del agua de infiltración antes de la impermeabilización	53
3.6. Impermeabilización de túneles	53
3.6.1. Tipos de impermeabilización de un túnel	54
3.6.2. Sistemas de Impermeabilización.....	57
4. IMPACTOS DE LAS AGUAS ÁCIDAS EN TÚNELES MINEROS.....	60
4.1. Ocurrencia del drenaje ácido.....	60
4.2. Programa de caracterización específico para túneles	60

4.2.1. Caracterización Geotécnica	60
4.3. Programa de Predicción	63
4.4. Modelo Hidrogeológico	66
4.4.1. Estudio Hidrológico	67
4.4.2. Estudio Hidrogeoquímico	67
4.4.3. Estudio Hidrogeológico	68
5. CASO DE ESTUDIO	70
5.1. Antecedentes del Túnel	70
5.2. Descripción General	70
5.3. Clima	72
5.4. Análisis de variables meteorológicas	74
5.5. Geología	86
5.6. Hidrogeología	86
5.6.1. Caudales	87
5.6.2. Niveles	88
5.7. Geomorfología	89
5.8. Glaciares	89
5.9. Suelos.....	89
5.10. Fauna	90
5.11. Flora	90
5.12. Línea base del arroyo	90
5.13. Resultados de Análisis Físicoquímicos.....	93
5.13.1. Calidad del agua del túnel	93
5.13.2. Calidad del agua del arroyo.....	95
5.14. Resultados del balance iónico	96
5.15. Análisis de Resultados	97
5.16. Construcción del túnel	104
5.16.1. Identificación de los aspectos ambientales asociados	104
5.16.2. Control de aguas ácidas en el interior túnel	106
5.16.3. Fortificación del túnel	106
5.17. Gestión de aguas ácidas durante la operación del túnel	107
5.17.1. Tratamiento pasivo de las aguas del túnel	107
5.17.2. Propuesta pozo de desviación de caliza con balsa de decantación.....	109
5.17.3. Propuesta Canal de aireación con SAPS, balsa de decantación y LLB	114
5.18. Tratamiento activo del drenaje del túnel	123
5.18.1. Tratamiento mediante neutralización con cal hidratada	123
5.19. Cierre del Túnel	134
5.19.1. Marco Regulatorio	134
5.19.2. Clausura de accesos.....	135
5.19.3. Identificación de los aspectos ambientales asociados	135
5.19.4. Tapones	136
5.20. Diseño del tapón propuesto	139
5.20.1. Tapón de lados paralelos	139
5.20.2. Parámetros de Diseño.....	140
5.21. Dimensionamiento del Tapón	142
5.21.1. Diseño por Corte	143
5.21.2. Fracturamiento hidráulico	147
5.21.3. Gradiente hidráulico permitido.....	148
5.21.4. Filtración permitida	150

5.21.5. Mecanismos físicoquímicos a largo plazo	152
5.22. Instrumentación	152
6. CONCLUSIONES	153
7. RECOMENDACIONES	155
8. BIBLIOGRAFÍA	156
9. ANEXO A	171
9.1. Gráficos de parámetros físicoquímicos de calidad del agua.....	171

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 5.1 Cálculo del Error del balance iónico	96
Ecuación 5.2 Error del balance iónico calculado	96
Ecuación 5.3 Cálculo del Tiempo de Residencia	112
Ecuación 5.4 Cálculo del área total de la balsa	113
Ecuación 5.5 Cálculo del volumen del canal	117
Ecuación 5.6 Cálculo del Área de sección transversal del flujo.....	117
Ecuación 5.7 Cálculo de la carga de acidez a tratar	118
Ecuación 5.8 Cálculo del área del SAPS	118
Ecuación 5.9 Cálculo del tiempo de residencia del SAPS.....	120
Ecuación 5.10 Cálculo de cobertura de roca mínima	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Efluente del Túnel Argo	7
Figura 2.2 Ubicación de los Túneles Argo y Big Five	8
Figura 2.3 Efluentes del Túnel Big Five y del Cañón de Virginia.....	10
Figura 2.4 Esquema del sistema PLB portátil.....	11
Figura 2.5 Tapón instalado en el Túnel Argo.....	12
Figura 2.6 Túnel Koehler	13
Figura 2.7 Mapa de localización del Túnel Koehler.....	13
Figura 2.8 Portal del Túnel Koehler	14
Figura 2.9 Efluente del Túnel Koehler	14
Figura 2.10 Poza con drenaje ácido de mina del Túnel Koehler	15
Figura 2.11 Tapón instalado en el Túnel Koehler.....	16
Figura 2.12 Esquema con las filtraciones al interior del Túnel Koehler	16
Figura 2.13 Ubicación de pozos perforados y lechados alrededor del tapón	17
Figura 2.14 Ubicación del Pozo A3A.....	18
Figura 2.15 Portal del Túnel Kingsmill.....	19
Figura 2.16 Ubicación del Túnel Kingsmill	20
Figura 2.17 Canal con efluente del Túnel Kingsmill	20
Figura 2.18 Confluencia del Río Yauli (izquierda) con el Río Mantaro (derecha).....	21
Figura 2.19 Mapa Geológico del Túnel Kingsmill	22
Figura 2.20 Mapa de unidades hidrogeológicas del Túnel Kingsmill.....	22
Figura 2.21 Perfil del Túnel Kingsmill	23
Figura 2.22 Río Yauli contaminado por aguas ácidas del Túnel Kingsmill	24
Figura 2.23 Planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill	25
Figura 2.24 Proceso de lodos de alta densidad	26
Figura 2.25 Diseño de la planta de tratamiento HDS	27
Figura 2.26 Vista satelital de la planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill.....	27
Figura 2.27 Aguas del Túnel Kingsmill post-tratamiento	28
Figura 2.28 Punto de muestreo en el Adit 71	29
Figura 2.29 Cuneta de conducción de drenaje ácido del Adit 71	29
Figura 2.30 Precipitados de hidróxido férrico en el drenaje de El Teniente	30
Figura 2.31 Flujograma y esquema del tratamiento propuesto	31
Figura 3.1 Tampones típicos y su pH en un sistema ARD	35
Figura 3.2 Etapas en la generación del drenaje ácido	38
Figura 3.3 Factores para la formación del drenaje ácido de roca.....	40
Figura 3.4 Factores que controlan el drenaje ácido	40
Figura 3.5 Esquema de formación de minerales secundarios en el drenaje ácido de mina	44
Figura 3.6 Animales acuáticos y plantas afectados por el drenaje ácido	48
Figura 3.7 Gestión del agua conceptual en túneles mineros durante la Operación y Post-Cierre	49
Figura 3.8 Partes de un túnel	49
Figura 3.9 Tubos de drenaje (laterales en color azul) y colector principal (central en color azul) en túnel excavado con P & T	50
Figura 3.10 Membranas drenantes color café	54
Figura 3.11 Detalle para terrenos duros	55
Figura 3.12 Detalle para terrenos quebradizos	55

Figura 3.13 Detalle en el caso de terrenos blandos	56
Figura 3.14 Ubicación del sistema de impermeabilización en túneles	57
Figura 3.15 Sistema de Impermeabilización de un túnel excavado con P&T	58
Figura 3.16 Vista de perfil del tubo de drenaje	58
Figura 3.17 Sistema FlexoDrain	59
Figura 4.1 Estabilidad de las rocas de falla en un túnel	61
Figura 5.1 Túnel-Correa	70
Figura 5.2 Localización del Túnel.....	71
Figura 5.3 Portal del túnel en su condición de cierre temporal.....	71
Figura 5.4 Portal del túnel	72
Figura 5.5 Tipos de Clima de la Región de Atacama según clasificación de Köppen ...	73
Figura 5.6 Acumulación de nieve sobre el portal.....	73
Figura 5.7 Ubicación de la Estación Frontera.....	74
Figura 5.8 Promedio mensual de nieve acumulada	85
Figura 5.9 Perfil geológico del túnel	86
Figura 5.10 Variación del nivel freático entre 2007 y 2013.....	88
Figura 5.11 Dirección de la escorrentía de los glaciares en la cuenca.....	89
Figura 5.12 Variación temporal del caudal	97
Figura 5.13 Variación temporal del pH	97
Figura 5.14 Conductividad eléctrica vs Tiempo.....	98
Figura 5.15 Sólidos disueltos totales vs Tiempo	99
Figura 5.16 Concentraciones de sulfatos vs Tiempo.....	99
Figura 5.17 Concentraciones de Hierro vs Tiempo	100
Figura 5.18 Concentraciones de Aluminio Total vs Tiempo	101
Figura 5.19 Concentraciones de Manganeso Total vs Tiempo	101
Figura 5.20 Concentraciones de Cobre Total vs Tiempo	102
Figura 5.21 Concentraciones de Zinc Total vs Tiempo	103
Figura 5.22 Concentraciones de Arsénico Total vs Tiempo	103
Figura 5.23 Marinas expuestas a la meteorización	104
Figura 5.24 Tanque de mezcla vertical	105
Figura 5.25 Perno de fibra de vidrio	106
Figura 5.26 Malla electrosoldada	107
Figura 5.27 Dimensiones del pozo de desviación de caliza	109
Figura 5.28 Esquema del pozo de desviación de caliza.....	110
Figura 5.29 Vista real de un pozo de desviación de caliza.....	110
Figura 5.30 Pozos de desviación para tratamiento de aguas ácidas	111
Figura 5.31 Esquema de la balsa de decantación propuesta.....	113
Figura 5.32 Canal de aireación en cascada basado en la gravedad.....	115
Figura 5.33 Canal de aireación escalonado	116
Figura 5.34 Un dispositivo de aireación comercial de 15 HP	116
Figura 5.35 Tuberías en el fondo del SAPS	119
Figura 5.36 Esquema de un SAPS.....	119
Figura 5.37 Construcción de un SAPS.....	120
Figura 5.38 Esquema de un LLB.....	122
Figura 5.39 Lecho de Lixiviación de Caliza	122
Figura 5.40 Efecto del pH sobre la solubilidad de los iones metálicos (acuosos) en equilibrio con su correspondiente especie de hidróxido metálico (sólido)	126
Figura 5.41 Proceso de lodos de alta densidad (HDS)	129
Figura 5.42 Diagrama simplificado del proceso HDS	129

Figura 5.43 Exigencias del plan de cierre	134
Figura 5.44 Cierre sólido del portal del túnel	135
Figura 5.45 Tipos de Tapones.....	137
Figura 5.46 Tapón de concreto reforzado en túnel en labor horizontal para altas presiones de agua	138
Figura 5.47 Ubicación del tapón de hormigón en un túnel inclinado	138
Figura 5.48 Tapón de lados paralelos	140
Figura 5.49 Tapón de hormigón con tubería de drenaje	143
Figura 5.50 Diagrama de cargas para el diseño por corte	144
Figura 5.51 Diagrama del diseño por corte	144
Figura 5.52 Esquema del criterio Noruego para el confinamiento de flujos de agua presurizados sin revestimiento	147
Figura 5.53 Sensores e instrumentos instalados en tapones.....	152
Figura 9.1 Concentraciones de Níquel Total vs Tiempo.....	171
Figura 9.2 Concentraciones de Boro Total vs Tiempo	171
Figura 9.3 Concentraciones de Cobalto Total vs Tiempo.....	172
Figura 9.4 Concentraciones de Sodio Total vs Tiempo.....	172
Figura 9.5 Concentraciones de Magnesio Total vs Tiempo	173
Figura 9.6 Concentraciones de Potasio Total vs Tiempo	173
Figura 9.7 Concentraciones de Calcio Total vs Tiempo	174
Figura 9.8 Concentraciones de Flúor vs Tiempo.....	174
Figura 9.9 Concentraciones de Nitratos vs Tiempo.....	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características del drenaje a tratar.....	8
Tabla 2.2 Características del drenaje del Túnel Koehler.....	15
Tabla 2.3 Características del drenaje del Túnel Kingsmill.....	25
Tabla 2.4 Características del drenaje del Adit 71.....	30
Tabla 3.1 Reactividad relativa en la capacidad de neutralización de ácidos de los minerales.....	37
Tabla 3.2 Factores que controlan la generación y migración del drenaje ácido.....	41
Tabla 3.3 Potencial de neutralización (PN) según el tipo de yacimiento.....	43
Tabla 3.4 Sulfuros con la cantidad de protones liberados.....	43
Tabla 3.5 Principales minerales secundarios formados por drenaje ácido.....	45
Tabla 3.6 Resistencia de sulfuros a la meteorización.....	45
Tabla 3.7 Composición típica del drenaje minero según el tipo de yacimiento.....	46
Tabla 3.8 Límites máximos permitidos según el D.S. N°90/2000.....	52
Tabla 4.1 Clases de Macizo Rocoso según el RMR.....	61
Tabla 5.1 Coordenadas de la Estación Frontera.....	74
Tabla 5.2 Precipitación mensual máxima.....	75
Tabla 5.3 Velocidad del viento mensual.....	76
Tabla 5.4 Humedad relativa mensual.....	77
Tabla 5.5 Presión atmosférica mensual.....	78
Tabla 5.6 Temperatura mensual.....	79
Tabla 5.7 Radiación solar mensual.....	80
Tabla 5.8 Evapotranspiración mensual.....	81
Tabla 5.9 Datos anuales registrados en la Estación Frontera.....	82
Tabla 5.10 Niveles medidos en 2007.....	88
Tabla 5.11 Niveles medidos durante el periodo 2007-2013.....	88
Tabla 5.12 Parámetros de línea base en zona superior del arroyo.....	91
Tabla 5.13 Parámetros de línea base en zona inferior del arroyo.....	92
Tabla 5.14 Características del efluente del túnel.....	93
Tabla 5.15 Resultados Calidad del agua del túnel.....	94
Tabla 5.16 Resultados calidad del agua del arroyo.....	95
Tabla 5.17 Resultados del balance iónico estimado.....	96
Tabla 5.18 Valores de error admisible para valores de conductividad eléctrica del agua.....	96
Tabla 5.19 Parámetros operacionales de los sistemas de tratamiento con base en las características del drenaje.....	107
Tabla 5.20 Sistemas de tratamiento pasivo del drenaje ácido.....	108
Tabla 5.21 Parámetros del drenaje a tratar para el Escenario 1.....	108
Tabla 5.22 Caudal del drenaje para el Escenario 1.....	108
Tabla 5.23 Acidez y carga de acidez del drenaje para el Escenario 1.....	109
Tabla 5.24 Características del drenaje requerido para un tratamiento pasivo exitoso usando un pozo de desviación de caliza.....	109
Tabla 5.25 Propiedades químicas de la Caliza.....	111
Tabla 5.26 Características de la Caliza.....	111
Tabla 5.27 Dimensionamiento del pozo de desviación de caliza.....	111
Tabla 5.28 Requerimiento total de caliza.....	112
Tabla 5.29 Datos usados para calcular el tiempo de residencia.....	112
Tabla 5.30 Tiempo de Residencia calculado en el pozo de desviación.....	112

Tabla 5.31 Datos utilizados para el dimensionamiento de la balsa de decantación.....	113
Tabla 5.32 Dimensiones de la balsa de decantación	113
Tabla 5.33 Parámetros del drenaje a tratar para el Escenario 2	114
Tabla 5.34 Caudal del drenaje para el Escenario 2.....	114
Tabla 5.35 Acidez y carga de acidez del drenaje para el Escenario 2	114
Tabla 5.36 Parámetros para el dimensionamiento del canal.....	117
Tabla 5.37 Diseño del canal de aireación	117
Tabla 5.38 Criterios de descarga según el D.S N°90/2000	118
Tabla 5.39 Cálculos de carga de acidez a tratar en el SAPS	118
Tabla 5.40 Datos usados para calcular el tiempo de residencia	119
Tabla 5.41 Tiempos de residencia calculados para el SAPS	120
Tabla 5.42 Volúmenes calculados para el SAPS	121
Tabla 5.43 Dimensiones de la balsa de decantación	121
Tabla 5.44 Parámetros del drenaje a tratar para el Escenario 3	123
Tabla 5.45 Caudal del drenaje para el Escenario 3.....	123
Tabla 5.46 Acidez y carga de acidez del drenaje para el Escenario 3	123
Tabla 5.47 Propiedades químicas de la cal hidratada.....	123
Tabla 5.48 Características de la cal hidratada	124
Tabla 5.49 Requerimiento total de cal hidratada.....	124
Tabla 5.50 Orden de precipitación de metales en ácidos diluidos con aumento del pH.....	125
Tabla 5.51 pH teórico y la solubilidad mínima de algunos hidróxidos metálicos	125
Tabla 5.52 Pesos moleculares y concentraciones de metales.....	126
Tabla 5.53 Pesos moleculares de Hidróxidos metálicos	127
Tabla 5.54 Lodo total generado por precipitación de hidróxidos metálicos	127
Tabla 5.55 Lodo total generado por precipitación de yeso	128
Tabla 5.56. Lodo total generado.....	128
Tabla 5.57. Comparación condiciones de diseño.....	130
Tabla 5.58. Comparación funcional.....	130
Tabla 5.59. Comparación en eficiencia	130
Tabla 5.60. Comparación en mantenimiento.....	131
Tabla 5.61. Comparación económica.....	131
Tabla 5.62. Ventajas	132
Tabla 5.63. Limitaciones	133
Tabla 5.64. Criterios para el diseño de tapones permanentes	141
Tabla 5.65. Resistencia al corte y gradientes hidráulicos de diseño para tapones de túneles.....	142
Tabla 5.66. Parámetros de diseño del tapón de lados paralelos.....	143
Tabla 5.67 Longitud del tapón para carga estática.....	145
Tabla 5.68 Rangos de Aceleración sísmica	146
Tabla 5.69 Longitud del tapón para carga dinámica.....	146
Tabla 5.70 Fracturamiento Hidráulico	148
Tabla 5.71 Gradiente hidráulico permitido sin lechada.....	149
Tabla 5.72 Rango de presión de lechada objetivo	149
Tabla 5.73 Resultados de dimensionamiento del tapón.....	150
Tabla 5.74 Gradientes de presión máximos recomendados	151
Tabla 5.75 Longitud del tapón calculada según gradientes de presión máximos recomendados.....	151
Tabla 5.76 Longitud del tapón calculada en el contacto concreto/roca sin inyección...	151

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio busca determinar los impactos de las aguas ácidas en túneles mineros, proponer medidas de prevención, control y alternativas de tratamiento durante la construcción, operación y cierre del túnel. El drenaje ácido se genera inicialmente cuando la pirita (FeS_2) u otros sulfuros generadores de ácido se exponen al oxígeno y al agua y se oxidan (Watkins, 2007), produciendo acidez, altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos. La generación de drenaje ácido en túneles mineros se produce por la interacción de las aguas meteóricas (lluvia o nieve) y/o subterráneas con abundante pirita diseminada presente en las rocas de los yacimientos, las cuales quedan expuestas durante la excavación del túnel. Durante la vida útil de un túnel minero, la presencia de aguas ácidas puede afectar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (particularmente acuíferos poco profundos), impactando al medio ambiente y alterando la disponibilidad de agua para uso agrícola y/o humano. Por otra parte, a través de las fracturas y fallas del macizo rocoso ingresan aguas ácidas que dificultan el avance, poniendo en riesgo la seguridad de las personas. Las aguas ácidas también corroen los pernos, la malla, los marcos metálicos y deteriora el hormigón proyectado, impactando la estabilidad del túnel a mediano y largo plazo.

A nivel Internacional, existen túneles mineros con presencia de aguas ácidas como el caso del Túnel Argo en Idaho Springs, Colorado, Estados Unidos, el Túnel Koehler en el Distrito Minero Red Mountain, Colorado, Estados Unidos y el Túnel Kingsmill en Distrito Minero Morocoha, Región de Junín, Perú. A nivel Nacional, también existen túneles mineros con aguas ácidas como el caso del Adit 71 de la mina El Teniente y los Túneles de exploración y drenaje de la mina Chuquicamata. En los 3 casos internacionales y en el Adit 71, la gestión del drenaje ácido no se abordó de forma preventiva ni proactiva desde las etapas iniciales del ciclo de vida útil del túnel, ocasionando graves impactos ambientales. En este trabajo de grado, se analizará un caso de estudio de un túnel minero con presencia de aguas ácidas ubicado en la frontera entre Chile y Argentina.

Entre los distintos estudios revisados, se destacan dos relacionados con la presencia de drenaje ácido en túneles mineros, el primero titulado *“Determinación y Mitigación del potencial de generación ácido en botaderos de estériles Mina del Proyecto Desarrollo Teniente, División El Teniente, Codelco-Chile”* realizado por (Morales, 2003). En este estudio, se demostró que existe potencial de generación ácido en las rocas presentes en los desarrollos de los túneles de acceso y ventilación de los proyectos Reservas Norte y Diablo-Regimiento y determinó los posibles impactos de depositar marinas a la intemperie, y el segundo estudio titulado *“Caracterización Geotécnica y Estructural de la Rampa de Exploración y del Túnel de Drenaje, Mina Chuquicamata”* realizado por (Aguilar, 2008). En este estudio, se concluyó que entre 3 y 5 años desde la ejecución de los túneles, en zonas con afloramientos de aguas ácidas, se observa oxidación de pernos y malla.

1.1. Definición del problema

El drenaje ácido es un problema ambiental que requiere medidas para asegurar la predicción, prevención y corrección de sus potencialmente graves impactos asociados. Los túneles mineros son fuentes potencialmente generadoras de drenajes ácidos por la interacción de aguas meteóricas (lluvia y/o nieve) y/o subterráneas con abundante pirita diseminada presente en las rocas de los yacimientos. Durante la excavación del túnel minero, se generan marinas que contienen pirita, las cuales quedan expuestas a la meteorización y pueden producir drenajes ácidos e infiltración, afectando la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas (particularmente acuíferos poco profundos) del área, e incluso, en toda la cuenca. Adicionalmente, el túnel intercepta acuíferos secundarios que contienen agua naturalmente ácida almacenada en zonas muy fracturadas y en zonas de falla del macizo rocoso, el agua circula por las fracturas hasta ingresar al túnel, aflora en la bóveda y/o hastiales del túnel y alcanza altos caudales que deben gestionarse y tratarse durante la construcción, operación y cierre. Con el tiempo, la presencia de aguas ácidas daña el sostenimiento del túnel, causando problemas de corrosión en pernos, malla, marcos metálicos y deterioro del hormigón proyectado.

1.2. Justificación

Este estudio se realizará teniendo en cuenta la importancia de predecir, prevenir, tratar y controlar el drenaje ácido presente en túneles mineros. El agua que circula por las fracturas puede producir reacciones químicas y modificar la composición del agua y geotécnicamente, afecta la estabilidad de las excavaciones. El drenaje ácido puede tener impactos en la estabilidad del túnel debido a los efectos corrosivos del agua ácida en la infraestructura del túnel. Además, el drenaje ácido tiene un potencial significativo para causar impactos ambientales a largo plazo debido a la alteración de la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas, lo cual perjudica a las comunidades locales, ya que no pueden utilizar estos recursos hídricos para su propio consumo o para el riego de cultivos.

Con esta propuesta se identificarán los impactos de las aguas ácidas en el medio ambiente y en la estabilidad del túnel, con el fin de proponer medidas de prevención, control y alternativas de tratamiento para su gestión durante la construcción, operación y cierre del túnel, comprendiendo que la generación de aguas ácidas es un tema complejo que ocurre de forma natural o antropogénica y por esta razón, es necesario prevenir y controlar este tipo de problemáticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar los impactos de las aguas ácidas durante la construcción, operación y cierre del túnel y proponer soluciones para asegurar la estabilidad y el control ambiental.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar y analizar el impacto de las aguas ácidas en la estabilidad del túnel del caso de estudio y proponer medidas para asegurar la integridad de las obras.
- Determinar el impacto de las aguas ácidas en el medio ambiente.
- Proponer una solución para la prevención, control y tratamiento del drenaje ácido antes de la descarga y fuera del túnel del caso de estudio.

1.4. Alcances

- Se determinarán los impactos del drenaje ácido tanto en la estabilidad del túnel minero como al medio ambiente durante toda su vida útil.
- La caracterización del drenaje se realizará con base a la información disponible del caso de estudio para analizar y proponer una solución específica aplicable en este contexto.

1.5. Metodología

1.5.1. Recopilación y revisión de antecedentes de túneles mineros con presencia de aguas ácidas.

Se recopiló información sobre la gestión de aguas ácidas en túneles y se analizaron 3 casos internacionales y 2 casos nacionales de túneles mineros con presencia de aguas ácidas y las alternativas de tratamiento aplicadas.

1.5.2. Revisión de la información disponible del caso de estudio.

Se hizo una revisión de la siguiente información:

- Base de datos de análisis fisicoquímicos del agua del túnel del periodo comprendido entre el 3 de enero de 2014 y el 11 de enero de 2016 y de los análisis fisicoquímicos de agua del arroyo del periodo comprendido entre el 17 de enero de 2013 y el 1 de diciembre de 2015.
- Base de datos de la Línea base hidroquímica de la estación ubicada en la zona superior del arroyo del periodo comprendido entre diciembre de 1998 y diciembre de 2003 junto con los datos de la Línea base hidroquímica en la estación ubicada en la zona inferior del arroyo del periodo comprendido entre mayo de 1999 y enero de 2004.
- Caudales medidos en el portal del del túnel.
- Niveles de agua medidos por Golder Associates en el año 2007 (antes de la construcción del túnel) y durante el periodo comprendido entre los años 2012 y 2013 (en etapa de construcción del túnel).
- Datos meteorológicos registrados en la Estación Frontera durante el periodo 2012-2018.
- Informes sobre la Geomorfología, Geología e Hidrogeología de la zona de estudio.

1.5.3. Análisis e interpretación de datos estadísticos del agua del túnel y del arroyo.

Con base en los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se realizó un análisis de datos estadísticos para obtener los valores mínimos, máximos y promedio de los parámetros fisicoquímicos indicadores de drenaje ácido, con el fin de realizar una caracterización hidroquímica y determinar la calidad del agua del túnel y del arroyo.

1.5.4. Identificación de los impactos de las aguas ácidas tanto en la estabilidad del túnel como en el medio ambiente durante la vida útil del túnel y definición de medidas y alternativas de tratamiento.

Se identificaron los potenciales impactos ambientales asociados a la estabilidad química durante la construcción, operación y cierre del túnel para definir medidas de prevención y control o proponer alternativas de tratamiento a largo plazo.

1.5.4.1. Etapa de Construcción

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Las especificaciones técnicas de materiales, recomendaciones, pruebas y normativas para la fortificación de túneles disponibles en el mercado a nivel nacional. La fortificación se realiza utilizando la combinación de pernos, malla y shotcrete. Los criterios de fortificación se definen con base en la calidad geotécnica del macizo rocoso durante el avance del túnel.
- Las especificaciones técnicas de materiales, recomendaciones, pruebas y normativas para los sistemas de impermeabilización de túneles disponibles en el mercado a nivel nacional. La impermeabilización se realiza utilizando pre-inyección de cementos ultra finos, tubos de drenaje, instalación de capas de geotextil y membranas de PVC. La selección del sistema de impermeabilización dependerá de los flujos de agua, del nivel freático y de la calidad del macizo rocoso.
- La tesis de pregrado de la Universidad de Chile titulada “*Caracterización Geotécnica y Estructural de la Rampa de Exploración y del Túnel de Drenaje, Mina Chuquicamata*” realizada por Juan Carlos Mario Aguilar Aguilera en 2008. En esta tesis, se concluye que transcurridos entre 3 y 5 años desde la ejecución de los túneles, se mantienen buenas condiciones de estabilidad, observándose puntualmente la oxidación de los pernos sistemáticos y malla tejida, en zonas con afloramientos de aguas ácidas, con pH entre 3 y 5.
- La caracterización de las fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero y las fichas de técnicas instrumentales, análisis y test empleados en la predicción del potencial de generación del drenaje minero, presentados en el Anexo 1 de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras, elaborada por Fundación Chile y el Servicio Nacional de Geología y Minería en 2015.

- Las medidas, los procedimientos y las tecnologías que se utilizan actualmente en la industria minera a gran escala para el manejo y control del drenaje ácido generado por las minas expuestas a la meteorización.

1.5.4.2. Etapa de Operación

Se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Los sistemas de tratamiento de drenaje ácido pasivos y activos con base al documento del Centro Australiano de Investigación y Extensión de Minerales titulado *“A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD)”* realizado por Jeff Taylor, Sophie Pape y Nigel Murphy en 2005 para obtener los parámetros operacionales de los sistemas de tratamiento y las características del drenaje ácido requerido para tratamientos pasivos.
- Los factores de diseño para tratamientos pasivos y el diagrama de flujo para seleccionar un sistema de tratamiento pasivo basado en la química y el flujo del agua (adaptado de Hedin et al, 1994) presentados en el documento titulado *“Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment”* realizado por Jeff Skousen, Carl E. Zipper, Arthur Rose, Paul F. Ziemkiewicz, Robert Nairn, Louis M. McDonald y Robert L. Kleinmann en 2017.
- La tesis de pregrado de la Universidad Católica de Valparaíso titulada *“Tratamientos de drenaje ácido de minas, División El Teniente-Codelco Chile”*, realizada por Ricardo Pérez Peters en 2008, en la que propone un sistema de tratamiento pasivo para tratar las aguas ácidas del Adit 71 ubicado en el Nivel teniente 7 de la mina subterránea El Teniente. La alternativa propuesta por el autor consiste en un SAPS (sistema productor de alcalinidad sucesiva), seguido de una balsa de oxidación y un humedal aeróbico. Me basé en esta tesis específicamente para realizar el dimensionamiento del SAPS de mi propuesta.
- Las fichas de tecnologías de tratamiento pasivo y activo del drenaje ácido, presentadas en el *“Catastro de Medidas y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero”* elaborado por Fundación Chile para el Servicio Nacional de Geología y Minería en 2015.
- Se utilizó el estimador de acidez *ABATES V.1.41* de Earth Systems para calcular las concentraciones de acidez, las cargas de acidez del drenaje a tratar y el porcentaje de error del balance de carga iónico.

1.5.4.3. Etapa de Cierre

Se consideraron los siguientes aspectos:

- La Ley N° 20.551 promulgada en 2011 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, obliga a las empresas mineras a presentar un plan de cierre que asegure la estabilidad física y química en el largo plazo de todas las instalaciones mineras. Además, obliga a las compañías mineras a provisionar los fondos requeridos para garantizar el desarrollo de las actividades comprometidas en dicho plan. La estabilidad química se refiere

principalmente a los flujos de drenajes e infiltraciones que se pueden producir desde los diferentes depósitos de residuos o en las mismas excavaciones y labores subterráneas. La Ley N° 20.551 y su Reglamento aprobado en 2012, definen la Estabilidad Química como una *“situación de control en agua, aire y suelo, de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una faena minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua con los residuos generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y rípios de lixiviación”*. Según la *“Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras”* elaborada por Fundación Chile y el Servicio Nacional de Geología y Minería en 2015, una instalación minera se encuentra estable químicamente cuando, en su interacción con los factores ambientales, no genera impactos que impliquen un riesgo significativo para la salud de las personas y/o para el medio ambiente.

- Los parámetros de diseño, los factores de seguridad y las ecuaciones para dimensionar la longitud del tapón de lados paralelos con base en la *“Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras”* del Ministerio de Energía y Minas del Perú, elaborada en 2007.
- El documento del Centro Australiano de Geomecánica titulado *“The design and construction of water impounding plugs using sprayed concrete”* realizado por (Singh, Abraham, Bellamy & Swart, 2012). Dicho documento se tomó como referencia para realizar los cálculos del tapón de lados paralelos.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se describen 3 casos internacionales y 2 casos nacionales de túneles mineros con presencia de aguas ácidas y los tratamientos aplicados.

2.1. Casos internacionales de túneles mineros con presencia de aguas ácidas.

2.1.1. Caso N°1: Túnel Argo.

País: Estados Unidos.

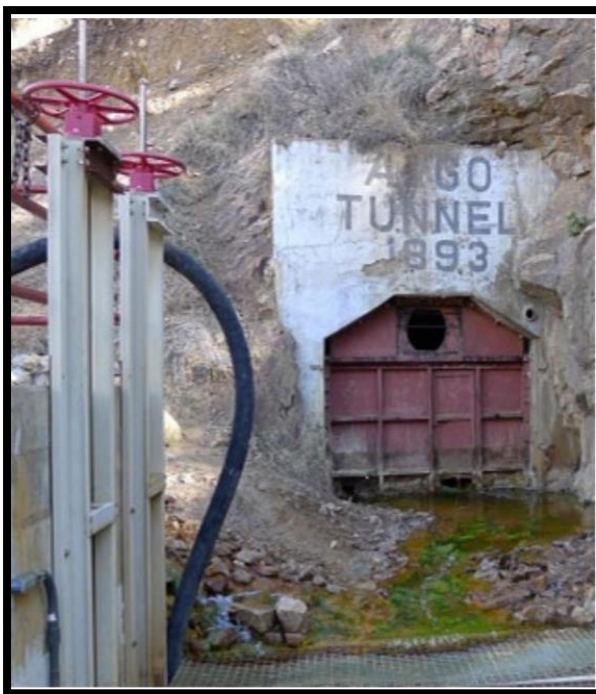


Figura 2.1 Efluente del Túnel Argo.

Fuente: (Colorado Department of Public Health and Environment, 2015).

2.1.1.1. Ubicación

El Túnel Argo está ubicado en Idaho Springs, Condado de Clear Creek, Colorado, a una altura aproximada de 2300 m s.n.m.

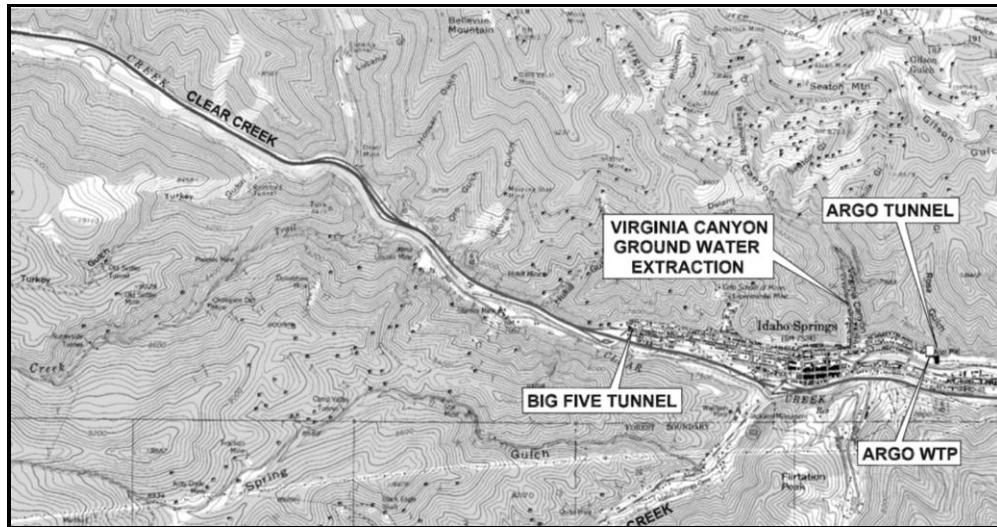


Figura 2.2 Ubicación de los Túneles Argo y Big Five.

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2007).

El túnel Argo tiene 6,7 Km de longitud y fue construido entre 1893 y 1910 con una pendiente del 1,5% para el drenaje y transporte de mineral desde Nevadaville hasta Idaho Springs. El túnel drenó el agua de varias labores mineras y permitió el acarreo de mineral hasta la planta Argo. Las litologías en los alrededores del túnel son Esquistos Precámbricos, Gneis y Granitos.

2.1.1.2. Problemática

El Túnel Argo drena agua ácida con valores de pH entre 2 y 3, cargada de sulfatos (2690 mg/L) y metales disueltos que se liberan diariamente a una tasa promedio de 19 L/s directamente al arroyo Clear Creek y a sus tributarios. Cuando este drenaje ácido ingresa a los arroyos y ríos, es tóxico para los peces y otras formas de vida acuática. El túnel tiene un historial de eventos que liberaron agua ácida cargada de metales al medio ambiente, contaminando las aguas subterráneas y superficiales, peces y vida acuática.

Tabla 2.1 Características del drenaje a tratar.

Parámetro	Unidades	Túnel Argo	Túnel Big Five	Cañón de Virginia
Flujo Promedio	L/s	12,62-28,39	0,95-2,52	0,32-11,36
pH	u.e.	3,00	5,50	3,00
Hierro	mg/L	120,00	65,00	3,00
Aluminio	mg/L	20,00	5,00	80,00
Manganeso	mg/L	90,00	30,00	90,00
Zinc	mg/L	40,00	8,00	92,00
Cobre	mg/L	4,00	1,00	9,00

Todos los valores son aproximados, basados en datos históricos.

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2007).

2.1.1.3. Receptores potenciales

El agua superficial y en menor grado, el agua subterránea. Específicamente, el tramo del arroyo Clear Creek desde el Túnel Argo hasta la ciudad de Golden, Colorado que se utiliza para fines recreativos pues, es un lugar para practicar kayak, rafting, pesca, observación de vida silvestre y búsqueda de oro. El arroyo Clear Creek también es una fuente de agua potable para Golden y una parte de los habitantes de Denver. Por lo tanto, el peligro para la salud humana implica una posible exposición a metales pesados, principalmente plomo, arsénico y cadmio.

2.1.1.4. Recursos impactados

El arroyo Clear Creek, particularmente North Fork de Clear Creek. Los impactos ambientales más importantes afectan el sistema de arroyos de Clear Creek, la vida y hábitats acuáticos. El zinc, el cobre, el cadmio y el manganeso se encuentran en las aguas superficiales y afectan a las truchas, los insectos acuáticos y otros organismos. La toxicidad del efluente del Túnel Argo impidió el desarrollo de recursos acuáticos desde el punto donde la descarga ingresó al arroyo Clear Creek hasta Golden.

2.1.1.5. Tratamiento aplicado

El drenaje ácido del túnel se trata en una planta. La planta de tratamiento de agua del Túnel Argo se diseñó originalmente para utilizar hidróxido de sodio como reactivo neutralizante. El proceso de tratamiento pudo eliminar más del 99,9% de los contaminantes metálicos mediante el tratamiento a un pH de 9,9. El pH del tratamiento se determinó por la necesidad de eliminar el manganeso, sin dejar de eliminar otros metales a bajas concentraciones. La planta de tratamiento comenzó a operar en abril de 1998, tratando el efluente del Túnel Argo. En 2004, el proceso de tratamiento se modificó para usar cal hidratada como reactivo neutralizante, debido a que la cal es más económica que el hidróxido de sodio. Con la cal hidratada, el sistema de tratamiento es capaz de eliminar más del 99,9% de los contaminantes metálicos, principalmente Hierro, Aluminio, Cobre, Manganeso y Zinc. Sin embargo, el pH del tratamiento tuvo que aumentarse a 10,1 debido a la menor velocidad de reacción de la cal. Los lodos contienen aproximadamente entre un 15% y 20% de sólidos y se desechan en un vertedero municipal. El Estado de Colorado y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos operan la planta de cal convencional para tratar hasta 44,17 L/s de drenaje ácido de mina del Túnel Argo. En 2006, la planta de tratamiento Argo también empezó a tratar el agua subterránea del Cañón de Virginia y del Túnel Big Five (Figura 2.3). Después de 10 años de operación, el Estado de Colorado se hizo responsable del 100% de los costos de la planta de tratamiento de agua del Túnel Argo. El agua tratada se descarga al arroyo Clear Creek.

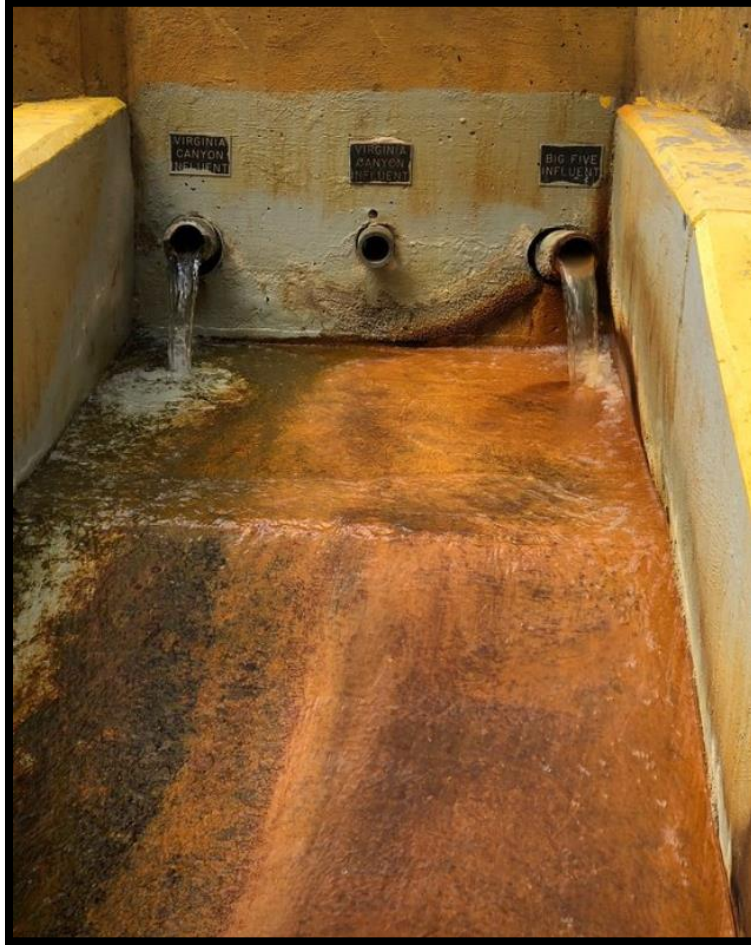


Figura 2.3 Efluentes del Túnel Big Five y del Cañón de Virginia.

Fuente: (Argo Mill and Tunnel (Idaho Springs), 2019).

Además, un tratamiento piloto fue operado y estudiado periódicamente desde 2004 hasta 2007 por el Centro de Ciencias de Leetown del Servicio Geológico de los Estados Unidos (INAP, 2012). El piloto utilizó un sistema de tratamiento de lecho de caliza pulsada (Pulsed Limestone Bed, PLB por sus siglas en Inglés). Se trataron hasta 3,8 L/s usando caliza y dióxido de carbono. Se agrega un polímero en una dosis baja (2-3 ppm) para efectuar la floculación (Sibrell et al., 2005). La solución se desborda en un clarificador de láminas de alta velocidad donde los sólidos caen al fondo del tanque y el agua clarificada fluye por la parte superior. Después de un ajuste final del pH a neutral, el agua tratada se descargó al arroyo Clear Creek.

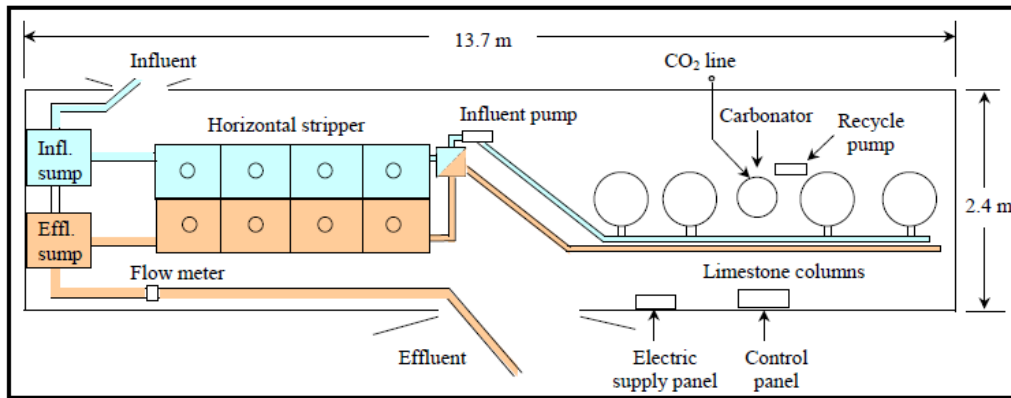


Figura 2.4 Esquema del sistema PLB portátil.

Fuente: (Sibrell, Wildeman, Friemuth, Chambers & Bless, 2005).

El sistema de tratamiento con PLB aumentó el pH del agua de 3,2 a 7,3. La alcalinidad se incrementó de indetectable a 210 mg/L como CaCO₃, dependiendo de las condiciones de operación. La eliminación de metales dependía del pH del agua y varió en más del 98% para el hierro y el aluminio, del 50%-99% para el cobre, del 5%-65% para el zinc y menos del 10% para el manganeso (Sibrell et al., 2005). Aunque el proceso produjo agua con alcalinidad neta, el efluente del proceso requirió post-tratamiento con cal para elevar el pH lo suficientemente alto como para eliminar el zinc y el manganeso a niveles descargables (Sibrell et al., 2005). Las pruebas post-tratamiento a escala piloto con cal mostraron que el lodo del PLB se asentaba más rápido y producía volúmenes de lodo que representaban el 60% del tratamiento solo con cal (INAP, 2012).

Las actualizaciones recientes convirtieron el proceso de cal convencional de la planta de tratamiento en un proceso de lodos de alta densidad (HDS). El proceso es más eficiente para eliminar metales del agua, lo que resulta en una torta de filtración más densa, menos material enviado a los vertederos y ahorros en costos. (Departamento de Salud Pública y Medio Ambiente de Colorado, 2015).

Por último, en agosto de 2015, se instaló un tapón de hormigón en el túnel (Figura 2.5) para controlar el flujo hacia la planta de tratamiento. Se instaló una tubería a través del tapón para que los operadores de la planta de tratamiento puedan regular el flujo y controlar los niveles de agua.

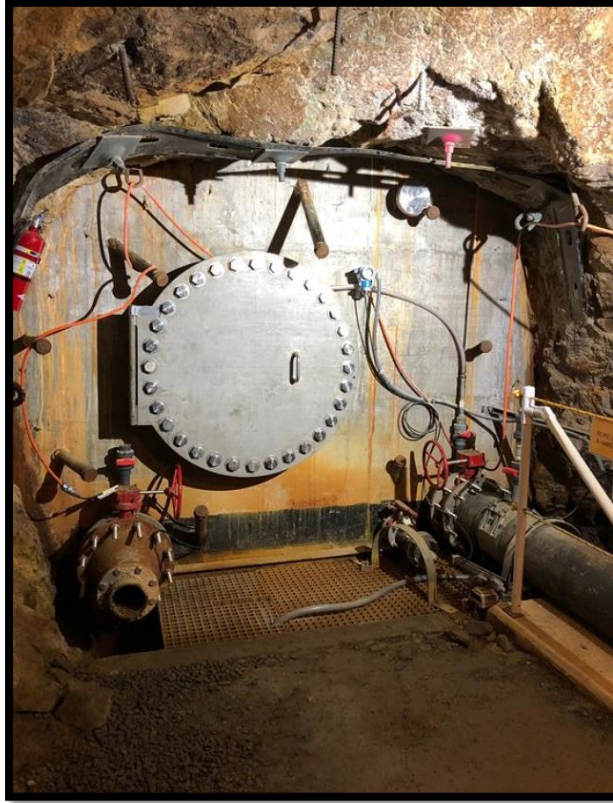


Figura 2.5 Tapón instalado en el Túnel Argo.

Fuente: (Argo Mill and Tunnel (Idaho Springs), 2019).

2.1.1.6. Resultados

El tratamiento de las descargas de los Túneles Argo y Big Five, así como el agua subterránea del Cañón de Virginia, ha mejorado significativamente la calidad del agua del arroyo Clear Creek, que actualmente permite una pesca de trucha marrón. En general, las poblaciones de truchas aguas abajo de Idaho Springs han mejorado.

2.1.2. Caso N°2: Túnel Koehler

País: Estados Unidos.



Figura 2.6 Túnel Koehler.

Fuente: (Google, 2013).

2.1.2.1. Ubicación

El Túnel Koehler está ubicado en la Mina San Antonio, en el Distrito Minero Red Mountain, Condado de San Juan, Colorado, al sur de Red Mountain Pass, a una altura de 3420 m s.n.m (Figura 2.7).

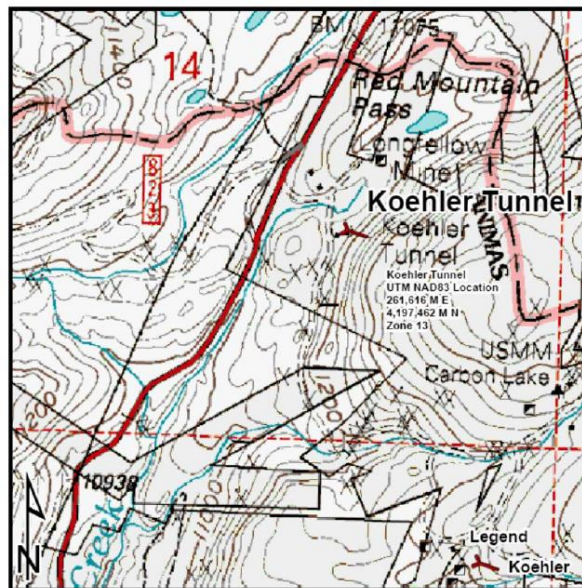


Figura 2.7 Mapa de localización del Túnel Koehler.

Fuente: (Colorado Division of Reclamation, Mining, & Safety).

El Túnel Koehler es un túnel de transporte de mineral para acceder a las brechas y al complejo de vetas Carbon Lake altamente mineralizadas a 609,6 m del portal (Figura 2.8).



Figura 2.8 Portal del Túnel Koehler.

Fuente: (Colorado Department of Natural Resources, 2020).



Figura 2.9 Efluente del Túnel Koehler.

Fuente: (Romeo, 2016).

2.1.2.2. Problemática

El Túnel Koehler descargó drenaje ácido de mina (Figura 2.9) con un flujo entre 0,6 y 4,2 L/s (U.S. Geological Survey, 1995) al arroyo Mineral Creek y al Río Animas.



Figura 2.10 Poza con drenaje ácido de mina del Túnel Koehler.

Fuente: (Cavello, 2019).

El drenaje del túnel es ácido y con altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos.

Tabla 2.2 Características del drenaje del Túnel Koehler.

Parámetros	Valor	Unidades
pH	2,50	u.e.
CE	3415,00	μS/cm
Sulfatos	2710,00	mg/L
Hierro	590,00	mg/L
Aluminio	70,85	mg/L
Manganeso	22,00	mg/L
Cobre	79,85	mg/L
Zinc	192,50	mg/L

Fuente: (U.S. Geological Survey, 1995).

2.1.2.3. Receptores Potenciales

El arroyo Mineral Creek y el Río Animas.

2.1.2.4. Medida implementada

En 2003, Sunnyside Gold Corporation instaló un tapón de hormigón en el túnel (Figura 2.12) para controlar la descarga de drenaje ácido y reducir la carga de metales al arroyo Mineral Creek.



Figura 2.11 Tapón instalado en el Túnel Koehler.

Fuente: (Colorado Department of Natural Resources, 2020).

En 2009, la División de Recuperación, Minería y Seguridad de Colorado realizó un informe hidrogeológico del túnel, el cual indicó que había una filtración alrededor del tapón de aproximadamente 0,4 L/s de agua ácida con pH 3 y altas concentraciones de metales.

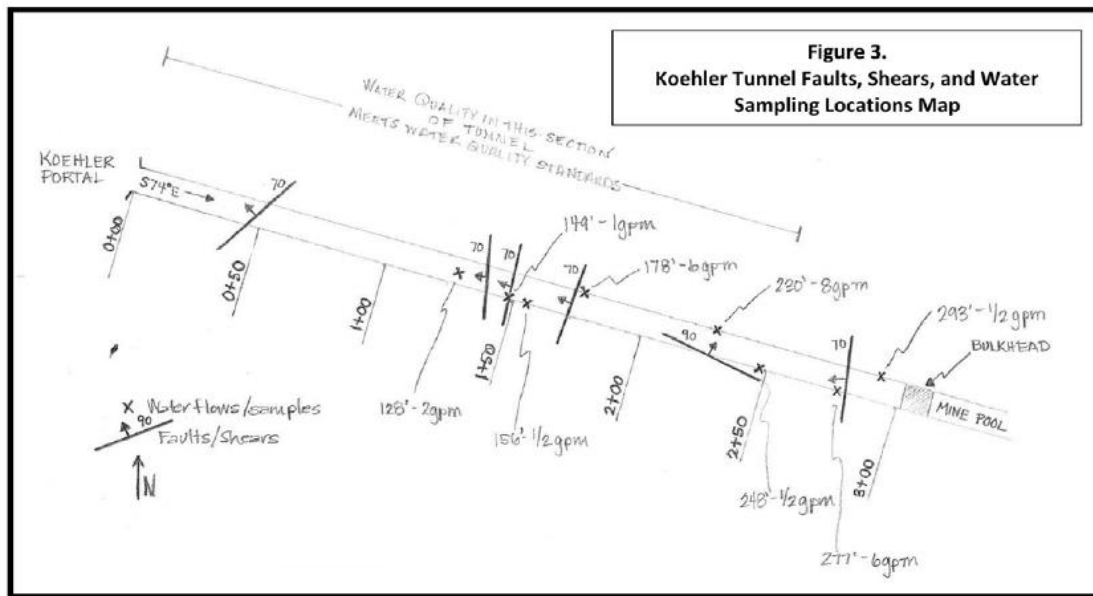


Figura 2.12 Esquema con las filtraciones al interior del Túnel Koehler.

Fuente: (Colorado Department of Natural Resources, 2020).

El 19 de agosto de 2011, WLH Construction comenzó la perforación de pozos y la inyección de lechada de cemento microfino para sellar las fracturas del macizo rocoso alrededor del tapón del Túnel Koehler (Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety).

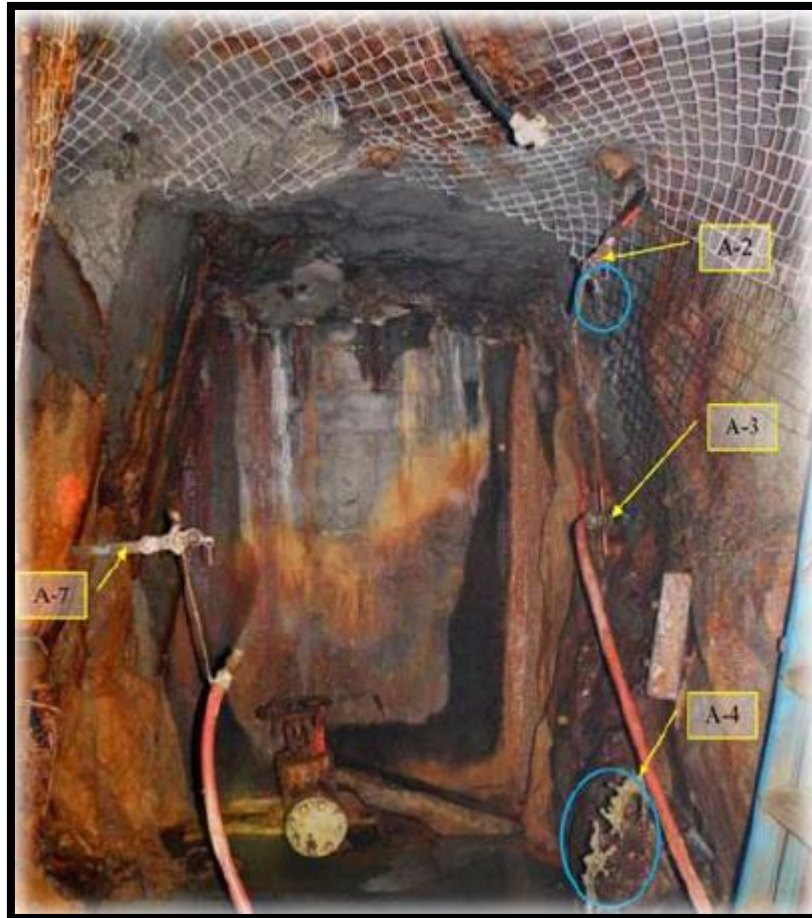


Figura 2.13 Ubicación de pozos perforados y lechados alrededor del tapón.

Fuente: (Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety).

El pozo A-3 intersectó una zona portadora de agua con pH 3, de 0,3048 m de espesor, a una profundidad de 5,2 m, que produjo 1,9 L/s (Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety). El pozo A-3 estaba conectado con la piscina de la mina y requirió una gran cantidad de lechada, por lo tanto, se perforó un pozo adicional A3A, paralelo a A3 para intersectar la misma zona con agua.

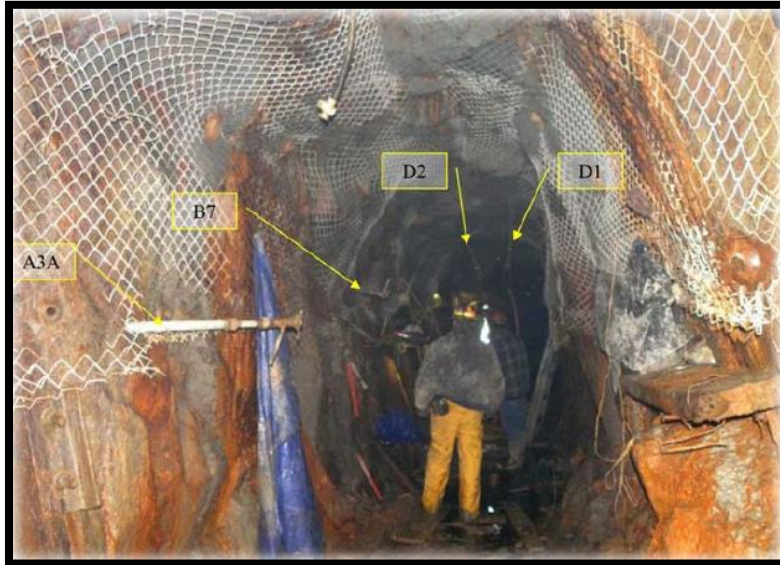


Figura 2.14 Ubicación del Pozo A3A.

Fuente: (Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety).

El pozo A3A se rellenó con cemento Portland tradicional, pero A3A continuó filtrando de 0,13 L/s a 0,19 L/s de agua de pH 3. Por consiguiente, WLH Construction volvió a lechar el pozo con lechada hidroactiva (Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety).

2.1.2.5. Resultados

La perforación y la lechada redujeron la filtración alrededor del tapón. El tapón ha sido eficaz para mejorar la calidad del agua en el arroyo Mineral Creek.

2.1.3. Caso N°3: Túnel Kingsmill

País: Perú.

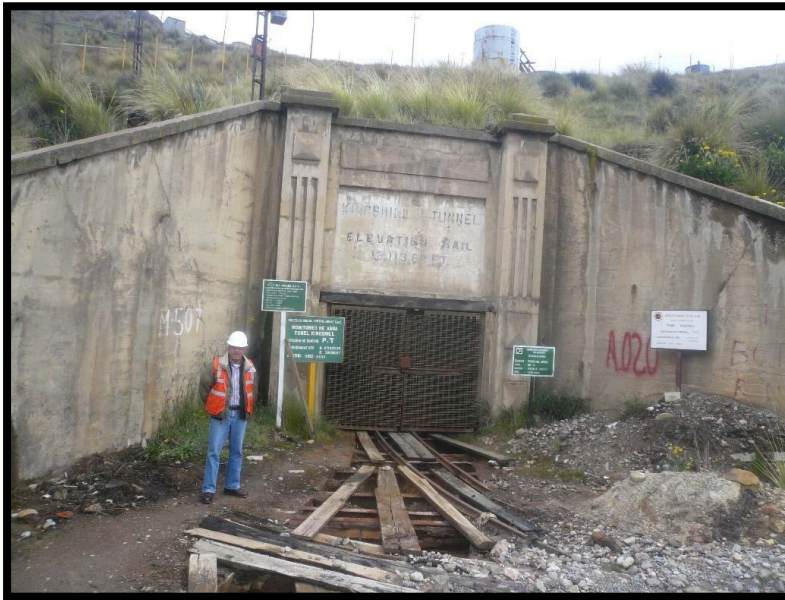


Figura 2.15 Portal del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Minera Perú Copper, 2008).

El túnel Kingsmill se encuentra a 500 metros de profundidad y tiene 11,5 kilómetros de largo, 3 m de ancho y 3,40 m de alto. El portal del túnel es de hormigón (Figura 2.15). El túnel sirve a la Compañía Minera del Estado Centromin Perú S.A, y a dos empresas privadas relativamente pequeñas. Actualmente, el agua proveniente del Túnel Kingsmill abastece a la planta concentradora de la Unidad Minera Toromocho.

2.1.3.1. Ubicación

El Túnel está ubicado en la Provincia de Yauli, Distrito Minero Morococha, Región de Junín, Perú (Figura 2.16). Su recorrido empieza en Morococha, atraviesa el distrito y las comunidades de Pucará y Yauli hasta desembocar en el Río Yauli, al que vierte el drenaje ácido a razón de 1100 L/s desde hace más de 70 años (Minera Chinalco Perú S.A, 2009).

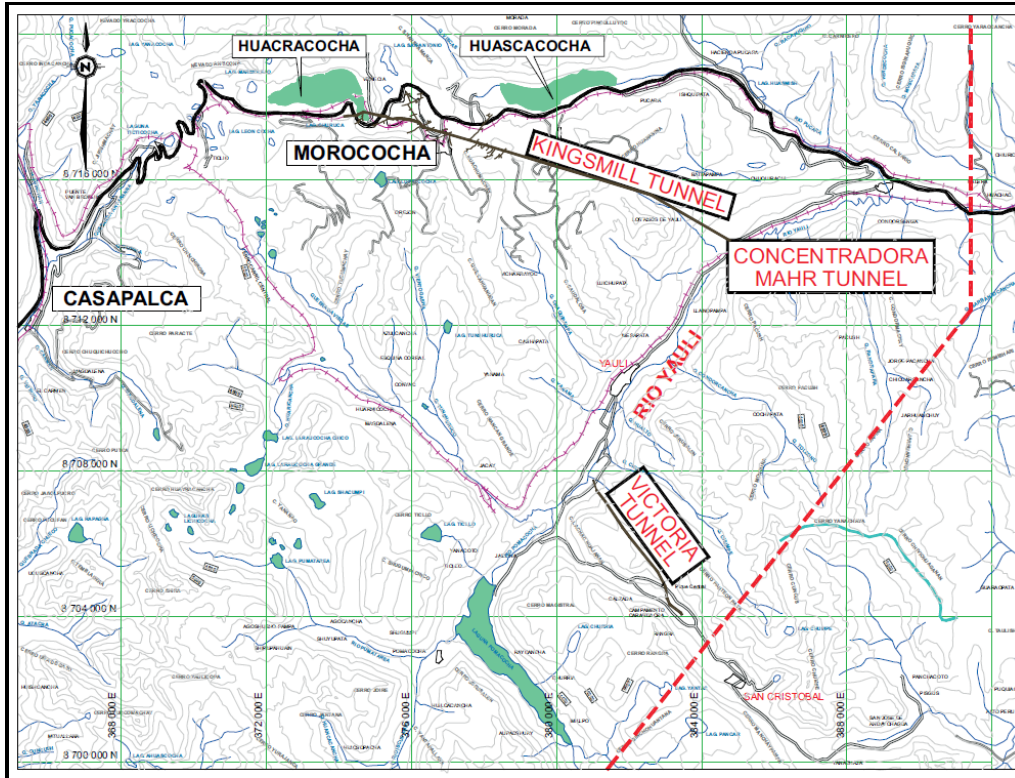


Figura 2.16 Ubicación del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Kuyucak, Chávez, Rosa del Castillo & Ruiz, 2003).

El Túnel Kingsmill fue construido entre 1929 y 1934 por la compañía Cerro de Pasco Corporation para drenar las galerías subterráneas del distrito minero de Morococha y así evitar que se inunden. Este túnel transporta el agua que es interceptada por la actividad minera subterránea, descargándola, mediante un canal, al Río Yauli, en la localidad de Mahr Túnel (Walsh Perú S.A, 2020).



Figura 2.17 Canal con efluente del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Cuadrado & Ollero, 2011).

El canal de 1,2 m de profundidad (Figura 2.17) pasa por el pueblo de Morococha y descarga aguas ácidas al Río Yauli, que posteriormente desemboca en el Río Mantaro (Figura 2.18), fuente de irrigación agrícola en el Valle.

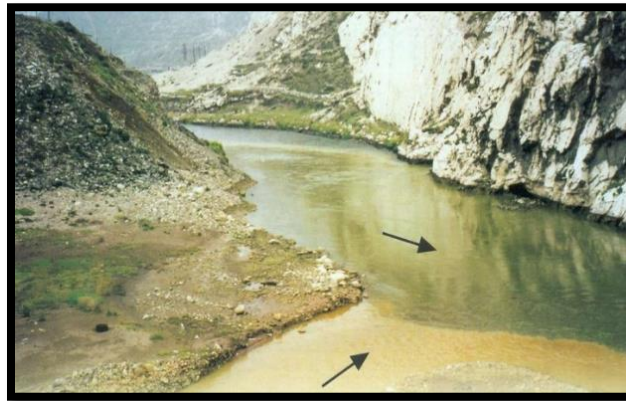


Figura 2.18 Confluencia del Río Yauli (izquierda) con el Río Mantaro (derecha).

Fuente: (Cuadrado & Ollero, 2011).

2.1.3.2. Hidrogeología

En el área, se encuentran tres cuerpos de agua principales que incluyen las Lagunas de Huacracocha, Huascacocha y Pomacocha.

El núcleo del yacimiento en el área está formado por filitas del Grupo Excelsior, seguido por rocas volcánicas de la Formación Catalina y los flujos de lava de dacita y andesita que cruzan el Túnel Kingsmill. Estas rocas están superpuestas por calizas de la Formación Pucará que están compuestas por capas intercaladas de calizas, tobas, shales bituminosos y cherts seguidas por el Grupo Goyllarisquizca. El Grupo Goyllarisquizca está representado por una secuencia de un conglomerado rojo, seguido de areniscas y lutitas rojas, capas de cuarcitas y areniscas grises, intercaladas con flujos de lava o diques de diabasa y basalto. Las rocas sedimentarias más permeables actúan como un acuífero y permiten que el agua superficial fluya sobre la orilla del Río Yauli, que posteriormente se infiltra en el Túnel Kingsmill. El agua se infiltra por las vetas y fallas. El 80% del agua que fluye a través del Túnel Kingsmill proviene de la zona de Morococha donde las excavaciones mineras subterráneas, fracturas y fallas conectadas facilitan el flujo de agua proveniente de la superficie hacia el túnel. El resto del agua fluye a través del lecho rocoso (Kuyucak, Chávez, del Castillo & Ruiz, 2003).

En la Figura 2.20 se observa que las unidades hidrogeológicas predominantes en la traza del túnel son los acuíferos con permeabilidad secundaria por fracturamiento y las formaciones metamórficas con permeabilidad secundaria por fisuramiento.

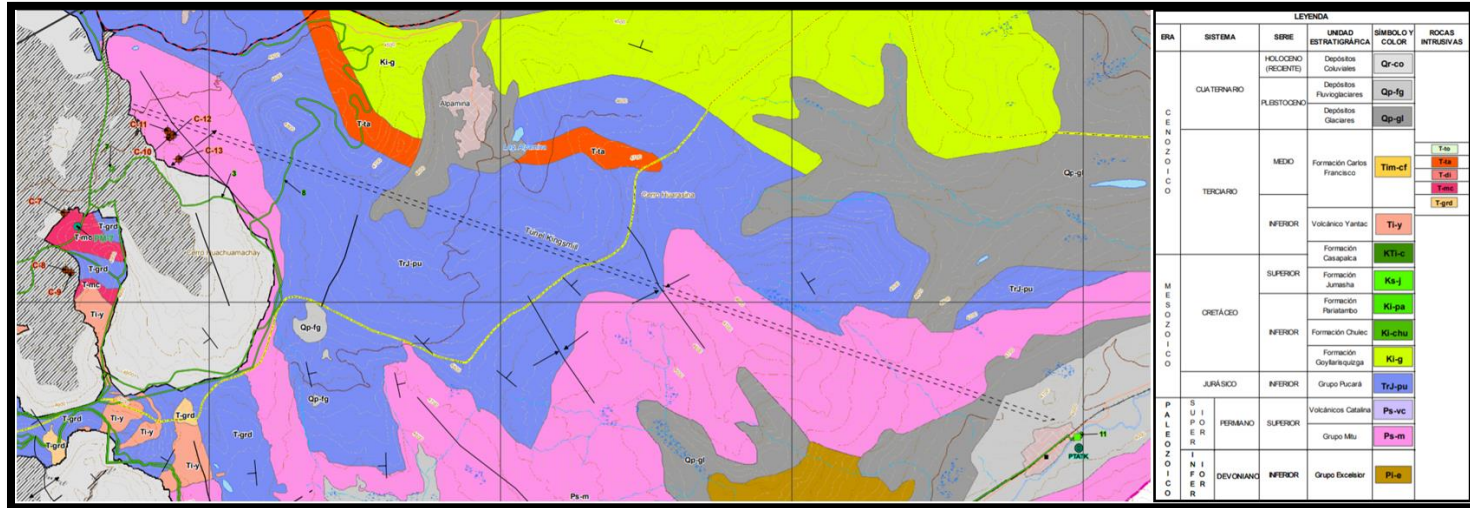


Figura 2.19 Mapa Geológico del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Walsh Perú S.A, 2020).

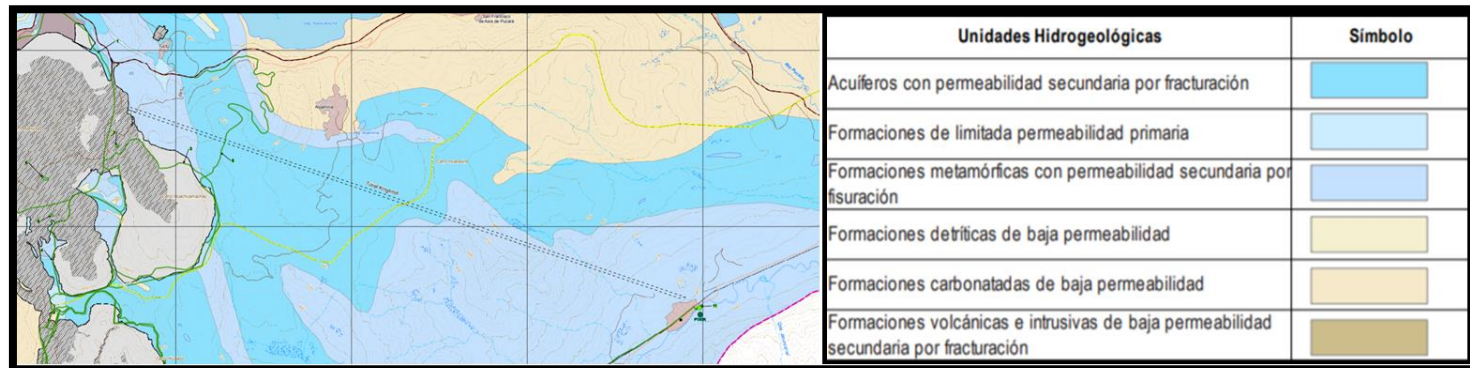


Figura 2.20 Mapa de unidades hidrogeológicas del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Walsh Perú S.A, 2020).

Las aguas superficiales de las cuencas del distrito de Morococha percolan o se infiltran a través de fallas y fracturas geológicas hacia las labores subterráneas existentes en la región, desde donde drenan al Túnel Kingsmill. En su recorrido a través de las zonas mineralizadas, los efluentes se acidifican y arrastran metales en solución, descargándose directamente al Río Yauli, afluente del Río Mantaro (ProInversión, 2005). Los sulfuros más abundantes en el distrito minero son la pirita, la calcopirita, la pirrotita, la esfalerita y la galena (PorterGeo, 2018).

La construcción del túnel ha drenado el macizo rocoso en los alrededores del túnel. Por lo tanto, el túnel es un sumidero de aguas subterráneas, superficiales y drenajes de bocaminas (Figura 2.21).

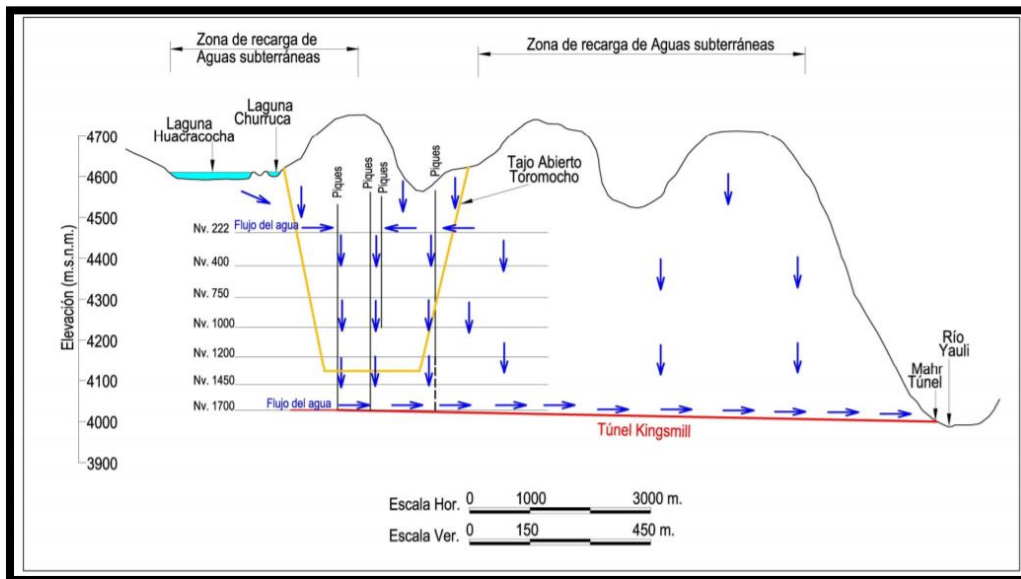


Figura 2.21 Perfil del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Minera Perú Copper S.A, 2007).

Los aportes de agua al Túnel Kingsmill provienen principalmente de los afluentes mineros y de las filtraciones locales desde la superficie.

2.1.3.3. Problemática ambiental

La contaminación del Río Yauli ocasionada por el agua que lleva el Túnel Kingsmill es uno de los grandes problemas ecológicos de la Región Junín (Minera Perú Copper S.A, 2007).

Durante más de 70 años, el Río Yauli viene sufriendo la contaminación minera afectando su ecología y la del Río Mantaro (Guerrero, 2000). Según monitoreos realizados por Water Managment Consultants en 2004, el Río Yauli fue contaminado por las aguas ácidas del Túnel Kingsmill que se vertieron en su caudal. Este drenaje ácido tiene un rango de pH de 2,7-3,0, presenta altas concentraciones de metales disueltos, especialmente hierro, aluminio, manganeso, zinc, cobre, plomo, arsénico, aluminio y cadmio. El drenaje ácido de mina del Túnel Kingsmill se descargaba al Río Yauli sin tratamiento previo, lo cual provocó efectos tóxicos a la salud de las personas y al medio ambiente. El deterioro del hábitat es

particularmente notable en la estación ubicada aguas abajo de la desembocadura del Túnel Kingsmill, que transporta aguas de drenaje de mina como consecuencia de las operaciones existentes (Knight Piésold Consultores S.A., 2009).

El agua del Río Yauli no se puede utilizar para ningún propósito debido a la contaminación. Las comunidades que viven aguas abajo no pueden utilizar el agua del Río Yauli debido a su bajo pH y concentraciones elevadas de metales (Cu, Zn, Fe, Mn, As, Cd) y sulfatos (Kuyucak, Chávez, del Castillo & Ruiz, 2003).



Figura 2.22 Río Yauli contaminado por aguas ácidas del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Minera Chinalco Perú, 2019).

2.1.3.4. Receptores potenciales

Los Ríos Yauli y Mantaro.

2.1.3.5. Recursos impactados

Las aguas de los Ríos Yauli y Mantaro, la agricultura, la ganadería y las comunidades.

2.1.3.6. Características del drenaje

El drenaje del Túnel Kingsmill es ácido y contiene altas concentraciones de hierro, aluminio, manganeso, cobre, zinc, arsénico y cadmio. Las concentraciones de sulfatos varían entre 1716 y 2305 mg/L. El túnel descarga un caudal promedio de 1100 L/s de drenaje ácido al Río Yauli.

Las características del drenaje del Túnel Kingsmill se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.3 Características del drenaje del Túnel Kingsmill.

Parámetros	Valor	Unidades
pH	3,50	u.e.
Sulfatos	1650,00	mg/l
Hierro Total	83,00	mg/l
Aluminio Total	4,30	mg/l
Manganeso Total	38,00	mg/l
Cobre Total	4,30	mg/l
Zinc Total	42,00	mg/l
Arsénico Total	0,75	mg/l
Cadmio Total	0,08	mg/l

Fuente: (AMEC PERÚ S.A, 2007).

2.1.3.7. Tratamiento aplicado

El procedimiento de descontaminación se inicia desde la captación de las aguas contaminadas en la boca del túnel, la cual es conducida a la planta de tratamiento de agua ácidas (Bedoya, 2010). Actualmente, el agua subterránea que transporta el túnel es tratada en la planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill, por lo tanto el agua que se vierte al Río Yauli cumple con los límites máximos permisibles que la ley exige para los efluentes líquidos de la actividad minero-metalúrgica (Walsh Perú S.A, 2020). La planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill es una de las más grandes del mundo, tiene un caudal de diseño de 1400 L/s y el agua tratada se descarga al Río Yauli (Figura 2.23).



Figura 2.23 Planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill.

Fuente: (Minera Chinalco Perú, 2019).

En 2007, la consultora minera AMEC PERÚ S.A realizó un “Estudio de Factibilidad y Evaluación Ambiental de la planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill”. En 2008, COSAPI

S.A Ingeniería y Construcción inició la construcción de la planta, GMI supervisó la construcción de la obra y en el segundo semestre de 2010, Minera Chinalco Perú S.A comenzó a operar la planta de tratamiento mediante el proceso de lodos de alta densidad (*High Density Sludge, HDS por sus siglas en Inglés*). AMEC seleccionó el proceso HDS porque es ampliamente utilizado en el mundo para tratar aguas ácidas de minas, produciendo efluentes de alta calidad y volúmenes mínimos de lodo estables.

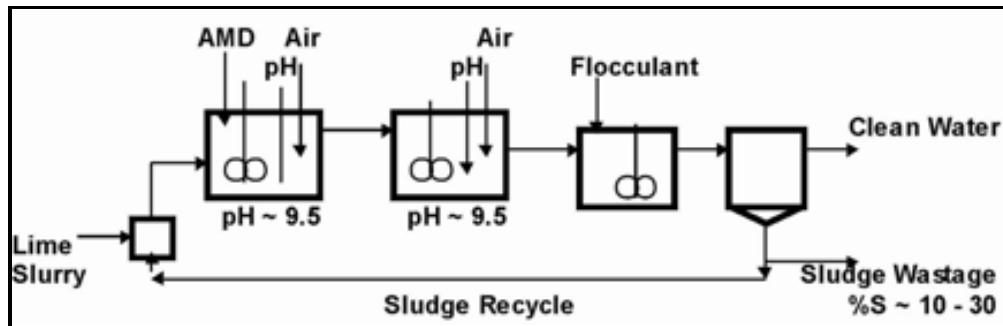


Figura 2.24 Proceso de lodos de alta densidad.

Fuente: (Kuyucak, Chávez, del Castillo & Ruiz, 2003).

La base del proceso HDS (Figura 2.24) es la adición de cal a los lodos recirculados en el tanque de mezcla cal/lodos para incrementar el pH y promover las condiciones necesarias para la densificación del lodo mediante reacciones de neutralización, oxidación y precipitación en los tanques reactores. El rebose de los tanques reactores es transportado hacia un clarificador donde se realiza la separación de sólidos. Se agrega un flocculante diluido para flocular los sólidos suspendidos y producir aglomerados que sedimentan en el clarificador, generando un rebose clarificado. El exceso de lodos precipitados en el clarificador es bombeado a las pozas de lodos para su desagüe, secado y posterior disposición final fuera del área de la planta. El lodo producido por el clarificador es una mezcla de hidróxidos metálicos precipitados y yeso, con una densidad del 20-30% de sólidos (AMEC PERÚ S.A, 2007).

En la Figura 2.25 se observa que la planta de tratamiento cuenta con 2 pozas de lodos, diseñadas para la sedimentación y el secado de los lodos y una poza de emergencia, diseñada para almacenar el agua sin tratamiento, decantar los lodos y separar el agua clara, en casos de corte de energía eléctrica y/o de parada de planta para limpiezas y/o mantenimiento (Thomas, Bayona, Durán & Altez, 2009).

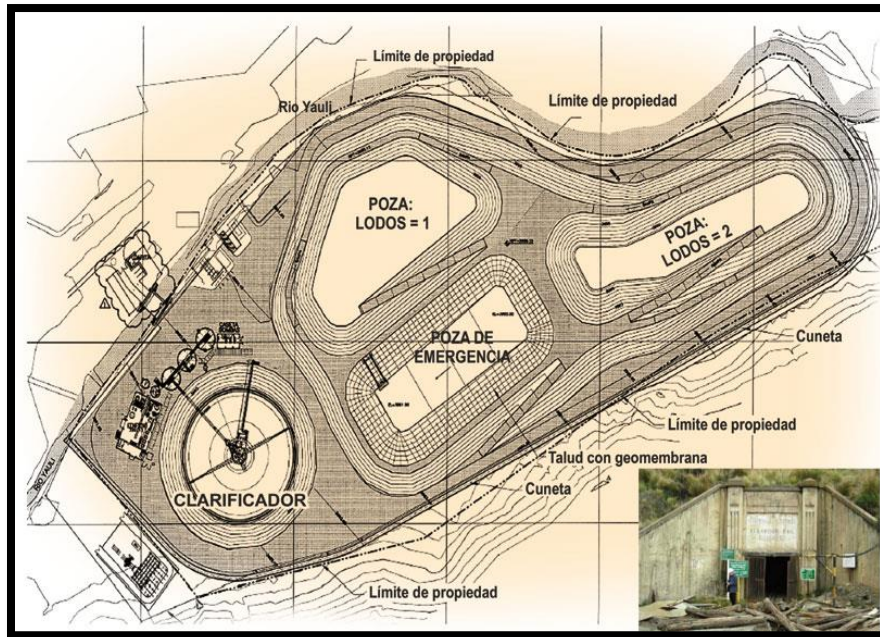


Figura 2.25 Diseño de la planta de tratamiento HDS.

Fuente: (Thomas, Bayona, Durán & Altez, 2009).



Figura 2.26 Vista satelital de la planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill.

Fuente: ("Google Maps", 2021).

El proceso de tratamiento permite incrementar el pH de las aguas del río aumentando la densidad de los metales con cal para luego retirarlos. Al finalizar, el agua clarificada es neutralizada y se vierte al Río Yauli. Esto tiene importantes ventajas porque reduce el volumen de lodos en más de un 95%, no se contaminan las aguas subterráneas circundantes y permite menores costos en la eliminación de los lodos (Minera Chinalco Perú S.A, 2009).

2.1.3.8. Resultados

Los efluentes de la planta de tratamiento son de de alta calidad, por ende, mejoró significativamente la calidad de las aguas del Río Yauli y se solucionó un problema histórico para las poblaciones.

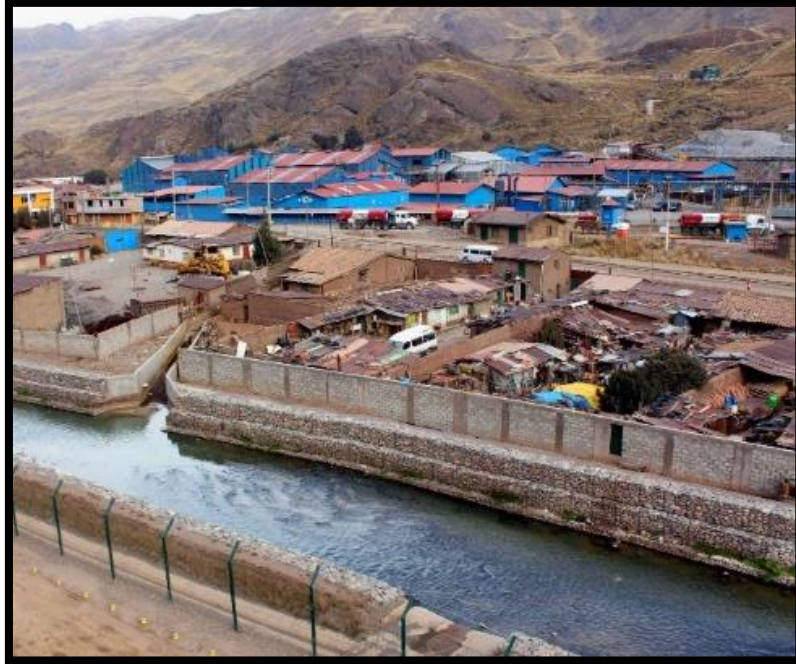


Figura 2.27 Aguas del Túnel Kingsmill post-tratamiento.

Fuente: (Minera Chinalco Perú, 2019).

2.2. Casos nacionales de túneles mineros con presencia de aguas ácidas.

2.2.1. Caso N°1: Adit 71



Figura 2.28 Punto de muestreo en el Adit 71.

Fuente: (Pérez, 2008).

2.2.1.1. Ubicación

El túnel se encuentra en la mina El Teniente de Codelco, emplazado en la Cordillera de los Andes, específicamente en el Nivel Teniente 7 ubicado a una cota de 2042 m s.n.m.

El túnel sirve de acceso principal a la mina, permite el tránsito de vehículos, transporte de personal e insumos y conduce el drenaje ácido de mina del RIL 17 (Figura 2.29).



Figura 2.29 Cuneta de conducción de drenaje ácido del Adit 71.

Fuente: (Pérez, 2008).



Figura 2.30 Precipitados de hidróxido férrico en el drenaje de El Teniente.

Fuente: (Pérez, 2008).

2.2.1.2. Problemática

Antiguamente, el Adit 71 descargó un flujo promedio de 292,68 L/s de drenaje ácido de mina a la ribera norte del Río Coya (ubicado en la Región de O'Higgins, aproximadamente 120 km al sur de Santiago), lo que ha producido graves problemas para el cumplimiento de las leyes ambientales y de la norma de emisión de efluentes (D.S. N°90/2000), impactando la calidad del agua para riego agrícola en la zona baja del valle. Las aguas ácidas también han ocasionado incrustaciones en la cañería. Actualmente, estas aguas son recirculadas al proceso Sewell con un caudal máximo de 350 L/s (Pérez, 2008).

Las características del drenaje del Adit 71 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Características del drenaje del Adit 71.

Parámetro	Valor Promedio	Unidades
pH	4,63	u.e.
Oxígeno Disuelto	6,90	mg/L
Sulfatos	2540,00	mg/L
Hierro Disuelto	14,94	mg/L
Hierro Férrico	16,25	mg/L
Hierro Ferroso	73,60	mg/L
Aluminio Total	132,40	mg/L
Manganeso Total	19,40	mg/L
Cobre Total	253,00	mg/L
Zinc Total	9,02	mg/L

Fuente: (Pérez, 2008).

2.2.1.3. Receptores potenciales

El Río Coya, la flora y la fauna acuática.

2.2.1.4. Recursos impactados

El Río Coya, las aguas utilizadas por los agricultores y la salud de las personas.

2.2.1.5. Tratamiento pasivo propuesto

En la tesis titulada "Tratamientos de drenaje ácido de minas División El Teniente-Codelco Chile" realizada por Ricardo Pérez Peters en 2008, se propuso un sistema de tratamiento pasivo para tratar las aguas ácidas del Adit 71 que consiste en SAPS (Sistemas sucesivos de producción de alcalinidad) seguido de una balsa de oxidación y un humedal aeróbico.

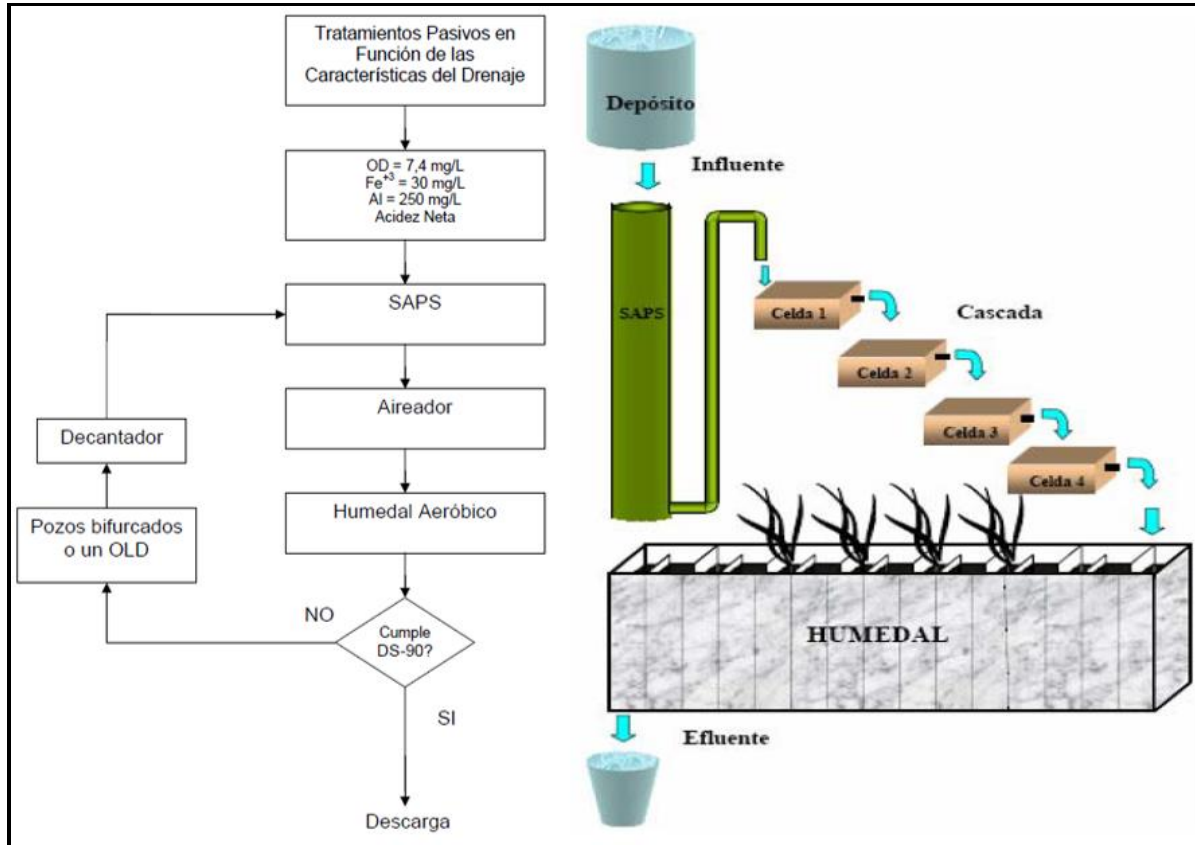


Figura 2.31 Flujograma y esquema del tratamiento propuesto.

Fuente: (Pérez, 2008).

2.2.1.6. Tratamiento activo

En 2007, el drenaje ácido del Adit 71 se depositaba en un estanque Ex-digestor que utiliza soda cáustica como reactivo neutralizante para elevar el pH y precipitar metales disueltos, luego el efluente tratado se enviaba a una sala de bombas y finalmente, a una sala de impulsión para recircularla al proceso de molienda en Sewell.

2.2.2. Caso N°2: Túneles de exploración y drenaje de la mina Chuquicamata.

Entre los años 2003 y 2005 se realizó la excavación de aproximadamente 6200 m de túneles correspondientes a la Rampa de Exploración y al Túnel de Drenaje de la mina Chuquicamata (Aguilar, 2008).

2.2.2.1. Ubicación

Los túneles se encuentran en la mina Chuquicamata de la División Codelco Norte, ubicados en la Precordillera del Norte de Chile, específicamente en el sector Central Norte del yacimiento Chuquicamata. Las excavaciones subterráneas se realizaron principalmente en el pórfido granodiorítico denominado Pórfido Este y en menor proporción en los metasedimentos (Aguilar, 2008).

El Túnel de drenaje tiene 2650 m de largo y una pendiente negativa del 15%. En él se distinguen tres unidades geotécnicas correspondientes al Pórfido Este Clorítico (PEC) con un 28,9% de la extensión del túnel, el Pórfido Este Potásico (PEK) correspondiente al 55,1% de la extensión del túnel, preferentemente en el sector Norte del yacimiento y la unidad de Metasedimentos (MET) con un 16% del túnel. La mayor parte de estos desarrollos se extendieron en la periferia Este del cuerpo mineralizado de los sulfuros profundos (Aguilar, 2008).

2.2.2.2. Fortificación

Para los tramos de mala calidad geotécnica se determinó un sostenimiento consistente en pernos sistemáticos, malla tejida y shotcrete con espesores de 10 a 15 cm, en tanto que para la zona de muy mala calidad geotécnica se determinó la instalación de marcos metálicos (Aguilar, 2008).

Respecto a la condición hidrogeológica, las excavaciones se desarrollaron principalmente en roca seca, con zonas muy localizadas de goteos y escurrimientos no mayores a 2 L/min. Estos se encuentran en el Túnel de Drenaje, extremo Norte de los desarrollos y en el Cruzado Geotécnico N° 1 (Aguilar, 2008).

2.2.2.3. Problemática

(Aguilar, 2008) concluyó que transcurridos entre 3 y 5 años desde la ejecución de los desarrollos, se mantienen buenas condiciones de estabilidad, observándose solo puntualmente oxidación de los componentes metálicos de la fortificación, en zonas con afloramientos de aguas ácidas. Se observa deterioro en la fortificación instalada en zonas con escurrimientos de agua, fundamentalmente en el Cruzado Geotécnico N° 1, que consiste en la oxidación de pernos y malla tejida. Esta fortificación se evaluará, considerando la acidez de las aguas presentes (pH de 3 a 5 de acuerdo a mediciones realizadas por el Servicio de Hidrogeología de la Dirección de Geotecnia, Codelco Norte).

Por consiguiente, la presencia de aguas ácidas en túneles hace que se consideren otras alternativas de fortificación para estos casos.

3. MARCO TEÓRICO

La primera parte de este capítulo presenta los conceptos fundamentales en el proceso de generación de aguas ácidas, las reacciones de generación de acidez, las reacciones de neutralización, las etapas en el desarrollo del drenaje ácido, los factores que controlan la generación y la migración del drenaje ácido y las características de las aguas ácidas.

La segunda parte de este capítulo hace referencia a la gestión del agua en túneles.

3.1. Generación de Aguas Ácidas

Las aguas ácidas se producen como resultado de la oxidación química y biológica de sulfuros metálicos, especialmente pirita (FeS_2) y pirrotita (FeS), que se pueden encontrar presentes o formando parte de botaderos de estériles, botaderos de baja ley, marinas, relaves, rípios de lixiviación, rajos y en minas subterráneas. La oxidación se produce cuando las rocas que contienen sulfuros son expuestas al aire y al agua (Wiertz, 2016).

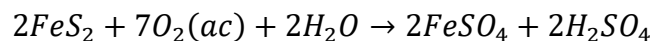
3.1.1. Conceptos Generales

La generación neta de ácido se produce por un desbalance entre las reacciones de generación de ácido y las reacciones de neutralización, el cual puede resultar de un desbalance neto entre las capacidades de generación y neutralización o de una diferencia entre las cinéticas. Si la capacidad de neutralización de ácido es menor que la generación de ácido, es posible que el drenaje sea ácido. La generación de ácido se produce por oxidación de compuestos reducidos de azufre y/o por hidrólisis de los cationes metálicos (Wiertz, 2016).

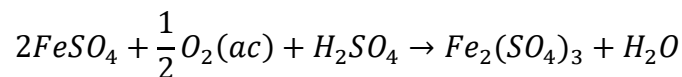
3.1.2. Reacciones de Generación

De acuerdo con (Wiertz, 2016), el drenaje ácido de rocas es el resultado de una serie compleja de reacciones químicas que involucra:

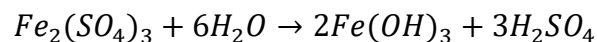
- Generación de ácido sulfúrico, debido a la oxidación de los sulfuros con agua y con oxígeno:



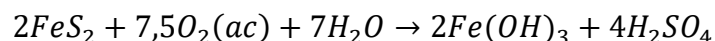
- La oxidación del ión ferroso:



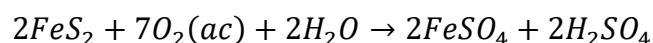
- La hidrólisis del férrico:



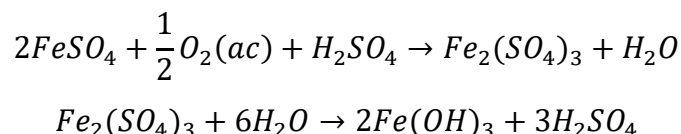
La reacción global es:



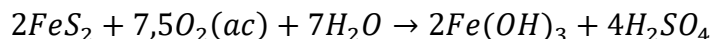
A $pH > 4,0$, el oxígeno disuelto es el único agente que oxida la pirita, con una cinética lenta (Wiertz, 2016):



En estas condiciones de pH, el ión férrico se hidroliza rápidamente y el hidróxido precipita (Wiertz, 2016):

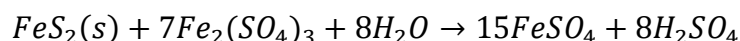


La reacción global es:

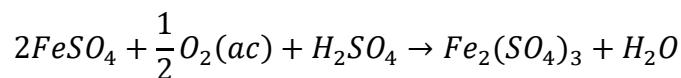


Las reacciones anteriores son abióticas.

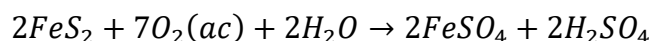
A pH < 3,0, el ión férrico disuelto puede oxidar la pirita, con una cinética bastante más rápida (Wiertz, 2016):



En estas condiciones de pH, el ión férrico se reduce a ferroso; en presencia de bacterias, este se reoxida (Wiertz, 2016):

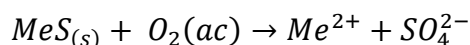


La reacción global es:

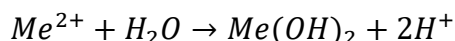


3.1.3. Reacciones de Oxidación

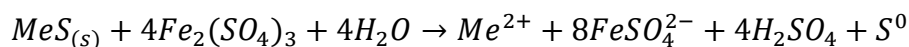
Otros sulfuros metálicos (MeS), pueden contribuir a la disolución de iones metálicos (Me: Fe, Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, etc), (Wiertz, 2016).



En este caso, no hay generación neta de ácido; sin embargo por hidrólisis de los metales se obtiene:



A bajo pH, la oxidación se produce también por el férrico:



Las bacterias también pueden catalizar estas últimas reacciones haciéndolas más rápidas (Wiertz, 2016).

3.1.4. Reacciones de Neutralización

Existe una serie de minerales que pueden consumir ácido y neutralizar el drenaje ácido (Lottermoser, 2007). Entre los minerales que consumen ácido se encuentran:

- Los Carbonatos
- Los Hidróxidos

- Los Silicatos

Las reacciones de neutralización dan como resultado la precipitación de sulfato de calcio e hidróxidos metálicos, oxi-hidróxidos y otros compuestos.

3.1.4.1. Carbonatos

Según (Dold, 2017), los minerales más importantes con potencial de neutralización son los carbonatos de calcio y magnesio, ya que tienen una reactividad rápida y tienden a amortiguar el sistema un poco. La calcita ($-\log K$ 8.48) y la magnesita ($-\log K$ 8.24) son carbonatos de disolución rápida, mientras que la dolomita tiene menor solubilidad ($-\log K$ 17.09). Por lo tanto, la calcita se considera en los cálculos del potencial de neutralización. La calcita (CaCO_3) es el tampón clave para mantener el pH alrededor de 7 (Figura 3.1) y, por lo tanto, es el agente neutralizante más importante en el entorno minero. Mientras la calcita esté disponible como tampón en el sistema, su disolución ácida liberará bicarbonato (HCO_3^-) a la solución (Sherlock et al., 1995) y es capaz de neutralizar un mol de protones por mol de calcita disuelta.

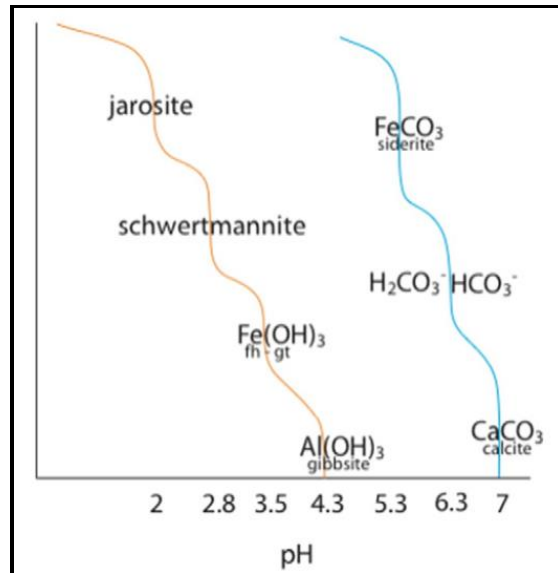
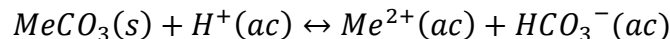


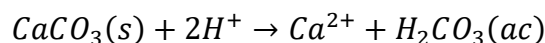
Figura 3.1 Tampones típicos y su pH en un sistema ARD.

Fuente: (Dold, 2017).

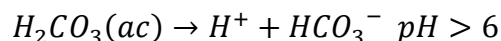
La reacción general de consumo de ácido de los carbonatos, donde Me representa a un catión divalente como Ca^{2+} o Mg^{2+} es:

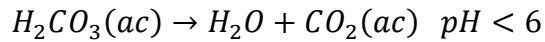


Los minerales consumidores de ácido, como los carbonatos, usualmente coexisten con los sulfuros. Estos reaccionarán con el ácido neutralizándolo (Wiertz, 2016).



- El ácido carbónico es inestable y se descompone dando:





- Las concentraciones de estas especies dependen del pH y de las constantes de disociación del ácido carbónico.

3.1.4.2. Hidróxidos

Según lo indicado por (Dold, 2017), los diferentes hidróxidos metálicos pueden tener funciones contrastantes en un sistema geoquímico. Por ejemplo, pueden actuar como tampón al recibir protones, o desprotonar la molécula de agua debido a la hidrólisis o pueden liberar iones de hidróxido en solución (Ca(OH)₂; portlandita), lo que conduce a un pH alcalino. Los principales tampones de hidróxido en el drenaje ácido están dominados por los cationes metálicos más abundantes con valencia 3+; es decir, Fe³⁺ y Al³⁺. Esto se debe a la capacidad de hidrólisis de cationes de valencia tres, dado su alto potencial iónico (PI) entre 4.65 (Fe³⁺) y 5.61 (Al³⁺), formando hidróxidos de hierro como ferrihidrita y goetita; hidroxisulfatos de hierro como schwertmanita y jarosita-alunita e hidróxidos de aluminio como gibbsita. Estos minerales representan tampones que controlan el pH a ~ 4,3 (Al(OH)₃; gibbsita), ~ 3,5 (Fe(OH)₃; ferrihidrita, goetita), ~ 2,5–3,5 (schwertmanita), ~ 2 (jarosita). Por tanto, los hidróxidos metálicos representan tampones importantes en los rangos de pH ácidos (Figura 3.1).

3.1.4.3. Silicatos

Entre los silicatos, el cuarzo se considera casi inerte, y los silicatos dominantes para la neutralización son los feldespatos. La anortita tiene una reactividad relativa aceptable en los procesos de meteorización, es decir, un potencial de neutralización de feldespato relativamente bueno, la albita o la ortoclasa (Feldespato de potasio) tienen una reactividad relativa muy baja y por lo tanto, en general no se consideran en la evaluación del potencial de neutralización (PN) general de una unidad de roca, ya que el equilibrio no puede alcanzarse en el tiempo de contacto del agua con el mineral. En algunos casos, una gran cantidad de silicatos de intemperismo intermedio rápido como la biotita y la clorita (~ 20%), por ejemplo, de alteraciones potásicas y propilíticas, podría agregar potencial de neutralización significativo (Dold, 2017).

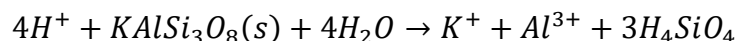
3.1.4.4. Reacción de Aluminosilicatos

Los aluminosilicatos tienden a ser menos reactivos, por lo que su capacidad de neutralización es menor (INAP, 2012).

Los aluminosilicatos como los feldespatos de potasio reaccionarán, consumiendo iones hidrógeno, liberando Al³⁺, K⁺ y ácido silícico (H₄SiO₄), (Wiertz, 2016).

A medida que el ácido se consume el pH aumenta y los iones metálicos comienzan a precipitar en forma de hidróxidos, produciendo nuevamente iones hidrógeno (Wiertz, 2016).

- A pH < 4.5:



- A pH > 6:

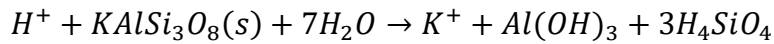


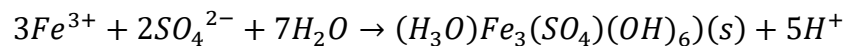
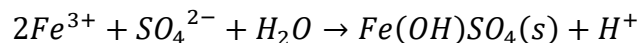
Tabla 3.1 Reactividad relativa en la capacidad de neutralización de ácidos de los minerales. (after (Sverdrup, 1990)).

Grupo	Minerales Típicos	Reactividad relativa (pH 5)
1. Disolviendo	Calcita, dolomita, magnesita, aragonita, brucita	1.0
2. Meteorización rápida	Anortita, olivino, granate, diópsido, wollastonita, jadeita, nefelina, leucita, espodumena	0.6
3. Meteorización Intermedia	Enstatita, augita, hornblenda, tremolita, actinolita, biotita, clorita, serpentina, talco, epidota, zoisita, hedenbergita, glaucofana, antofilita	0.4
4. Meteorización lenta	Plagioclasa (Ab100-Ab30), caolinita, vermiculita, montmorillonita, gibsita	0.02
5. Meteorización muy lenta	Feldespato de Potasio, moscovita	0.01
6. "Inerte" ^a	Cuarzo, rutilo, circón	0.004
^a "Inerte" es una expresión relativa, ya que en el ciclo de elementos geológicos ningún mineral es inerte.		

Fuente: (Dold, 2017).

3.1.4.5. Otras reacciones

- El Hierro Férrico puede precipitar a pH superiores a 2 en forma de sulfatos básicos o jarositas (Wiertz, 2016).
- Con el tiempo, las características del drenaje pueden cambiar, de ligeramente alcalino hasta casi neutro y finalmente ácido (Wiertz, 2016).



3.1.5. Etapas en el desarrollo del drenaje ácido

El drenaje ácido de minas se observa como un proceso en tres etapas, definidas por el pH del agua en el microambiente de los minerales sulfurados (Wiertz, 2016):

Etapas 1: Se genera acidez y rápidamente se neutraliza en las etapas iniciales. El drenaje de agua es casi neutro.

Etapas 2: Continúa la generación de ácido y se agotan los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa; bajo pH 4,5 ocurren reacciones de oxidación (químicas y biológicas).

Etapa 3: A medida que los minerales alcalinos se consumen, se produce acidez a mayor velocidad que el consumo, por lo que el pH continúa disminuyendo.

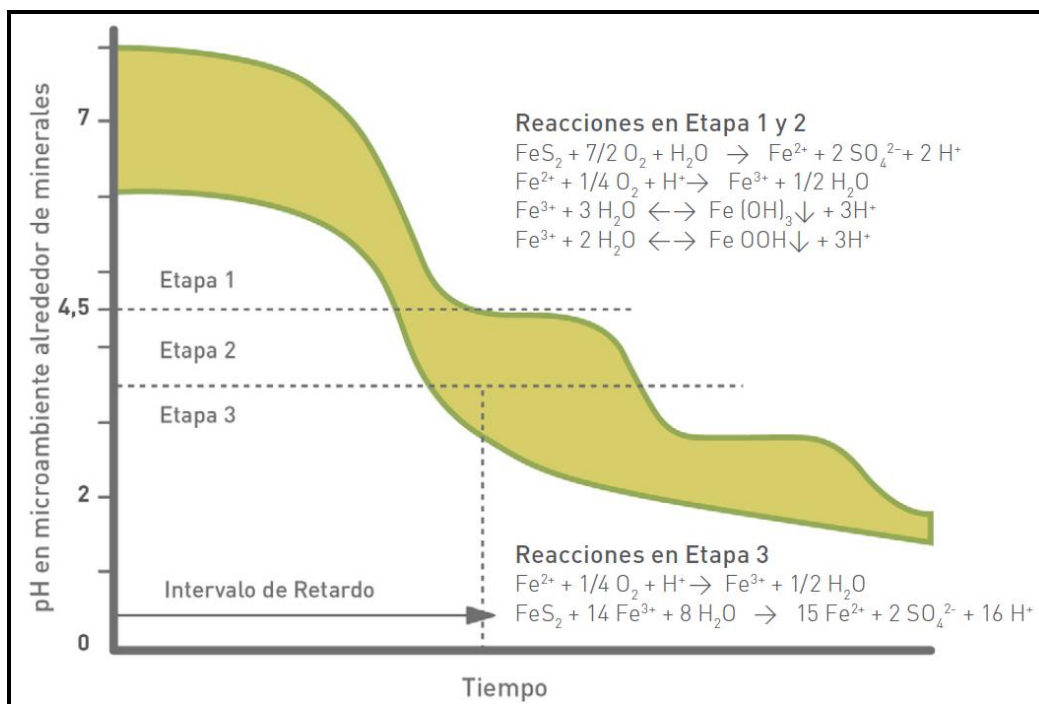


Figura 3.2 Etapas en la generación del drenaje ácido.

Fuente: (Modificada de Broughton & Robertson, 1992; Acuerdo Marco de Producción Limpia, 2002).

De acuerdo con (Wiertz, 2016):

3.1.5.1. Etapa 1

- Se genera acidez y rápidamente se neutraliza en las etapas iniciales cuando la roca que contiene minerales sulfurados es expuesta al oxígeno y al agua. El drenaje de agua es casi neutro.
- Es fundamentalmente un período de oxidación química lenta. El oxígeno es el oxidante principal, al producir sulfato y acidez a partir de la oxidación de los minerales sulfurados.
- Los minerales carbonatados, como la calcita (CaCO_3) presente en la roca, neutralizan esta acidez y mantienen condiciones que van de neutras a alcalinas ($\text{pH} > 7$) en el agua que fluye desde la roca.
- Los metales precipitan como hidróxidos.
- La oxidación química del hierro ferroso es rápida a un pH igual o superior a 7 y el hierro férrico se precipita de la solución como un hidróxido.
- La velocidad de oxidación química de la pirita es relativamente baja, comparada con las etapas posteriores de oxidación, ya que el hierro férrico no contribuye como oxidante.

- En esta etapa, el agua de drenaje se caracteriza generalmente por niveles elevados de sulfato, con pH cercano al neutro.

3.1.5.2. Etapa 2

- A medida que continúa la generación de ácido y se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa. Cuando el pH del microambiente disminuye por debajo de 4,5 ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas.
- A medida que la velocidad de generación de ácido se acelera en las etapas II y III, el pH disminuye progresiva y gradualmente.
- Los niveles de pH relativamente constantes representan la disolución de un mineral neutralizante que se vuelve soluble a ese nivel de pH.
- Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH alrededor de 2.5.
- A estos pH's el Hierro Férrico no precipitará como hidróxido y por lo tanto, se mantendrá en solución, actuando en las reacciones de oxidación indirecta.

3.1.5.3. Etapa 3

- A medida que los minerales alcalinos se consumen, se produce acidez a mayor velocidad que alcalinidad, el pH se vuelve ácido.
- Las reacciones dominantes se transforman de reacciones de oxidación exclusivamente químicas a reacciones de oxidación biológicamente catalizadas.
- De las reacciones de oxidación de los sulfuros (pirita o calcopirita), se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico. Este, a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal.
- En esta etapa, la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la Etapa I.
- El descenso del pH incrementa la velocidad de oxidación con un aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquellas generadas por oxidación química.
- En esta etapa, el agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas. El hierro disuelto se presenta como hierro ferroso y férrico.
- En algún momento en el futuro, décadas y posiblemente siglos después del inicio de la generación de estos ácidos, la velocidad disminuirá con la oxidación completa de los sulfuros más reactivos y el pH se incrementará hasta que la roca se torne sólo ligeramente reactiva y el pH del agua de drenaje no sea afectado.
- El tiempo para cada etapa sucesiva puede variar de un período de días a cientos de años, dependiendo de los factores que controlen la generación de ácido.

3.1.6. Factores que controlan el drenaje ácido

Para que ocurra el drenaje ácido se necesita:

- **Una fuente potencial:** Presencia de minerales sulfurados.
- **Un oxidante:** El oxígeno o el hierro férrico (Fe^{+3}).
- **Un solvente:** El agua.
- **La presencia de bacterias puede acelerar el proceso** → Hierro y Sulfo-oxidantes: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y otras especies.

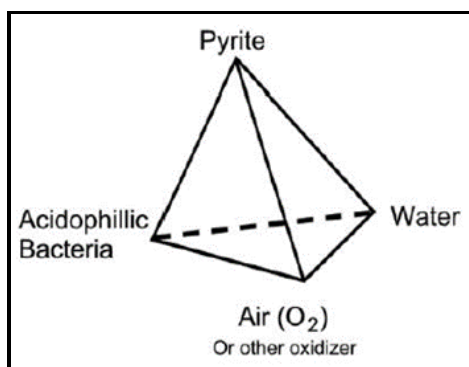


Figura 3.3 Factores para la formación del drenaje ácido de roca.

Fuente: (Gusek, 1994).

De acuerdo con (Wiertz, 2016), el resultado final y la calidad del drenaje dependen del balance entre las reacciones de generación de ácido y las reacciones de consumo. Cuando la capacidad de generación supera la capacidad de neutralización (altos contenidos de pirita y/o bajo contenido de carbonatos y minerales neutralizadores), el drenaje resulta ácido (caracterizado por un pH inferior a 4 y altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos), pero si la capacidad de neutralización supera la capacidad de generación de ácido (bajo contenido de pirita y/o alto contenido de carbonatos u otros minerales neutralizadores), el drenaje resulta neutro o alcalino. Sin embargo, un drenaje neutro o alcalino puede presentar concentraciones de algunos metales disueltos, producto de la oxidación de los sulfuros.

Existen varios factores que controlan la generación del drenaje, así como también su migración o transporte y los efectos de éste en el medio ambiente receptor (cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, fauna, flora). Entre los factores que controlan el drenaje ácido se pueden distinguir:

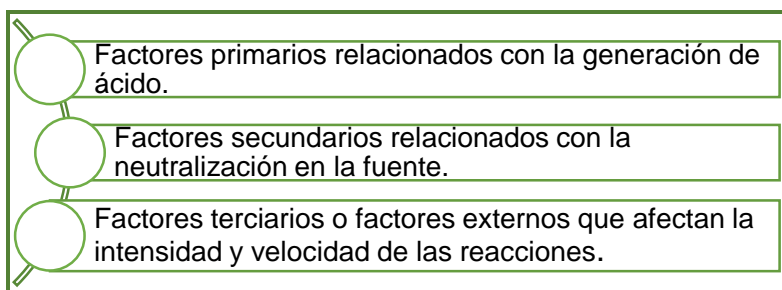


Figura 3.4 Factores que controlan el drenaje ácido.

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.6.1. Factores Primarios

Son aquellos directamente involucrados en la generación de productos de oxidación de sulfuros y determinan la cantidad de ácido que se puede generar en un ambiente determinado (Wiertz, 2016).

Según lo indicado por (Akcil & Koldas, 2006), los factores principales que determinan la tasa de generación de ácido son:

- El pH
- La temperatura
- El contenido de oxígeno de la fase gaseosa.
- La concentración de oxígeno en la fase acuosa.
- El grado de saturación con agua.
- La actividad química del Ión Férrico (Fe^{3+}).
- El área de superficie del sulfuro metálico expuesto.
- La energía de activación química necesaria para iniciar la generación de ácido.
- La actividad bacteriana.

3.1.6.2. Factores Secundarios

Son aquellos que consumen o alteran los productos de oxidación de sulfuros, mediante otros minerales capaces de neutralizar la acidez y determinan la cantidad de ácido que puede ser neutralizada naturalmente en un ambiente determinado (Wiertz, 2016).

3.1.6.3. Factores Terciarios

Son aquellas condiciones físicas que influyen la oxidación de los sulfuros, la migración y el consumo de productos de oxidación, los cuales determinan la velocidad con la cual se pueden producir la generación y el transporte de las soluciones ácidas (Wiertz, 2016).

Los factores que controlan el drenaje ácido se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Factores que controlan la generación y migración del drenaje ácido.

Primarios	Disponibilidad de oxígeno Disponibilidad de agua para transporte Grado de liberación de los sulfuros	Temperatura pH Equilibrio hierro férrico / ferroso Actividad microbiológica
Secundarios	Presencia de carbonatos. Presencia de silicatos y aluminosilicatos.	
Terciarios	Naturaleza física de los materiales de residuo: tamaño de partículas, dureza, resistencia a la erosión, permeabilidad. Factores climáticos: pluviosidad, temperatura, escurrimiento e infiltración. Química de los cuerpos de agua receptores: dureza, alcalinidad, contenido de materia orgánica.	

Fuente: (Wiertz, 2016).

Adicionalmente a los factores antes mencionados, es importante considerar las condiciones hidrológicas de la zona como:

- La disponibilidad de agua: en cuanto a cantidad de agua promedio (precipitaciones, escurrimiento de aguas superficiales, aguas subterráneas), pero también en cuanto a la variabilidad (factores climáticos).
- La calidad de las aguas: agua lluvia eventualmente acidificada, aguas superficiales y subterráneas con una calidad determinada por el entorno geológico.

3.1.6.4. Factores hidrológicos

Según (Wiertz, 2016), los factores hidrológicos que determinan el balance hidrológico y que influyen en la disponibilidad del agua y en la generación, el transporte y los efectos del drenaje ácido son:

- Precipitación
- Evaporación y sublimación
- Derretimiento
- Infiltración
- Escurrimiento

Generalmente, se determina el balance hidrológico a partir de la relación entre precipitación y evaporación. Sin embargo, es importante recalcar los siguientes puntos:

- Las precipitaciones son generalmente estacionales y el balance se debe establecer no en una base anual sino mensual o preferiblemente diaria.
- El “año normal” es en realidad “promedio anual” ”; existe una gran variabilidad y son más frecuentes los años bajo el promedio anual.
- Proporcionalmente, la variaciones interanuales son mayores en la zona norte que en la zona central o sur.
- Caso particular en la zona altiplánica: Precipitaciones estivales intensas.

3.1.6.5. Factores geológicos

Existen una serie de factores geológicos que tienen relación directa con la generación, el transporte y los efectos de los drenajes ácidos.

Entre los cuales se pueden mencionar:

- El tipo de yacimiento: un Pórfido cuprífero tiene abundante pirita diseminada y es más propenso a generar drenaje ácido que un yacimiento de tipo Skarn.

La siguiente tabla muestra los yacimientos propensos a generar drenaje ácido, excepto los yacimientos tipo Skarn o Placer.

Tabla 3.3 Potencial de neutralización (PN) según el tipo de yacimiento.

Marco geotectónico	Tipo de yacimiento	Sulfuros y/o sulfatos	PN	Elementos
Intrusivo	Skarns	Alto	Medio – Alto	Au, Fe
	Pórfidos Cu - Au - Mo	Alto	Bajo – Medio	Cu, Mo, Zn
	Sn granitoides y pegmatitas	Bajo – Medio	Bajo	Sn, W, Fe
Volcánico continental	Au epitermales SA	Medio – Alto	Bajo	Au, Hg, Fe, Cu, As, Sb
	Au epitermales AC	Bajo	Medio – Alto	Au, Ag
Volcánico oceánico	Kuroko (VMS)	Alto	Medio	Fe, Au, Pb, Zn, Ni, Co, Cu
	Beshi	Alto	Medio	Fe, Au, Pb, Zn, Ni, Co, Cu
Ofiolítico	Cromita "podiform"	Medio	Medio – Alto	Cr, Pt
Sedimentario	MSV Zn – Pb	Alto	Alto	Zn, Pb, Cu, Fe, Cd
	Estratiforme Cu	Alto	Bajo – Medio	Cu, Fe, Co

Fuente: (Dueñas & Candía, 2010).

- Cantidad y mineralogía de sulfuros: los sulfuros de estequiometría MS_2 , generan más protones; Es el caso de la Pirita (FeS_2); Los sulfuros de estequiometría MS (ZnS , PbS , CuS), generalmente no generan ácido, pero liberan metales disueltos; la hidrólisis y precipitación de los hidróxidos metálicos libera protones y puede contribuir a la acidificación (Wiertz, 2016).

La siguiente tabla muestra la cantidad de protones liberados según el tipo de oxidante y de sulfuro.

Tabla 3.4 Sulfuros con la cantidad de protones liberados.

Sulfuro	Fórmula	Moles H^+
Oxidación a través del oxígeno + Hidrólisis del Fe^{3+}		
Pirita	FeS_2	4
Arsenopirita	$FeAsS$	3
Calcopirita	$CuFeS_2$	2
Pirrotita	$Fe_{(1-x)}S$	2
Enargita	Cu_3AsS_4	4
Esfalerita	ZnS	0
Galena	PbS	0
Covelina	CuS	0
Oxidación a través del Hierro Férrico		
Pirita	FeS_2	$16/2^a$
Arsenopirita	$FeAsS$	$15/2^a$
Calcopirita	$CuFeS_2$	$16/0^a$
Pirrotita	$Fe_{(1-x)}S$	$8/0.2^a$
Enargita	Cu_3AsS_4	$39/4^a$
Esfalerita	ZnS	$8/0^a$

Sulfuro	Fórmula	Moles H ⁺
Oxidación a través del Hierro Férrico		
Galena	PbS	8/0 ^a
Covelina	CuS	8/0 ^a

^a Cantidad de protones producidos, considerando si la cantidad de hierro férrico debe producirse primero a través de la oxidación en el sistema, que neutraliza un mol de protones por mol de hierro férrico.

Fuente: (Dold, 2017).

En la oxidación de la piritita (FeS_2) se generan minerales secundarios meta-estables como la schwertmanita, ferrihidrita y jarosita, y/o estables como la goethita y la hematita, entre otros (Figura 3.5). La precipitación de estos minerales depende de las condiciones de Eh-pH del medio y de la disponibilidad de elementos claves como potasio y azufre (Weibel, 2009).

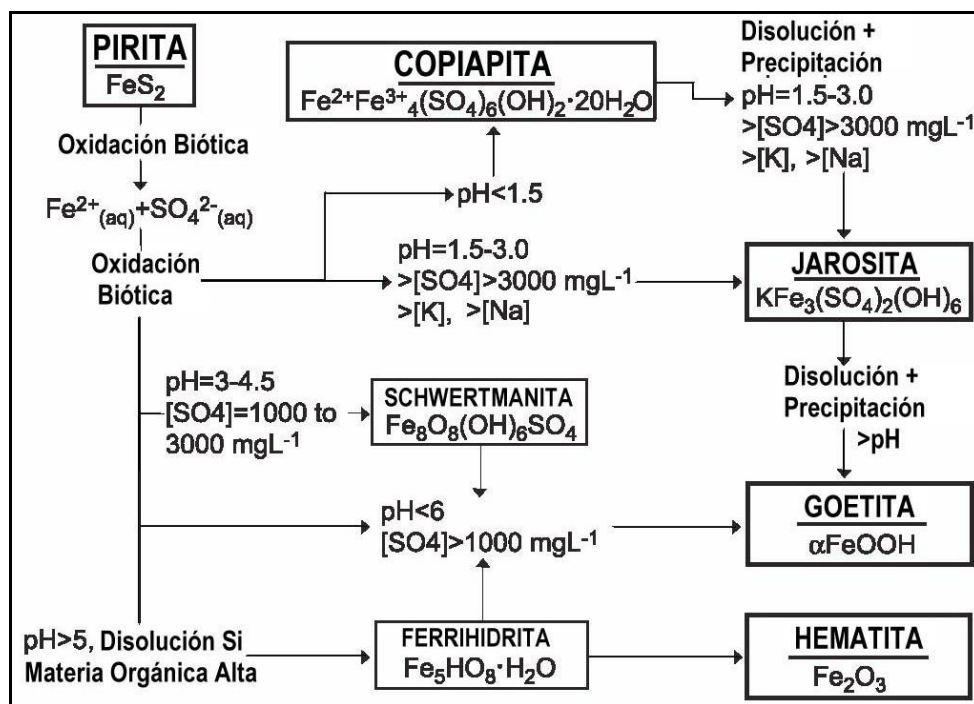


Figura 3.5 Esquema de formación de minerales secundarios en el drenaje ácido de mina.

Fuente: (Montero, et al., 2005).

Otro grupo relevante dentro de los minerales secundarios son las sales eflorescentes de sulfatos, las que se forman en condiciones oxidantes y altas tasas de evaporación. Estas sales son altamente solubles y, en presencia de agua lluvia o escorrentía, pueden liberar una cantidad significativa de metales y ácido, constituyendo una fuente de contaminación secundaria y determinando una variación o fluctuación estacional en los niveles de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, especialmente en climas áridos y semiáridos (Dold, 2010).

Algunos ejemplos comunes de sales eflorescentes de sulfato de hierro son la melanterita, la rozenita, la szomolnokita, la copiapita, la romboclasa, la halotricita (sal de sulfato de metal mixto) y la calcantita (sal de sulfato de cobre) (Nordstrom, 2011).

Tabla 3.5 Principales minerales secundarios formados por drenaje ácido.

Mineral	Fórmula
Schwertmanita	$\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4 - \text{Fe}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH})_{10}(\text{SO}_4)_3$
Ferrihidrita	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Alunita	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Hematita	Fe_2O_3
Siderita	FeCO_3
Melanterita	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Roemerita	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
Coquimbita	$\text{Fe}_2^{3+}(\text{SO}_4) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Bonatita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Hexahidrita	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
Malaquita	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Fuente: (Lottermoser, 2007).

- Resistencia de sulfuros a la meteorización: los sulfuros son más a menos refractarios dependiendo de su mineralogía, de su grado de cristalinidad y de la presencia de impurezas, entre otros factores.

Tabla 3.6 Resistencia de sulfuros a la meteorización.

Mineralogía	Tamaño	Textura	Impur. Trazos	Resistencia
Pirrotita Calcosina Galena Esfalerita	Fino	Framboidal Coliformo	Alto	Bajo
Pirita Enargita Marcasita Calcopirita	Medio	Masivo		↓
Molibdenita	Grueso	Euhedral	Bajo	

Fuente: (Acuerdo Marco de Producción Limpia, 2002).

- Comportamiento electroquímico de sulfuros: la reactividad depende también de la asociación entre sulfuros y de la eventual presencia de pares galvánicos.
- Disponibilidad, mineralogía y resistencia de neutralizantes.
- Contexto litológico.

- Estilo de alteración.
- Mineralogía de productos de alteración: la formación y precipitación de minerales del tipo MSO_4 , produce un depósito de acidez.
- Hidrogeología del yacimiento: Las composiciones del drenaje varían según el tipo de yacimiento. Existen yacimientos que tienen características hidrogeológicas y minerales que son favorables para la generación de aguas ácidas con altas concentraciones de metales.

La siguiente tabla muestra los drenajes de algunos tipos de yacimientos metálicos:

Tabla 3.7 Composición típica del drenaje minero según el tipo de yacimiento.

(Bowell et al., 2013).

Parameter	Volcanogenic Massive Sulfide	High Sulfidation Epithermal	Manto deposit	Porphyry
pH	<1-6	2-4	<2-6	2-8
Cu	<0.1-6,800	<0.01-5,400	<0.01-790	<0.01-2,100
Zn	<0.1->10,000	<0.1-3,900	<0.01-4,300	<0.01-80
Fe	10->10,000	<1-28,000	<1-5,500	<0.01-1,700
Pb	<1-165	<0.1-12	<1-210	<6
Ag	<1-630	<1-90	<1-580	<2

Concentraciones de metales en mg/L y pH en u.e.

Fuente: (Nordstrom, Bowell, Campbell & Alpers, 2017).

Según lo indicado por Wiertz, 2016, la geología estructural puede también afectar los procesos relacionados con la generación y transporte de los drenajes:

- La estructura geológica local es muy importante en el transporte del agua y de las soluciones contaminadas.
- La presencia de fallas puede eventualmente favorecer o frenar el transporte, formando un camino preferencial o una barrera, dependiendo del tipo de falla y de los terrenos en contacto.
- En general, la permeabilidad depende principalmente de la litología, pero también de la estructura y de las secuencias.

3.1.6.6. Factores mineros

Los botaderos de estéril y los tranques de relave constituyen las principales fuentes de generación de aguas ácidas. El rajo final puede estar por debajo del nivel freático y se forma entonces un lago que puede acidificarse (Wiertz, 2016).

En minas subterráneas, la explotación por “*Panel caving*” y “*Block Caving*” genera un fracturamiento intenso del macizo rocoso y una zona que puede ser afectada por la

meteorización y así generar aguas ácidas (Wiertz, 2016). El método de extracción utilizado influye en la medida en que los minerales y los residuos interactúan con el oxígeno atmosférico y las aguas subterráneas o superficiales (Plumlee, Smith, Montour, Ficklin & Mosier, 1999).

Adicionalmente, todas las labores subterráneas (túneles y chimeneas de ventilación) donde circula agua y aire son también fuentes potenciales de drenaje ácido.

3.1.7. Características del drenaje ácido

Las principales características de las aguas ácidas son:

- Valores de pH entre 1,5 y 5,5.
- Alcalinidad decreciente y acidez creciente.
- Concentraciones elevadas de sulfatos.
- Concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales).
- Concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales (TDS).

Otros minerales sulfurados son oxidados de forma similar a la pirita, disolviéndose metales y sulfatos; los drenajes ácidos contienen diversos metales, por ejemplo Cu, Fe, Zn, Al, Pb, As, Cd, etcétera, en concentraciones tóxicas.

La gestión eficaz de las aguas ácidas y la corrección de los impactos que producen sólo es posible si se conocen los procesos que influyen en la liberación y transporte de los elementos potencialmente tóxicos, en particular de los denominados metales pesados (Armienta, Talavera, Morton, & Barrera, 2003; Árcega-Cabrera et al., 2010; Inocencio-Flores, Velázquez-Machuca, Pimentel-Equihua, Montañez-Soto & Venegas-González, 2013).

3.1.8. Posibles impactos del drenaje ácido

- A. Durante la excavación del túnel, la pirita y otros sulfuros quedan expuestos al oxígeno.
- B. El agua subterránea se filtra en el túnel.
- C. El oxígeno, el agua y la pirita reaccionan para producir ácido sulfúrico y a su vez, disuelve los metales de las rocas.
- D. El agua sale del túnel.
- E. Los metales disueltos reaccionan con el oxígeno y la solución cae a las corrientes de agua y adquieren un color rojo anaranjado o azul verdoso.
- F. El drenaje ácido mata los animales acuáticos (especialmente los peces) y plantas, debido a la acidez y metales disueltos en las aguas.

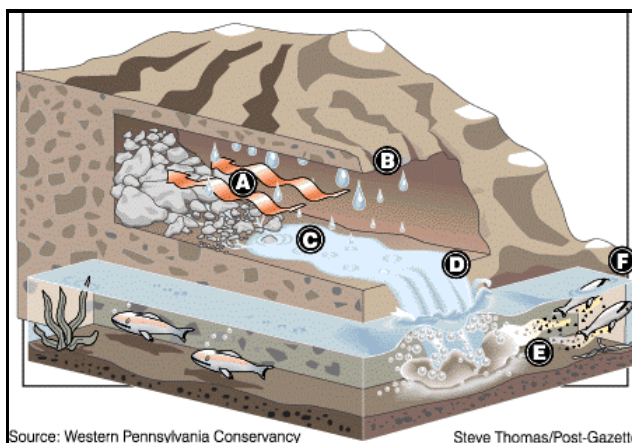


Figura 3.6 Animales acuáticos y plantas afectados por el drenaje ácido.

Fuente: ("Abandoned Mine Drainage | Schuylkill Action Network", 2021).

El posible impacto del drenaje ácido sobre el medio ambiente es la alteración de la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas (acuíferos poco profundos), lo cual podría afectar a la comunidad por limitar o impedir utilizar las aguas para el riego agrícola o recreación (Acuerdo Marco de Producción Limpia, 2002).

3.2. Gestión del Agua en Túneles

Los túneles mineros son una fuente potencial de drenaje ácido.

Durante la fase de excavación del túnel con el método convencional (perforación y tronadura), los sulfuros quedan expuestos en las paredes del túnel y también se generan marinas (acopios de mineral o roca resultante de la tronadura) que quedan expuestas al oxígeno atmosférico o al agua meteórica (lluvia o nieve), cuando éstas aguas entran en contacto con los túneles o las marinas, se oxidan, se convierten en una fuente de drenaje ácido y se transportan al medio ambiente a través de cursos de aguas superficiales o infiltraciones.

Durante la fase de operación, en los túneles se mantiene un flujo constante de aire a través del sistema de ventilación, lo cual da como resultado la oxidación de los sulfuros presentes en las paredes del túnel y en fracturas. La composición química del agua se verá afectada por los minerales y rocas de los túneles que entren en contacto con ella. El desaguado de los túneles se realiza mediante bombas sumergibles (a corto plazo) y a través de pozos de bombeo (en el mediano y largo plazo) para mantener los niveles de agua controlados. En algunos casos, se construye un túnel de drenaje por debajo del nivel de extracción para drenar por gravedad el agua subterránea hasta la superficie y luego, fluye hacia arroyos, ríos y humedales.

En la etapa de cierre del túnel, no se realiza bombeo y en consecuencia, el nivel freático aumenta e inunda los túneles, galerías y shafts, que se convierten en vías de flujo preferente para la circulación de agua. A medida que el nivel de agua accede a zonas con oxidación de sulfuros, aumenta la acidez, se liberan sulfatos y se disuelven metales, principalmente hierro, aluminio y manganeso. Si el drenaje ácido no se gestiona a tiempo y no se controla adecuadamente, puede afectar las aguas superficiales y/o subterráneas (acuíferos poco profundos).

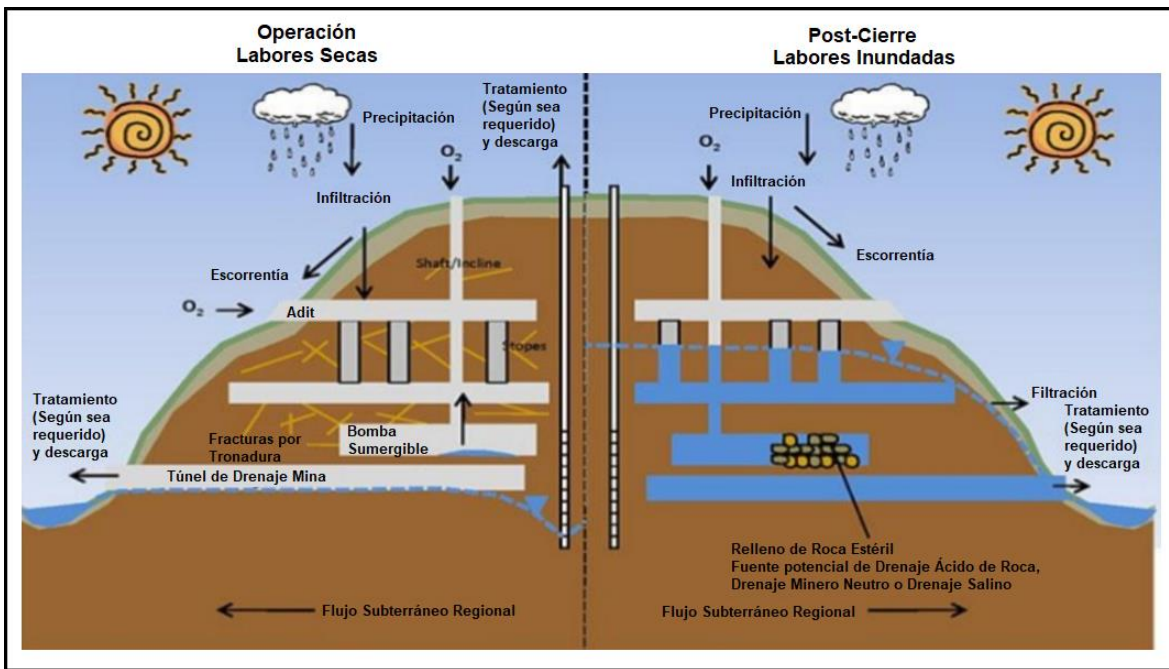


Figura 3.7 Gestión del agua conceptual en túneles mineros durante la Operación y Post-Cierre.

Fuente: (INAP, 2009).

Las partes del túnel son:

- Bóveda: es la parte superior del túnel, es decir el techo curvado.
- Hastiales: son las paredes del túnel.
- Solera: es la parte inferior del túnel, es decir el piso.
- Contrabóveda: es la parte inferior del revestimiento del túnel que se construye en tramos de mala calidad del macizo rocoso y se ubica debajo la solera y se apoya en la base de los hastiales.

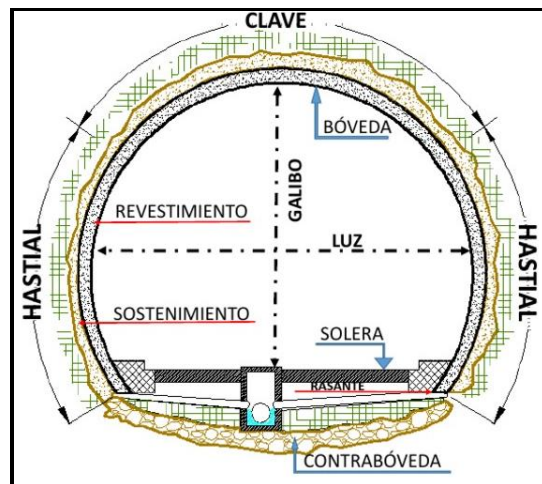


Figura 3.8 Partes de un túnel.

Fuente: (Castro, J).

3.2.1. Drenaje de túneles

El túnel puede ser construido como una estructura drenante y en este caso, el túnel drenará el agua existente de modo permanente, evacuándola por los tubos de drenaje y colectores dispuestos en la base de los hastiales y contrabóveda. De esta manera, se mantendrá aliviada la presión hidrostática y se puede excavar el túnel.

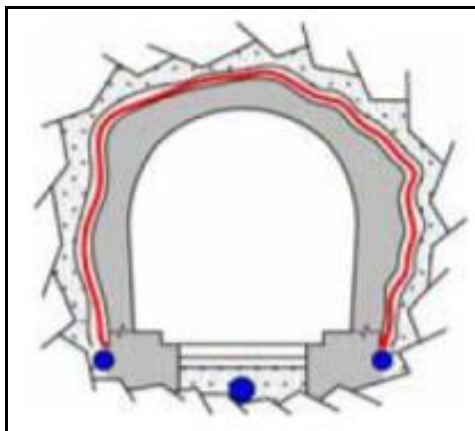


Figura 3.9 Tubos de drenaje (laterales en color azul) y colector principal (central en color azul) en túnel excavado con P & T.

Fuente: (Úbeda, 2011).

El agua acumulada entre el revestimiento/sistema de impermeabilización y sostenimiento/roca (trazo en color rojo en la Figura 3.8), debe ser evacuada rápidamente hasta los drenes longitudinales, para evitar su acumulación, y posibles problemas de sobrepresión en el anillo de revestimiento por aumento de la altura de la columna de agua (por aumento del nivel freático) (Úbeda, 2011).

El drenaje permite el paso del agua por vías de escurrimiento, pudiendo ser exteriores o interiores al túnel. Cuando la pendiente del túnel lo permita, se recomienda dejar canaletas en sus bordes, para desviar el agua que se filtra. 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.

Los sistemas de drenaje (perforaciones en el macizo rocoso y canaletas) permiten ejercer un mejor control de agua durante la excavación, conducirla y disponerla adecuadamente durante la vida útil de la obra (EMB Construcción, 2017).

Por otra parte, estabilizar con preinyección antes de avanzar puede ser percibido como un mayor costo operacional, sin embargo, se traduce en un avance eficiente que disminuye las detenciones y optimiza el desarrollo pudiendo reducir la duración de un proyecto, lo que genera ahorros sobre la inversión operacional. Adicionalmente, el costo de la preinyección resulta significativamente inferior con respecto a tratamientos post-excavación. Es necesario tener presente que controlar el agua que ingresará al túnel, previo al avance, es cumplir con las exigencias ambientales u operacionales de un proyecto y lograr tasas de avance permanentes (EMB Construcción, 2017).

Durante la construcción del túnel, el nivel freático disminuye a lo largo de la traza del túnel debido a que el túnel drena parcialmente el agua del macizo rocoso.

Medioambientalmente, el drenaje de los túneles es muy importante, puesto que en fase de construcción siempre es necesario tratar efluentes que se generan en el túnel ya sea por intercepción de aguas freáticas almacenadas en fracturas y fallas del macizo rocoso que fluyen por las zonas de mayor permeabilidad e ingresan al túnel durante la excavación o por las propias operaciones de construcción del túnel como la perforación.

3.2.2. Aguas de contacto

Las aguas de contacto son las escorrentías y flujos superficiales y/o subterráneos, de origen natural, que entran en contacto con materiales que pueden lixiviarse o ser arrastrados, afectando su calidad, pero cuya existencia y características, especialmente su volumen, no pueden ser previstas con certeza (Wiertz, 2016). Estas aguas son de composición variable en el espacio y tiempo, y son difíciles de predecir y de muestrear.

El (SEA, 2017) define las aguas de contacto como *“Aguas provenientes de escorrentías superficiales y/o subterráneas de origen natural, que no siendo utilizadas en un proceso, actividad o servicio, entran en contacto con estos o con las materias primas, insumos o residuos de los mismos”*.

3.2.3. Intercepción de aguas de contacto túnel

Según el Informe Consolidado de la *“Evaluación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Nuevo Nivel Mina”* de la División El Teniente, las aguas de contacto túnel son conducidas hacia 3 canaletas recolectoras de hormigón de sección rectangular (20 cm de base y 10 cm de altura) con una rejilla superficial. Cada canaleta descarga a tuberías de HDPE. Dichas tuberías se disponen al interior de los túneles enterradas bajo la plataforma.

3.3. Gestión y tratamiento de efluentes

Se debe instalar un sistema de bombeo y estaciones de tratamiento en los portales de los túneles para tratar el agua ácida antes de su devolución al cuerpo receptor. También es necesario considerar una piscina de emergencia revestida con HDPE que reciba el agua durante la interrupción del suministro eléctrico. Esta piscina se ubicará a un costado de la estación de bombeo.

3.4. Normas de emisión de efluentes

El D.S. N°90/2000 es la Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Indica los límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos en aguas marinas, fluviales y lacustres; además tiene en cuenta la capacidad de disolución del desecho. También indica con qué frecuencia y cómo realizar el muestreo de las aguas y qué métodos de análisis aplicarle.

La descarga de residuos líquidos es la evacuación o vertimiento de residuos líquidos a un cuerpo de agua receptor, como resultado de un proceso, actividad o servicio de una fuente emisora.

La fuente emisora es el establecimiento que descarga residuos líquidos a cuerpos de agua receptores, como resultado de su proceso, actividad o servicio, con una carga contaminante media diaria o de valor característico superior en uno o más de los parámetros indicados. El cuerpo de agua receptor o cuerpo receptor es el curso o volumen de agua natural o artificial, marino o continental superficial, que recibe la descarga de residuos líquidos. El D.S. N°46/2002 es la Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas, indica los límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos a través del suelo, a las zonas saturadas de los acuíferos, mediante obras destinadas a infiltrarlo.

La Tabla 3.8 indica los límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos en aguas fluviales.

Tabla 3.8 Límites máximos permitidos según el D.S. N°90/2000.

	Ríos sin capacidad de dilución	Ríos con capacidad de dilución
Parámetro	Límite Máximo Permitido (mg/L)	Límite Máximo Permitido (mg/L)
pH	6,00 -8,50	6,00 -8,50
Temperatura (°C)	35,00	40,00
Aluminio	5,00	10,00
Arsénico	0,50	1,00
Boro	0,75	3,00
Cadmio	0,01	0,30
Cianuro	0,20	1,00
Cloruros	400,00	2000,00
Cobre Total	1,00	3,00
Cromo Hexavalente	0,05	0,20
Fósforo	10,00	15,00
Fluoruros	1,50	5,00
Hierro Disuelto	5,00	10,00
Manganeso	0,30	3,00
Mercurio	0,001	0,01
Molibdeno	1,00	2,50
Níquel	0,20	3,00
Nitrógeno Total	50,00	75,00
Plomo	0,05	0,50
Selenio	0,01	0,1
TSS	80,00	300,00
Sulfatos	1000,00	2000,00
Sulfuros	1,00	10,00
Zinc	3,00	20,00

Fuente: (Biblioteca del Congreso Nacional, 2001).

3.5. Control del agua de infiltración antes de la impermeabilización

Las etapas previas de control de infiltraciones (antes y durante la excavación) son fundamentales para poder generar un escenario propicio para la impermeabilización (Chaparro, 2017). Las etapas previas son las siguientes:

- Estudio detallado del macizo rocoso en el que se emplazará la excavación del túnel. Se deben tener en cuenta aspectos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos.
- Definición óptima de la ubicación de la excavación teniendo en cuenta la estabilidad y la presencia de aguas de infiltración.
- Diseño de la excavación, fortificación, drenaje, impermeabilización y revestimiento que incluya requerimientos funcionales, de constructibilidad, vida útil y mantenimiento del túnel.

En los túneles se realiza un preacondicionamiento de la roca mediante preinyección de cementos ultrafinos, que permiten minimizar fuertes filtraciones que afecten el revestimiento final del túnel (Claussen, 2017).

El control de infiltraciones se realiza a través de métodos de inyección cementicia que se pueden complementar con sistemas de drenaje del macizo rocoso (drenes horizontales y canaletas). Las inyecciones comprenden una etapa inicial de perforación de agujeros los cuales son rellenados principalmente con cemento y aditivos de acuerdo a las condiciones y necesidades de inyección, utilizando bombas de hormigonado de alta presión. Estas inyecciones no solo se aplican para reducir la infiltración de agua, ya que adicionalmente mejoran la estabilidad de la excavación y la durabilidad de la fortificación (Chaparro, 2017).

Antes de impermeabilizar, es fundamental recolectar agua mediante un sistema de drenes, permitir el acceso al interior del túnel a través de tuberías plásticas llamadas barbacanas y posteriormente, conducirla hacia un pozo previamente diseñado. En este caso, la clave es evitar que el agua se filtre por las paredes del hormigón.

Sin embargo, en otros casos, esta metodología no es aplicable y se debe impermeabilizar el interior del túnel haciendo que el agua subterránea escurra hacia los drenes que están en la base de los hastiales y/o en la base de la losa piso. En este caso, se debe colocar hormigón proyectado de soporte sobre el cual se instala un geotextil y una lámina impermeable, construyendo finalmente el muro de hormigón.

3.6. Impermeabilización de túneles

La impermeabilización se realiza cuando la excavación y la fortificación del túnel se encuentren terminadas. La impermeabilización de túneles surge debido a la necesidad de controlar flujos de infiltración de agua que se producen a través del macizo rocoso. El control de estas infiltraciones se puede realizar antes, durante y después de las excavaciones (EMB Construcción, 2017).

El objetivo de la impermeabilización es proteger al túnel de la humedad o de la entrada de aguas ácidas. El riesgo de filtración de agua en la excavación del túnel se origina principalmente en las fallas.

Es muy importante tener en cuenta durante la planificación, diseño y construcción del túnel los siguientes factores:

- Condiciones del terreno y tipo de construcción.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Grado de impermeabilización requerido según el servicio que prestará el túnel.
- Elementos necesarios y específicos de la impermeabilización.
- Daños a los que puede estar sujeta la impermeabilización.

El costo de impermeabilización será menor si se realiza preinyección. Los productos utilizados para pre y post inyección son resinas de poliuretano, monocomponentes y bicomponentes, microcementos y silica coloidal. La selección del tipo de material depende de la geología, la exigencia de impermeabilización del túnel y los flujos de agua encontrados (EMB Construcción, 2017).

3.6.1. Tipos de impermeabilización de un túnel

Existen principalmente dos tipos de impermeabilización. La primaria en fase constructiva que consiste en la captación directa de filtraciones importantes y su conducción hacia conductos de drenaje mediante métodos *Oberhasli* o media caña, y la impermeabilización principal en fase de explotación que consiste en la recolección del agua de infiltración mediante láminas que recubren toda la sección conduciendo el agua a los drenes laterales. En el mercado nacional existen láminas drenantes para túneles con aguas ácidas como las que se muestran en la siguiente figura:

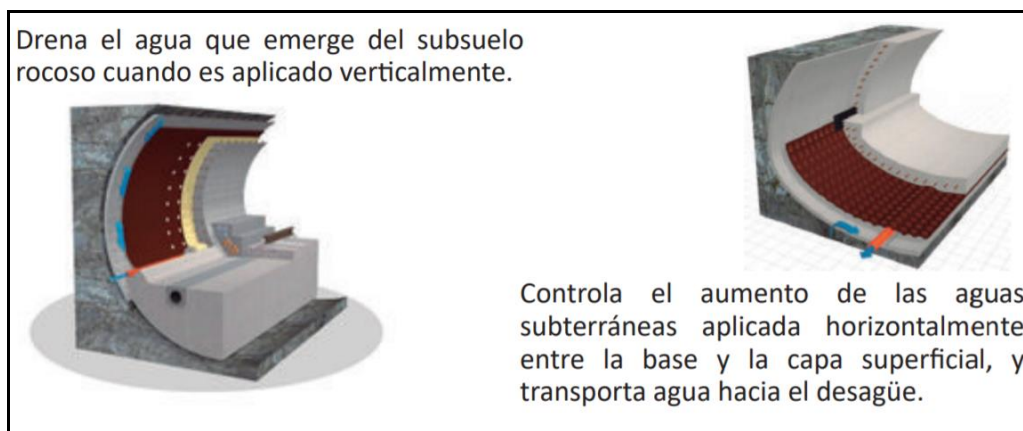


Figura 3.10 Membranas drenantes color café.

Fuente: (Dynal Industrial S.A, 2019).

Con respecto a las condiciones del terreno, se pueden distinguir tres tipos:

3.6.1.1. Terreno Duro

En el caso de terrenos duros, se recomienda eliminar irregularidades y rellenar fracturas mediante hormigón proyectado y aplicar después la impermeabilización sobre esta superficie ondulada y rugosa. Después se revestirá con hormigón proyectado si es necesario formar la

estructura de soporte del túnel, teniendo en cuenta la presión del terreno e incluso del agua (Sika S.A. Chile).

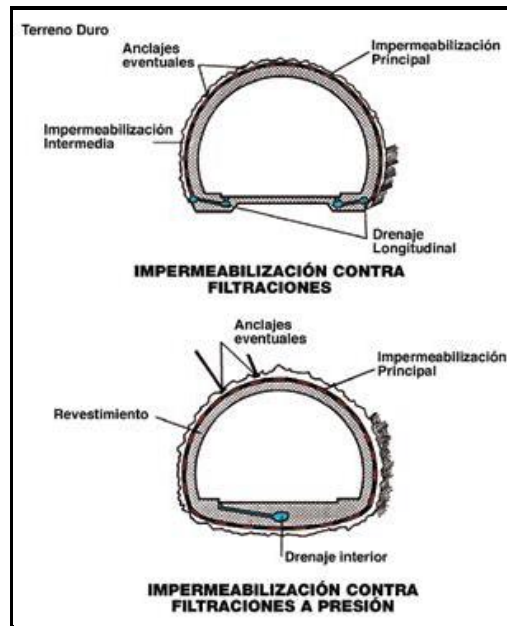


Figura 3.11 Detalle para terrenos duros.

Fuente: (Sika S.A. Chile).

3.6.1.2. Terreno Fracturado

En el caso de terrenos fracturados, se realiza un sostenimiento previo en cada fase capaz de garantizar la seguridad del túnel y el avance. Es sobre este soporte y antes del revestimiento estructural definitivo sobre el que se realiza la impermeabilización (Sika S.A. Chile).

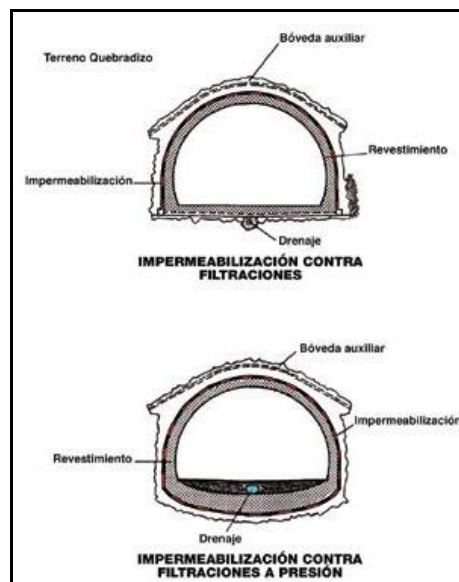


Figura 3.12 Detalle para terrenos quebradizos.

Fuente: (Sika S.A. Chile).

3.6.1.3. Terreno Blando

En el caso de terrenos blandos (plásticos) existen dos tipos de impermeabilización para este tipo de terrenos:

- Sellado de juntas entre dovelas.
- Una impermeabilización de superficies de dichas dovelas (en caso de dovelas reticulares o metálicas, es necesario primero igualar la superficie como soporte de la impermeabilización).

Como la unión entre las dovelas y la impermeabilización no es suficiente para soportar la presión del agua, es necesario construir un revestimiento interior con hormigón armado (Sika S.A. Chile).

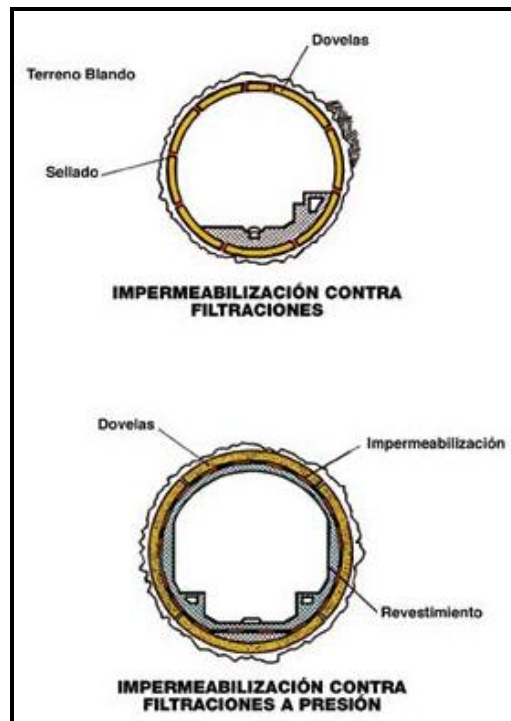


Figura 3.13 Detalle en el caso de terrenos blandos.

Fuente: (Sika S.A. Chile).

En cuanto a la impermeabilización de labores subterráneas, se destaca lo siguiente:

- Dada la frecuencia con que se repiten los deterioros en los túneles debidas a humedades y filtraciones, se debe dedicar una mayor atención a los proyectos, en relación con los métodos, procedimientos y materiales de revestimiento, en túneles nuevos, a fin de conseguir una impermeabilización apropiada.
- Los costos de impermeabilización para un túnel ya ejecutado son siempre superiores a los costos de la impermeabilización de un túnel en ejecución.
- En la construcción de un túnel, el sistema de impermeabilización debe ser coherente con el sistema de excavación y revestimiento seleccionados.

- Toda impermeabilización está compuesta de varias fases y la elección del conjunto de ellas es lo que define un sistema.
- Es más económico captar el agua, drenarla y dirigirla a las cunetas.

3.6.2. Sistemas de Impermeabilización

Según (EMB Construcción, 2017), los sistemas de impermeabilización de túneles se diseñan para:

- Resistir a la presión total del agua con una impermeabilización completa y sin sistema de drenaje de las aguas subterráneas.
- Resistir la presión del agua limitada con un sistema parcialmente drenado para el alivio parcial de las tensiones.
- Aliviar la presión de agua total a través de sistemas de drenaje dirigidos.

La función del sistema de impermeabilización y drenaje es proteger el hormigón de aguas agresivas como es el caso de las aguas ácidas, las cuales tienen altas concentraciones de sulfatos. Por este motivo, para controlar las filtraciones, se ha previsto que antes de colocar el revestimiento se instale un sistema de impermeabilización con láminas sintéticas prefabricadas de PVC-P (policloruro de vinilo plastificado) o VLDPE (polietileno lineal de muy baja densidad) para garantizar la absoluta impermeabilidad del túnel. El sistema se compone de una geomembrana como elemento impermeable y un geotextil como capa de protección y drenaje que recogen el agua hacia un colector principal que la transporta fuera del túnel.

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, 2016). 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, 2016). 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:

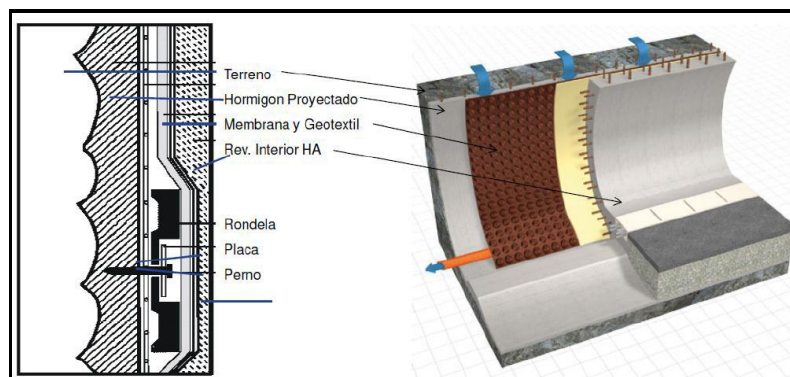


Figura 3.14 Ubicación del sistema de impermeabilización en túneles.

Fuente: (Pozo, 2017).

Respecto a la impermeabilización a través de membranas, el mercado ofrece varias alternativas como los tradicionales sistemas de láminas asfálticas y membranas sintéticas. También, hay membranas de bentonita sódica que tienen la propiedad de expansión cuando está en contacto con el agua. Para túneles bajo el nivel del terreno natural se pueden usar membranas drenantes que permiten la evacuación de agua hacia zonas inferiores del terreno o hacia drenes previamente proyectados evitando la presión hidrostática sobre el muro de hormigón.

Según lo afirmado por (Chaparro, 2017), lo más utilizado para impermeabilización de túneles es la instalación de capas de geotextil y la posterior instalación de membranas de PVC (policloruro de vinilo). La colocación de dos capas de material (geotextil + PVC) hacen de barrera física entre el terreno natural y la estructura, con el fin de impedir filtraciones de agua y garantizar un correcto sellado, evitando así los efectos negativos del agua en la estructura.

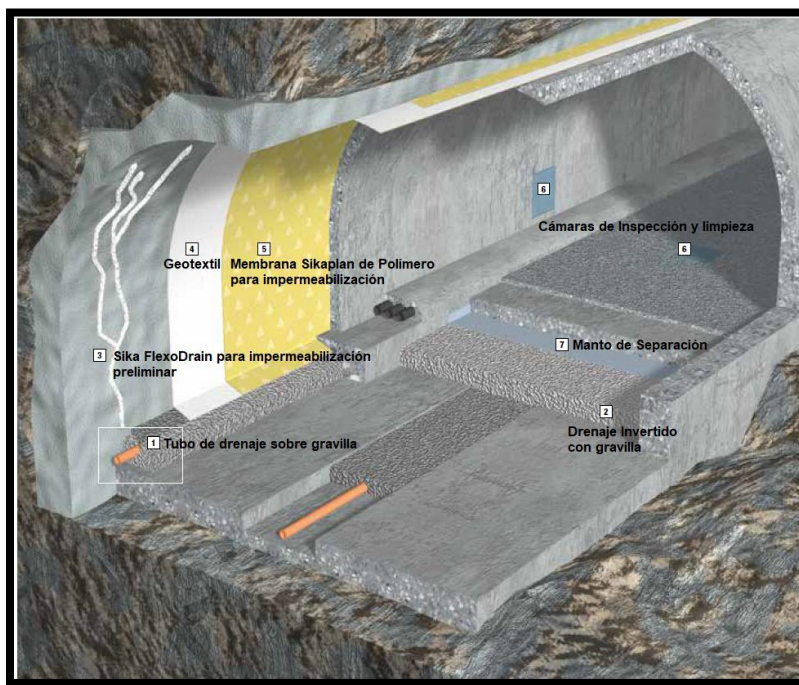


Figura 3.15 Sistema de Impermeabilización de un túnel excavado con P&T.

Fuente: Sika S.A. Chile.

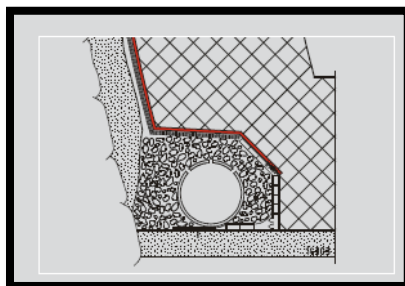


Figura 3.16 Vista de perfil del tubo de drenaje.

Fuente: Sika S.A. Chile.

Un sistema de impermeabilización minimiza la infiltración de fluidos al interior del túnel.

En los túneles es inevitable la infiltración de agua a presión a través de fracturas de las rocas, agua que se debe conducir desde la clave del túnel hacia los canales laterales y evacuarla hacia el exterior. El sistema de drenaje de agua *Flexodrain* de Sika es un sistema flexible de drenaje para túneles mineros. Una de las ventajas es que se puede instalar rápidamente porque cuenta con largas pestañas para montaje e instalación con pistola de clavos.

La filtración de agua donde los anclajes/pernos penetran en el revestimiento del hormigón proyectado es recolectada a través de un sistema de drenaje que impide el ingreso de agua al túnel permitiendo un sustrato seco para instalar posteriormente la membrana de impermeabilización.



Figura 3.17 Sistema FlexoDrain.

Fuente: Sika S.A. Chile.

La selección del sistema depende de la presión del agua, las condiciones del agua subterránea, el régimen de mantenimiento y los impactos ambientales.

La utilización de inyecciones desde el exterior del túnel acompañada de un “paraguas” de “jet grouting” o bien desde el interior del túnel. En general, en terrenos de mala calidad saturados, se combinan procedimientos de drenaje e inyección desde el propio túnel. Es frecuente que en circunstancias difíciles se dispongan taladros de longitud apreciable (30m–100m), perforados desde el frente, para detectar presiones o caudales elevados y permitir el drenaje.

4. IMPACTOS DE LAS AGUAS ÁCIDAS EN TÚNELES MINEROS

Se deben identificar las fuentes potencialmente generadoras de drenaje ácido y la relación fuente-ruta-receptor, con el fin de gestionar los potenciales impactos generados y el riesgo a la salud de las personas y/o al medio ambiente para asegurar la estabilidad química de la fuente durante la vida útil. Esta gestión debe permanecer en el tiempo, con el fin de prevenir, controlar y/o mitigar los impactos del drenaje ácido en el largo plazo.

4.1. Ocurrencia del drenaje ácido

El drenaje ácido puede ocurrir de 4 formas distintas:

1. Drenaje ácido asociado a la meteorización de las marinas, fuera del túnel; se trata igual que cualquier botadero generador de drenaje ácido. En este caso, la roca es potencial generadora y al excavar o perforar el túnel queda expuesta a la meteorización.
2. El túnel intercepta agua que ya presenta características de drenaje ácido por un proceso natural de meteorización de minerales sulfurados en superficie o en una formación permeable (como el caso de Pascua Lama). En este caso, el problema se presenta desde el inicio de la etapa de construcción del túnel.
3. Generación de drenaje ácido asociado directamente a la construcción del túnel que permite el ingreso de aire (y por ende de oxígeno) al sistema. En este caso, el problema puede no aparecer en forma inmediata, pero tiende a agudizarse con el tiempo.
4. Drenaje ácido asociado a actividades mineras, en adits que reciben agua de la mina y con el tiempo se acidifican (como el caso de El Teniente).

La gestión de aguas ácidas en túneles mineros comprende las etapas de caracterización, predicción, prevención y control, tratamiento y monitoreo.

4.2. Programa de caracterización específico para túneles.

Este programa considera una caracterización sistemática de las rocas y de las aguas durante el avance del túnel. Cabe destacar la importancia de caracterizar las formaciones geológicas que va a atravesar el túnel, pero también las formaciones adyacentes y sobre todo las aguas subterráneas. En algunos tramos, los túneles se excavan por debajo del nivel freático o influyen en él, presentan infiltraciones de agua en la bóveda, hastiales y/o solera, pudiendo ocasionar graves problemas durante el avance. En rocas fracturadas, la influencia del agua es un aspecto importante que se debe considerar. El agua que circula por las fracturas, es decir, la permeabilidad secundaria, puede producir reacciones químicas y modificar la composición del agua y geotécnicamente, afecta a la estabilidad de las excavaciones.

4.2.1. Caracterización Geotécnica

Se realiza un mapeo geotécnico de los frentes de excavación para obtener el valor de la clasificación del macizo rocoso (Rock Mass Rating, RMR por sus Siglas en Inglés) y los datos principales de las zonas con alto fracturamiento y zonas de falla. El RMR es un sistema de calificación del macizo rocoso desarrollado por Bieniawski en 1973 que integra la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, el grado de fracturamiento (Rock Quality Designation, RQD por sus siglas en Inglés), el espaciamiento, la condición y orientación de discontinuidades y la presencia de agua en el frente de excavación. Las versiones del RMR más usadas son las de

los años 1976 y 1989. La versión del RMR más actualizada es la del 2014 e incluye la alterabilidad de la matriz rocosa por efecto del agua. El sistema RMR clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, siendo 0 para roca muy mala y 100 para roca muy buena, las clases de macizos rocosos determinados a partir de la puntuación total se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Clases de Macizo Rocoso según el RMR.

Clase de Macizo Rocoso	Descripción	RMR
I	Roca Muy Buena	81-100
II	Roca Buena	61-80
III	Roca Regular	41-60
IV	Roca Mala	21-40
V	Roca Muy Mala	0-20

Fuente: (Bieniawski, 1989).

Para la caracterización geotécnica se requiere:

1. Determinar la calidad del macizo rocoso en los tramos excavados para evaluar las propiedades geotécnicas y el comportamiento probable del macizo rocoso.
2. Caracterizar las estructuras (fallas y zonas fracturadas) interceptadas por el tramo excavado del túnel. En caso de falla y en función de la diferencia de permeabilidad entre las formaciones adyacentes a la falla y del tipo de relleno, ésta puede ser una barrera frente a las filtraciones o una vía preferencial (por ejemplo, las zonas de falla con relleno arcilloso ocasionan problemas en la construcción del túnel por el ingreso de un alto caudal de agua). Si actúa como vía preferencial y dependiendo del relleno, se generan distintos comportamientos frente a la estabilidad que se muestran en la siguiente figura:

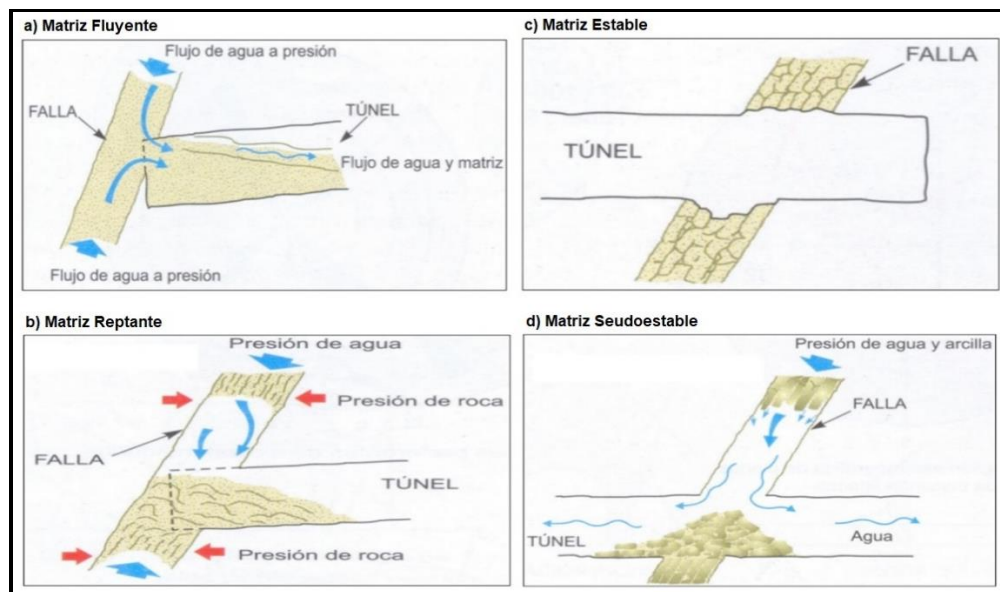


Figura 4.1 Estabilidad de las rocas de falla en un túnel.

Fuente: (Hansen & Martna, 1988).

3. Durante el avance del túnel, también se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - Los niveles de agua de los pozos ubicados por encima de la traza del túnel o en el sector y su variación estacional para evaluar si se esperan afloramientos de agua en los terrenos afectados por la excavación del túnel.
 - Tipo de acuíferos presentes, zonas de recarga (ríos, glaciares, lagos, humedales, etc.) y descarga (lagos, océano, salares, lagunas, etc.) y determinación de sus parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad), la profundidad del nivel freático y la posible conexión con aguas superficiales.
 - La velocidad y dirección de flujo (modelos de flujo).
 - Definir si la presencia de agua será significativa o estará limitada a pequeñas zonas de humedad o goteo de agua por infiltración superficial directa. Identificar zonas de mayor riesgo de filtraciones mediante la observación de humedad en la bóveda y/o hastiales del túnel para el reconocimiento de posibles inestabilidades. Si aparecen flujos de agua en zonas que habitualmente se encuentran secas, es un indicio que la roca sufre una variación de esfuerzos. Las fracturas sufren apertura que conlleva la aparición de humedad.
 - Determinar la calidad del agua mediante la medición de parámetros fisicoquímicos (pH, Eh, temperatura, conductividad eléctrica) y la composición química (concentración de sulfatos, cationes y aniones mayores, concentración de elementos traza). Cabe destacar la importancia de evaluar tanto el caudal como las concentraciones de los elementos, con el objetivo de establecer la carga metálica asociada. Esto permitirá evaluar el aporte del flujo a la transferencia de metales y constituye un dato relevante a la hora de establecer medidas de gestión (Jiao et al., 2014).
 - Cambios en los acuíferos y evidencia de contaminación de las aguas por drenaje ácido.
4. Se debe realizar una caracterización preliminar de las manifestaciones de drenaje ácido presentes en el área del túnel considerando todas las estaciones del año y que incluya lo siguiente:
 - Tomar muestras de ríos o quebradas aguas arriba, aguas abajo y en la confluencia.
 - Tomar muestras aguas abajo del arroyo más cercano al túnel y analizar la cantidad de hierro ferroso (Fe^{2+}) y hierro férrico (Fe^{3+}).
 - En cada efluente, medir con un equipo multiparámetros portátil y registrar el pH, potencial redox (ORP), temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS), contenido de oxígeno disuelto (OD) y salinidad. También, se debe medir la alcalinidad en terreno con un kit de titulación manual y determinar la presencia de hierro ferroso a través de un método colorimétrico de terreno cualitativo. Adicionalmente, medir el nivel del agua en pozos con un pozómetro y registrarlo en una planilla.
 - Para la caracterización del tipo de agua, proveniencia y características de calidad química, se deben tomar y enviar muestras a los laboratorios certificados para análisis químicos de elementos traza (Fe, Al, Mn, Li, Be, Si, V, Cr, Co, Rb, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ba, Ag, Cd, Pb y Hg) por ICP-MS.

- Determinar las concentraciones de los cationes mayores (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2}).
- Determinar concentraciones de sulfatos por turbidimetría y cloruros por titulación.
- Observación y muestreo de minerales secundarios asociados a los drenajes ácidos como eflorescencias salinas (de color celeste-amarillento-blanquecino: sulfatos hidratados de aluminio y de hierro) y precipitados ferruginosos de color pardo amarillentos a pardo rojizos.
- Tomar muestras de mano de ferricretas (conglomerados ferruginosos o brechas sedimentarias de color pardo oscuro, clasto a matriz soportadas con abundante cemento de goetita). Las ferricretas son producto del drenaje ácido y se desarrollan en sectores que favorecen un contacto permanente de aguas ricas en hierro con los depósitos aluviales o coluviales. Están relacionadas a sistemas de paleo-drenaje ácido y son indicadores de la oxidación de depósitos de sulfuros (Fernández Remolar et al 2005, Maza 2015).
- Finalmente, se debe realizar una inspección detallada del estado del túnel recorriendo todo el trazado, describir los daños (tramos con hormigón agrietado y/o pernos oxidados) y especificar la fortificación instalada (tipo de pernos, tipo de malla, características del hormigón proyectado y de los marcos metálicos).

Respecto a la gestión del drenaje ácido en túneles, se recomienda efectuar un programa de predicción desde el inicio de la vida útil de un túnel.

4.3. Programa de Predicción

El objetivo del programa de predicción es determinar si se va a producir drenaje ácido, el tipo y su magnitud, y conocer el comportamiento esperado de la fuente potencialmente generadora o de los materiales que la componen, no sólo durante el desarrollo de la actividad sino también en el futuro, más allá del cese de las operaciones mineras, empleando información actual para predecir lo que ocurrirá en el futuro, no sólo en un año o dos, sino que incluso en cientos de años (Acuerdo Marco de Producción Limpia, 2002).

La información recopilada en esta etapa servirá de base para las etapas posteriores de gestión de la estabilidad química, permitiendo incluso determinar el tiempo requerido para prevenir los posibles impactos ambientales que pueden ser generados (MEND, 2009).

En general, la predicción del drenaje ácido se logra a partir de:

- La determinación de la química del drenaje ácido en tiempo real.
- La predicción del tipo de drenaje que se podría generar en el futuro.
- La determinación de sulfuros productores de acidez (Pirita (FeS_2), Troilita (FeS), Calcopirita (CuFeS_2), Arsenopirita (FeAsS), Sulfato Ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)), los sulfuros que no producen acidez, pero generan metales (Esfalerita (ZnS), Galena (PbS), los minerales que no producen acidez $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Yeso)), consumidores de acidez (carbonatos, aluminosilicatos, etc..) y la determinación de los procesos a los cuales pueden verse sometidos, para así determinar la influencia de estos factores sobre la química del drenaje ácido.
- La determinación del tiempo que tardarían en generarse los cambios significativos en la química del drenaje.

Durante la etapa de predicción, se realiza un seguimiento para verificar el cumplimiento de los objetivos establecidos e incorporar modificaciones a la planificación inicial.

Además, se debe considerar que la predicción del potencial de generación de drenaje ácido en las fuentes es una tarea permanente a lo largo del ciclo de vida útil del túnel minero, por lo que se recomienda diseñar e implementar un programa de predicción, que permita recolectar, validar y complementar la información a través del tiempo, disminuyendo la incertidumbre asociada a la toma de decisiones realizada en etapas posteriores de gestión del drenaje ácido (prevención, control y tratamiento).

Un programa de predicción de drenaje ácido en túneles requiere:

1. Reconocimiento en terreno para la caracterización del drenaje ácido, por lo tanto, se requieren profesionales calificados para armar un equipo multidisciplinario que aborde el problema, es decir que tengan un amplio conocimiento de las condiciones y características del entorno donde se ubica la fuente potencialmente generadora de drenaje ácido. Estas inspecciones en terreno requieren la observación de indicadores *in situ* y descripción detallada del entorno. Esta información se puede obtener de:
 - Observación del macizo rocoso del túnel y sus alrededores.
 - Observación del entorno: presencia o ausencia de vegetación, variaciones en la cobertura de nieve, presencia de algas en el agua, presencia de sales eflorescentes en hastiales y/o bóveda del túnel como resultado de la evaporación a lo largo del curso de agua o precipitados de color amarillo, rojizo o café típicos de las zonas afectadas por drenaje ácido, color y turbidez en los efluentes debido a la abundancia de partículas en suspensión, por ejemplo producto de la presencia de hidróxidos de hierro (Lottermoser, 2007), entre otros.
 - Observación de los ecosistemas acuáticos: perturbaciones o ausencia de flora y fauna acuática (Lottermoser, 2007).
 - Interpretación de colores que evidencian distintos tipos y grados de alteración, lo que permite hacer una estimación de la etapa en que se encuentra el sistema (Dold, 2003). Por ejemplo, el color amarillo o blanco debido a la precipitación de jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) evidencia una fuerte oxidación ácida; los colores verdes y azulados de los sulfuros y carbonatos son producto de la meteorización de los minerales de cobre en condiciones ácidas y alcalinas; o la variedad de colores anaranjados y cafés de la limonita (mezcla de goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$), lepidocrocita ($\text{FeO}(\text{OH})$) y jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)) que evidencian también el proceso de meteorización de los sulfuros de hierro y silicatos (Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, 1997).

Adicionalmente, es importante llevar un martillo geológico, una lupa, un rayador, ácido clorhídrico y un equipo de fluorescencia de rayos x portátil para realizar una descripción preliminar precisa de las muestras de mano obtenidas, indicando la litología, alteración, mineralización (principalmente contenido de sulfuros), tamaño de grano, textura, color, dureza, presencia de fracturas y fallas, alteración y evidencia de óxidos de hierro, precipitados, que en conjunto a la información generada en la etapa de descripción contribuya a la caracterización

detallada del macizo rocoso que forma o formará parte del túnel considerado fuente potencialmente generadora de drenaje ácido.

2. Técnicas instrumentales para la determinación de fases. Existen técnicas de análisis elemental (fluorescencia de rayos X, ICP-MS, ICP-OES y espectrómetro de absorción atómica) y técnicas de análisis mineralógico (Difracción de rayos X, Microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión y QEMSCAM).
3. Análisis de calidad del efluente; técnicas de predicción en campo y laboratorio para determinar si se produce drenaje ácido y de qué tipo.
4. El modelamiento de los procesos para predecir comportamientos futuros: el modelamiento es parte fundamental en la predicción de la generación de drenaje ácido, y no sólo permite evaluar la implementación de medidas efectivas de gestión que minimicen el riesgo para la salud de las personas y para el ecosistema, sino que también influye en el diseño, la planificación y toda la vida útil del túnel minero.

El proceso de modelamiento incluye el desarrollo de un modelo conceptual para el origen del drenaje ácido en el túnel, la selección de un código computacional apropiado, la verificación y calibración del modelo con datos de campo, y el análisis de la incertidumbre del modelo (Maest et al., 2005; INAP, 2012).

De todos los códigos de modelamiento del drenaje ácido, los más utilizados son MODFLOW para la predicción del flujo de aguas subterráneas y el código geoquímico PHREEQC (Parkhurst, 1995; Plummer & Parkhurst, 1990; Parkhurst & Appelo, 1999 y 2013) para especiación y transporte reactivo.

Los modelos utilizados en la predicción del drenaje ácido pueden ayudar a:

- Entender la interacción entre el túnel minero y el agua que entra en contacto con éste (Modelos esquemáticos de circulación hídrica local).
- Predecir la calidad y cantidad de drenaje ácido producido en el túnel minero. Los modelos hidrológicos incluyen el destino, transporte y las potenciales descargas del drenaje ácido a través de un sistema de aguas superficiales, la estimación de la calidad del agua en túneles mineros. Los modelos hidrogeológicos para la zona no saturada y aguas subterráneas en cambio, abordan el flujo de agua y el transporte de contaminantes bajo la superficie.
- Evaluar escenarios futuros con enfoque en la gestión integral de las fuentes potencialmente generadoras de drenaje ácido. Los modelos geoquímicos pueden ser utilizados para predecir la generación de drenaje ácido en el túnel, tanto para agua superficial como subterránea. El tipo de modelo a utilizar dependerá del objetivo, del tipo de fuente del drenaje ácido y sus vías de transporte. Los modelos de especiación química son uno de los más importantes. Otro tipo son los modelos de transporte (reactivo o no reactivo) que se acoplan con modelos de reacción para determinar los efectos del flujo en las reacciones y viceversa. El modelo de transporte reactivo es fundamental para analizar procesos fisicoquímicos en acuíferos porque integra procesos físicos, geoquímicos y microbiológicos para describir interacciones de procesos a distintas escalas de espacio y tiempo. Los modelos geoquímicos de equilibrio consideran sólo

reacciones químicas. Estos modelos son estáticos y permiten conocer la distribución de especies químicas en el agua y las reacciones químicas en equilibrio.

- Entender la química del drenaje, por ejemplo, la especiación de elementos químicos (Simulaciones geoquímicas realizadas en PHREEQC), la precipitación o disolución de los productos de reacción y los límites de solubilidad de los minerales, entre otros.

4.4. Modelo Hidrogeológico

La caracterización hidrogeológica resulta fundamental para definir las posibles infiltraciones de agua en el túnel y los potenciales requerimientos de drenaje y/o bombeo. El propósito de la caracterización hidrogeológica es el desarrollo de un modelo cuyo análisis permita evaluar, cuantitativamente, los potenciales efectos de las aguas sobre la estabilidad del túnel. Esta evaluación debe incluir las infiltraciones que afectarían a las operaciones mineras (magnitud, lugar y tiempo de ocurrencia), el rango de presión de poros que afectaría en la profundización del túnel, la potencial ocurrencia de infiltraciones súbitas de agua al túnel, etc.

El modelo hidrogeológico deberá validarse antes de ser empleado como herramienta predictiva. Esta validación deberá apoyarse en los resultados de pruebas de bombeo, los registros de información en pozos de observación, piezómetros y caudales de bombeo del nivel más profundo del túnel. El desarrollo de un buen modelo hidrogeológico implica la elaboración de un modelo conceptual y la elaboración de un modelo numérico. La *“Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA”*, menciona los aspectos más relevantes que se deben considerar.

Un modelo conceptual requiere varios estudios básicos, partiendo por un estudio geológico, continuando con la hidrología de superficie y estudio hidrogeoquímico, para terminar con el estudio hidrogeológico propiamente tal. Para ello se requiere información ambiental de línea base, lo cual normalmente involucra la revisión de estudios anteriores y la consulta en bases de datos de distintos organismos de carácter público. La elaboración de un modelo conceptual requiere de una revisión detallada de la información disponible, labores de terreno y estudios básicos, lo que servirá de sustento técnico a la hora de definir las condiciones hidrogeológicas que serán representadas luego en el modelo numérico y determinarán, además, la precisión y la capacidad predictiva del mismo (SEA, 2012).

Debido a la naturaleza física del flujo del agua subterránea, los resultados de la modelación conceptual de un sistema hidrogeológico deben incluir como mínimo la caracterización de la geometría del acuífero, los parámetros hidrogeológicos que lo representan, las entradas y salidas del sistema, la piezometría (sentido del flujo), el tipo de acuífero y la hidroquímica. Por último, considerando todos los atributos en conjunto, se debe establecer un balance hídrico preliminar (SEA, 2012).

Según lo indicado por (SEA, 2012), los principales aspectos que se espera que el modelo conceptual permita aclarar son:

- La geometría de las unidades hidrogeológicas y sus propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad).

- La información piezométrica, su variabilidad temporal y el sentido de flujo del agua subterránea.
- Las características hidroquímicas y sus variaciones.
- Los mecanismos de recarga y descarga del sistema.
- Clasificar el o los acuíferos (libre, confinado, semiconfinado, etc.)
- Establecer un balance hídrico preliminar.

4.4.1. Estudio Hidrológico

De acuerdo con (SEA, 2012), el estudio hidrológico se enfoca en los procesos hidrológicos superficiales como las precipitaciones (nivales y/o pluviales), escurrimientos y la evaporación, con el fin de estimar la recarga del acuífero resultante de un balance de ganancias (precipitaciones) y pérdidas (escurrimiento, evaporación).

Los factores más importantes a considerar en los estudios hidrológicos son:

- Definición y caracterización del área de influencia hidrológica.
- Recopilación y análisis de información.
- Estimación de recarga por precipitación.
- Estimación de descarga por evaporación.

4.4.2. Estudio Hidrogeoquímico

La hidrogeoquímica de aguas subterráneas consiste en la documentación y análisis de la composición química de las aguas y en la comprensión de los procesos que afectan su estructura (Chapelle, 2005). Para estudios hidrogeológicos tiene como finalidad establecer relaciones entre las fuentes, composición, distribución y circulación del agua en los acuíferos y la geología, mineralogía y sistema de flujo de éstos (Vázquez–Suñe, 2009). Para estudios ambientales tiene como finalidad determinar la calidad química del agua para diversos usos antropogénicos y/o el impacto generado en las aguas por las actividades humanas respecto de un valor de línea base o condiciones ambientales naturales del sistema (Knödel *et al.*, 2007).

El estudio hidrogeoquímico utiliza los análisis de la composición de las aguas para comprender con mayor certeza las dinámicas de los flujos y su interacción y es, además, fundamental para elaborar modelos de transporte de contaminantes y en estudios que aborden aspectos de calidad del agua (SEA, 2012).

La información obtenida en terreno, la calidad y precisión de los análisis químicos es fundamental, por lo que es necesario que la toma de muestras se realice según la Norma NCh411/11Of.98 para el muestreo de aguas subterráneas y que los análisis sean realizados por un laboratorio certificado.

El estudio de la isotopía en las aguas subterráneas permite obtener información relevante para elaborar el modelo conceptual, el cual se relaciona con el origen y dinámica de los flujos de aguas subterráneas y superficiales (SEA, 2012). Específicamente, el estudio de los isótopos estables del agua subterránea tiene como objetivos:

- Identificar el origen del agua de recarga (río, lago, nieve, lluvia).
- Determinar la altitud de la zona de recarga.
- Deducir ciertos procesos fisicoquímicos relevantes (evaporación, interacción agua-roca, etc.).
- Determinar mezclas de agua y deducir fenómenos de interacción con gases.
- Estimar tiempos de residencia.

4.4.3. Estudio Hidrogeológico

El estudio hidrogeológico está orientado a determinar los rangos y distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos (reflejo de las propiedades del acuífero y su anisotropía), así como también a caracterizar el comportamiento del sistema subterráneo (interacción acuífero-cuerpos superficiales, niveles piezométricos, entradas y salidas del sistema, etc.).

El estudio hidrogeológico involucra varias actividades orientadas a caracterizar el comportamiento del sistema subterráneo.

4.4.3.1. Catastro de pozos y piezometría

Según lo indicado por el (SEA, 2012), el objetivo es realizar un análisis de niveles para cada acuífero, desde el punto de vista temporal, para entender el comportamiento piezométrico y establecer tendencias, y desde el punto de vista espacial, para establecer la distribución, gradientes y sentido de escurrimiento.

Para llevar a cabo esta actividad, es necesario elaborar un catastro de pozos de la zona de estudio y analizar el historial de extracciones, las extracciones actuales y los derechos de aprovechamiento de agua.

4.4.3.2. Unidades hidrogeológicas

La definición de unidades hidrogeológicas apunta a caracterizar o conceptualizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema, por lo que resulta indispensable caracterizar potenciales acuíferos, acuitardos, acuícludos y el basamento impermeable del sistema (SEA, 2012).

La caracterización de las unidades hidrogeológicas debería incluir el tipo litológico y su relación con las unidades geológicas previamente descritas, por ende, debe considerar su disposición estratigráfica, geometría y relaciones de contacto, además de sus características hidráulicas principales como conductividad hidráulica (K), almacenamiento (S) y porosidad (n). Para cada unidad hidrogeológica estos parámetros fluctúan dentro de un rango, que debería ser escogido verificando consistencia entre los valores derivados de las pruebas, ensayos de terreno y la literatura. Además, dependiendo de los alcances y de la información disponible, podría ser relevante estimar el caudal pasante por cada unidad hidrogeológica (SEA, 2012).

4.4.3.3. Recarga y descarga

La recarga es el volumen de agua que aumenta la reserva de un acuífero.

(SEA, 2012) sugiere que las principales fuentes de recarga corresponden a:

- Infiltración debido a la precipitación, directamente desde la superficie del sistema o bien desde su periferia a raíz de la lluvia que cae sobre las áreas aportantes laterales y que escurren subsuperficialmente hasta llegar al acuífero.
- Infiltración por riego predial.
- Infiltración desde cauces naturales y canales.
- Entradas subterráneas provenientes de cuencas vecinas.
- Percolación de la red de agua potable.

Las principales fuentes de descarga corresponden a:

- Afloramientos en ríos y esteros.
- Evapotranspiración.
- Descargas subterráneas hacia otras cuencas o en dirección al mar.
- Extracción mecánica (norias y pozos) y gravitacional (galerías subterráneas, adits, túneles).

5. CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta la información recopilada, revisada y analizada de un túnel con presencia de aguas ácidas. También, se proponen medidas de prevención y control de aguas ácidas durante la construcción del túnel, luego se plantean 3 alternativas de tratamiento del drenaje ácido durante la operación. Finalmente, se presenta la medida propuesta para el cierre del túnel y el dimensionamiento del tapón de hormigón de lados paralelos con drenaje de agua permanente.

5.1. Antecedentes del Túnel

El túnel se diseñó y se construyó como un sistema de drenaje del acuífero existente. Si el túnel se hubiera diseñado y construido de tal forma de no alterar (o de alterar lo mínimo el acuífero), eso hubiese significado construir un túnel "impermeable" (rellenando las facturas y las zonas permeables a medida que avanza el túnel). Obviamente, eso significa un mayor costo y una mayor dificultad constructiva, pero minimiza los costos de manejo y tratamiento de las aguas y los costos de cierre. Tal vez globalmente hubiera salido más económico.

5.2. Descripción General

El túnel forma parte de un proyecto minero que se encuentra ubicado en la Cordillera de Los Andes, en el límite fronterizo entre Chile y Argentina. El túnel está ubicado a una altura promedio de 4425 m s.n.m y en su interior funcionará una correa transportadora que llevará el mineral desde el chancador primario ubicado en el lado chileno hasta la planta de procesamiento ubicada en el lado argentino (Figura 5.1).



Figura 5.1 Túnel-Correa.

Fuente: (Modificado de Canadian Mining Journal, 2018).

El túnel tiene 2,7 km de largo, su construcción se inició en octubre de 2010 y actualmente, no está terminado, faltando 50 m por excavar, por lo tanto los frentes de excavación no están

conectados. Además, se encuentran construidos un pique de traspaso y un pique de ventilación (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019). La pendiente del túnel es hacia el lado Argentino y varía entre 5%-16% (Figura 5.2).



Figura 5.2 Localización del Túnel.

Fuente: (Barrick, 2012).

El proyecto minero se paralizó en el año 2013 en su fase de construcción y actualmente, el túnel está cerrado temporalmente y con restricción de acceso de personal (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).



Figura 5.3 Portal del túnel en su condición de cierre temporal.

Fuente: (Barrick, 2015).

El túnel tiene forma de herradura con 6,3 metros de ancho por 5,5 metros de alto y una sección transversal de 30,4 m² aproximadamente. Del lado Chileno, la boca del túnel se ubica a una altura aproximada de 4650 m s.n.m y el portal de salida por el lado Argentino está a más de 4100 m s.n.m. El avance se realizó por ambos frentes, tanto en Chile como en Argentina.



Figura 5.4 Portal del túnel.

Fuente: (Mining Press, 2017).

La construcción del túnel se realizó con el método de perforación y tronadura y la mitad superior del túnel está revestido con shotcrete, el cual se aplica después del avance en la excavación. Actualmente, el proyecto se encuentra paralizado en su fase de construcción y con fecha de agosto del 2019, se estaba implementando un cierre temporal parcial.

5.3. Clima

Según la clasificación climática de (Köppen, 1948), en el sector donde está emplazado el túnel el clima es *Tundra de Alta Montaña* (Figura 5.5). Este tipo de clima se manifiesta siempre en ambientes de altitud que superan los 3000 m s.n.m. El régimen térmico es más frío, pero las oscilaciones térmicas son menores que en el desierto marginal bajo, debido a la altura. La humedad relativa es baja, los cielos son predominantemente despejados. Las precipitaciones son más abundantes en este clima y se producen casi exclusivamente en los meses de invierno, de mayo a agosto. Estas son de origen frontal y muchas veces en forma de nieve (Figura 5.6). En general no existe vegetación desarrollada en este tipo de clima y su relevancia reside en que es una fuente de agua permanente, a través del deshielo que abastece los cursos de agua que fluyen hacia sectores más bajos (Gestión Ambiental Consultores S.A., 2019).

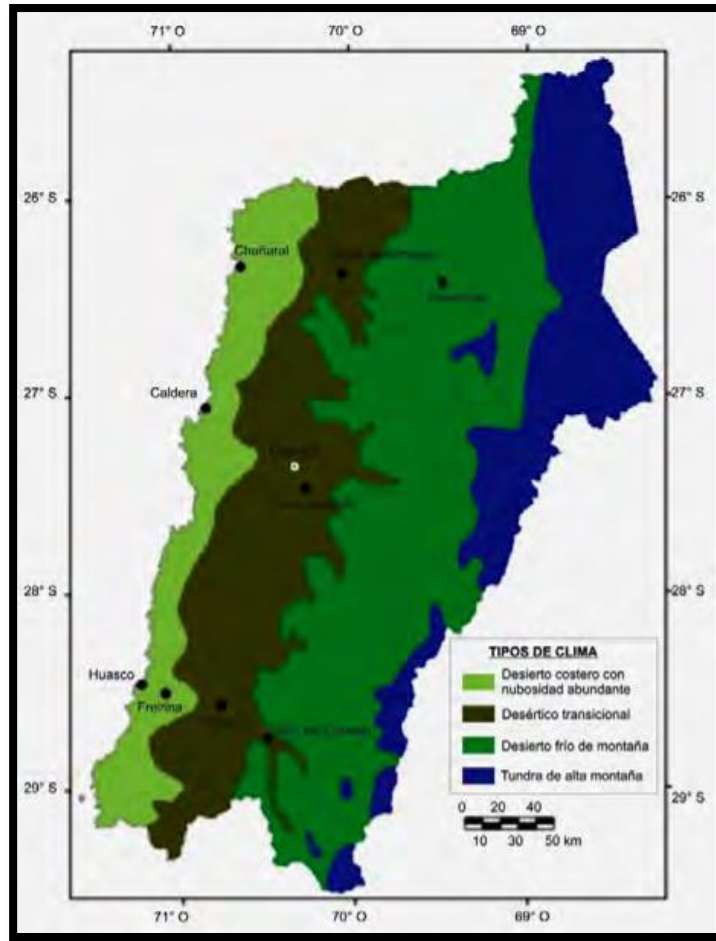


Figura 5.5 Tipos de Clima de la Región de Atacama según clasificación de Köppen.

Fuente: (Gobierno de Chile, 2019).



Figura 5.6 Acumulación de nieve sobre el portal.

Fuente: (Mining Press, 2018).

El drenaje natural de aguas proviene principalmente del derretimiento de nieve de la cordillera en verano. El agua ingresa al túnel a través de las zonas fracturadas del macizo rocoso y fluye pendiente abajo hacia el lado Argentino. La mayor parte del agua que drena naturalmente del túnel es tratada en la planta antes de descargarla al arroyo más cercano.

5.4. Análisis de variables meteorológicas.

Se analizó estadísticamente la información registrada en la estación meteorológica Frontera durante los años 2012 al 2018, la cual está ubicada a mayor altura, en la zona con condiciones climáticas más extremas (en la cima del cordón cordillerano). Las variables meteorológicas analizadas fueron la temperatura, la humedad relativa, la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la precipitación, la radiación solar y la evapotranspiración, con el fin de establecer una caracterización meteorológica en el entorno del túnel.

Tabla 5.1 Coordenadas de la Estación Frontera.

Estación Meteorológica		
Coordenadas WGS84		
Este	Norte	Elevación (m s.n.m)
401585.509	6756648.88	4932

Fuente: (Luna, 2013).

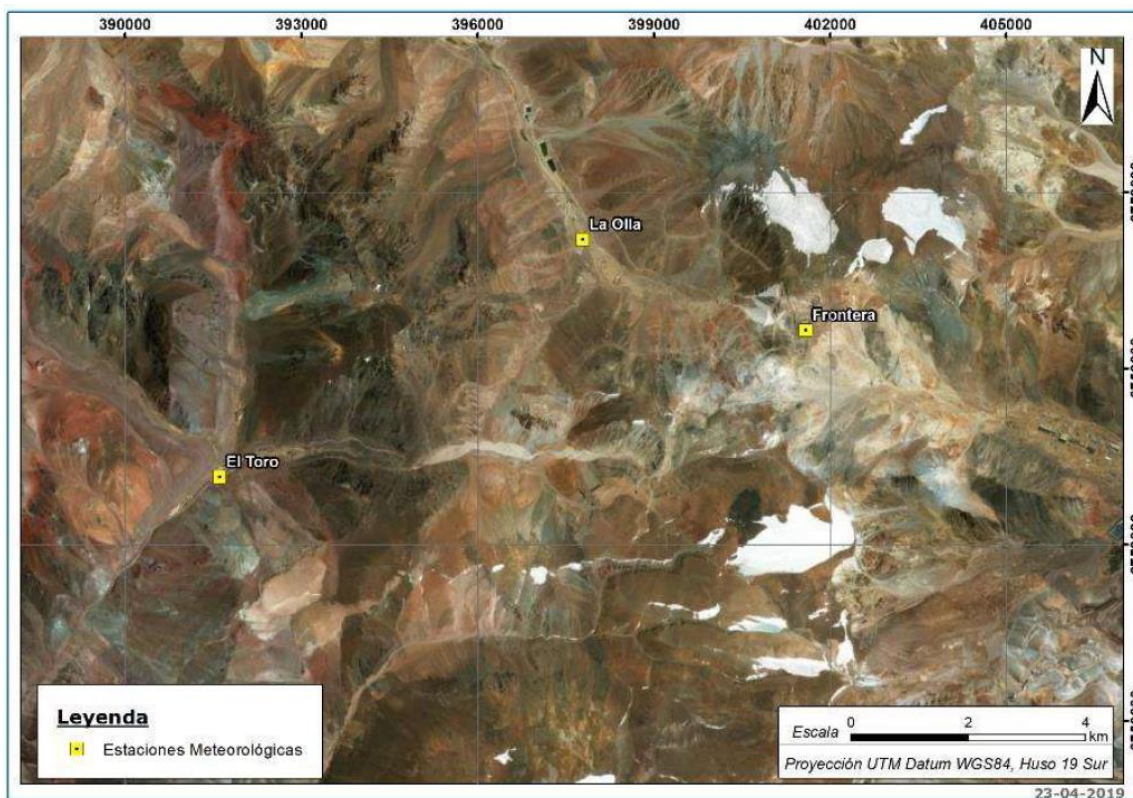


Figura 5.7 Ubicación de la Estación Frontera.

Fuente: (Gestión Ambiental Consultores S.A., 2019).

Se deben considerar los parámetros de las estaciones meteorológicas *in situ* como la precipitación en forma de lluvia o nieve, la cantidad y distribución temporal, y la temperatura incluyendo la amplitud térmica diaria. Además, se pueden considerar los periodos de precipitación y de sequía, la evapotranspiración, la humedad relativa, la velocidad y dirección del viento del sector donde se ubica el túnel minero, ya que influyen en la oxidación de los sulfuros, favorecen la dilución y el transporte de drenaje ácido hacia los receptores (cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, fauna y flora). Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 5.2 Precipitación mensual máxima.

Año	Mes	Precipitación	
		Lluvia (mm)	Nieve (m)
		Máximo	Máximo
2013	Enero	0,00	0,16
	Febrero	0,00	2,22
	Marzo	0,00	0,00
	Abril	0,00	0,00
	Mayo	0,00	0,00
	Junio	0,00	0,00
	Julio	0,00	0,00
	Agosto	0,00	0,00
	Septiembre	0,00	0,00
	Octubre	0,00	0,00
	Noviembre	0,00	0,00
2014	Octubre	0,00	2,79
	Noviembre	0,00	0,00
	Diciembre	0,00	2,77
2015	Enero	0,00	2,80
	Febrero	0,00	0,00
	Marzo	0,00	0,66
	Abril	0,00	2,81
	Mayo	0,00	2,81
	Junio	0,00	0,00
	Julio	0,00	0,00
	Agosto	26,70	0,00
	Septiembre	7,30	0,00
	Octubre	1,17	0,00
	Noviembre	0,00	0,00
	Diciembre	0,00	0,00
2016	Enero	0,00	0,00
	Febrero	0,00	0,00
	Marzo	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

La precipitación máxima se registra en invierno con 26,70 mm de lluvia (en agosto de 2015). Durante el periodo comprendido entre 2013 y 2016, la altura de nieve acumulada es de 17 m.

Tabla 5.3 Velocidad del viento mensual.

Año	Mes	Velocidad del viento (m/s)		
		Promedio		Absoluto
		Medio	Máximo	Máximo
2013	Enero	8,15	16,79	28,57
	Febrero	9,08	15,51	22,87
	Marzo	10,10	17,11	22,65
	Abril	11,31	19,12	35,47
	Mayo	11,12	20,46	30,30
	Junio	10,91	19,93	39,90
	Julio	10,15	19,71	28,65
	Agosto	5,34	13,05	15,07
	Septiembre	7,07	15,75	21,60
	Octubre	14,68	6,54	21,30
	Noviembre	4,38	14,23	21,07
	2014	Octubre	8,61	18,65
Noviembre		9,53	19,47	30,07
Diciembre		8,98	19,07	29,40
2015	Enero	6,62	16,15	22,65
	Febrero	6,40	16,07	27,15
	Marzo	5,90	15,34	27,45
	Abril	8,19	16,87	23,25
	Mayo	10,21	19,82	32,77
	Junio	10,09	20,79	33,00
	Julio	9,15	18,63	31,80
	Agosto	3,97	10,27	38,92
	Septiembre	10,72	18,55	20,02
	Octubre	10,98	25,67	35,02
	Noviembre	10,50	23,33	34,27
	Diciembre	9,54	19,58	26,25
2016	Enero	8,20	17,24	24,82
	Febrero	6,79	15,94	21,45
	Marzo	7,51	16,57	24,07

Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades del viento máximas se registran en invierno con valores de 39,90 m/s en junio de 2013 y 38,92 en agosto de 2015.

Tabla 5.4 Humedad relativa mensual.

Año	Mes	Humedad relativa (%)		
		Promedio		
		Medio	Máximo	Mínimo
2013	Enero	69,80	84,58	45,97
	Febrero	46,89	83,56	17,58
	Marzo	44,88	79,81	19,80
	Abril	28,92	49,24	13,58
	Mayo	50,68	72,19	29,59
	Junio	54,06	75,20	27,94
	Julio	15,57	28,67	7,50
	Agosto	48,19	67,10	27,27
	Septiembre	38,78	68,38	17,77
	Octubre	27,54	48,92	12,67
	Noviembre	34,35	69,60	13,15
2014	Octubre	41,12	71,59	18,17
	Noviembre	40,75	73,77	16,58
	Diciembre	30,46	60,90	10,94
2015	Enero	35,00	72,55	10,62
	Febrero	53,06	86,53	20,83
	Marzo	46,84	78,74	23,85
	Abril	39,56	65,09	18,01
	Mayo	49,34	71,52	27,64
	Junio	27,61	44,35	15,76
	Julio	52,07	77,72	28,95
	Agosto	70,15	92,74	48,81
	Septiembre	52,21	75,98	33,77
	Octubre	63,84	86,42	38,29
	Noviembre	39,51	71,02	16,03
	Diciembre	37,40	68,53	16,21
2016	Enero	47,91	81,65	20,60
	Febrero	38,61	76,96	13,66
	Marzo	50,01	79,89	23,27

Fuente: Elaboración propia.

La humedad relativa varía entre el 22% y el 71%, con un valor promedio del 47%.

Tabla 5.5 Presión atmosférica mensual.

Año	Mes	Presión atmosférica (mbar)		
		Promedio		
		Medio	Máximo	Mínimo
2013	Enero	543,71	546,30	542,00
	Febrero	543,78	548,00	539,30
	Marzo	541,72	545,00	537,80
	Abril	540,71	546,30	534,00
	Mayo	537,84	545,80	530,70
	Junio	536,83	544,60	528,60
	Julio	537,36	540,60	533,30
	Agosto	537,72	544,00	530,50
	Septiembre	536,01	547,10	525,00
	Octubre	537,85	541,90	530,70
	Noviembre	539,33	543,70	528,70
2014	Octubre	542,45	536,50	536,50
	Noviembre	539,89	535,80	535,80
	Diciembre	541,16	545,10	534,60
2015	Enero	544,46	547,30	540,00
	Febrero	543,58	546,90	536,60
	Marzo	543,95	548,00	536,60
	Abril	542,02	547,00	537,80
	Mayo	538,93	545,40	534,20
	Junio	539,17	544,50	531,00
	Julio	535,44	540,90	524,00
	Agosto	534,46	540,60	523,20
	Septiembre	539,33	540,40	538,30
	Octubre	535,53	541,90	522,90
	Noviembre	536,81	541,60	533,80
	Diciembre	541,02	545,20	537,60
2016	Enero	544,20	549,10	540,30
	Febrero	544,91	547,40	542,10
	Marzo	544,12	547,30	539,60

Fuente: Elaboración propia.

La presión atmosférica varía entre 534 y 544 mbar con un valor promedio de 539 mbar.

Tabla 5.6 Temperatura mensual.

Año	Mes	Temperatura (°C)	
		Absoluta	
		Máxima	Mínima
2013	Enero	7,15	-7,74
	Febrero	11,14	-9,28
	Marzo	4,49	-11,34
	Abril	6,64	-15,00
	Mayo	3,825	-18,01
	Junio	6,76	-20,81
	Julio	-4,22	-16,93
	Agosto	2,57	-19,14
	Septiembre	6,96	-23,95
	Octubre	1,23	-19,81
	Noviembre	4,29	-17,94
2014	Octubre	7,616	-11,07
	Noviembre	6,76	-13,21
	Diciembre	6,22	-14,28
2015	Enero	10,94	-7,61
	Febrero	10,22	-11,61
	Marzo	10,17	-14,60
	Abril	8,88	-13,34
	Mayo	3,70	-16,27
	Junio	0,17	-18,07
	Julio	-3,89	-23,01
	Agosto	-2,69	-19,01
	Septiembre	-0,63	-10,07
	Octubre	-1,56	-20,81
	Noviembre	1,03	-16,33
	Diciembre	8,08	-10,21
2016	Enero	11,67	-9,68
	Febrero	11,40	-7,61
	Marzo	7,69	-10,41

Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas máximas se registran en verano con valores de 11,67 °C y 11,40 °C en enero y febrero de 2016, respectivamente. Las temperaturas mínimas registradas son -23,95 °C y -23,01 °C.

Tabla 5.7 Radiación solar mensual.

Año	Mes	Radiación solar (MJ/m ²)		
		Promedio		
		Medio	Máximo	Mínimo
2013	Enero	28,26	33,48	15,41
	Febrero	27,22	32,02	16,28
	Marzo	23,14	27,59	14,84
	Abril	17,32	20,97	9,12
	Mayo	12,49	15,14	4,87
	Junio	10,72	12,11	4,50
	Julio	11,51	11,79	11,13
	Agosto	7,13	19,07	16,25
	Septiembre	19,03	24,42	7,87
	Octubre	25,06	30,19	5,18
	Noviembre	29,44	33,32	14,28
	2014	Octubre	25,83	30,31
Noviembre		16,46	34,12	16,46
Diciembre		33,97	35,10	25,68
2015	Enero	32,90	34,80	26,73
	Febrero	27,47	32,30	11,86
	Marzo	23,22	27,87	11,02
	Abril	18,08	22,37	7,163
	Mayo	12,79	16,28	3,42
	Junio	11,34	13,40	7,68
	Julio	10,70	14,06	2,41
	Agosto	13,51	25,83	2,31
	Septiembre	24,39	25,85	21,67
	Octubre	21,10	30,64	6,01
	Noviembre	28,86	33,94	16,06
	Diciembre	33,35	34,91	22,43
2016	Enero	31,42	34,64	22,40
	Febrero	29,82	33,38	24,91
	Marzo	23,22	27,97	12,01

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de radiación máxima se registran en verano y lo mínimos en invierno. La radiación solar varía entre el 13 y 26 MJ/m², con un valor promedio de 20 MJ/m².

Tabla 5.8 Evapotranspiración mensual.

Año	Mes	Evapotranspiración (mm/día)		
		Mensual		
		Promedio	Máximo	Mínimo
2013	Enero	2,32	3,35	1,31
	Febrero	2,78	4,90	0,94
	Marzo	2,03	3,28	1,09
	Abril	1,70	2,80	0,71
	Mayo	0,93	2,27	0,08
	Junio	0,78	1,76	0,11
	Julio	1,11	1,42	0,89
	Agosto	1,27	2,05	0,41
	Septiembre	1,41	2,90	0,37
	Octubre	2,00	2,86	0,65
	Noviembre	2,75	4,14	0,86
2014	Octubre	2,46	3,86	1,06
	Noviembre	2,26	3,20	1,12
	Diciembre	3,02	4,27	1,35
2015	Enero	3,53	4,76	2,41
	Febrero	2,67	4,32	0,55
	Marzo	2,47	3,89	0,58
	Abril	1,67	2,91	0,28
	Mayo	1,08	2,20	0,25
	Junio	1,14	1,80	0,50
	Julio	0,78	1,43	0,09
	Agosto	2,40	5,82	0,08
	Septiembre	1,61	1,92	1,43
	Octubre	1,20	2,45	0,25
	Noviembre	1,91	3,09	1,02
	Diciembre	2,66	4,21	0,72
2016	Enero	3,05	5,06	1,55
	Febrero	3,32	4,50	1,93
	Marzo	2,27	3,39	0,71

Fuente: Elaboración propia.

En general, los valores de evapotranspiración máximos se registran en verano, con valores de 5,05 mm/día en 2016 y 4,90 mm/día en 2013. Los mínimos se presentan en otoño e invierno de 2013 con valores de 0,08 y 0,11 mm/día, respectivamente.

Adicionalmente, se revisaron los datos anuales reportados en los informes realizados por consultoras para Barrick que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.9 Datos anuales registrados en la Estación Frontera.

Parámetro	Variable	2012	2013	2014	2015	1 ^{er} Trimestre 2016	2017	2018
Temperatura (°C)	Promedio	-6,25	-6,55	-6,25	-6,31	-0,96	-3,9	-4,9
	Máximo	4,02	5,32	3,99	10,94	11,67	11,4	11,9
	Mínimo	-18,62	-20,57	-21,80	-23,01	-10,41	-16,1	-26,2
	Desviación Estándar	4,95	5,30	5,53	5,12	2,82	4,7	5,6
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%	51,4%	36,3%
Humedad Relativa (%)	Promedio	44,27	42,95	41,25	45,85	45,18	50,6	47,3
	Máximo	100	100	98,80	100	100	100	100
	Mínimo	6,15	5,70	5,62	1,83	2,302	3,0	1,2
	Desviación Estándar	25,31	24,72	22,06	23,87	19,91	29,3	29,9
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%	51,4%	36,3%
Velocidad del Viento (m/s)	Promedio	5,20	5,38	7,45	8,54	7,52	10,1	8,1
	Máximo	24,79	24,02	23,81	38,92	24,82	36,4	34,0
	Mínimo	3,02	3,42	3,58	0,00	2,566	0,1	0,0
	Desviación Estándar	4,03	3,92	3,87	3,52	2,48	4,6	4,5
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%	51,4%	36,3%
Dirección del Viento	Promedio	231,49	221,63	221,63	280,42	279,46	W-NW	W-NW
Presión Atmosférica (mbar)	Promedio	539,66	539,63	539,67	539,76	544,43	541,5	540,9
	Máximo	547,00	548,00	546,80	548,00	549,1	552,0	551,9
	Mínimo	525,70	524,30	524,50	522,90	539,6	526,6	520,6
	Desviación Estándar	4,50	4,68	4,89	4,58	2,07	3,9	4,2
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%	51,4%	36,3%

Parámetro	Variable	2012	2013	2014	2015	1 ^{er} Trimestre 2016	2017	2018
Precipitación (mm)	Total Anual	3,65	0,00	0,00	35,16	0,00	0,0	0,0
	Máximo 24hr	1,46	0,00	0,00	26,70	0,00	0,00	0,00
	Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Desviación Estándar	0,10	0,00	0,00	1,54	0,00	0,00	0,00
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%	51,4%	36,3%
Radiación Solar (MJ/m ²)	Promedio	20,77	21,00	19,58	21,38	28,65	25,06	19,01
	Máximo	34,09	35,36	35,02	34,91	34,64	104,54	100,22
	Mínimo	0,00	2,22	2,83	2,31	12,01	0,0	0,0
	Desviación Estándar	8,75	8,93	8,75	9,26	4,69	0,36	0,32
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%	51,4%	36,3%
Evapotranspiración (mm/día)	Promedio	4,55	2,12	1,92	1,93	2,94		
	Máximo	7,99	7,80	4,74	5,82	5,056		
	Mínimo	0,00	0,08	0,17	0,08	0,71		
	Desviación Estándar	2,13	1,55	1,12	1,15	0,92		
	% Datos Válidos	100%	100%	54%	100%	100%		

Fuente: Elaboración propia basada en datos de informes de Barrick.

Respecto a los registros con pocas o nulas precipitaciones en forma de lluvia durante el periodo 2012-2018, éstos se deben a los siguientes factores:

- Al fenómeno de La Niña que se asocia con una disminución de la cantidad de lluvias acumuladas anualmente y menor acumulación de nieve en la alta Cordillera de Los Andes. En Chile, este fenómeno inició en el año 2009 y se mantuvo hasta mediados de Mayo de 2021.
- Fortalecimiento de los vientos alisios que devuelven el agua tibia al pacífico occidental, provocando que se deposite agua fría en la superficie del pacífico oriental, lo cual tiende a generar periodos más secos.
- La Región de Atacama que se caracteriza por sus escasas precipitaciones.
- Las precipitaciones en forma de nieve son las que predominan en la zona cordillerana.

Con base a los registros de la estación meteorológica Frontera ubicada a 4932 m s.n.m se destacan los siguientes valores de precipitaciones en forma de lluvia y nieve:

Se registró una lluvia acumulada de 3,65 mm durante el año 2012.

En el periodo del 18 de Enero al 17 de Noviembre de 2013, se registró una altura de nieve acumulada de 0,54 m.

En el periodo del 16 de Octubre al 31 de Diciembre de 2014, se registró una altura de nieve acumulada de 5,56 m.

Durante el año 2015, se registró una lluvia acumulada de 35,17 mm y una altura de nieve acumulada de 9,08 m.

No se registran lluvias ni caída de nieve durante el primer trimestre de 2016.

No se registran lluvias durante los años 2017 y 2018.

La estación Frontera cuenta con pluviómetros y sensores de altura de nieve para registrar los eventos de precipitación. Respecto a las precipitaciones, en esta zona ocurren principalmente entre abril y septiembre, con más del 90% en forma de nieve, registrándose una media anual de 263 mm para el período comprendido entre los años 1982 y 2004 (Compañía Minera Nevada SpA, 2009).

Se registra un promedio de nieve acumulada de 257,1 cm (~2,57 m) durante el periodo 2001-2012 (Figura 5.8).

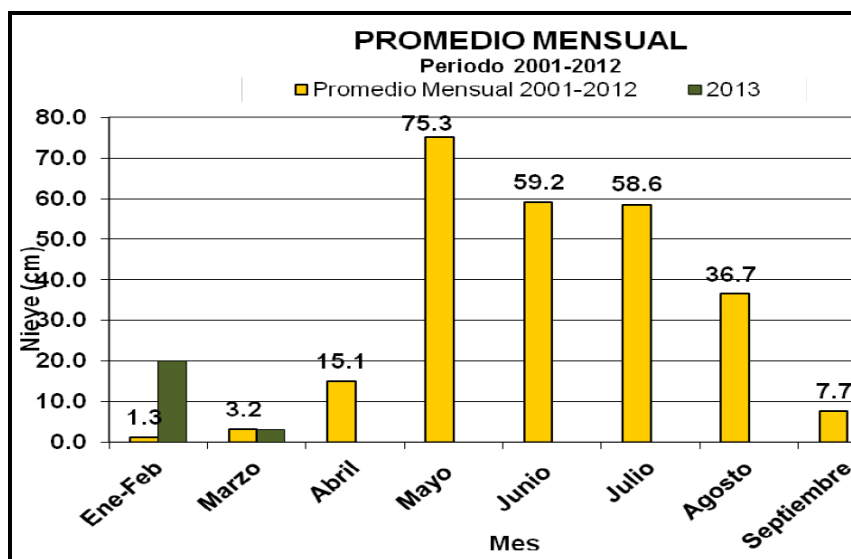


Figura 5.8 Promedio mensual de nieve acumulada.

Fuente: (Luna, 2013).

El promedio horario de temperaturas registra un período de bajas temperaturas entre las 5:00 y 6:00 horas, situación que cambia a partir de las 7:00 horas, aumentando hasta lograr su valor más alto de temperatura entre las 14:00 y 16:00 horas, para luego disminuir y comenzar el ciclo nocturno a las 22:00 horas. Existe una marcada variación estacional de la temperatura característica de alta montaña, con meses más fríos entre mayo y septiembre.

La temperatura en el periodo 2012-2018 varía entre $-26,20^{\circ}\text{C}$ y $11,90^{\circ}\text{C}$, con un valor promedio de $-5,02^{\circ}\text{C}$.

La humedad relativa en el periodo 2012-2018 presenta valores bajos, con promedios de 45,34%.

Los vientos del sector se caracterizan por poseer altas intensidades entre las 12:00 horas y 19:00 horas, con velocidades máximas de 38,9 m/s. La dirección del viento predominante es Oeste-Noroeste.

La presión atmosférica en el periodo 2012-2018 varía entre 520,60 mbar y 552,00 mbar, con un valor promedio de 540,79 mbar.

En el periodo 2012-2018, la radiación solar promedio es de $22,21 \text{ MJ/m}^2$, con un valor máximo de $104,54 \text{ MJ/m}^2$.

En el periodo de 2012-2016, la evapotranspiración promedio es de 2,7 mm/día, con un valor máximo de 8,0 mm/día.

5.5. Geología

Gran parte del túnel atraviesa granitos gris claros y granodioritas, intrusivos dioríticos gris moderados y rocas volcánicas con abundante pirita.

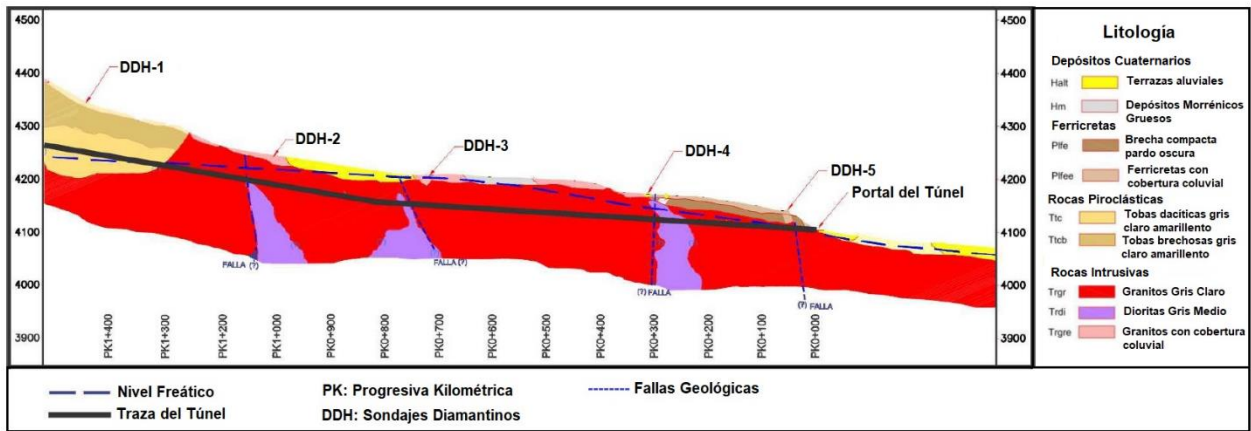


Figura 5.9 Perfil geológico del túnel.

Fuente: (Modificado de Golder, 2007).

El portal del túnel está compuesto por brechas sedimentarias compactas pardo oscuras con abundantes óxidos de hierro (ferricretas). En los primeros 250 m, el túnel atraviesa granitos y granodioritas gris claro, seguidos por un tramo de 50 m de dioritas. A los 700 m excavados el túnel atraviesa dioritas muy compactas, a los 1000 m excavados, el túnel atraviesa granitos y granodioritas. Entre los 1250 y 1500 m excavados, el túnel atraviesa tobas dacíticas silicificadas, seguidas de granitos a granodioritas hasta los 1650 m excavados (Golder Associates, 2013).

Las rocas que están sobre la traza del túnel tienen abundante pirita diseminada, característica de los yacimientos epitermales de alta sulfuración. La mineralización está compuesta por la asociación Alunita-Pirita-Enargita con presencia de metales preciosos como oro y plata.

El túnel atraviesa 6 fallas geológicas significativas con rumbo Norte-Sur a Noroeste-Sureste y alto ángulo e inclinación hacia el Este. En las zonas con alto grado de fracturamiento predominan las fracturas abiertas y las fracturas con relleno arcilloso.

Las fallas, zonas fracturadas y los lineamientos estructurales son zonas de alta permeabilidad que controlan la recarga del agua subterránea que se infiltra al túnel.

5.6. Hidrogeología

Por influencia del nivel freático por encima de la traza del túnel, se produce la infiltración de aguas hacia el interior del túnel. El efluente del túnel y las aguas del arroyo cercano a la zona del túnel son aguas ácidas con valores de pH~ 3,3, de tipo sulfatadas cálcicas y con altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos. Los caudales que salen del túnel varían entre 24 y 70 L/s.

En una inspección al túnel realizada por consultores en noviembre de 2015 se observó lo siguiente:

- Acumulación de nieve sobre el portal.
- Agua de deshielo en el sector del portal y goteos permanentes desde el techo del túnel aproximadamente en el PK10.
- Canalización de un caudal aproximado de 40 L/s en el PK30 hacia las tuberías que la conducen a la planta de tratamiento.
- No se observan filtraciones de las paredes ni techo del túnel en el PK50.
- Túnel con escasas surgencias locales en las paredes del PK250 y no hay filtraciones en el techo. Los parámetros del agua medidos *in situ* en el PK250 son: (pH: 3,01; T: 5,17 °C; CE: 3,87 mS/cm; TDS 2,47 g/L).
- Abundantes surgencias desde drenes, paredes y techo del túnel desde el PK450 hasta el PK560. Los parámetros del agua medidos *in situ* en el PK450 son: (pH: 3,14; T: 4,94°C; CE: 4,8 mS/cm; TDS: 3,06 g/L).

5.6.1. Caudales

El agua ingresa al túnel principalmente por las zonas de falla. En dichas zonas, se infiltra la mayor parte del caudal total de infiltración.

El tramo saturado del túnel está entre los 410 m y 1200 m excavados, este tramo se subdividió en las siguientes zonas de infiltración:

Los tramos con infiltración alta que se caracterizan por un goteo en la bóveda y filtraciones en los hastiales. Goteo intenso y flujos ocasionales desde las zonas fracturadas y pernos. A través de estos tramos, se infiltran 63 L/s aproximadamente.

En los tramos con infiltración moderada, hay ingreso de agua desde la mayoría de los pernos de los hastiales, goteos puntuales en zonas fracturadas. Humedad y goteo ocasional en zonas con shotcrete. A través de estos tramos, se infiltran 19 L/s aproximadamente.

En los tramos con infiltración baja, aparece humedad en zonas fracturadas y en el shotcrete, los goteos son muy leves. A través de este tramo, ingresan 4,5 L/s aproximadamente.

El caudal promedio registrado entre los años 2014 y 2016 en el portal del túnel es 37,36 L/s.

Las variaciones de los caudales de infiltración dependerán de la recarga del macizo. El arroyo es una fuente de recarga del macizo rocoso sobre la zona del túnel.

5.6.2. Niveles

La siguiente figura muestra la variación de los niveles de agua antes y después de la construcción del túnel.

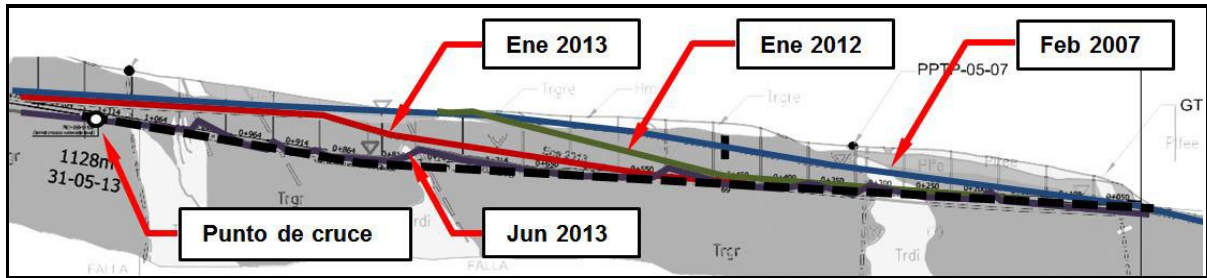


Figura 5.10 Variación del nivel freático entre 2007 y 2013.

Fuente: (Barrick, 2016).

La excavación del túnel atravesó zonas de falla y provocó la evacuación local de agua del macizo rocoso, registrando un descenso del nivel freático a lo largo de la traza del túnel.

Los niveles de agua medidos en los 5 sondajes diamantinos inclinados ubicados a lo largo de la traza del túnel antes de la construcción del túnel se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5.10 Niveles medidos en 2007.

Sondaje	Cota (m s.n.m)	Profundidad (mdbp)	Nivel Freático (mdbp)	Cota Nivel Freático (m s.n.m)
DDH-1	4343,53	120,15	105,83	4237,70
DDH-2	4243,63	90,00	25,48	4218,15
DDH-3	4206,53	85,00	0,11	4206,42
DDH-4	4174,22	160,00	25,33	4148,89
DDH-5	4140,73	120,00	42,99	4097,74

mdbp: metros desde la boca del pozo.

Fuente: (Modificado de Golder Associates, 2007).

La Tabla 5.11 muestra los niveles de agua registrados durante el periodo 2007-2013. Actualmente, no se miden niveles en estos pozos porque algunos se encuentran secos y otros obstruidos o derrumbados.

Tabla 5.11 Niveles medidos durante el periodo 2007-2013.

Pozo	Profundidad (mdbp)	Nivel de Agua (mdbp)		
		Máximo	Promedio	Mínimo
DDH-1	120,15	103,63	99,86	93,29
DDH-2	90,00	33,81	23,47	8,11
DDH-3	85,00	53,17	7,10	0,09
DDH-4	160,00	23,96	20,62	18,48
DDH-5	120,00	41,72	39,55	38,84

Fuente: Elaboración propia con datos de Golder Associates.

5.7. Geomorfología

El túnel se emplaza en la Cordillera de los Andes con un relieve más escarpado por el lado Chileno y con valles más amplios y pendientes menos inclinadas por el lado Argentino. El túnel se encuentra en la subcuenca del Arroyo Turbio.

Debido a su posición en altura, el área está marcada por las acciones glaciales ocurridas en los últimos milenios y por la acción erosiva de los ríos de alta montaña. Estos eventos se manifiestan en la presencia de formas y depósitos característicos, como valles tipo “U” propios de la acción glacial, y valles en donde las formas glaciales originales han sido borradas o modificadas por fenómenos posteriores a la última glaciación, generando quebradas con formas de “V”, derivadas de erosión fluvial (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).

5.8. Glaciares

Los glaciares cercanos al túnel son Los Amarillos y Guanaco. Gran parte de la escorrentía proveniente de estos glaciares fluye hacia diferentes valles. Sola una pequeña parte de la escorrentía del Glaciar Los Amarillos fluye hacia el valle del Río Turbio superior y una parte del escurrimiento del glaciar Guanaco fluye hacia el valle del Arroyo Canito, que entra en el valle del Río Turbio y aguas abajo del portal del túnel (SRK Consulting Argentina S.A, 2015).

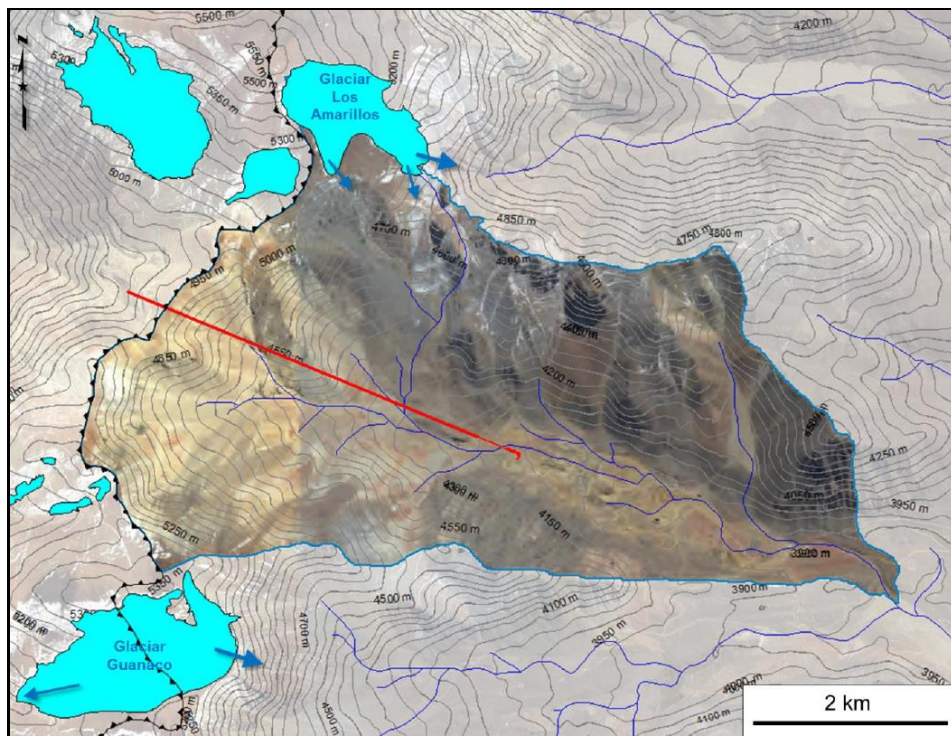


Figura 5.11 Dirección de la escorrentía de los glaciares en la cuenca.

Fuente: (SRK Consulting Argentina S.A, 2015).

5.9. Suelos

Según (USDA 2005), los suelos del área del proyecto minero se insertan en zonas rocosas, pero en inspecciones realizadas en terreno se observó que algunos sectores

presentan características de Entisoles. Los Entisoles corresponden a suelos de desarrollo muy limitado, que provienen de depósitos aluviales recientes, son suelos muy delgados sobre roca; suelos delgados en pendientes fuertes; o dunas estabilizadas con escasa acumulación de materia orgánica. Corresponden a los suelos que se conocían como Litosoles y Regosoles.

Los suelos además presentan texturas principalmente dentro de las fracciones gruesas, siendo la textura más abundante la franco arenosa. Las pendientes varían entre lomas y montañas. La pedregosidad va de abundante a muy abundante y los suelos no reaccionan a la aplicación de ácido clorhídrico (HCl). El riesgo de erosión actual estimado para el área del proyecto es en su mayoría alto (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).

Del contenido de materia orgánica, se concluye que es muy homogénea, con valores muy bajos en su mayoría, lo que se traduce en condición física muy pobre y baja actividad biológica del suelo. Respecto al pH, los sectores de las quebradas presentan pH neutros y básicos, y en sectores de los cerros presentan pH más ácidos (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).

Con esto, se concluye que se trata de suelos pobres, que pueden manifestar toxicidades en los sectores con pH ácido. Esto hace que presenten baja o nula aptitud agrícola, con clasificaciones que van desde CCUS VI en valle a CCUS VII en mayor pendiente, identificándose gran superficie sin CCUS por poseer un mayor nivel de intervención (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).

5.10. Fauna

En general, debido a la altitud y las condiciones climáticas severas, la presencia de fauna en el área directa asociada al proyecto es escasa. La presencia de especies amenazadas, en particular las calificadas como vulnerables, que podría acercarse al sector de las vegas señaladas corresponde a Cóndor, Guanaco, Lagarto de Müller y Lagarto de Roberto (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).

5.11. Flora

Debido a la altitud, el área de estudio (sobre los 3700 metros de altitud en el lado chileno), el desarrollo de la vegetación se encuentra limitado por condiciones climáticas severas, lo que determina que el límite altitudinal superior de distribución de la vegetación se ubique alrededor de los 4200 metros de altitud, es decir, bajo instalaciones como el rajo y el botadero (Gestión Ambiental Consultores S.A, 2019).

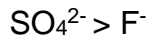
5.12. Línea base del arroyo

En la zona superior del arroyo, las aguas son ácidas con valores de pH *in situ* que varían entre 2,10 y 3,28; con una alcalinidad total máxima < 5 mg/L de CaCO₃, sólidos disueltos totales promedio de 3512 mg/L, altas concentraciones de sulfatos que varían entre 1370 y 2755 mg/L, altas concentraciones de hierro disuelto con valores entre 100 y 295 mg/L, concentración de aluminio promedio de 221 mg/L y concentraciones de manganeso promedio de 10,80 mg/L.

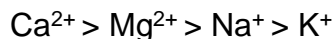
Las concentraciones totales de elementos traza varían de la siguiente forma:

Fe > Al > Mn ≥ Cu > Zn > B > As > Li > Co > Ni > Pb > Cr > Cd > Se > Sb

Las concentraciones de aniones mayores varían de la siguiente forma:



Las concentraciones totales de cationes mayores varían de la siguiente forma:



En la zona superior del arroyo, las aguas son de tipo sulfatadas cálcicas.

La siguiente tabla muestra la caracterización hidroquímica de la zona superior del arroyo:

Tabla 5.12 Parámetros de línea base en zona superior del arroyo.

Periodo: Diciembre de 1998-Diciembre de 2003.

Parámetro	Unidad	n	Mín.	Máx.	Prom.	Límite Máximo Permitido NCh 1333.Of78
pH <i>in situ</i>	Adimensional	40	2,10	3,28	2,85	5,5 – 9,0
pH de Laboratorio	Adimensional	37	2,38	3,15	2,80	6,6-7,2
TDS	mg/L	37	2086	4410	3512	≤500
Sulfatos	mg/L	37	1370,00	2755,00	2248,00	250
Hierro Total	mg/L	37	130,00	565,00	264,00	5,0
Hierro Disuelto	mg/L	17	100,00	295,00	214,00	-
Aluminio Total	mg/L	37	90,00	1710,00	221,00	5,0
Manganeso Total	mg/L	37	<0,001	23,00	10,80	0,2
Calcio Total	mg/L	37	155,00	365,00	257,00	-
Magnesio Total	mg/L	28	28,00	88,00	43,70	-
Potasio Total	mg/L	28	0,60	27,00	6,74	-
Sodio Total	mg/L	37	6,70	18,40	10,60	-
Zinc Total	mg/L	37	2,99	17,00	7,48	2,0
Arsénico Total	mg/L	37	0,009	1,00	0,211	0,1
Boro Total	mg/L	28	<0,50	2,500	0,383	0,75
Cobalto Total	mg/L	37	0,055	0,210	0,118	0,05
Cobre Total	mg/L	37	4,30	27,00	10,80	0,2
Níquel Total	mg/L	37	0,036	0,260	0,097	0,2
Fluoruros	mg/L	28	<0,200	1,680	0,435	1,0
Alcalinidad Total (CaCO ₃)	mg/L	27	<0,600	<5,000	0,104	> 20,00
Cromo Total	mg/L	28	<0,001	0,260	0,043	0,10
Litio Total	mg/L	23	0,021	0,550	0,129	2,50
Plomo Total	mg/L	37	<0,001	1,100	0,087	5,00
Cadmio Total	mg/L	28	0,006	0,063	0,033	0,01
Antimonio Total	mg/L	28	<0,0001	0,005	0,001	-
Selenio Total	mg/L	37	<0,001	0,100	0,007	0,02

Fuente: Elaboración propia.

En la zona inferior del arroyo, las aguas son ácidas con valores de pH *in situ* que varían entre 2,70 y 4,01; con una alcalinidad total promedio de 0,135 mg/L de CaCO₃, sólidos disueltos totales promedio de 1544 mg/L, altas concentraciones de sulfatos que varían entre 526 y 1370 mg/L, altas concentraciones de hierro disuelto con valores entre 1,40 y

84 mg/L, concentración de aluminio promedio de 61,4 mg/L y concentraciones de manganeso promedio de 4,54 mg/L.

Las concentraciones totales de elementos traza varían de la siguiente forma:

Al > Fe > Mn > Cu > Zn > B > Li > As > Pb > Ni > Co > Cr > Cd > Se > Sb

Las concentraciones de aniones mayores varían de la siguiente forma:

SO₄²⁻ > F⁻

Las concentraciones totales de cationes mayores varían de la siguiente forma:

Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺

Las aguas en la zona inferior del arroyo son de tipo sulfatadas cálcicas.

La siguiente tabla muestra la caracterización hidroquímica de la zona inferior del arroyo:

Tabla 5.13 Parámetros de línea base en zona inferior del arroyo.

Periodo: Mayo de 1999-Enero de 2004.

Parámetro	Unidad	n	Mín.	Máx.	Prom.	Límite Máximo Permitido NCh 1333.Of78
pH <i>in situ</i>	u.e.	75	2,70	4,01	3,33	5,5 – 9,0
pH de Laboratorio	u.e.	47	2,22	4,73	3,09	6,6-7,2
TDS	mg/L	47	900	2150	1544	≤500
Sulfatos	mg/L	46	526,00	1370,00	965,00	250
Hierro Total	mg/L	47	2,40	96,00	45,70	5,0
Hierro Disuelto	mg/L	27	1,40	84,00	29,76	-
Aluminio Total	mg/L	46	15,00	410,00	61,400	5,0
Manganeso Total	mg/L	47	0,004	7,00	4,54	0,2
Calcio Total	mg/L	47	77,00	255,00	186,00	-
Magnesio Total	mg/L	38	15,50	33,00	25,90	-
Potasio Total	mg/L	38	2,60	23,50	4,89	-
Sodio Total	mg/L	47	5,130	205,00	17,00	-
Zinc Total	mg/L	47	<0,001	4,30	2,32	2,0
Arsénico Total	mg/L	47	<0,005	1,04	0,084	0,1
Boro Total	mg/L	36	<0,010	1,60	0,296	0,75
Cobalto Total	mg/L	45	<0,010	0,190	0,041	0,05
Cobre Total	mg/L	47	<0,002	5,00	2,78	0,2
Níquel Total	mg/L	47	<0,010	0,30	0,051	0,2
Fluoruro	mg/L	36	0,30	1,81	0,679	1,0
Alcalinidad Total (CaCO ₃)	mg/L	34	<0,60	0,60	0,135	> 20,0
Cromo Total	mg/L	38	<0,001	0,330	0,024	0,1
Litio Total	mg/L	33	<0,001	1,020	0,100	2,5
Plomo Total	mg/L	47	<0,001	0,720	0,056	5,0
Cadmio Total	mg/L	37	<0,0001	0,022	0,009	0,01
Antimonio Total	mg/L	37	<0,0001	0,009	0,001	-
Selenio Total	mg/L	47	<0,0001	0,059	0,004	0,02

Fuente: Elaboración Propia.

5.13. Resultados de Análisis Físicoquímicos

5.13.1. Calidad del agua del túnel

Para determinar las características del drenaje del túnel, se utilizó información registrada entre los años 2014 y 2016. La Tabla 5.14 muestra los resultados de los parámetros indicadores de drenaje ácido (pH, conductividad eléctrica, sulfatos, hierro total y disuelto, aluminio, manganeso, arsénico, cobre, y zinc), algunos cationes mayores (sodio, magnesio, potasio, calcio, cobalto, níquel) y algunos aniones mayores (sulfatos, fluoruros y nitratos).

Tabla 5.14 Características del efluente del túnel.

Periodo: 3 de Enero de 2014 al 11 de Enero de 2016.

Parámetro	Unidad	n	Mín.	Máx.	Prom.	Límite Máximo Permitido D.S. N°90/2000
Caudal	L/s	344	24,18	69,85	37,36	-
pH <i>in situ</i>	u.e.	418	2,45	4,91	3,24	6,0 -8,5
CE	µS/cm	412	1140,00	5090,00	4182,42	-
TDS	mg/L	186	2114,00	6604,00	4628,35	-
Sulfatos	mg/L	186	1236,39	4272,00	3295,02	1000
Hierro Total	mg/L	186	174,20	591,60	430,66	-
Hierro Disuelto	mg/L	186	25,52	548,96	367,12	5
Aluminio Total	mg/L	186	41,80	345,38	244,54	5
Manganeso Total	mg/L	186	22,32	39,07	29,41	0,3
Calcio Total	mg/L	186	294,82	618,00	409,66	-
Magnesio Total	mg/L	186	35,45	117,08	82,78	-
Potasio Total	mg/L	186	4,96	20,15	10,69	-
Sodio Total	mg/L	186	9,81	1544,08	24,80	-
Zinc Total	mg/L	186	0,01	25,21	18,45	3,0
Arsénico Total	mg/L	186	0,05	1,06	0,59	0,5
Boro Total	mg/L	186	0,01	4,27	0,07	0,75
Cobalto Total	mg/L	186	0,01	0,34	0,22	-
Cobre Total	mg/L	186	11,56	26,29	18,23	1,0
Níquel Total	mg/L	186	0,01	0,30	0,19	0,2
Fluoruros	mg/L	186	0,40	1,90	0,68	1,5
Nitratos	mg/L	186	0,70	22,80	7,15	-

CE: Conductividad Eléctrica; TDS: Sólidos Disueltos Totales.

Fuente: Elaboración propia.

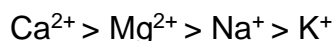
Las concentraciones totales de elementos traza varían de la siguiente forma:



Las concentraciones de aniones mayores varían de la siguiente forma:



Las concentraciones totales de cationes mayores varían de la siguiente forma:



Las aguas del túnel son de tipo sulfatadas cálcicas.

El caudal que sale del túnel varía entre 24,18 y 69,85 L/s con un valor promedio de 37,36 L/s. Las aguas del túnel son naturalmente ácidas, con una concentración de acidez promedio de 2178,26 mg CaCO₃/L (estimada usando *ABATES V.1.41*), valores de pH *in situ* que varían entre 2,45 y 4,91, concentración de sólidos totales promedio de 4628,35 mg/L, conductividad eléctrica promedio de 4182,42 µS/cm, concentraciones de sulfatos promedio de 3295,02 mg/L, concentraciones de hierro total promedio de 430,66 mg/L, concentraciones de hierro disuelto promedio de 367,12 mg/L, concentraciones de aluminio promedio de 244,54 mg/L, concentraciones de manganeso promedio de 29,41 mg/L, concentraciones de arsénico promedio de 0,59 mg/L, concentraciones de cobre promedio de 18,23 mg/L, concentraciones de zinc promedio de 18,45 mg/L. En términos estacionales, los caudales en verano varían entre 24,18 y 66,70 L/s, con un caudal promedio de 38,33 L/s, mientras que en invierno, los caudales varían entre 24,48 y 69,85 L/s, con un caudal promedio de 36,62 L/s. En ambas temporadas, las aguas son ácidas con valores de pH inferiores a 3,5. Sin embargo, el pH en verano es inferior a 4, mientras que el pH en invierno es inferior a 5, con concentraciones de sulfatos promedio de 3367,55 mg/L en verano y 3227,02 mg/L en invierno. Las aguas tratadas del túnel se descargan en el arroyo.

Tabla 5.15 Resultados Calidad del agua del túnel.

Periodo: 03 de Enero de 2014 al 11 de Enero de 2016.

Parámetro	Unidad	VERANO	INVIERNO	Límite Máximo Permitido D.S.Nº90/2000
		Prom.	Prom.	
Caudal	L/s	38,33	36,62	-
pH <i>in situ</i>	Adimensional	3,22	3,33	6,0 -8,5
CE	µS/cm	4283,59	4091,07	-
TDS	mg/L	4802,58	4465,00	-
Hierro Total	mg/L	444,70	417,50	-
Hierro Disuelto	mg/L	390,98	344,75	5,0
Aluminio Total	mg/L	248,44	240,88	5,0
Arsénico Total	mg/L	0,58	0,59	0,5
Boro Total	mg/L	0,04	0,10	0,75
Cobalto Total	mg/L	0,23	0,22	-
Cobre Total	mg/L	18,62	17,87	1,0
Manganeso Total	mg/L	29,72	29,12	0,3
Níquel Total	mg/L	0,19	0,19	0,2
Zinc Total	mg/L	19,14	17,80	3
Sodio Total	mg/L	32,46	17,61	-
Magnesio Total	mg/L	84,74	80,94	-
Potasio Total	mg/L	10,28	11,08	-
Calcio Total	mg/L	423,54	396,64	-
Fluoruros	mg/L	0,60	0,75	1,5
Sulfatos	mg/L	3367,55	3227,02	1000
Nitratos	mg/L	7,56	6,76	-

Fuente: Elaboración propia.

5.13.2. Calidad del agua del arroyo

En el período de Enero de 2013 a Diciembre de 2015, el caudal del arroyo cercano al túnel varía entre 5,44 y 28,73 L/s, los valores de pH in situ son varían entre 2,56 y 3,83, reflejando un rango de pH ácidos; la conductividad eléctrica promedio es de 2524 $\mu\text{S}/\text{cm}$, las concentraciones de sulfatos varían entre 104,80 a 4835,70 mg/L, la concentración promedio del hierro disuelto es de 135,55 mg/L. Las aguas del arroyo exceden los límites máximos permitidos según la Norma Chilena N°1333/Of.78 de calidad del agua para riego. Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos del arroyo se presentan en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Resultados calidad del agua del arroyo.

Periodo: 17 de Enero de 2013 al 01 de Diciembre de 2015.

Parámetro	Unidad	n	Mín.	Máx.	Prom.	Límite Máximo Permitido NCh 1333.Of78
Caudal	L/s	5	5,44	28,73	14,37	-
pH <i>in situ</i>	Adimensional	17	2,56	3,83	3,03	5,5 – 9,0
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	17	306,00	5880,00	2524,18	≤ 750
TDS	mg/L	18	120,00	4878,00	1947,61	≤ 500
Sulfatos	mg/L	18	104,80	4835,70	1774,94	250
Hierro Total	mg/L	18	3,48	696,16	239,30	5,0
Hierro Disuelto	mg/L	18	0,82	501,90	135,55	-
Aluminio Total	mg/L	18	4,42	443,50	190,33	5,0
Manganeso Total	mg/L	18	1,47	33,60	15,98	0,2
Calcio Total	mg/L	18	19,94	434,20	221,62	-
Magnesio Total	mg/L	18	6,69	101,76	50,03	-
Potasio Total	mg/L	18	0,50	111,06	12,66	-
Sodio Total	mg/L	18	2,39	26,13	13,18	-
Zinc Total	mg/L	18	0,53	28,70	10,97	2,0
Arsénico Total	mg/L	18	0,05	7,68	0,75	0,1
Boro Total	mg/L	18	0,04	1,00	0,45	0,75
Cobalto Total	mg/L	18	0,02	0,31	0,15	0,05
Cobre Total	mg/L	18	0,11	35,72	12,94	0,2
Níquel Total	mg/L	18	0,02	0,29	0,12	0,2
Fluoruros	mg/L	18	0,10	6,60	0,98	1,0
Nitratos	mg/L	17	1,83	20,80	6,81	-

Fuente: Elaboración propia.

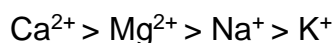
Las concentraciones totales de elementos traza varían de la siguiente forma:



Las concentraciones de aniones mayores varían de la siguiente forma:



Las concentraciones totales de cationes mayores varían de la siguiente forma:



Las aguas del arroyo son de tipo sulfatadas cálcicas.

5.14. Resultados del balance iónico

El balance iónico se realiza para las muestras de agua que presentan análisis de los aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^-) y cationes (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+) mayores. De esta manera, se debe verificar que la suma de miliequivalentes de los aniones sea igual a la suma de miliequivalentes de los cationes. El error del balance iónico está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{error (\%)} = 100 \times \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Ecuación 5.1 Cálculo del Error del balance iónico.

Con base en las concentraciones promedio de los cationes y aniones mayores de la Tabla 4.8, se utilizó la herramienta *ABATES V.1.41* de Earth Systems para estimar el balance de carga iónica, dando como resultado un error del balance iónico del 1,7%, lo cual indica un balance iónico razonable.

$$\text{error (\%)} = 100 \times \frac{\sum 71,15 - \sum 68,77}{\sum 71,15 + \sum 68,77} = 1,7 \%$$

Ecuación 5.2 Error del balance iónico calculado.

Para verificar la calidad o consistencia de la información analizada se utiliza el criterio del balance iónico, propuesto en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW, Edición N°23, 2017), según lo indicado en SMEWW, si el error del balance iónico es menor al 5%, se asume que el análisis es correcto.

Tabla 5.17 Resultados del balance iónico estimado.

% Error del balance iónico	1,7%
% Diferencia de error del balance iónico aceptable	5,0%

Fuente: *Elaboración Propia*.

Una vez determinado el error del balance iónico, se debe tener en cuenta la conductividad eléctrica de la muestra de agua para comprobar si es aceptable o no. Una comprobación que se pueden realizar para validar la calidad del análisis es mediante la siguiente tabla:

Tabla 5.18 Valores de error admisible para valores de conductividad eléctrica del agua. (Modificado de Custodio & Llamas, 1983).

Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	50-199	200-499	500-1999	>2000
Error Admisible (%)	15	5	4	2

Fuente: (SEA, 2012).

Los valores de conductividad eléctrica del efluente del túnel varían entre 1140 $\mu\text{S/cm}$ y 5090 $\mu\text{S/cm}$, con una conductividad eléctrica promedio de 4182,42 $\mu\text{S/cm}$, dando como resultado un error admisible del 2%.

5.15. Análisis de Resultados

En esta sección se analizan e interpretan los gráficos de caudales del arroyo y del efluente del túnel junto con los gráficos de los parámetros indicadores de drenaje ácido: el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, las concentraciones de sulfatos, las concentraciones de hierro total y disuelto, las concentraciones de aluminio, manganeso, arsénico, cobre y zinc.

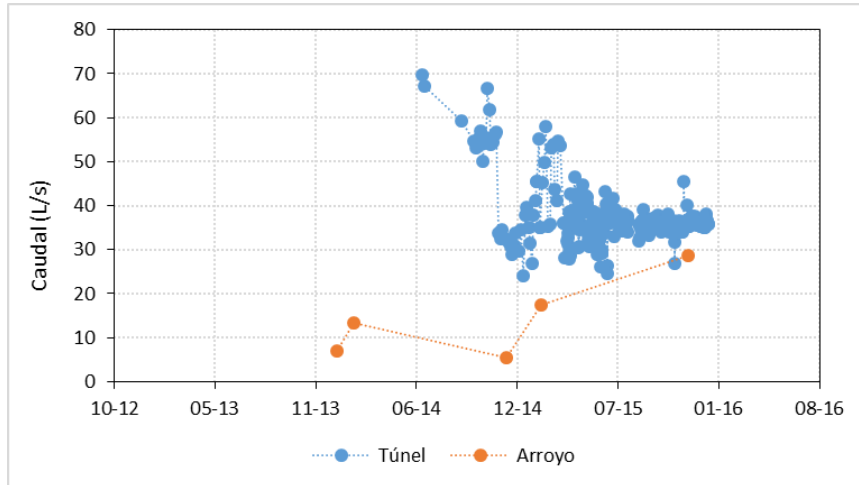


Figura 5.12 Variación temporal del caudal.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el periodo del 3 de Enero de 2014 al 11 de Enero de 2016, los caudales en el túnel fluctúan entre 24,18 y 69,85 L/s, con caudales mínimos en verano (Enero de 2015) y máximos en invierno (Junio de 2014), época en la que hay precipitaciones en forma de nieve en la zona. Durante el periodo del 17 de Enero de 2013 al 1 de Diciembre de 2015, los caudales del arroyo fluctúan entre 5,44 y 28,73 L/s con máximos en verano (meses de deshielo).

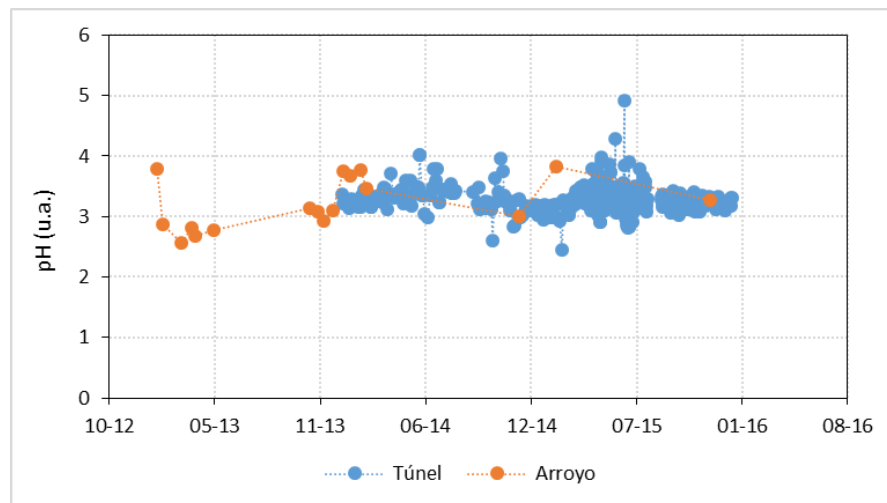


Figura 5.13 Variación temporal del pH.

Fuente: Elaboración propia.

Durante el periodo comprendido entre Enero de 2014 y Enero de 2016, los valores de pH del efluente del túnel varían entre 2,45 y 4,91 observándose rangos de pH ácidos que exceden los límites máximos permitidos por la NCh 1333 (5,5-9,0) y por el D.S N°90/200 (6,0-8,5). El efluente del túnel presenta valores de pH mínimos en verano (Febrero de 2015) y máximos en invierno (Junio de 2015).

Durante el periodo entre Enero de 2013 y Enero de 2015, el pH del agua del arroyo varía entre 2,56 y 3,83 apreciándose rangos de pH ácidos. El arroyo presenta valores de pH mínimos en otoño (Marzo de 2013) y máximos en verano (Febrero de 2015). Al comparar estos valores de pH con el rango de línea base del arroyo entre Diciembre de 1998 y Enero de 2004, el rango de pH varía entre 2,10 y 4,01, por lo tanto, los valores de pH del arroyo entre 2013 y 2015 están dentro del rango de línea base, pero exceden los límites máximos permitidos por las Normas Chilenas NCh 1333 (5,5-9) y NCh 409 (6,5-8,5).

La línea base del arroyo presenta valores de de pH ácido (~4), evidenciando una acidificación natural de las aguas y la estación ubicada en la zona superior del arroyo registra valores de pH más bajos con respecto a los valores de pH de la estación ubicada en la zona inferior del arroyo.

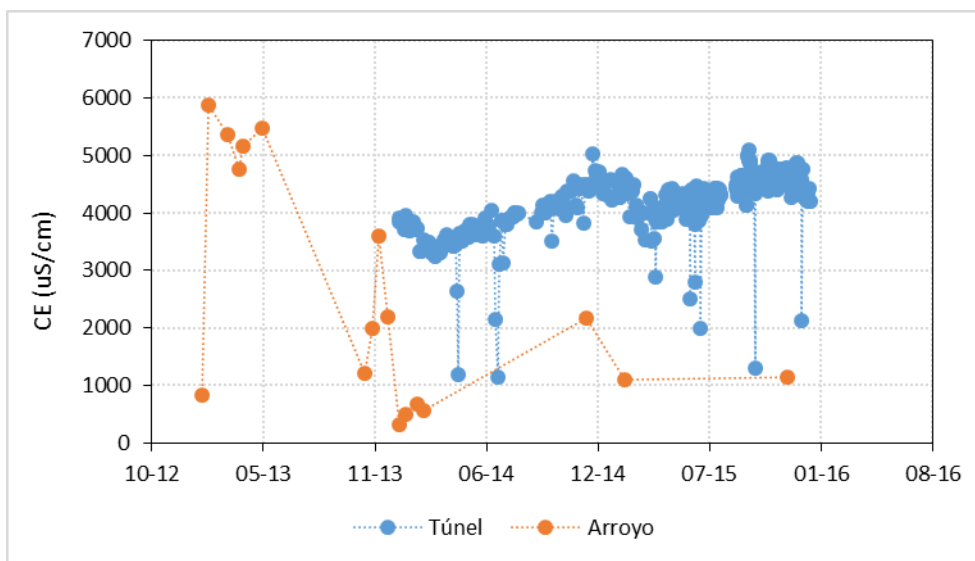


Figura 5.14 Conductividad eléctrica vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de conductividad eléctrica del efluente del túnel varían entre 1140 y 5090 $\mu\text{S/cm}$, con mínimos en invierno (Junio de 2014) y máximos en Primavera (Septiembre de 2015). De modo que las conductividades eléctricas del efluente del túnel exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333 (750 $\mu\text{S/cm}$).

Los valores de conductividad eléctrica del arroyo varían entre 306 y 5880 $\mu\text{S/cm}$ con mínimos y máximos en verano, Enero de 2014 y Enero de 2013 respectivamente.

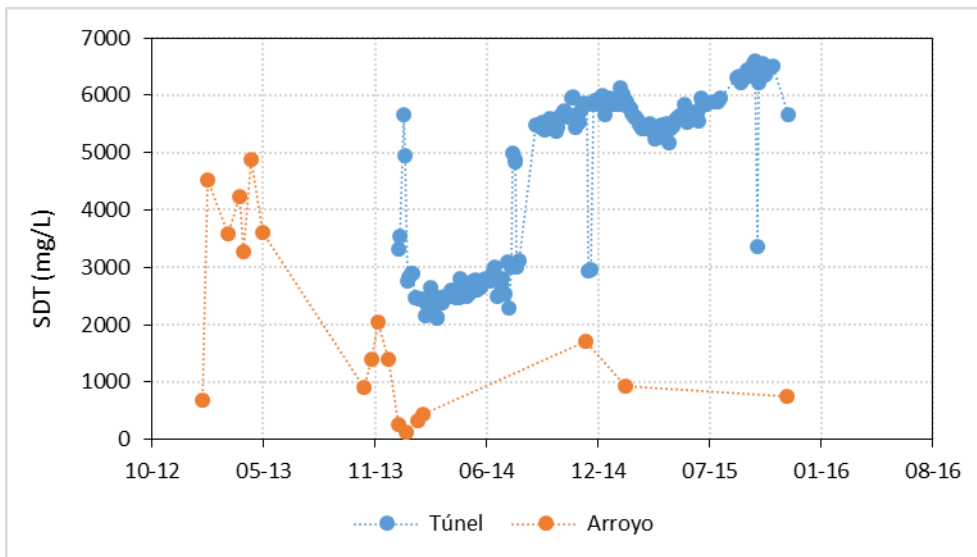


Figura 5.15 Sólidos disueltos totales vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los sólidos disueltos totales del efluente del túnel varían entre 2114 y 6604 mg/L con mínimos en otoño (Marzo de 2014) y máximos en primavera (Octubre de 2015). Por lo tanto, los sólidos disueltos totales del efluente del túnel exceden el límite máximo permitido por la NCh1333 (450 mg/L).

Los valores de sólidos disueltos totales del arroyo varían entre 120 y 4878 mg/L con mínimos en verano (Enero de 2014) y máximos en otoño (Abril de 2013). Al comparar estos valores de sólidos disueltos totales con el rango de línea base 1998-2004, los valores de sólidos disueltos totales varían entre 900 y 4410 mg/L, por lo tanto, los valores de los sólidos disueltos totales del arroyo entre 2013 y 2015 están fuera del rango y exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333 y por la NCh 409 (1500 mg/L).

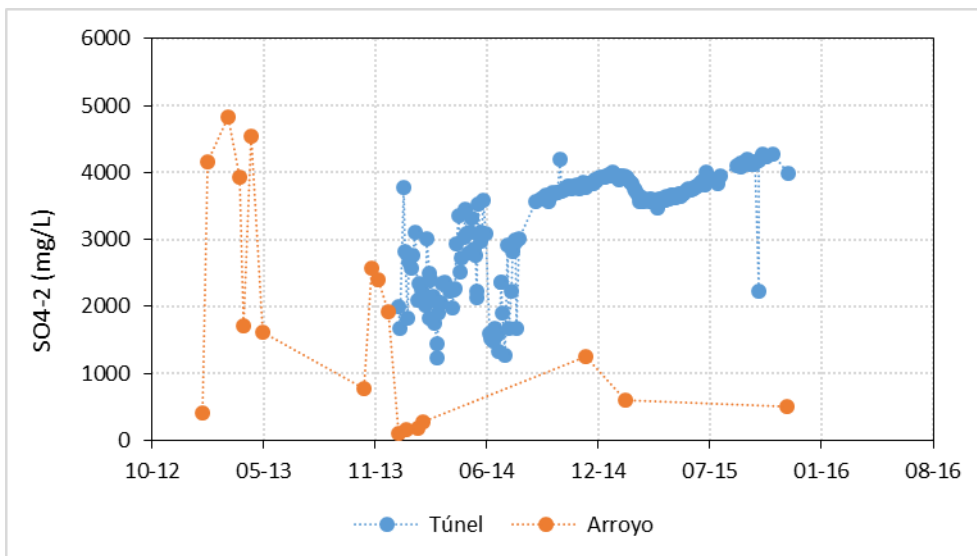


Figura 5.16 Concentraciones de sulfatos vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de sulfatos del efluente del túnel varían entre 1236,39 y 4272 mg/L con mínimos en otoño (Marzo de 2014) y máximos en primavera (Noviembre de 2015). De modo que las concentraciones de sulfatos exceden los límites máximos permitidos por la NCh 1333 (250 mg/L) y por el D.S N°90/2000 (1000 mg/L).

Las concentraciones de sulfatos del arroyo varían entre 104,80 y 4835,70 mg/L con mínimos en verano (Enero de 2014) y máximos en otoño (Marzo de 2013). Al comparar estos valores con el rango de línea base del periodo 1998-2004, el rango de concentraciones de sulfatos varía entre 526 y 2755 mg/L, por lo tanto, las concentraciones de sulfatos del arroyo entre 2013 y 2015 están fuera del rango de línea base y exceden los límites máximos permitidos por la NCh 1333 y la NCh 409.

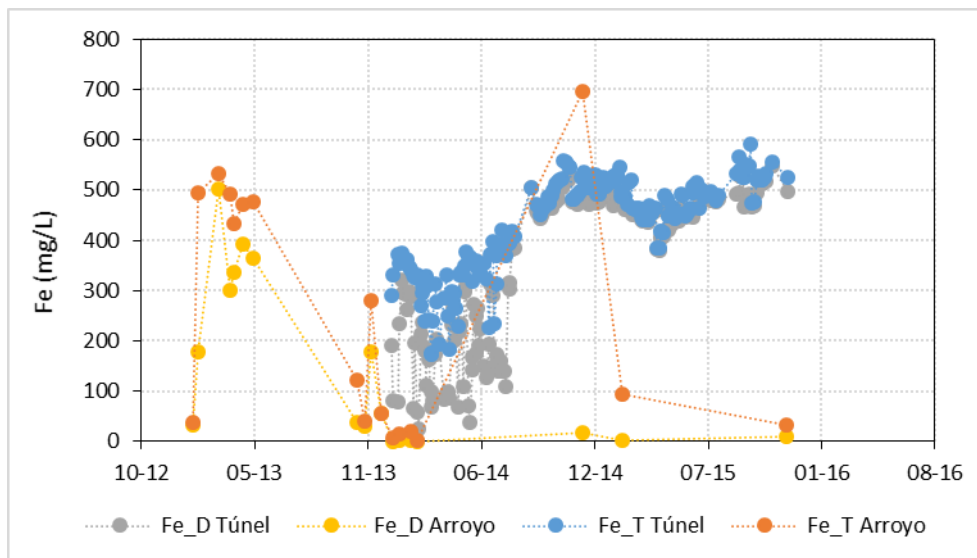


Figura 5.17 Concentraciones de Hierro vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de hierro total del efluente del túnel varían entre 174,20 y 591,60 mg/L con mínimos en otoño (Marzo de 2014) y máximos en primavera (Septiembre de 2015). Las concentraciones de hierro disuelto del efluente del túnel varían entre 25,52 y 548,96 mg/L con mínimos en verano (Febrero de 2014) y máximos en primavera (Noviembre de 2015). Las concentraciones de hierro total y hierro disuelto exceden los límites máximos permitidos por la NCh 1333 (5 mg/L) y por el D.S N°90/2000 (5mg/L) respectivamente.

En la Figura 5.17 se observa un comportamiento errático en las concentraciones de hierro del arroyo. Las concentraciones de hierro total del arroyo varían entre 3,48 y 696,16 mg/L con mínimos y máximos en verano, febrero de 2014 y diciembre de 2014 respectivamente. Al comparar estas concentraciones con el rango de línea base de 1998-2004, las concentraciones de hierro total varían entre 2,4 y 565 mg/L, por lo tanto las concentraciones de hierro total entre 2013 y 2015 exceden el límite superior en 131,16 mg/L. Las concentraciones de hierro disuelto del arroyo varían entre 0,82 y 501,90 mg/L con mínimos en verano (Febrero de 2014) y máximos en otoño (Marzo de 2013). Al comparar estas concentraciones con el rango de línea base de 1998-2004, las concentraciones de hierro disuelto varían entre 1,4 y 295 mg/L, por lo tanto, las

concentraciones de hierro disuelto del arroyo entre 2013 y 2015 están fuera del rango de línea base.

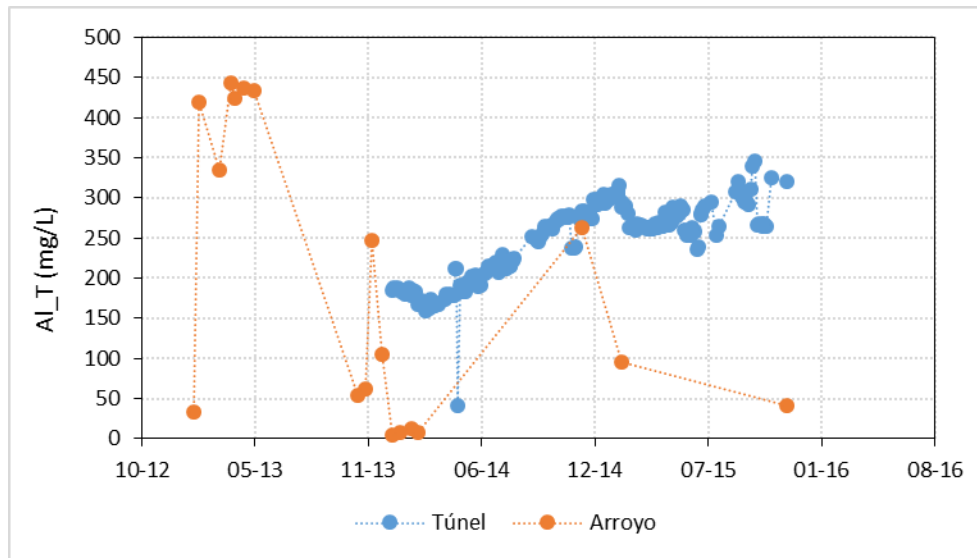


Figura 5.18 Concentraciones de Aluminio Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de aluminio total del efluente del túnel varían entre 41,80 y 345,38 mg/L con mínimos en otoño (Abril de 2014) y máximos en primavera (Octubre de 2015). Estas concentraciones exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333 (5 mg/L) y por el D.S N°90/2000 (5 mg/L). Las concentraciones de aluminio total del arroyo varían entre 4,42 y 443,50 mg/L con mínimos en verano (Enero de 2014) y máximos en otoño (Marzo de 2013). Al comparar estas concentraciones con el rango de línea base de 1998-2004, las concentraciones de aluminio total varían entre 15 y 1710 mg/L, por lo tanto, el límite inferior del rango de concentraciones de aluminio de 2013-2015 está por debajo del límite inferior del rango de línea base. En general, las concentraciones de aluminio total exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333.

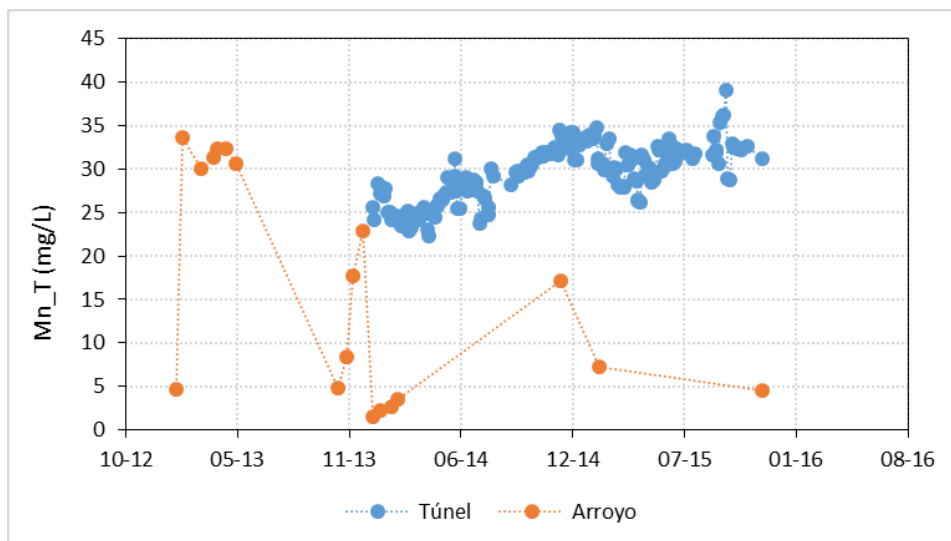


Figura 5.19 Concentraciones de Manganeso Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de manganeso total del efluente del túnel varían entre 22,32 y 39,07 mg/L con mínimos en otoño (Abril de 2014) y máximos en primavera (Septiembre de 2015). Estas concentraciones exceden los límites máximos permitidos por la NCh 1333 (0,2 mg/L) y por el D.S N°90/2000 (0,3 mg/L).

Las concentraciones de manganeso total del arroyo varían entre 1,47 y 33,60 mg/L con mínimos en verano (Enero de 2014) y máximos en verano-otoño de 2013. Estas concentraciones están fuera del rango de línea base de 1998-2004 (0,004-23,00 mg/L) y exceden la NCh 1333 (0,2 mg/L) y la NCh 409 (0,1 mg/L).

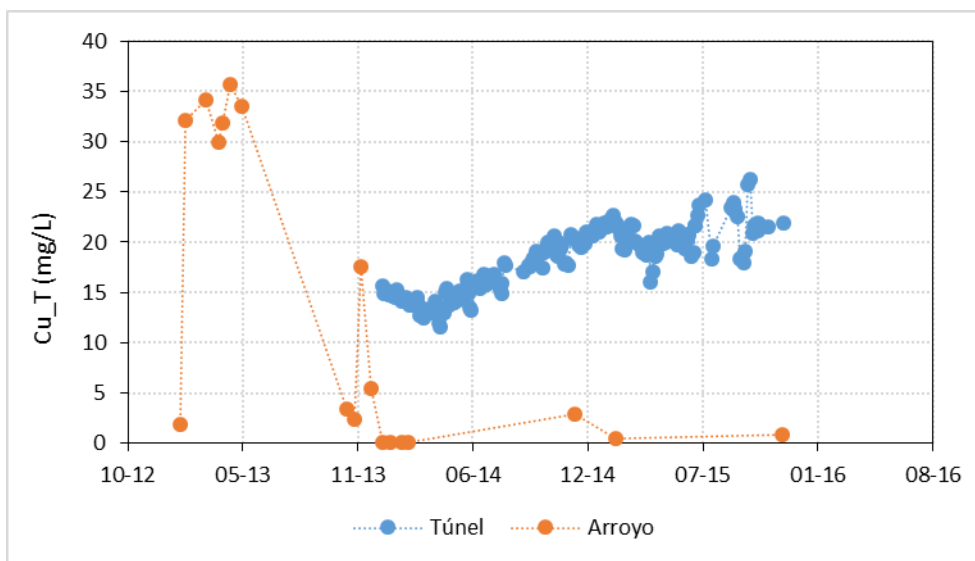


Figura 5.20 Concentraciones de Cobre Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de cobre total del efluente del túnel varían entre 11,56 y 26,29 mg/L con mínimos en otoño (Abril de 2014) y máximos en primavera (Octubre de 2015). Estas concentraciones exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333 (0,2 mg/L) y por el D.S N° 90/2000 (1 mg/L).

Las concentraciones de cobre total del arroyo varían entre 0,11 y 35,72 mg/L con mínimos en verano (Enero de 2014) y máximos en otoño (Abril de 2013). Estas concentraciones están fuera del rango de línea base de 1998-2004 (4,30-27,00 mg/L) y exceden la NCh 1333 (0,2mg/L) y la NCh 409 (2 mg/L).

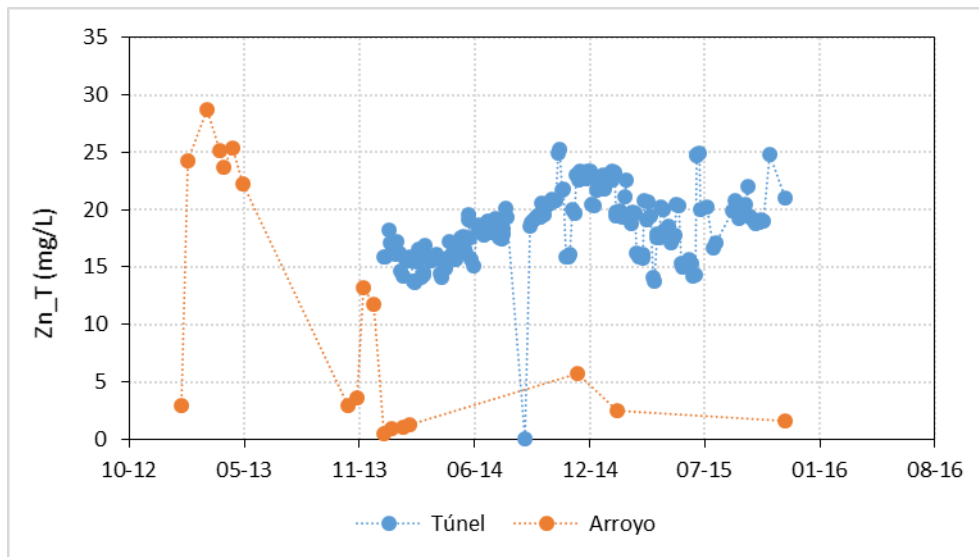


Figura 5.21 Concentraciones de Zinc Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de zinc total del efluente del túnel varían entre 0,01 y 25,21 mg/L con mínimos y máximos en primavera, Septiembre y Noviembre de 2014, respectivamente. En general, estas concentraciones exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333 (2 mg/L) y por el D.S N° 90/2000 (5,7 mg/L).

Las concentraciones de zinc total del arroyo varían entre 0,53 y 28,70 mg/L con mínimos en verano (Enero de 2014) y máximas en otoño (Marzo de 2013). Por consiguiente, estas concentraciones están fuera del rango de línea base de 1998-2004 (2,99-17,00 mg/L) y exceden la NCh 1333 (2 mg/L) y la NCh 409 (3 mg/L).

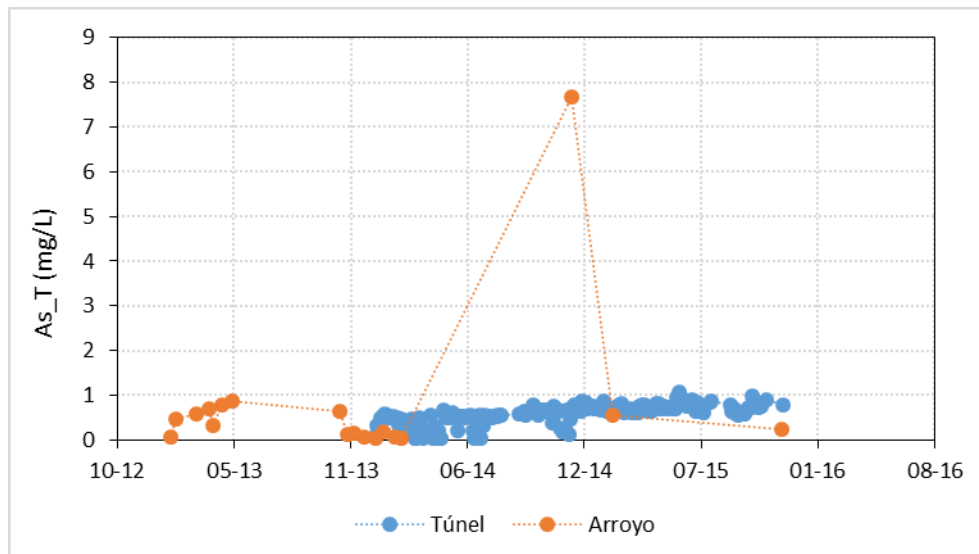


Figura 5.22 Concentraciones de Arsénico Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de arsénico total del efluente del túnel varían entre 0,05 y 1,06 mg/L con mínimos en otoño e invierno y máximos en invierno (Junio de 2015). En general,

estas concentraciones exceden el límite máximo permitido por la NCh 1333 (0,1 mg/L) y por el D.S N° 90/2000 (0,5 mg/L).

Las concentraciones de arsénico total del arroyo varían entre 0,05 y 7,68 mg/L con mínimos en verano y máximos en diciembre de 2014. Por consiguiente, estas concentraciones están fuera del rango de línea base de 1998-2004 (0,01-1,04 mg/L) y exceden la NCh 1333 (0,1 mg/L) y la NCh 409 (0,01 mg/L).

5.16. Construcción del túnel

La excavación del túnel genera grandes volúmenes de marinas que deben retirarse del frente de excavación, segregarse y acopiarse en botaderos. Las marinas contienen sulfuros metálicos que en contacto con el aire (oxidación) y el agua (disolución) reaccionan, generando drenajes ácidos.

5.16.1. Identificación de los aspectos ambientales asociados

A continuación se identifica la fuente potencialmente generadora de drenaje ácido y las medidas planteadas para evitar los posibles impactos.

Fuente: Marinas expuestas a la meteorización.

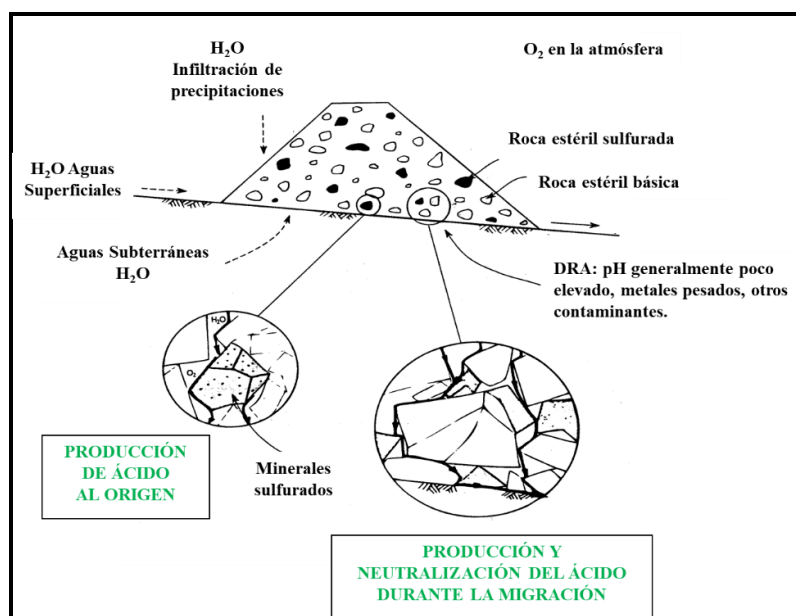


Figura 5.23 Marinas expuestas a la meteorización.

Fuente: (Acuerdo Marco de Producción Limpia, 2002).

La Figura 5.23 muestra que el drenaje ácido, se puede producir en la fuente debido a varios factores (minerales sulfurados, oxígeno atmosférico, agua, etc.); luego éste puede ser transportado en el medio ambiente por medio de las infiltraciones de aguas lluvia y por las escorrentías, acidificándose y/o neutralizándose a la vez y finalmente, puede llegar al medioambiente receptor (cuerpos de agua superficiales y subterráneas, flora y fauna) causando posibles impactos (Acuerdo Marco de Producción Limpia, 2002).

Posibles impactos:

- Alteración significativa de la calidad de aguas superficiales por interacción de aguas meteóricas (lluvia, nieve) con la marina.
- Alteración significativa de la calidad de aguas subterráneas producto de la infiltración de las aguas ácidas a los acuíferos poco profundos.

Posibles riesgos:

- Afectación de la salud de las personas por el uso del agua.
- Afectación de especies y/o ecosistemas por el contacto, y el uso del agua en lugares de afloramiento del mismo.

Medidas de control:

- Segregar las marinas con alto potencial para generar drenaje ácido de las marinas que tienen bajo a incierto potencial y se recomienda mezclar las marinas con cal.
- Impermeabilizar toda la base del acopio de las marinas y cubrirla con un geotextil.
- Construir y dejar operativo un sistema de intercepción y acumulación de los drenajes aguas debajo de los acopios de marinas, donde éstos se monitorearán y manejarán.
- Monitoreo semestral que incluya medición de niveles estáticos y/o dinámicos y muestreo hidroquímico para determinar la calidad del agua subterránea.

Medida de tratamiento:

- En caso de aparición de drenajes ácidos en la base del acopio de marinas, se deberá recolectar y tratar el drenaje ácido utilizando un sistema de tratamiento *in situ* portátil como el “tanque de mezcla vertical” de Earth Systems con 10000 litros de capacidad que usa cal hidratada como reactivo neutralizante.



Figura 5.24 Tanque de mezcla vertical.

Fuente: (Earth Systems, 2021).

5.16.2. Control de aguas ácidas en el interior túnel

En caso de afloramientos de agua en el interior túnel, se debe realizar un seccionamiento del túnel delimitando los tramos con mayores caudales. Se deben seleccionar tramos para perforar drenes horizontales, habilitarlos con tubería ranurada de PVC e instalar piscinas con bomba sumergible y sensor de nivel o conectar los drenes con tubería HDPE a una estación de bombeo.

Una forma de inspeccionar la aparición de agua con anticipación es realizar perforaciones horizontales con los Jumbos a medida que se avanza en el frente para detectar la presencia de agua antes de tronar. De esta forma, se puede evacuar el agua rápidamente y no se retrasa el avance del túnel.

Antes de la perforación, se deben revisar los niveles estáticos de los pozos cercanos al sector excavado para saber si el túnel interceptará el nivel freático durante el avance.

Por último, se recomienda medir y estimar el caudal de agua que saldrá del túnel, para obtener intervalos referenciales y evaluar alternativas de tratamiento.

5.16.3. Fortificación del túnel

Los criterios de fortificación se definen con base en la determinación de la calidad geotécnica del macizo rocoso durante el avance del túnel. La fortificación se realiza utilizando la combinación de pernos, malla y hormigón proyectado.

La presencia continua de agua genera el deterioro del sistema de sostenimiento del túnel. En el caso de las aguas ácidas, estas tienen potencial de corrosión y deterioro mucho mayor.

5.16.3.1. Pernos

Los pernos de anclaje mecánico expuestos a aguas ácidas se oxidan con el tiempo, por esta razón la medida de prevención propuesta es la instalación de pernos de fibra de vidrio que se caracterizan por ser altamente resistentes a la corrosión.



Figura 5.25 Perno de fibra de vidrio.

Fuente: (DSI Underground Chile, 2017).

5.16.3.2. Malla

Se propone la instalación de malla electrosoldada DSI fabricada con acero de alta resistencia que tiene uniones soldadas que no se corren.

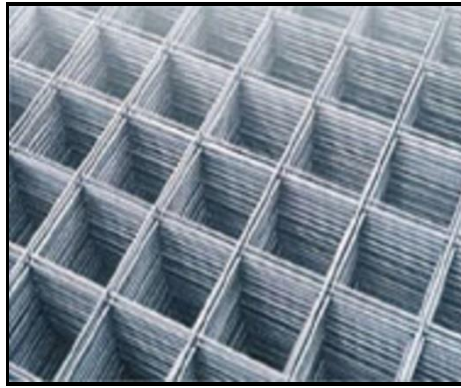


Figura 5.26 Malla electrosoldada.

Fuente: (DSI Underground Chile, 2017).

5.16.3.3. Shotcrete

Teniendo en cuenta que las aguas que ingresan al túnel tienen altas concentraciones de sulfatos, se propone el hormigón proyectado MELÓN AD que tiene mayor resistencia al ataque de sulfatos y evita la corrosión de las armaduras. Otra opción es el hormigón proyectado MorteSHOT-F de Polpaico que emplea cemento de alta resistencia y es impermeable incluso en ambientes agresivos.

5.17. Gestión de aguas ácidas durante la operación del túnel

Durante la operación del túnel, el impacto de las aguas ácidas identificado es el deterioro de la calidad del agua superficial por la descarga accidental de aguas ácidas al arroyo, lo cual podría afectar a la comunidad por impedir el uso del agua para riego agrícola o recreación. A continuación, se proponen alternativas de tratamiento para gestionar las aguas ácidas del túnel.

5.17.1. Tratamiento pasivo de las aguas del túnel.

De acuerdo con (Taylor, Pape, & Murphy, 2005), los sistemas pasivos se adaptan mejor al tratamiento de aguas con caudales bajos (<50 L/s), baja acidez (<800 mg CaCO₃/L) y cargas de acidez bajas (<150 kg de CaCO₃/día).

Tabla 5.19 Parámetros operacionales de los sistemas de tratamiento con base en las características del drenaje.

Sistema de Tratamiento	Rango de Acidez Promedio (mg CaCO ₃ /L)	Carga de Acidez Promedio (Kg CaCO ₃ /día)	Caudal Promedio (L/s)	Rango de pH	Máximo pH alcanzable
Pasivo	1-800	1-150	<50	>2	7.5-8.0
Activo	1-10000	1-50000	Sin límite	Sin límite	14.0

Fuente: (Taylor, Pape, & Murphy, 2005).

Tabla 5.20 Sistemas de tratamiento pasivo del drenaje ácido.

Sistemas de Tratamientos Pasivos	
Drenes de caliza óxicos (OLD)	Sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS)
Drenes de caliza anóxicos (ALD)	Barreras reactivas permeables (PRB)
Pozos de desviación de caliza (LDW)	Lechos de lixiviación de escoria (SLB)
Lechos de caliza de pirolusita (PLB)	Sistemas de reactores microbianos (MRS)
Humedales aeróbicos/anaeróbicos	Compuestos de pasivación de sulfuros
Sistemas de producción de alcalinidad inversa (RAPS)	Cubiertas que producen alcalinidad
Humedales de flujo vertical (VFW)	Sistema de desplazamiento y redox de gas (GaRDS)
Sistemas productores de alcalinidad (APS)	Cubiertas electroquímicas

Fuente: (Taylor, Pape, & Murphy, 2005).

Para el tratamiento del drenaje ácido del túnel, se plantean 2 escenarios y sus respectivas alternativas de tratamiento pasivo.

Escenario 1: Considerando el caudal mínimo y los parámetros mínimos del drenaje del túnel (tablas 5.21, 5.22 y 5.23).

Para el cálculo de la concentración de acidez y la carga de acidez estimada, se usaron los siguientes supuestos:

- Todo el hierro disuelto en el drenaje ácido está como hierro ferroso (Fe^{2+}).
- Todo el cobre total está como (Cu^{2+}), ya que el Cu^{2+} se encuentra como catión libre en medio ácido.

Tabla 5.21 Parámetros del drenaje a tratar para el Escenario 1.

Parámetro	Concentración (mg/L)
Aluminio (Al)	41,8
Hierro (Fe^{2+})	25,52
Manganeso (Mn)	22,32
Cobre (Cu^{2+})	11,56
Zinc (Zn)	0,01
Arsénico (As)	0,05
Níquel (Ni)	0,01
Cobalto (Co)	0,01
pH	2,45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.22 Caudal del drenaje para el Escenario 1.

Caudal	Unidades
24,18	L/s
87,05	m^3/h
2089,15	$\text{m}^3/\text{día}$

Fuente: Elaboración propia.

La concentración de acidez total y la carga de acidez se estimaron utilizando el calculador de acidez *ABATES V.1.41*, herramienta basada en hojas de cálculo Excel desarrollada por Earth Systems e INAP para la evaluación de la calidad del agua.

Tabla 5.23 Acidez y carga de acidez del drenaje para el Escenario 1.

Resultados	Valor	Unidades
Acidez Estimada	515	mg CaCO ₃ /L
Carga de Acidez Estimada	1,08	Ton CaCO ₃ /día
Carga de Acidez Estimada	1076	Kg CaCO ₃ /día

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 5.24 Características del drenaje requerido para un tratamiento pasivo exitoso usando un pozo de desviación de caliza.

Rango de Acidez promedio (mg CaCO ₃ /L)	Carga de Acidez Promedio (kg CaCO ₃ /día)	Caudal Promedio (L/s)	Concentración de Oxígeno	Rango Típico de pH	pH máximo alcanzable
<500	1-1000	<1000	Ambiente	>2	6-8

Fuente: *(Taylor, Pape & Murphy, 2005).*

5.17.2. Propuesta pozo de desviación de caliza con balsa de decantación

El drenaje ácido a tratar se caracteriza por una acidez de 515 mg CaCO₃/L, con una carga de acidez de 1076 Kg CaCO₃/día, un caudal de 24,18 L/s y un pH de 2,45. Teniendo en cuenta la Tabla 5.24, se propone tratar este drenaje mediante un pozo de desviación de caliza y un estanque decantador.

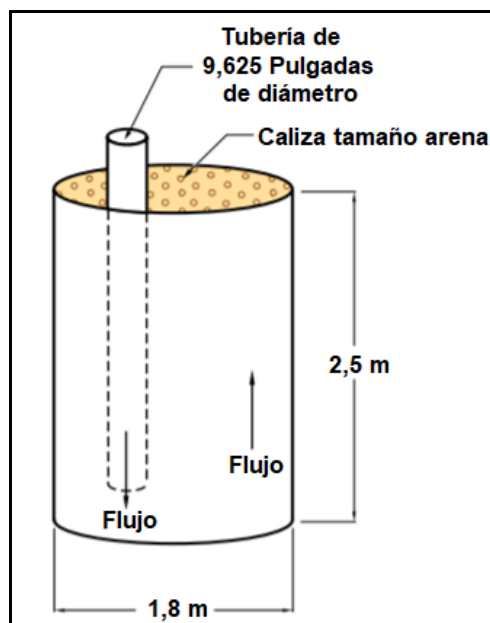


Figura 5.27 Dimensiones del pozo de desviación de caliza.

Fuente: *(Modificado de Skousen, 1997).*

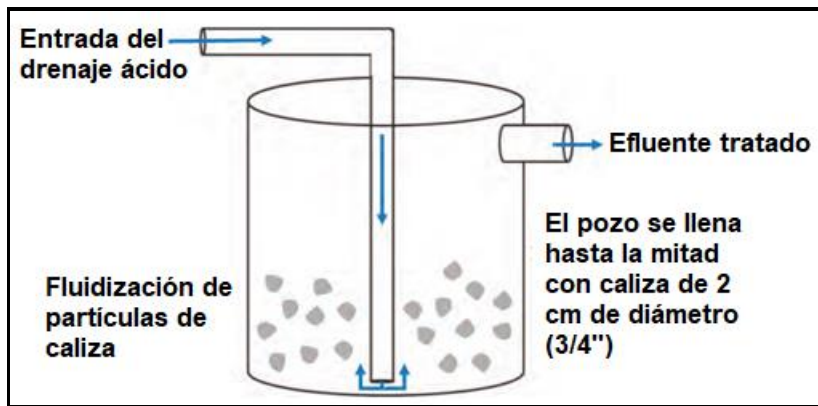


Figura 5.28 Esquema del pozo de desviación de caliza.

Fuente: (Forbes, Trumm, Pope, & Bell, 2018).



Figura 5.29 Vista real de un pozo de desviación de caliza.

Fuente: (Pérez, 2008).

El pozo de desviación propuesto es un tanque cilíndrico vertical de hormigón de $6,36 \text{ m}^3$ llenado con caliza tamaño arena hasta la mitad. El agua ácida ingresa a la tubería de 9,625 pulgadas de diámetro desde el portal del túnel con una altura hidráulica mínima de 2,5 m; la tubería vertical lleva el agua ácida al fondo del tanque bajo presión y luego fluye a través de la caliza de 2 cm de diámetro en el tanque. El caudal y la energía del agua agitan y fluidizan la caliza. El agua ácida disuelve la caliza, que genera alcalinidad; los flóculos de metal producidos por las reacciones de hidrólisis y neutralización permanecen suspendidos y son arrastrados por la corriente de agua que sale por la parte superior del pozo. La agitación también ayuda a la disolución de la caliza y ayuda a eliminar los recubrimientos de Hidróxido Férrico $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ para que las superficies de caliza estén

continuamente expuestas. Dependiendo del caudal y de la concentración de acidez, la caliza debe reponerse semanal o mensualmente para asegurar la continuidad del tratamiento.

Tabla 5.25 Propiedades químicas de la Caliza.

Material de Neutralización	PH de saturación	Solubilidad (mg/L) en agua fría
Caliza (CaCO ₃)	8.0-9,4	14

Fuente: (Taylor, Pape, & Murphy, 2005).

Tabla 5.26 Características de la Caliza.

Reactivo Neutralizante	Requerimiento de cal (ton/ton de acidez)	Eficiencia de neutralización (%)	Costo de la caliza/ton de ácido neutralizado (USD\$/ton)
Caliza (CaCO ₃)	1,0	30-50	10,5-31,63

Fuente: (INAP, 2012).



Figura 5.30 Pozos de desviación para tratamiento de aguas ácidas.

Fuente: (Skousen et al., 2017).

Los resultados del dimensionamiento del pozo se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.27 Dimensionamiento del pozo de desviación de caliza.

Parámetro	Valor	Unidad
Radio	0,9	m
Altura	2,5	m
Volumen	6,36	m ³
Volumen	6361,73	Litros
Área	19,23	m ²
Tiempo de llenado	263,10	s
Tiempo de llenado	4,4	min

Fuente: Elaboración propia.

Usando caliza de 96% de pureza y considerando una eficiencia de uso del 95%, para tratar una carga de acidez de 1,08 ton CaCO₃/día **se requieren 1,2 ton de CaCO₃/día.**

Tabla 5.28 Requerimiento total de caliza.

Requerimiento Total de Caliza	
Valor	Unidades
49,16	Kg de CaCO ₃ /h
1179,73	Kg de CaCO ₃ /día
1,2	ton de CaCO₃/día

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.29 Datos usados para calcular el tiempo de residencia.

Área del pozo (m ²)	Tipo de Capa	Espesor (m)	Porosidad	Caudal (m ³ /h)
19,23	Caliza	1,25	0,4	87,05
	Agua	2,5	1	

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación utilizada para calcular el tiempo de residencia es la siguiente:

$$\text{Tiempo de residencia [h]} = \frac{\text{Área(m}^2\text{)} * \text{Espesor (m)} * \text{Porosidad}}{\text{Caudal } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}$$

Ecuación 5.3 Cálculo del Tiempo de Residencia.

Tabla 5.30 Tiempo de Residencia calculado en el pozo de desviación.

Tiempo de Residencia	Valor	Unidades
Caliza	0,11	h
Agua	0,55	h
Total	0,66	h
Total	39,76	min

Fuente: Elaboración propia.

El caudal tratado sale por la parte superior del pozo y los flóculos metálicos suspendidos se depositan en una balsa de decantación aguas abajo. El caudal tratado se reincorpora al flujo inicial.

Respecto al dimensionamiento de la balsa de decantación, la clave del diseño es asegurar que el tiempo de retención sea suficiente para que el hierro precipite de manera eficaz.

La relación entre el tiempo de retención y la reducción de hierro es lineal y se expresa de la siguiente forma:

Tiempo de retención (horas): 0,5 x (% de retención de Fe deseado)

Tiempo de retención: 0,5 x 50%=25 horas.

Por consiguiente, para lograr una reducción de la concentración de hierro del 50%, se requiere un tiempo de retención de 25 horas.

% Reducción de concentración hierro alcanzable: 2 x tiempo de retención (horas).

El volumen requerido se calcula multiplicando el tiempo de retención por el caudal y el área total de la balsa, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Área total (m}^2\text{)} = [(\text{Largo} * \text{Ancho}) + 2(\text{Ancho} * \text{Altura}) + 2(\text{Largo} * \text{Altura})]$$

Ecuación 5.4 Cálculo del área total de la balsa.

Tabla 5.31 Datos utilizados para el dimensionamiento de la balsa de decantación.

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de Retención	25	h
Caudal	87,05	m ³ /h
Volumen requerido	2176,20	m ³

Fuente: Elaboración propia.

Con base al volumen requerido calculado, se dimensiona la balsa.

Tabla 5.32 Dimensiones de la balsa de decantación.

Parámetro	Valor	Unidades
Altura	2,5	m
Longitud	35	m
Ancho	25	m
Volumen de diseño	2187,5	m ³
Área de la base	875	m ²
Área total	1175	m ²

Fuente: Elaboración propia.

La balsa de decantación tendrá 35 m de longitud, 25 m de ancho y 2,5 m de altura. Por lo tanto, para la construcción de la balsa de 2187,5 m³ de capacidad, se requiere un área total de 1175 m².

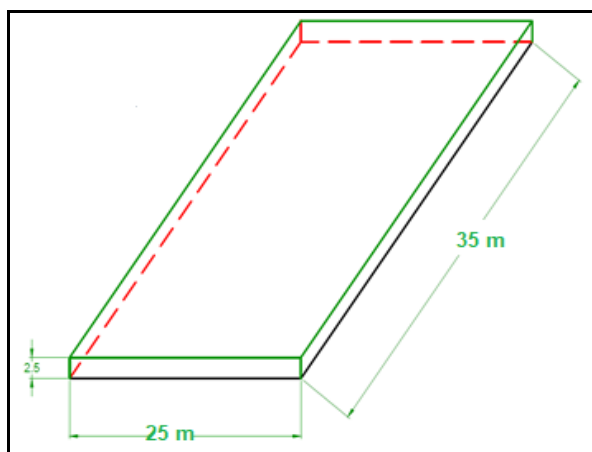


Figura 5.31 Esquema de la balsa de decantación propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

Escenario 2: Considerando el valor del caudal promedio y los parámetros promedio del drenaje del túnel de las siguientes tablas:

Tabla 5.33 Parámetros del drenaje a tratar para el Escenario 2.

Parámetro	Concentración (mg/L)
Aluminio (Al)	244,54
Hierro (Fe ²⁺)	367,12
Manganeso (Mn)	39,07
Cobre (Cu ²⁺)	18,23
Zinc (Zn)	18,45
Arsénico (As)	0,59
Níquel (Ni)	0,19
Cobalto (Co)	0,22
pH	3,24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.34 Caudal del drenaje para el Escenario 2.

Caudal	Unidades
37,36	L/s
134,50	m ³ /h
3227,90	m ³ /día

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.35 Acidez y carga de acidez del drenaje para el Escenario 2.

Resultados	Valor	Unidades
Acidez Estimada	2178	mg CaCO ₃ /L
Carga de Acidez Estimada	7,03	Ton CaCO ₃ /día
Carga de Acidez Estimada	7031,24	Kg CaCO ₃ /día

Fuente: Elaboración propia.

La alternativa de tratamiento propuesta para tratar el drenaje ácido del túnel del escenario 2 es la siguiente:

5.17.3. Propuesta Canal de aireación con SAPS, balsa de decantación y LLB.

5.17.3.1. Dimensionamiento del canal de aireación

La aireación es un aspecto significativo en el tratamiento del drenaje ácido, de modo que si hay más de 50 mg/L de Hierro Ferroso (Fe²⁺), el agua debe airearse para elevar el nivel de oxígeno disuelto (OD) y favorecer la oxidación del hierro. En este caso, el drenaje ácido contiene altas concentraciones de hierro disuelto (367,12 mg/L), una carga de hierro disuelto de 1,2 ton/día y un pH de 3,2. Por este motivo, se propone un canal de aireación para tratar parcialmente el afluente con alta carga de hierro.

Se construye un canal poco profundo y se reviste con caliza para mejorar la oxidación del hierro y promover la adsorción y coprecipitación junto con las bacterias oxidantes del hierro, pues a un pH por debajo de aproximadamente 3,5, el proceso puede ser catalizado por bacterias especializadas. El hierro ferroso (Fe^{2+}) se oxida a hierro férrico (Fe^{3+}), parte del cual precipita como Hidróxido Férrico [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] u Óxido Férrico [Fe_2O_3], disminuyendo parcialmente las concentraciones de hierro disuelto.

Al instalar un canal de aireación en cascadas (Figura 5.32) para tratar el agua ácida proveniente del portal del túnel, se utilizan procesos biogeoquímicos naturales para eliminar parcialmente el hierro a pH bajo. Esto permitirá que se elimine más hierro en el canal de aireación en vez de acumularse en el SAPS.



Figura 5.32 Canal de aireación en cascada basado en la gravedad.

(Foto cortesía de Mike Kaufman, Chemstream, Inc.)

Fuente: (INAP, 2012).

La aireación se puede realizar antes o durante el tratamiento, las condiciones operacionales dependerán del sistema de aireación utilizado, ya sea por gravedad o aireación mecánica o por una mezcla de ambos. Si se trata de un sistema de aireación por gravedad como por ejemplo una cascada de aireación, las condiciones operacionales dependen del caudal y en el caso del sistema de aireación mecánico, las condiciones operacionales dependen de las características del soplador, el sistema de distribución y la agitación (INAP, 2012).

El canal de aireación escalonado de la Figura 5.33 se llena rápidamente con precipitados de hierro que deben eliminarse regularmente. Se recomienda limpiar el aireador escalonado según sea necesario.



Figura 5.33 Canal de aireación escalonado.

Fuente: (Stream Restoration Incorporated and BioMost, Inc, 2017).

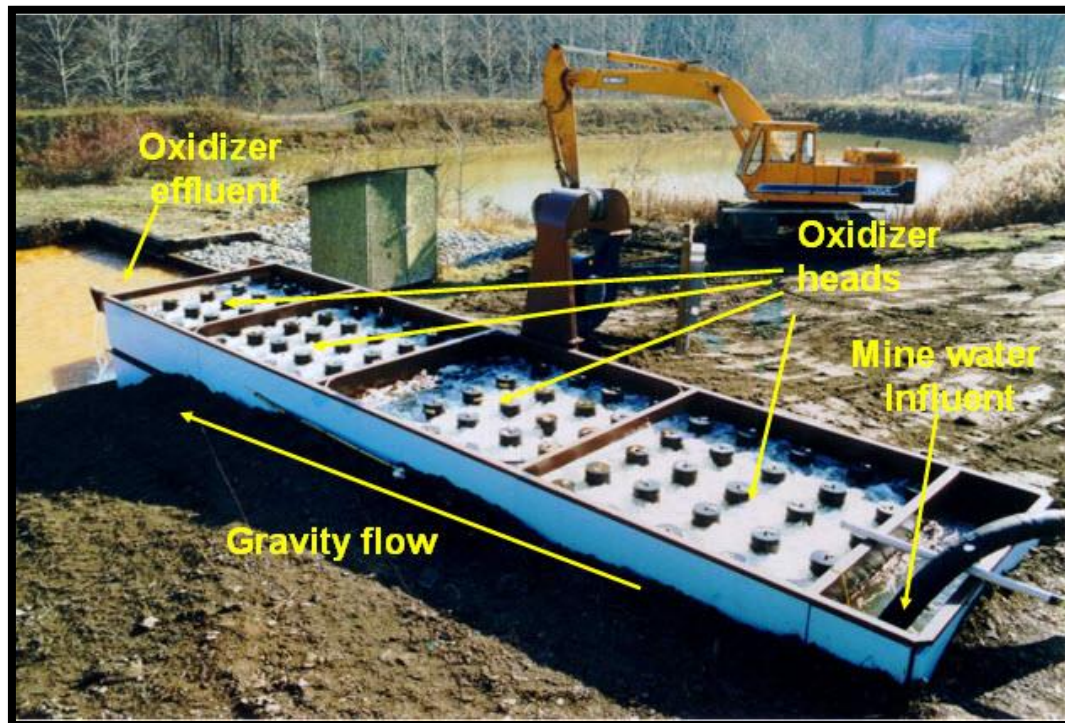


Figura 5.34 Un dispositivo de aireación comercial de 15 HP.

(Fotografía de Don Budeit, Environmental Solutions, Inc.)

Fuente: (INAP, 2012).

La Figura 5.34 muestra un sistema mecanizado de aireación instalado en un sitio de tratamiento pasivo para airear el agua que fluye de una mina de carbón subterránea.

Para el dimensionamiento del canal de aireación se utilizaron los datos de la siguiente tabla:

Tabla 5.36 Parámetros para el dimensionamiento del canal.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal	2,24	m ³ /min
Tiempo de detención (t _d)	5,00	minutos
Longitud del canal	3,00	m

Fuente: Elaboración propia.

El volumen del canal de aireación se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen del canal (m}^3\text{)} = \text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) * t_d(\text{min})$$

Ecuación 5.5 Cálculo del volumen del canal.

$$\text{Volumen del canal} = 2,24 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) * 5(\text{min}) = 11,21 (\text{m}^3)$$

El área de sección transversal del canal se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Área de sección transversal del flujo (m}^2\text{)} = \frac{\text{Volumen del canal (m}^3\text{)}}{\text{Longitud del canal (m)}}$$

Ecuación 5.6 Cálculo del Área de sección transversal del flujo.

$$\text{Área de sección transversal del flujo} = \frac{11,21 (\text{m}^3)}{3 (\text{m})} = 3,74 (\text{m}^2)$$

Las dimensiones del canal de aireación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.37 Diseño del canal de aireación.

Dimensión	Valor	Unidades
Volumen del canal	11,21	m ³
Área de sección transversal del flujo	3,74	m ²

Fuente: Elaboración propia.

5.17.3.2. Dimensionamiento del Sistema Sucesivo de Producción de Alcalinidad (SAPS)

En los SAPS, el agua ácida se deposita a una profundidad de 1 a 3 m sobre 0,2 a 0,6 m de un sustrato orgánico, que reposa sobre una capa de 0,5 a 1,2 m de caliza. La carga hidráulica del agua la impulsa a través del sustrato orgánico, donde se consume oxígeno, produciendo condiciones anóxicas. La función principal de la capa orgánica es la

reducción de todo el Hierro a Hierro Ferroso (Fe^{2+}), lo que evita el recubrimiento de la caliza subyacente con Hidróxido Férrico. La neutralización del ácido se produce en la capa orgánica por reducción de sulfatos y en la base de caliza una serie de tuberías de drenaje perforadas debajo de la caliza transportan el agua a un estanque de sedimentación donde se precipita el hierro principalmente.

Al estimar la acidez con las concentraciones máximas permitidas según el D.S N°90/2000, se obtuvo una acidez permitida de 46 mg CaCO_3/L .

Tabla 5.38 Criterios de descarga según el D.S N°90/2000.

Parámetro	Límites máximos permitidos (mg/L)
Aluminio (Al)	5,0
Hierro Ferroso (Fe^{2+})	5,0
Manganeso (Mn)	0,3
Cobre (Cu^{2+})	1,0
Zinc (Zn)	3,0
Arsénico (As)	0,5
Nickel (Ni)	0,2
Cobalto (Co)	0,05
pH	7,0

Fuente: Elaboración propia.

El exceso de acidez que requiere tratamiento es la diferencia entre la acidez total estimada y la acidez permitida. La carga de acidez a tratar se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Carga de Acidez (g CaCO}_3/\text{día)} = \text{Exceso de acidez (g CaCO}_3/\text{m}^3) * \text{Caudal (m}^3/\text{día)}$$

Ecuación 5.7 Cálculo de la carga de acidez a tratar.

$$\text{Carga de Acidez (g CaCO}_3/\text{día)} = 2132,27(\text{g CaCO}_3/\text{m}^3) * 3227,90 (\text{m}^3/\text{día})$$

$$\text{Carga de Acidez a tratar} = 6882754,44 (\text{g CaCO}_3/\text{día})$$

Tabla 5.39 Cálculos de carga de acidez a tratar en el SAPS.

Acidez Total Estimada (mg CaCO_3/L)	Acidez Permitida (mg CaCO_3/L)	Exceso de acidez (mg CaCO_3/L)	Carga de Acidez a tratar (g $\text{CaCO}_3/\text{día}$)
2178,27	46,00	2132,27	6882754,44

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta una tasa de eliminación de acidez a largo plazo de 35 g/ $\text{m}^2/\text{día}$ propuesta por Kepler & McCleary (1997), Rose (2006), Watzlaf et al. (2002) como criterio de dimensionamiento, entonces, el área del SAPS se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Área (m}^2) = \frac{\text{Carga de Acidez a tratar } (\frac{\text{g}}{\text{día}})}{35 \text{ g de acidez/m}^2/\text{día}}$$

Ecuación 5.8 Cálculo del área del SAPS.

$$\text{Área} = \frac{6882754,44 \left(\frac{g}{\text{día}}\right)}{35 \text{ g de acidez}/\text{m}^2/\text{día}} = 196650,13 \text{ (m}^2\text{)} = 20 \text{ (ha)}$$

Tabla 5.40 Datos usados para calcular el tiempo de residencia.

Área del SAPS (m ²)	Tipo de Capa	Espesor (m)	Porosidad	Caudal (m ³ /h)
196650,13	Caliza	1,2	0,4	134,50
	Materia Orgánica	0,6	0,3	
	Agua	2,0	1	

Fuente: *Elaboración Propia.*

El tamaño aproximado de la caliza debe ser de 6 a 15 cm de diámetro (Watzlaf & Hyman, 1995; Skousen et al., 1998). Debajo de la caliza hay una serie de tuberías de drenaje que conducen el agua a un estanque de sedimentación donde se precipitan los metales. (Figura 5.35).



Figura 5.35 Tuberías en el fondo del SAPS.

Fuente: (Skousen et al., 2017).

Los SAPS tienen tuberías perforadas e incrustadas en la capa de caliza en la base del sistema y están cubiertas por un sustrato de materia orgánica. El agua que se acumula en la superficie, pasa a través del sustrato orgánico, luego pasa a la caliza y sale a través de las tuberías hacia un estanque de sedimentación.

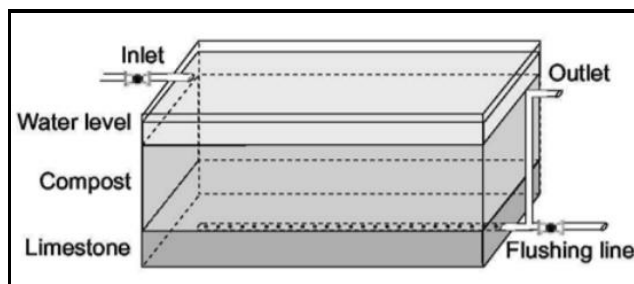


Figura 5.36 Esquema de un SAPS.

Fuente: (Trumm, Watts, Pope, & Lindsay, 2008).

El sustrato orgánico debe ser lo suficientemente permeable (intervalo de permeabilidad de 0,01 a 1 m/d). Para este escenario, se propone que la capa de materia orgánica esté compuesta por 5% de virutas de madera, 10% de paja, 80% de estiércol de vaca, 5% de conchas de mejillones o caliza fina. Una modificación importante del diseño original del SAPS es la adición de un 10-25% en volumen de partículas finas de caliza en el sustrato orgánico. Con esta modificación, los SAPS son capaces de tratar agua con altas concentraciones de Hierro y Aluminio. El material orgánico puede degradarse y debe sustituirse cada dos o tres años (Watzlaf et al. 2000, Wolkersdorfer 2008, Matthies et al. 2010).



Figura 5.37 Construcción de un SAPS.

Fuente: (Skousen, 1997).

Los SAPS constan de capas de material orgánico y caliza como muestra la Figura 5.37. El drenaje ácido pasa a través de estas capas agregando alcalinidad y algunos metales como el hierro y el aluminio pueden precipitar.

La ecuación utilizada para calcular el tiempo de residencia es la siguiente:

$$\text{Tiempo de residencia [h]} = \frac{\text{Área (m}^2\text{)} * \text{Espesor (m)} * \text{Porosidad}}{\text{Caudal } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)}$$

Ecuación 5.9 Cálculo del tiempo de residencia del SAPS.

Los tiempos de residencia calculados se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 5.41 Tiempos de residencia calculados para el SAPS.

Tiempo de Residencia	Valor	Unidades
Caliza	701,82	h
Materia Orgánica	263,18	h
Agua	2924,25	h
Total	3889,26	h
Total	162	días

Fuente: Elaboración propia.

El volumen total del SAPS se calcula multiplicando el caudal por el tiempo de residencia total.

Los volúmenes calculados son:

Tabla 5.42 Volúmenes calculados para el SAPS.

Volumen	Valor	Unidades
Caliza	94392,06	m ³
Materia Orgánica	35397,02	m ³
Agua	393300,25	m ³
Total	523089,34	m³

Fuente: Elaboración propia.

5.17.3.3. Dimensionamiento de la balsa de decantación

Para dimensionar la balsa de decantación y considerando eventos de lluvias intensas, se adicionan 0,2 m al largo y al ancho del SAPS.

Tabla 5.43 Dimensiones de la balsa de decantación.

Parámetro	Valor	Unidades
Largo	627,34	m
Ancho	313,77	m
Altura	3,8	m
Área Total	203990,70	m ²
Volumen Total	747985,57	m ³

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados

Con esta propuesta, se requiere un tiempo de residencia muy largo (162 días) y una gran área de terreno (20 ha). Se eliminó el 98% de la acidez del afluente tratado en el SAPS. Por lo tanto, el efluente tendrá una acidez de 46 mg CaCO₃/L aproximadamente. El SAPS es muy eficaz para elevar el pH del agua, pero presenta problema con la eliminación de metales del agua (Skousen, 1997). Con el SAPS se logra una reducción de acidez y de sulfatos, pero es necesario instalar una balsa de decantación aguas abajo para la precipitación de hidróxidos metálicos, seguido de un lecho de lixiviación de caliza (LLB) con descarga automática para la oxidación de manganeso, precipitación y eliminación del óxido de manganeso. Los lechos de lixiviación de caliza con autolimpieza están diseñados con desagües que se pueden abrir automáticamente según un temporizador, o que descargan automáticamente cada vez que se llenan. (Wolfe et al, 2010) encontraron que drenar completamente el lecho de lixiviación una vez a la semana fue eficaz para mantener la neutralización. Los experimentos de (Wolfe et al, 2010) muestran que alrededor del 50% de los flóculos se eliminan, si el LLB se drena semanalmente.

Se propone instalar el lecho de caliza con un sistema de drenaje inteligente (alimentado con energía solar) para controlar mejor el tiempo de residencia y proporcionar una eliminación de flóculos más efectiva. Por ejemplo, el sistema de drenaje inteligente Agri-Drain está programado para abrir una válvula en ciertos intervalos de tiempo o niveles de agua para eliminar los flóculos acumulados. Los paneles solares proporcionan energía, por lo que la descarga puede ser tan frecuente como varias veces a la semana. Esta tecnología se ha utilizado con éxito en varios sitios (Wolfe et al, 2010).

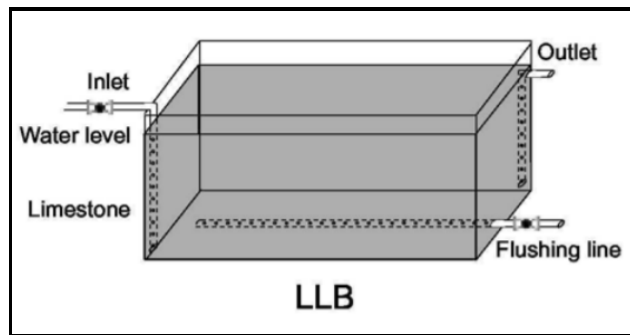


Figura 5.38 Esquema de un LLB.

Fuente: (Trumm, Watts, Pope, & Lindsay, 2008).

El LLB requiere baja concentración de hierro disuelto en el afluente, es fácil de construir, suele tener mínimo un metro de profundidad, requiere grava caliza de 2 a 10 cm de diámetro y se instala una cerca de madera para protegerlo, es económico y requiere bajo mantenimiento. A la salida del LLB, se instalará una tubería que conduzca el agua tratada hacia su disposición final.



Figura 5.39 Lecho de Lixiviación de Caliza.

Fuente: (Ziemkiewicz & Skousen, 1998).

5.18. Tratamiento activo del drenaje del túnel.

Escenario 3: Considerando el caudal máximo y los parámetros del drenaje del túnel de las siguientes tablas:

Tabla 5.44 Parámetros del drenaje a tratar para el Escenario 3.

Parámetro	Concentración (mg/L)
Aluminio (Al)	345,38
Hierro (Fe ²⁺)	548,96
Manganeso (Mn)	39,07
Cobre (Cu ²⁺)	26,29
Zinc (Zn)	25,21
Arsénico (As)	1,06
Níquel (Ni)	0,30
Cobalto (Co)	0,34
pH	4,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.45 Caudal del drenaje para el Escenario 3.

Caudal	Unidades
69,85	L/s
251,46	m ³ /h
6035,04	m ³ /día

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.46 Acidez y carga de acidez del drenaje para el Escenario 3.

Resultados	Valor	Unidades
Acidez Estimada	3062	mg CaCO ₃ /L
Acidez Estimada	3,06	Kg CaCO ₃ /m ³
Carga de Acidez Estimada	18,48	Ton CaCO ₃ /día
Carga de Acidez Estimada	18479,86	Kg CaCO ₃ /día

Fuente: Elaboración propia.

5.18.1. Tratamiento mediante neutralización con cal hidratada.

Teniendo en cuenta la alta carga de acidez a tratar (18,48 ton CaCO₃/día) y el alto caudal, se propone un tratamiento del drenaje ácido mediante neutralización con cal hidratada [Ca(OH)₂], la cual es muy útil para tratar altos caudales con alta acidez y es uno de los reactivos más efectivos con un pH máximo alcanzable de 12.4.

Tabla 5.47 Propiedades químicas de la cal hidratada.

Material de neutralización	PH de saturación	Solubilidad (mg/L) en agua fría
Cal hidratada (Ca(OH) ₂)	12.4	1300-1850

Fuente: (Taylor, Pape & Murphy, 2005).

Para calcular la cantidad de cal hidratada requerida para neutralizar el drenaje ácido, se consideraron los siguientes supuestos:

- Todo el hierro disuelto en el drenaje está como Hierro Ferroso (Fe^{2+}).
- Se utilizará cal hidratada de 95% de pureza y una eficiencia de uso del 95%.
- La cal puede eliminar hasta 2000 mg/L de sulfatos.

5.18.1.1. Consumo de cal hidratada para la neutralización.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 5.46, para neutralizar 1 m³ de drenaje ácido se requieren 3,06 Kg de CaCO_3 .

Tabla 5.48 Características de la cal hidratada.

Reactivo Neutralizante	Requerimiento de cal (ton/ton de acidez) ¹	Eficiencia de neutralización (%) ²	Costo de cal/ton de ácido neutralizado (USD\$/ton) ³
Cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	0,74	90	105-246

¹ El requerimiento de cal se expresa en relación al CaCO_3 y refleja la cantidad de cal requerida por unidad de acidez (expresada como CaCO_3).

² La eficiencia de neutralización estima la efectividad relativa del químico para neutralizar la acidez del drenaje ácido. Por ejemplo, para neutralizar 18,48 toneladas de ácido, entonces se puede estimar que se necesitarían 15,2 toneladas de cal hidratada para neutralizar la acidez del agua ($18,48(0,74)/0,90$).

³ La cal hidratada es uno de los reactivos más económicos. El precio de la cal depende de la cantidad. Los precios variarán con el tiempo.

Fuente: (INAP, 2012).

74 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ proporcionan el mismo poder de neutralización que 100 g de CaCO_3 , por lo tanto, se debe usar el factor de conversión a equivalencia de CaCO_3 de 1,35 (100 g/74g).

Para la cal hidratada $\rightarrow 3,06/1,35=2,27$ Kg/m³ de drenaje ácido si se usa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pura.

Usando cal hidratada de 95% de pureza $\rightarrow 2,27/0,95=2,39$ Kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{m}^3$.

Considerando una eficiencia de uso del 95% $\rightarrow 2,39/0,95=2,51$ Kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{m}^3$ de drenaje ácido.

Para el caudal a tratar, se requieren:

Tabla 5.49 Requerimiento total de cal hidratada.

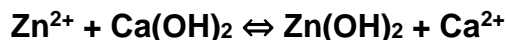
Valor	Unidades
631,35	Kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$
15152,46	Kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{día}$
15,2	ton de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{día}$

Fuente: Elaboración Propia.

El requerimiento total de cal hidratada es de 15,2 ton de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{día}$.

5.18.1.2. Formación de lodos por precipitación de hidróxidos metálicos.

La reacción demuestra que la cal hidratada neutraliza la acidez, pero genera precipitados metálicos como por ejemplo el Hidróxido de zinc.



La eliminación de metales por precipitación implica la adición de cal hidratada a un determinado pH para la eliminación selectiva del metal de interés.

Tabla 5.50 Orden de precipitación de metales en ácidos diluidos con aumento del pH.

Metal, ión metálico	pH al que se produce la precipitación
Hierro Férrico, (Fe ³⁺)	2,0
Aluminio, (Al ³⁺)	4,1
Cromo, (Cr ³⁺)	5,3
Cobre, (Cu ²⁺)	5,3
Hierro Ferroso, (Fe ²⁺)	5,5
Plomo, (Pb ²⁺)	6,0
Níquel, (Ni ²⁺)	6,7
Cadmio, (Cd ²⁺)	6,7
Cobalto, (Co ²⁺)	6,9
Zinc, (Zn ²⁺)	7,0
Mercurio, (Hg ²⁺)	7,3
Manganeso, (Mn ²⁺)	8,5

Fuente: (Lewis & Boynton).

La solubilidad de la mayoría de los metales en el drenaje ácido aumenta en condiciones ácidas (pH bajo <4.0) y alcalinas (pH alto ≥9.5) y alcanza un mínimo en algún valor de pH intermedio. Tabla muestra el efecto del pH sobre la solubilidad de los iones metálicos.

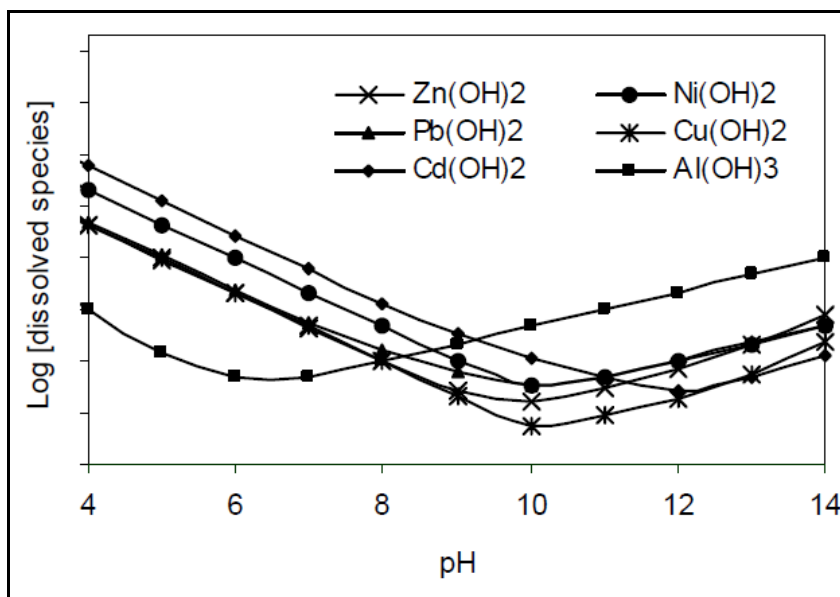
Tabla 5.51 pH teórico y la solubilidad mínima de algunos hidróxidos metálicos.

Metal, ión metálico	pH correspondiente a la solubilidad mínima del hidróxido metálico/L
Hierro Férrico, (Fe ³⁺)	~3,5
Antimonio, (Sb ²⁺)	~4,2
Aluminio, (Al ³⁺)	~4,5
Plomo, (Pb ²⁺)	~6,5
Cobre, (Cu ²⁺)	~7,0
Hierro Ferroso, (Fe ²⁺)	~8,0
Zinc, (Zn ²⁺)	~8,5
Níquel, (Ni ²⁺)	~9,3
Cadmio, (Cd ²⁺)	~10,0
Manganeso, (Mn ²⁺)	~10,6

Fuente: (INAP, 2012).

Algunos hidróxidos metálicos son anfotéricos, es decir su curva de solubilidad en función del pH, muestra un mínimo, a partir del cual un desplazamiento tanto hacia el ácido como hacia el álcali aumenta la solubilidad.

Figura 5.40 Efecto del pH sobre la solubilidad de los iones metálicos (acuosos) en equilibrio con su correspondiente especie de hidróxido metálico (sólido).



Fuente: (Taylor, Pape, & Murphy, 2005).

Para calcular la cantidad de lodos que se generan por precipitación de hidróxidos metálicos se utilizaron los datos de las siguientes tablas:

Tabla 5.52 Pesos moleculares y concentraciones de metales.

Metal	Peso Atómico (g/mol)	Concentración (mg/L)
Hierro	56,00	548,96
Aluminio	27,00	345,38
Cobre	63,55	26,29
Zinc	65,40	25,21
Manganeso	55,00	39,07

Fuente: Elaboración propia.

El aumento de pH proporciona iones OH^- que se combinan con los metales disueltos para producir precipitados. Las siguientes ecuaciones muestran las reacciones de precipitación con diferentes metales:

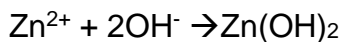
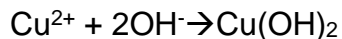
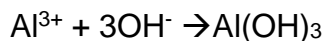
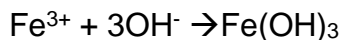


Tabla 5.53 Pesos moleculares de Hidróxidos metálicos.

Compuesto Químico	Peso Atómico (g/mol)
Hidróxido Férrico, [Fe(OH) ₃]	107,00
Hidróxido de Aluminio,[Al(OH) ₃]	78,00
Hidróxido de Cobre, [Cu(OH) ₂]	97,55
Hidróxido de Zinc, [Zn(OH) ₂]	99,40
Óxido de Manganeso, [MnO ₂]	87,00

Fuente: Elaboración propia.

1 mol de Fe → 1 mol de Fe(OH)₃ (56 g de Fe producen 107 g de Fe(OH)₃)

1 mol de Al → 1 mol de Al(OH)₃ (27 g de Al producen 78 g de Al(OH)₃)

1 mol de Cu → 1 mol de Cu(OH)₂ (63,55 g de Cu producen 97,55 de Cu(OH)₂)

1 mol de Zn → 1 mol de Zn(OH)₂ (65,4 g de Zn producen 99,4 g de Zn(OH)₂)

1 mol de Mn → 1 mol de MnO₂ (55 g de Mn producen 87 g de MnO₂)

La concentración de lodo debido a hidróxidos metálicos se obtiene de la sumatoria resultante al multiplicar la concentración de cada metal por el peso molecular del Hidróxido metálico dividido entre el peso molecular del metal.

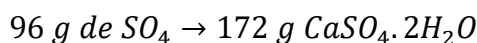
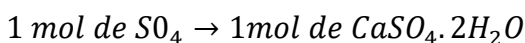
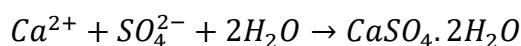
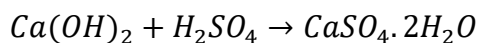
Tabla 5.54 Lodo total generado por precipitación de hidróxidos metálicos.

Metal	Concentración (g/m ³)
Aluminio	997,76
Hierro	1048,91
Manganeso	61,80
Cobre	40,36
Zinc	38,32
Lodo total generado	2187,14

Fuente: Elaboración propia.

5.18.1.3. Formación de lodos por precipitación de yeso.

La reacción que ocurre al usar cal hidratada como reactivo alcalino es:



La concentración de sulfatos que será precipitado como yeso se obtiene al restar 2000 mg/L a la concentración de sulfatos del drenaje ácido.

La concentración de lodo debida al yeso, se obtiene al multiplicar la concentración de sulfatos que precipitará como yeso por 172 g, dividido entre 96 g.

Tabla 5.55 Lodo total generado por precipitación de yeso.

Parámetro	Valor	Unidades
Concentración de Sulfatos	4272	mg/L
Concentración de Sulfatos que precipitará como yeso	2272	mg/L
Lodo debido al yeso	4070,67	g/m ³

Fuente: Elaboración propia.

5.18.1.4. Formación de lodo debido a las impurezas

El lodo total generado se obtiene sumando los lodos generados por precipitación de hidróxidos metálicos con los lodos generados por precipitación de yeso.

Tabla 5.56. Lodo total generado.

Output	Valor	Unidades
Lodo total generado	6257,81	g/m ³
Lodo debido a impurezas	625,78	g/m ³ de drenaje ácido tratado
Lodo total seco	6883,59	g/m ³ de drenaje ácido tratado
Lodo total seco	6,88	Kg/m ³ de drenaje ácido tratado
Lodo Total	1730,95	kg/h
Lodo Total	41542,75	kg/día
Lodo Total	41,54	ton/día

Fuente: Elaboración propia.

Se asumió que el lodo debido a impurezas corresponde al 10% del lodo total generado.

El lodo total seco es el lodo total generado más el lodo debido a las impurezas.

El lodo total en kg/h se obtiene multiplicando el lodo total seco en kg/m³ por el caudal (251,46 m³/h).

5.18.1.5. Volumen de lodos generados.

Se asumió una gravedad específica de sólidos de 1,2 ton/m³.

Aplicando el proceso de Lodos de baja densidad (LDS) → Genera lodos de 5% en peso de sólidos → $(41,54 \text{ ton/día}) / (1,2 \text{ ton/m}^3) / (0,05) = 692,38 \text{ m}^3/\text{día}$. Por lo tanto, se genera un volumen de lodos de 692,38 m³/día.

Aplicando el Proceso de lodos de alta densidad (HDS) → Genera lodos de 25% en peso de sólidos → $(41,54 \text{ ton/día}) / (1,2 \text{ ton/m}^3) / (0,25) = 138,48 \text{ m}^3/\text{día}$. De modo que, se genera un volumen de lodos de 138,48 m³/día.

Al comparar los resultados obtenidos, se puede concluir que con el proceso HDS, se logra una reducción significativa del volumen de lodos generados, por lo tanto se selecciona este proceso para tratar el drenaje ácido del Escenario 3.

La gestión de lodos implica la separación sólido-líquido, deshidratación y eliminación de lodos, se deben considerar aspectos fundamentales como la masa de lodo producido, la capacidad de deshidratación del lodo, la densidad del lodo, el volumen del lodo, la estabilidad química y física, la composición del lodo, lugar de disposición y la economía (Zinck, 2006).

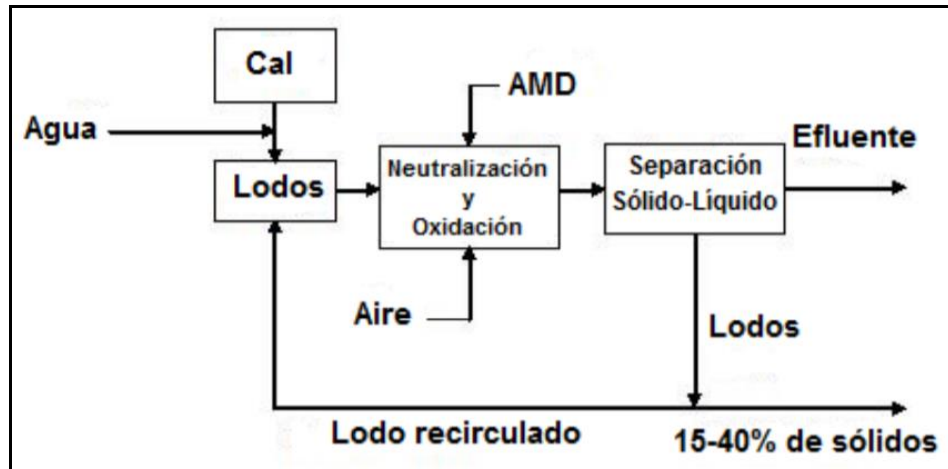


Figura 5.41 Proceso de lodos de alta densidad (HDS).

Fuente: (Espinosa-Rodríguez, & Hidalgo-Millán, & Delgado-Delgado, 2016).

En una planta HDS, una parte del lodo se recicla del clarificador a uno de los tanques del reactor, para completar la primera etapa de neutralización.

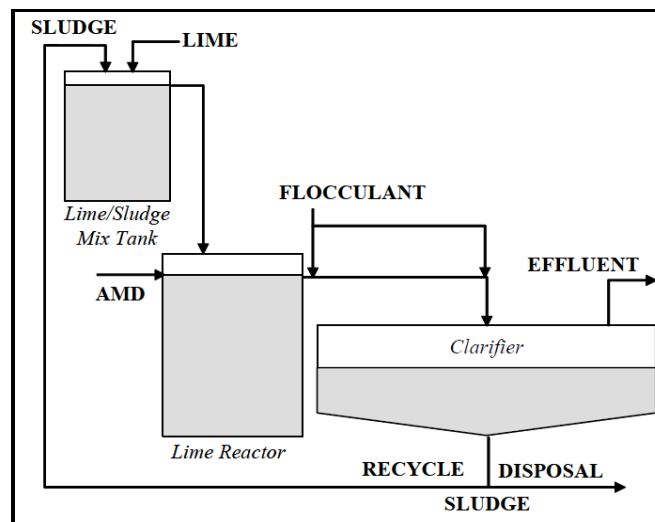


Figura 5.42 Diagrama simplificado del proceso HDS.

Fuente: (Aubé & Lee, 2015).

Finalmente, las diferentes alternativas de tratamiento propuestas aparecen resumidas en las siguientes tablas comparativas:

Tabla 5.57. Comparación condiciones de diseño.

Aspecto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
pH del efluente a tratar (u.e.)	2,45	3,24	4,91
Caudal del efluente a tratar (L/s)	24,18	37,36	69,85
Acidez del efluente a tratar (mg de CaCO ₃ /L)	515,00	2178,00	3062,00
Carga de acidez a tratar (kg de CaCO ₃ /día)	1076,00	7031,24	18479,86
Carga de acidez a tratar (Ton de CaCO ₃ /día)	1,08	7,03	18,48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.58. Comparación funcional.

Aspecto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tipo de reactivos utilizados	Caliza	Caliza y materia orgánica	Cal hidratada y floculante
Pureza del reactivo	96%	96%	95%
Eficiencia de uso del reactivo	95%	95%	95%
Cantidad de reactivo requerida	1,2 ton de CaCO ₃ /día	7,7 ton de CaCO ₃ /día	15,2 ton de Ca(OH) ₂ /día

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.59. Comparación en eficiencia.

Aspecto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Máximo pH alcanzable	6,0-8,0	6,0-8,0	9,0-11,0
Eficiencia de Neutralización	50,0%	50,0%	90,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.60. Comparación en mantenimiento.

Aspecto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Frecuencia	Requiere mantenimiento periódico. El mantenimiento también implica la eliminación regular de hojas, ramas u otros desechos del pozo para evitar la obstrucción.	Requiere mantenimiento periódico y agitación ocasional del material orgánico para desalojar los precipitados metálicos acumulados. También requiere lavado o la instalación de sifones de descarga automática para proporcionar una eliminación de precipitados más efectiva.	Requiere mantenimiento regular.
Reposición de insumos	La caliza debe reponerse semanal o mensualmente, dependiendo del caudal y de las concentraciones de acidez del efluente. La caliza solo se puede agregar al pozo en pequeñas cantidades, por lo que se requiere un llenado frecuente con caliza limpia para asegurar un tratamiento continuo. Se pueden instalar sistemas de alimentación por tolva para permitir que la caliza se alimente automáticamente al pozo a medida que se consume el reactivo.	El material orgánico puede degradarse y debe cambiarse cada dos o tres años.	Requiere la adición rutinaria de cal y floculante. La dosificación del reactivo debe controlarse cuidadosamente para evitar la saturación con respecto al reactivo neutralizante.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.61. Comparación económica.

Aspecto	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo del reactivo (US\$/ton)	45	45	350
Costo del reactivo (US\$/día)	53	347	5305

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.62. Ventajas.

Sistema de Tratamiento	Ventajas
Pozo de desviación de caliza con balsa de decantación (Alternativa 1)	<ul style="list-style-type: none"> • Económico. • Fácil construcción. • Alta eficiencia de la caliza. • Elimina la acidez y parcialmente los sulfatos. • Remueve el hierro y el aluminio.
Canal de aireación con SAPS, balsa de decantación y LLB (Alternativa 2)	<ul style="list-style-type: none"> • Funciona bien para tratar altas cargas de hierro y bajas cargas de aluminio. • Fácil operación. • Alta eficiencia de eliminación de acidez y sulfatos. • Remueve el hierro, el aluminio y el manganeso. • Puede operar durante largos períodos de tiempo sin monitoreo.
Neutralización con Cal Hidratada (Proceso de lodos de alta densidad, HDS) (Alternativa 3)	<ul style="list-style-type: none"> • Uso eficiente de la cal. • Puede tratar altos caudales (>50 L/s) y altas cargas de acidez (rango promedio de 1-50000 kg de CaCO₃/día) y metales. • Alta eficiencia en la eliminación de metales disueltos (hierro, aluminio, manganeso, zinc, cadmio, níquel y arsénico) y sólidos suspendidos totales (TSS). • Produce lodos más densos que contienen de 10-30% de sólidos y que requieren un sitio más pequeño para su eliminación. • Genera bajos volúmenes de lodos, lo cual implica un ahorro en costos de disposición de lodos. • Produce efluentes de alta calidad. • Mayor estabilidad física y química de los lodos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.63. Limitaciones.

Sistema de Tratamiento	Limitaciones
<p>Pozo de desviación de caliza con balsa de decantación (Alternativa 1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere rellenar con chips de caliza aproximadamente cada 2-4 semanas. • Requiere un caudal constante. • Si el cambio de elevación es inferior a 10 metros, provoca bajas velocidades del agua impidiendo la mezcla turbulenta. • Permite tratar bajas cargas de acidez (rango promedio de 1–1000 kg de CaCO₃/día).
<p>Canal de aireación con SAPS, balsa de decantación y LLB (Alternativa 2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de capital. • Requiere grandes áreas de terreno disponible. • Requieren un tiempo de residencia muy largo. • No puede tratar caudales muy altos (>50 L/s). • No puede tratar cargas muy altas de acidez y de metales. • Puede ocurrir blindaje de la caliza y taponamiento con hidróxidos.
<p>Neutralización con Cal Hidratada (Proceso de lodos de alta densidad, HDS) (Alternativa 3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere suministro continuo de energía. • Los costos de capital dependen directamente del caudal a tratar. • Remoción de metales limitadas por la solubilidad. • Altos costos de operación y mantenimiento. • Requiere almacenamiento y suministro de reactivos constantes. • Pueden ocurrir problemas de incrustación en el tanque de mezcla de lodos/cal. • Requiere terreno disponible para los tanques de mezcla y clarificador y para disponer los lodos (pozas de secado).

Fuente: Elaboración propia.

5.19. Cierre del Túnel

En esta sección menciona los conceptos y definiciones relevantes de la Ley N° 20.551 que regula el cierre de faenas en instalaciones mineras. Luego, presenta los principales aspectos que se deben considerar en el diseño de un tapón para el cierre del túnel. Finalmente, muestra una memoria de cálculo para el dimensionamiento del tapón de hormigón de lados paralelos con drenaje, propuesto como medida de cierre.

5.19.1. Marco Regulatorio

La Normativa Chilena que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras es la Ley N° 20.551 promulgada en 2011 y su Reglamento aprobado en 2012. Esta Ley obliga a toda empresa minera a presentar un plan de cierre que asegure la estabilidad física y química en el largo plazo de todas las instalaciones mineras. También, obliga a las compañías mineras a provisionar los fondos requeridos para garantizar el desarrollo de las actividades comprometidas en dicho plan (Figura 5.43).

El Artículo 2º de la Ley N° 20.551 señala que *“El objeto del plan de cierre de faenas mineras es la integración y ejecución del conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la industria extractiva minera, en los lugares en que ésta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de los mismos, en conformidad a la normativa ambiental aplicable. La ejecución de las medidas y acciones de la manera antes señalada deberá otorgar el debido resguardo a la vida, salud, seguridad de las personas y medio ambiente, de acuerdo a la ley”*.

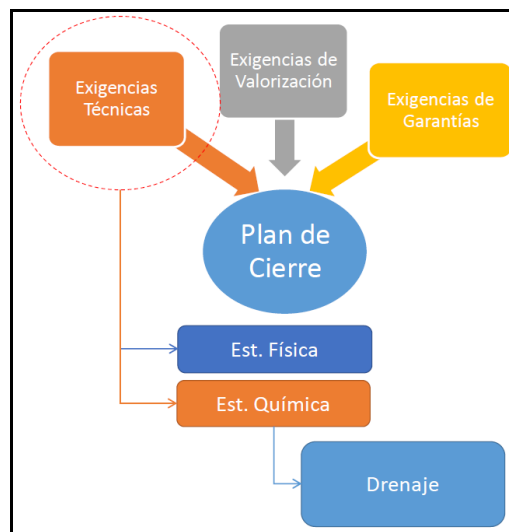


Figura 5.43 Exigencias del plan de cierre.

Fuente: (Wiertz, 2019).

El Artículo 3º de la Ley N° 20.551 y su Reglamento definen la estabilidad química como una *“situación de control en agua, aire y suelo, de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una faena minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua con los residuos generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y rípios de lixiviación”*.

Según la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de faenas e instalaciones mineras elaborada por Fundación Chile y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en 2015, se entenderá que “una instalación minera se encuentra estable químicamente cuando, en su interacción con los factores ambientales, **no genera impactos** que impliquen un riesgo significativo para la salud de las personas y/o para el medio ambiente”.

5.19.2. Clausura de accesos

En esta etapa, se clausuran todos los accesos al túnel. En la Figura 5.44 se evidencia el cierre sólido efectuado en toda la sección del túnel, se instaló una reja con restricción de acceso y señalización. El cierre del portal se hizo con shotcrete.



Figura 5.44 Cierre sólido del portal del túnel.

Fuente: (Barrick, 2018).

5.19.3. Identificación de los aspectos ambientales asociados

Para el cierre del túnel y la captación de efluentes e infiltraciones, se analizaron dos posibles opciones para el manejo de aguas ácidas. La primera opción consiste en un “cierre hermético”, sin evacuación de las aguas, las cuales se acumularían en el túnel. La segunda opción considera un “sello con drenaje” que permita la evacuación del agua del túnel, evitando su acumulación. Si bien la primera opción presenta como principal ventaja la eliminación de las operaciones de tratamiento de las aguas, tiene como principal desventaja la alta presión hidráulica que significaría en la zona inferior del túnel, no solamente en el mismo tapón de cierre sino también en la zona aledaña, la cual posiblemente se traduciría por la formación de escurrimientos superficiales en la zona cercana al tapón. En efecto, el cierre del túnel sin relleno de este, no permite restablecer las condiciones iniciales del acuífero interceptado debido a la singularidad de alta conductividad hidráulica que significa el túnel. En resumen, el túnel por donde se conduce el drenaje al exterior, se sellaría con hormigón permitiendo el libre paso de las aguas.

A continuación, se identifica la fuente generadora de drenaje ácido, el posible impacto ambiental asociado a la estabilidad química y la medida propuesta para el cierre.

Fuente: Túnel con presencia de aguas ácidas.

Impacto ambiental: Alteración de la calidad del agua superficial y/o subterránea (acuíferos poco profundos) por infiltración de drenaje ácido.

Medida propuesta: Instalación de un tapón de hormigón con drenaje permanente.

5.19.4. Tapones

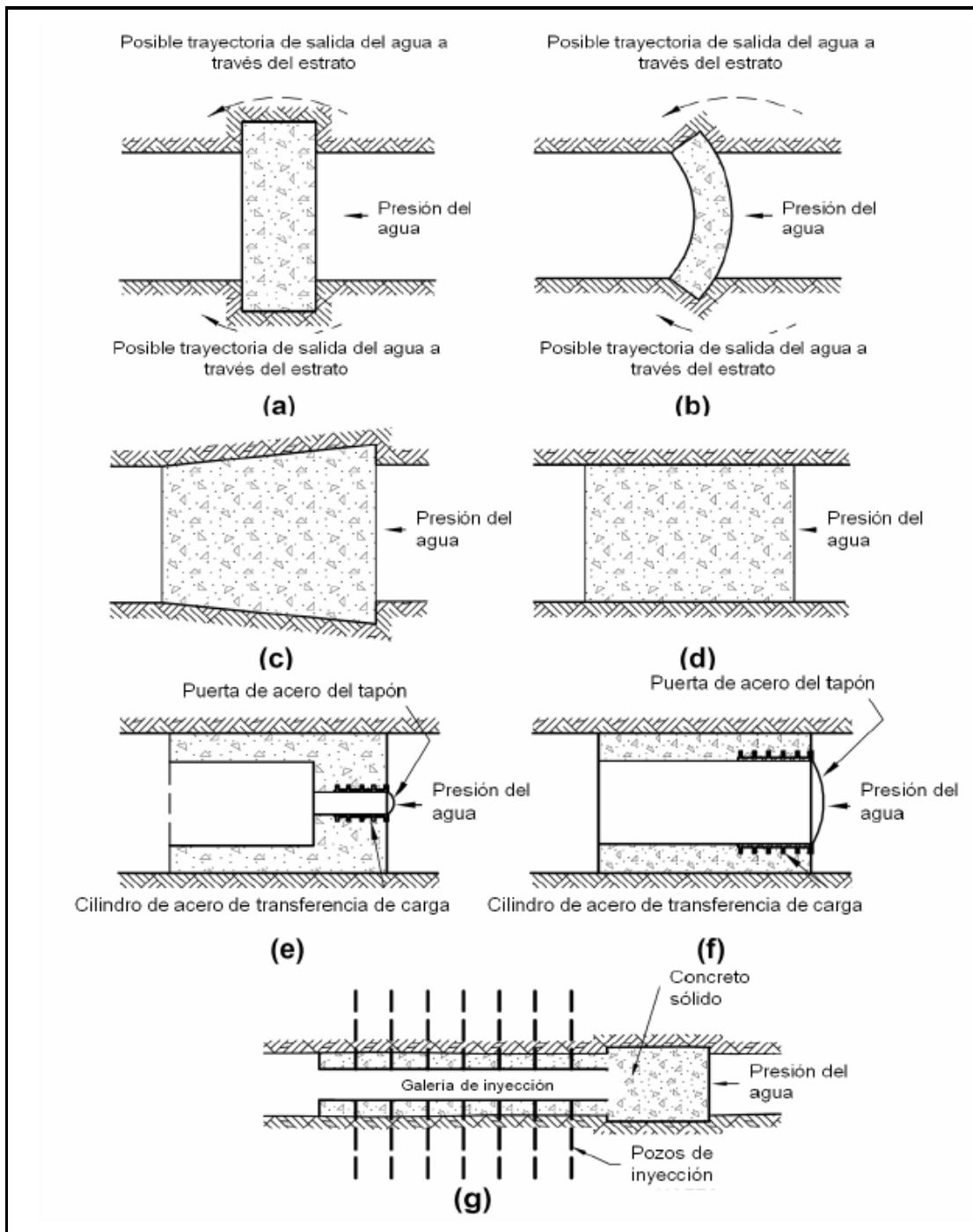
Según la Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras publicada por el Ministerio de Energía y Minas del Perú en 2007, los tapones son estructuras permanentes de concreto puro o reforzado para retener y controlar aguas ácidas bajo presiones elevadas es decir, mayores a 100 kPa o 10 m de columna de agua que no requieren mantenimiento, operación o monitoreo diario.

Los tapones de hormigón en los túneles están diseñados para contener el agua ácida y según (Einarson & Abel, 1990) deben cumplir los siguientes criterios:

1. Tener una longitud suficiente para evitar fallas por corte en el concreto y/o en la roca y para reducir al mínimo las filtraciones a lo largo del contacto concreto/roca.
2. Ser lo suficientemente gruesos para evitar fallas por corte en el concreto o la roca.
3. Tener un espesor suficiente para evitar fallas por tracción de la cara del tapón aguas abajo o bien contener suficiente refuerzo a la tracción para soportar la tensión por tracción.
4. Ser lo suficientemente profundos para evitar el hidrofracturamiento de la formación rocosa.
5. Ser lo suficientemente fuertes como para resistir el sismo máximo creíble.
6. Ser suficientemente resistente a los ácidos para durar todo el período de vida útil requerido.
7. Tener suficiente durabilidad para resistir la degradación debido a cualquier filtración a través del tapón que podría causar corrosión o reacciones químicas debido al drenaje ácido durante la vida útil del tapón. La durabilidad del diseño del tapón deberá ser tal que cualquier tubo instalado a través del tapón tenga suficiente espesor para brindar la vida útil mínima requerida considerando las velocidades de corrosión previstas.

5.19.4.1. Tipos de Tapones

Los tipos de tapones se observan en la siguiente figura:



Nota:

a) y b) tapones indentados (resistencia estructural adecuada pero por lo general insuficiente resistencia a las fugas); c) tapón de concreto en cuña y monolíticos sin refuerzo (resistencia estructural y resistencia a las fugas adecuada, pero menos económico que otras alternativas); d) de lados paralelos y monolítico sin refuerzo (por lo general económico con adecuada resistencia estructural y resistencia a las fugas); e) cilíndricos, de concreto, de lados paralelos sin refuerzo, con acceso limitado en la vía principal; f) similar a e) pero con un acceso mayor, con acceso en toda su altura; y g) sección compuesta – indentado, con una galería de inyección aguas abajo (logra una resistencia adecuada y resistencia a la fuga).

Figura 5.45 Tipos de Tapones.

Fuente: (Modificado por Auld, 1983).

5.19.4.2. Cierre de labores subterráneas inclinadas y horizontales

En este tipo de labores se suelen considerar los accesos y desarrollos, como galerías, túneles, bocaminas, rampas, planos inclinados y otros que por lo general se construyen con poca inclinación. Una vez finalizada su vida operativa deben cerrarse para evitar riesgos potenciales que afectarían a las personas y al ambiente, principalmente por la descarga de aguas que pueden movilizar carga metálica (Osinergmin, 2017).

En las Figuras 5.46 y 5.47 se pueden apreciar algunos cierres para labores horizontales e inclinadas, respectivamente.

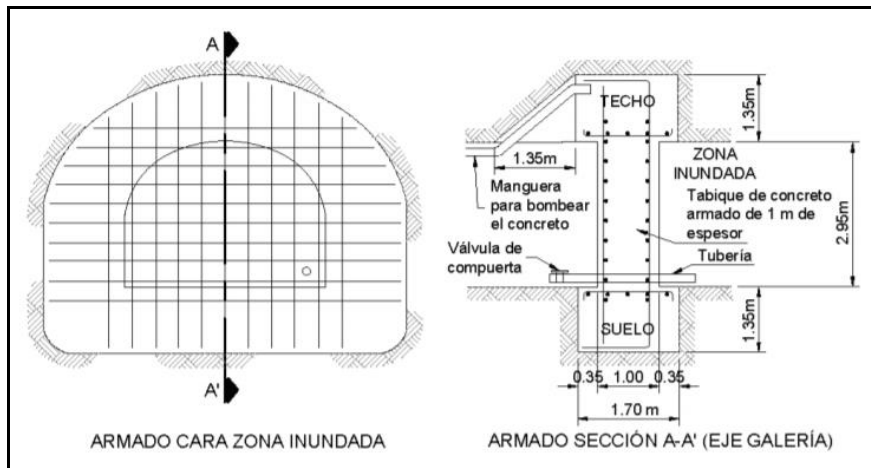


Figura 5.46 Tapón de concreto reforzado en túnel en labor horizontal para altas presiones de agua.

Fuente: (Aduvire et al., 2000).

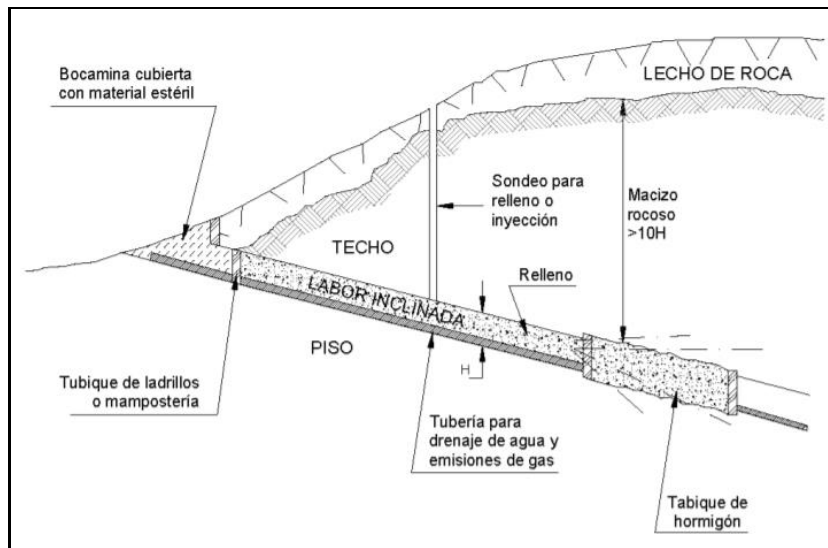


Figura 5.47 Ubicación del tapón de hormigón en un túnel inclinado.

Fuente: (Aduvire et al., 2000).

Según la Guía Peruana de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas elaborada en 2017 por el Organismo supervisor de la inversión en energía y minería, algunos criterios geomecánicos a considerar en el cierre de instalaciones mineras son:

- Evaluar la eventual generación de aguas ácidas a fin de minimizar su impacto sobre cuerpos receptores de aguas superficiales y subterráneas, el medio físico y público en general. Para ello, se deberá evaluar el potencial de generación de ácido y la disolución de contaminantes de los materiales residuales expuestos en las labores subterráneas que pueden contactar con la circulación de aguas provenientes de la reposición de las napas subterráneas, o por el agua que se infiltra a través de las fracturas debido a las precipitaciones en el área de cierre (Osinergmin, 2017).
- Evaluar la necesidad del tipo de cierre a colocar en cada labor subterránea a cerrar (galerías, túneles, chimeneas, piques, sondeos, otros) para garantizar la seguridad de las personas, así como la estabilidad física y la recuperación de las áreas rehabilitadas y el medioambiente del lugar. Los esquemas de cierre elegidos (tapones, barreras, muros, sellos, coberturas, rellenos y otros) deben permitir lograr la estabilidad a largo plazo y evitar que se produzcan emisiones y descargas incontroladas, inestabilidades, desprendimientos, subsidencias, inundaciones y otros (Osinergmin, 2017).

Según (CESEL Ingenieros S.A, 2005), los criterios de selección del método de cierre de pasivos ambientales, se describen, con la finalidad de:

- Prevenir y/o remediar la generación de aguas ácidas.
- Prevenir el riesgo potencial de accidentes para personas y animales.

5.20. Diseño del tapón propuesto

Debido a la fuerte pendiente del túnel que varía entre 5 y 16% y a la larga extensión del túnel (2,7 km), para evitar una presión hidráulica excesiva en el tapón inferior, se podría plantear la construcción de varios tapones intermedios que permitiría distribuir la presión total, y eventualmente, restablecer el acuífero en una situación más parecida a las condiciones previas al túnel. Obviamente, puede significar un mayor costo, pero podría evitar el tratamiento de agua ácida a perpetuidad.

5.20.1. Tapón de lados paralelos

El diseño del tapón se basó principalmente en el documento titulado "*Sellado permanente de túneles para retener relaves o drenaje ácido de rocas*" de (Lang, 1999) y en la "*Guía para el diseño de tapones para el cierre de labores mineras*" del (Ministerio de Minas y Energía del Perú, 2007). También, se tomó como referencia el documento titulado "*The design and construction of water impounding plugs using sprayed concrete*" de (Singh, Abraham, Bellamy & Swart, 2012) para realizar los cálculos del dimensionamiento del tapón. Además se tuvo en cuenta las Guías de diseño de (Garrett & Campbell-Pitt, 1958 y 1961), la Circular Informativa USBM 9020 para el Diseño de compuertas para el control del agua en minas subterráneas de (Chekan, 1985). Adicionalmente, se revisó la circular publicada por el HSE del Reino Unido (2005) titulada "*El diseño y la construcción de tapones de retención de agua en minas en funcionamiento*". También, se utilizó un artículo de (Auld, 1982) relacionado con tapones para evaluar el diseño.

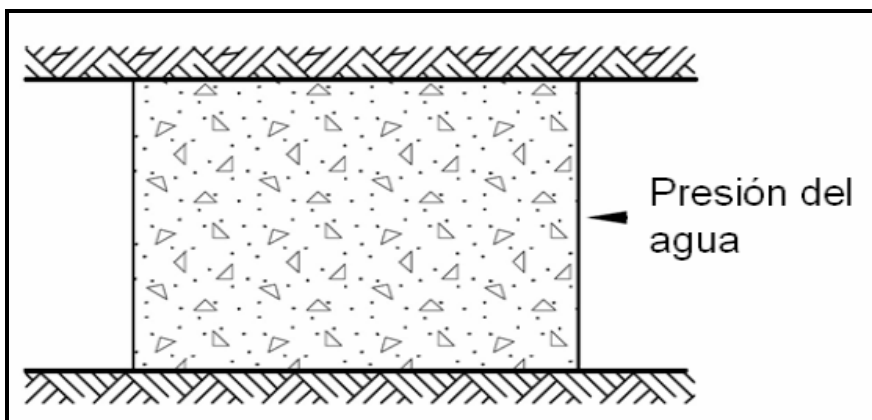


Figura 5.48 Tapón de lados paralelos.

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía del Perú, 2007).

El tapón de lados paralelos es económico, tiene una adecuada resistencia estructural y resistencia a las fugas. Este tipo de tapón, se ha usado en Perú, Estados Unidos, Sudáfrica y Canadá (Ministerio de Minas y Energía de Perú, 2007).

5.20.2. Parámetros de Diseño

Se han considerado los siguientes parámetros de diseño:

- El túnel tiene una forma de herradura de 6,3 m de ancho por 5,5 m de alto y un área de sección transversal de 30,4 m² aproximadamente.
- La columna de agua estática sobre el tapón es 550 m.
- La columna de roca sobre el túnel es de 353 m (dato supuesto).
- Macizo rocoso de buena calidad ($61 < \text{RMR} < 80$). Resistencia al corte de del macizo rocoso= 900 kPa, produciendo un esfuerzo de corte máximo permisible de 300 kPa ($900/3$ para un Factor de Seguridad de 3).
- Resistencia a la compresión uniaxial para el concreto = 50 MPa
- Máximo gradiente hidráulico permitido = 14 m/m (o 140 kPa/m) para un macizo rocoso de buena calidad (según Benson, 1989).

Para el diseño del tapón de lados paralelos, se consideraron los criterios diseño de las siguientes tablas:

Tabla 5.64. Criterios para el diseño de tapones permanentes.

Modo de Falla	Criterios de diseño
1) Corte – Falla por corte a lo largo del contacto roca/concreto, a lo largo del macizo rocoso, o a lo largo de discontinuidades adversamente orientadas.	El esfuerzo de corte total admisible de la roca de acuerdo, por ejemplo, al criterio de falla de Hoek-Brown. El esfuerzo de corte admisible del concreto de acuerdo al ACI (American Concrete Institute), al CSA (Canadian Standard Association) o el equivalente aprobado por normas peruanas. F.S. > 3.0 condiciones normales F.S. > 1.5 condiciones sísmicas y para presiones hidrostáticas de lodo/ relaves (con gravedad específica igual a 2) F.S. > 1.1 para condiciones de huayco (dinámicas) (impacto directo)
2) Falla por flexión de viga gruesa	Esfuerzo a la tracción admisible del concreto de acuerdo con el código ACI. F.S. > 3.0 condiciones normales F.S. > 1.5 condiciones sísmicas
3) Levante hidráulico de la roca que rodea al tapón.	F.S. > 1.3 condiciones normales (análisis de esfuerzos totales) F.S. > 1.1 condiciones sísmicas (análisis de esfuerzos totales)
4) Gradiente Hidráulico y Fugas (o una excesiva filtración) alrededor del tapón para evitar erosión de las paredes del túnel.	a) Máximo gradiente hidráulico sobre la base de métodos empíricos de diseño (como se muestra en la Tabla 2-1). b) Para condiciones estáticas, un factor de seguridad mínimo de 2.5 deberá usarse para asegurar el gradiente de presión a través del tapón, usando el enfoque sudafricano (es decir, Garrett & Campbell-Pitt, 1958 y 1961). c) Para condiciones de huayco (dinámicas), se deberá adoptar un factor de seguridad de 1.5. <u>Adicionalmente, para los tapones construidos para retener drenaje ácido de roca, se deberán revisar los siguientes Criterios de "ejecución":</u> d) Reducir la conductividad hidráulica del contacto y del macizo rocoso que circunda al tapón a por lo menos 10^{-7} m/s con inyecciones (si fuera necesario). e) Limitar la filtración a ocasionales goteos en el tapón y menos de 0.5 L/s medidos 20 m aguas abajo del tapón.
5) Desintegración del concreto a largo plazo	> 30 MPa resistencia a la compresión. La mezcla de concreto será diseñada de acuerdo con los mejores estándares de resistencia al ataque por ácido, ataque por sulfatos y a la reacción alcali agregado.

Fuente: Adaptado de (Auld, 1983), (Chekan, 1985) & (TSS, 1999).

Se realizaron cálculos de diseño para los siguientes modos de falla:

- Falla por corte (tanto estático como dinámico) a través del hormigón, el contacto hormigón/roca y la roca.
- Fracturamiento hidráulico.
- Gradiente hidráulico
- Filtraciones alrededor del tapón (incluyendo los requisitos de lechada).

Tabla 5.65. Resistencia al corte y gradientes hidráulicos de diseño para tapones de túneles.

Condición general de la roca RMR – Evaluación del macizo rocoso	Resistencia al corte (Máxima resistencia al corte admisible) ¹ (kPa)	Máxima gradiente hidráulica admisible ² m/m	Máxima gradiente de presión admisible kPa/m
Muy Buena Roca Masiva, dura, ampliamente diaclasada 81<RMR<100	1500 (500) ³	15 - 30	150 - 300
Buena Roca Dura a moderadamente dura, moderadamente diaclasada 61<RMR<80	900 (300)	10 - 14	100 - 140
Roca Moderada a débil, meradamente diaclasada 41<RMR<60	600 (200)	7 - 9	70 - 90
Roca Pobre Débil, cercanamente diaclasada o cortada 21<RMR<40	300 (100)	5 - 6	50 - 60
Roca Muy Pobre Muy débil, probablemente erosionable RMR < 20	150 (50)	3 - 4	30 - 40

Nota: Las características erosionables de tapón aguas abajo deberán tratarse localmente

¹ Considerando un factor de seguridad de por lo menos 3.0.
² Los gradientes hidráulicos admisibles pueden ser mayores si se lleva a cabo una inyección en la formación.
³ La resistencia al corte estimado del macizo rocoso (kPa) y entre paréntesis la máxima resistencia al corte admisible.

Fuente: (Benson, 1989).

5.21. Dimensionamiento del Tapón

Se propone la instalación de un tapón de lados paralelos con drenaje construido con hormigón de 50 MPa de resistencia a la compresión uniaxial. El objetivo de este tapón es reducir el flujo de descarga de agua ácida al medio ambiente y restablecer los niveles del agua subterránea a sus condiciones previas al túnel.

Se debe considerar como presión, la columna de agua que va a rellenar el túnel. Por lo tanto, la presión se calcula por diferencia de cotas entre la entrada y salida del túnel (4650 m s.n.m–4100 m s.n.m= 550 m). Por lo tanto, para el diseño del tapón de este caso de estudio, se tomó una columna de agua de 550 m, aunque puede ser menor si se considera que el túnel no se llena completamente. Teniendo en cuenta que el túnel tiene una pendiente pronunciada (5%-16%) y una alta presión hidrostática, el diseño del tapón propuesto corresponde a la opción de un tapón con drenaje permanente de agua (Figura 5.49). El sistema de drenaje está compuesto por un conjunto de válvulas diseñadas para bombear el agua acumulada y tuberías HDPE.

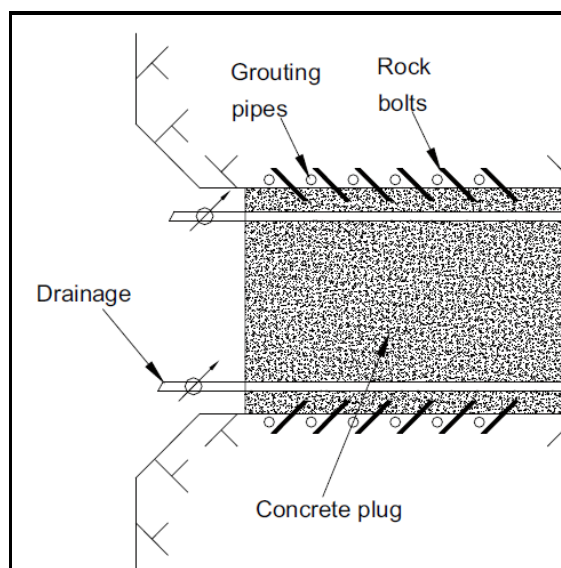


Figura 5.49 Tapón de hormigón con tubería de drenaje.

Fuente: (Modificado de Dixon, Börgesson, Gunnarsson & Hansen, 2009).

Los parámetros utilizados para el diseño del tapón se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.66. Parámetros de diseño del tapón de lados paralelos.

Parámetros	Valor	Unidades
Resistencia a la compresión uniaxial del concreto: f_c'	50	MPa
Esfuerzo al corte permitido para el concreto según (ACI, 1972): f_s'	1175	kPa
Esfuerzo al corte permitido para el concreto: f_s'	1174504	Pa
Clasificación del macizo rocoso	Roca buena a regular	
	61 <RMR <80	
Resistencia al corte de la roca de diseño (Tabla 5.65)	900	kPa
Resistencia al corte de la roca de diseño	900000	Pa
Gradiente hidráulico máximo permitido de diseño (GHmax) según (Benson, 1989).	14	m/m
Diseño para tapón paralelo de hormigón, con drenaje permanente para evacuar el agua ácida acumulada.	No se requiere incrustación de cuña en la roca	
Columna de agua estática sobre el tapón: H	550	m

Fuente: Elaboración propia.

5.21.1. Diseño por Corte

En el diseño de tapón de lados paralelos, se asume que la carga inducida por la presión hidrostática sería transmitida del tapón de concreto a la roca como corte alrededor del perímetro del tapón y en su longitud (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2007).

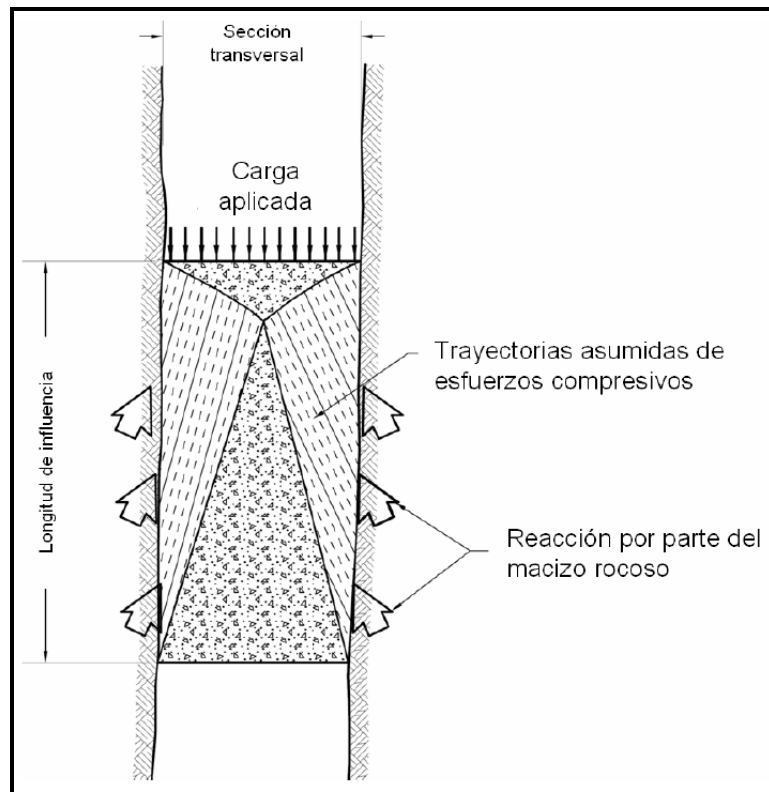


Figura 5.50 Diagrama de cargas para el diseño por corte.

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2007).

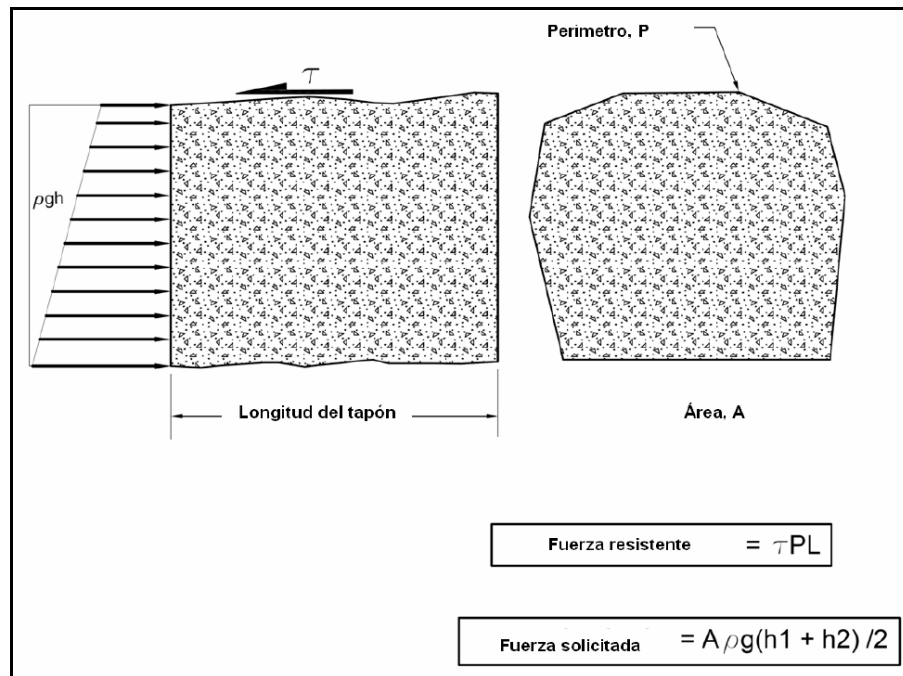


Figura 5.51 Diagrama del diseño por corte.

Fuente: (Lang, 1999).

Por consiguiente, la longitud de un tapón debe diseñarse para mantener el esfuerzo de corte desarrollado en el concreto del tapón por debajo de los límites ACI y mantener el

esfuerzo de corte en la roca que rodea al tapón muy por debajo de la resistencia al corte. De modo que, la falla por corte debería evaluarse en el concreto, en el contacto roca/concreto y a través del macizo rocoso. (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2007).

En este caso de estudio, la resistencia al corte de la roca (900 kPa) es menor al esfuerzo de corte del concreto (1175 kPa), en consecuencia la falla por corte estará controlada por la resistencia a la corte desarrollada en la roca y no en el concreto. Las aguas ácidas pueden reducir la integridad del hormigón del tapón, por este motivo se seleccionó un hormigón con alta resistencia a la compresión (50 MPa), con el objetivo de evitar la desintegración del concreto que puedan causar las aguas ácidas a largo plazo.

Los resultados obtenidos del diseño del tapón por corte, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.67 Longitud del tapón para carga estática.

Parámetros	Valor	Unidades
Pf = Presión Hidrostática	$Pf = \rho w * g * H$	Pa
Densidad del agua: ρw	1000,00	kg/m ³
Aceleración de la gravedad:(g)	9,81	m/s ²
Pf = Presión Hidrostática	5395500	Pa
Pf = Presión Hidrostática	5395,50	kPa
A = Área transversal del tapón	30,40	m ²
Pe = Perímetro transversal del tapón	$Pe = 2(w + h)$	m
Pe = Perímetro transversal del tapón	23,60	m
Ancho del túnel: (w)	6,30	m
Altura del túnel: (h)	5,50	m
L = Longitud del tapón para F.S=1	7,72	m
Aplicando un F.S=4, se obtiene L=Longitud del tapón según el diseño por corte	31,00	m
Gradiente de Presión	174,67	kPa/m
Verificando el gradiente hidráulico máximo, se obtiene la longitud mínima del tapón para retener la carga hidrostática.	$L_{mín} = H/GH_{max}$	m
Longitud mínima del tapón para retener la carga estática:	39,00	m

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando un factor de seguridad de 4, la longitud del tapón obtenida con base en la resistencia al corte es 31 m, pero al verificar el gradiente hidráulico máximo permitido, la longitud mínima del tapón requerida para retener la carga de agua estática es de 39 m.

Tabla 5.68 Rangos de Aceleración sísmica.

Escala de Mercalli ³	Aceleración sísmica (g)	Velocidad sísmica (cm/s)	Percepción del temblor	Potencial de daño
I	< 0.0017	< 0.1	No apreciable	Ninguno
II-III	0.0017 - 0.014	0.1 - 1.1	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 - 0.039	1.1 - 3.4	Leve	Ninguno
V	0.039 - 0.092	3.4 - 8.1	Moderado	Muy leve
VI	0.092 - 0.18	8.1 - 16	Fuerte	Leve
VII	0.18 - 0.34	16 - 31	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34 - 0.65	31 - 60	Severo	Moderado a fuerte
IX	0.65 - 1.24	60 - 116	Violento	Fuerte
X+	> 1.24	> 116	Extremo	Muy fuerte

Fuente: (Aceleración sísmica, 2019).

Tabla 5.69 Longitud del tapón para carga dinámica.

Longitud del tapón para Carga Dinámica	Valor	Unidades
La carga dinámica es transitoria.		
Factor de seguridad para la carga sísmica: F.S>1.5 (Lang, 1999)	1,5	
Presión adicional: P _H	$P_H = c \cdot v \cdot \rho_w$	
Velocidad acústica del agua: c	1437,00	m/s
Densidad del agua: ρ_w	1000,00	kg/m ³
Velocidad en tierra: v		
Aceleración sísmica máxima de diseño: a _{max} (Dato supuesto según Tabla 5.68)	0,5	g
Relación v _{max} /a _{max} según (Seed & Idriss, 1983) (para roca)	55,00	(cm/s)/g
Velocidad máxima: v _{max}	0,275	m/s
Presión adicional: P _H	395175	Pa
Presión adicional: P _H	395,18	kPa
Carga dinámica: H _{dinámica}	P _H /9,81	m
Carga dinámica: H _{dinámica}	40,28	m
Longitud del tapón para carga dinámica:	H _{dinámica} /GH _{max}	m
Longitud del tapón para soportar la carga dinámica:	3,00	m

Fuente: Elaboración propia.

La presión adicional que puede ocurrir en el tapón como resultado de un sismo con aceleración máxima de 0,5 g es de 395,18 kPa, que se podría agregar a la presión hidrostática de 5395,50 kPa, dando como resultado una presión total de 5790,68 kPa. Volviendo a verificar el gradiente hidráulico, la longitud requerida del tapón sería (550 m + 40,28 m)/14 equivalente a 42 m.

Si el diseño por corte da como resultado una longitud del tapón que es menor que la dimensión máxima del túnel, el diseño debe verificarse para determinar la resistencia a la flexión de viga gruesa (Lang, 1999). Se comprobó que la longitud del tapón obtenida en el diseño por corte es mayor que la dimensión máxima del túnel. Por lo tanto, no se requiere la verificación de la longitud del tapón por flexión de viga gruesa y el tapón no necesitará refuerzo de acero para soportar los esfuerzos de flexión por tracción aplicados aguas abajo.

5.21.2. Fracturamiento hidráulico

El fracturamiento hidráulico de la roca que rodea al tapón ocurrirá si la presión hidráulica sobre el tapón supera el esfuerzo mínimo principal (σ_3). El esfuerzo mínimo principal se puede estimar de forma conservadora como la carga debida a la profundidad de la cobertura de roca sobre el túnel. Una regla empírica es que la profundidad de la cobertura sobre el tapón debe ser como mínimo la mitad de la carga estática dentro del túnel (Lang, 1999). Por lo tanto, se requiere suficiente cobertura rocosa sobre el tapón para evitar el fracturamiento hidráulico.

5.21.2.1. Fracturamiento hidráulico según el criterio Noruego

El criterio Noruego requiere que la presión hidrostática máxima sea inferior al esfuerzo principal menor, reducida mediante un factor de seguridad definido (Ministerio de Energía y Minería, 2007). El criterio Noruego es adecuado para túneles ubicados cerca de un valle y es válido para pendientes hasta de 60°. En el caso de pendientes más inclinadas, se requieren mediciones de los esfuerzos in situ (Benson & Lang, 1989).

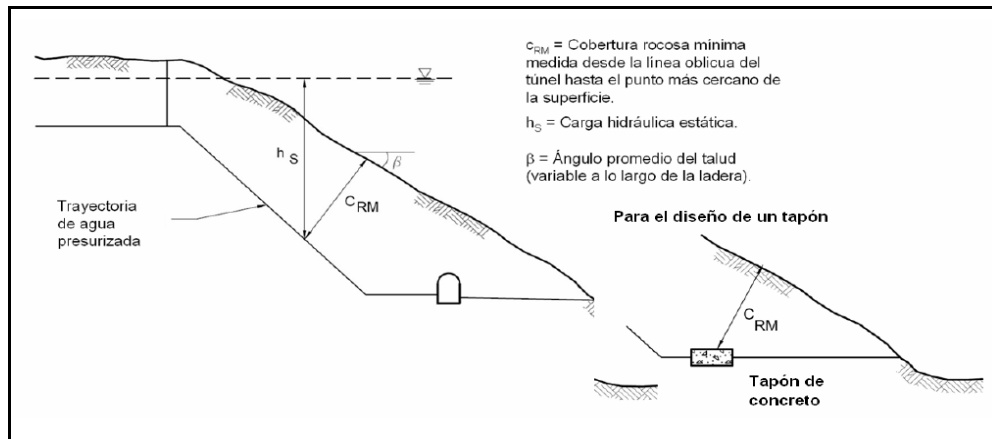


Figura 5.52 Esquema del criterio Noruego para el confinamiento de flujos de agua presurizados sin revestimiento.

Fuente: (Adaptado de Bergh-Christensen, 1988).

Para una cobertura inclinada, la cobertura de roca mínima se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{RM} = \frac{H_S * \gamma_w * F.S}{\gamma_r * \cos\beta}$$

Ecuación 5.10 Cálculo de cobertura de roca mínima.

Dónde,

C_{RM} : Cobertura de roca mínima sobre la ubicación planificada del tapón hacia el punto más cercano.

Hs: Carga hidrostática de diseño.

γ_w : Peso unitario del agua.

γ_r : Peso unitario de la roca.

F.S: Factor de seguridad. Para condiciones normales, se debería aplicar un F.S mínimo de 1.3 (Recomendado por Lang, 1999).

β : Ángulo de la pendiente.

Remplazando los valores de la Tabla 5.70 en la Ecuación 5.10, se obtuvo una cobertura de roca mínima de 275 m. Esto significa que se requiere una columna de roca de 275 m sobre el tapón para soportar una columna de agua estática de 550 m y prevenir el hidrofracturamiento alrededor del túnel y la pérdida de agua ácida a través de las fracturas. Además, con la cobertura de roca obtenida y la densidad de la roca suprayacente, se calculó el esfuerzo de sobrecarga equivalente a 7553 kPa que resulta mayor a la presión hidrostática (5396 kPa). La presión de ruptura hidráulica se estima con base en los datos obtenidos de las pruebas de hidrofracturamiento realizadas en terreno. En este caso, no se tienen esos datos y para la estimación de la formación de rupturas, se duplicó el esfuerzo de sobrecarga y se obtuvo una presión de ruptura hidráulica equivalente a 15107 kPa.

Tabla 5.70 Fracturamiento Hidráulico.

Parámetros	Valor	Unidades
C_{RM} : Cobertura mínima de roca medida desde el túnel oblicuamente hasta el punto más cercano de la superficie.		
Para cobertura inclinada, C_{RM}	$(H_s \cdot \gamma_w \cdot F.S) / (\gamma_r \cdot \cos \beta)$	m
Carga Estática de diseño: Hs	550	m
γ_w : Peso unitario del agua	1,0	MN/m ³
γ_r : Peso unitario de la roca	2,6	MN/m ³
F.S=Factor de seguridad. (Bergh-Christiansen & Dannevig, 1971) sugieren un F.S apropiado entre 1.1 y 1.3.	1,3 (Recomendado por Lang, 1999).	Adimensional
Ángulo de la pendiente: β	2,86 (Correspondiente a una pendiente del 5% en el tramo entre 0 m y 750 m).	°
Cobertura mínima de roca requerida: C_{RM}	275	m
La cobertura de roca mínima requerida para evitar el fracturamiento hidráulico es 275 m.		

Fuente: Elaboración propia.

5.21.3. Gradiente hidráulico permitido

El gradiente hidráulico es fundamental para el dimensionamiento de la longitud del tapón. Para un macizo rocoso de buena calidad con un RMR entre 61 y 80, la Tabla 5.65 sugiere un gradiente hidráulico máximo permitido entre 10 y 14 m/m o (100-140 kPa/m). Por

consiguiente, la longitud mínima del tapón es equivalente a $550 \text{ m}/14 \text{ m/m} = 39,29 \text{ m}$. Entonces, se requiere un tapón de 39 m de largo para soportar la presión hidrostática.

Tabla 5.71 Gradiente hidráulico permitido sin lechada.

Parámetro	Valor	Unidades
Presión Hidrostática	5395,50	kPa
Longitud del tapón para carga estática	39,29	m
Gradiente hidráulico calculado	137,34	kPa/m
Gradiente hidráulico máximo permitido	140,00	kPa/m

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados de la Tabla 5.71, se obtuvo un gradiente hidráulico inferior al gradiente máximo permitido, de modo que la lechada no es un requisito de diseño. Sin embargo, se recomienda aplicar lechada por precaución para sellar la roca alrededor del perímetro y el contacto roca/concreto. Los cálculos para las presiones de lechada se muestran a continuación:

Presión de lechada objetivo según HSE (UK HSE, 2005):

Presión de lechada $\rightarrow > 1,25 * \text{Presión hidrostática}$

Presión de lechada $\rightarrow > 1,25 * \rho_w * g * H_w$

Presión de lechada $\rightarrow < 0,8 * \text{Presión Litostática}$

Presión de lechada $\rightarrow < 0,8 * \rho_R * g * H_{roca}$

Al remplazar los valores de la Tabla 5.72, se obtiene un rango de presión de lechada objetivo entre 6,7 MPa y 7,2 MPa.

Tabla 5.72 Rango de presión de lechada objetivo.

Parámetros	Valor	Unidades
Presión Hidrostática	5395,50	kPa
Presión de la lechada $> 1,25 * \text{Presión Hidrostática}$. Bajo estas condiciones, la presión de inyección debe corresponder a 1,25 veces la presión hidrostática, respecto al nivel superficial.		
Presión de la lechada $> 1,25 * \rho_w * g * H$	6744,38	kPa
Columna de roca sobre el túnel: H_{roca} (Valor supuesto)	353	m
Densidad de la roca: (ρ_r)	2600	kg/m ³
Gravedad: (g)	9,81	m/s ²
Presión de la lechada $< 0,8 * \text{Presión Litostática}$		
Presión de la lechada $< 0,8 * \rho_r * g * H_{roca}$	7202894	Pa
Presión de la lechada $< 0,8 * \rho_r * g * H_{roca}$	7202,89	kPa
La presión de lechada objetivo está entre 6744,38 kPa y 7202,89 kPa.		
La presión de lechada objetivo está entre 6,7 MPa y 7,2 MPa.		

Fuente: Elaboración propia.

5.21.4. Filtración permitida

Para que el diseño del tapón sea aceptable desde un punto de vista que limite las filtraciones, se debe demostrar que la filtración potencial en virtud de los gradientes hidráulicos aplicados no tendrá consecuencias estructurales ni ambientales para la integridad del tapón respecto a los fines para los que fue diseñado (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

La tasa de filtración máxima permitida a largo plazo para un tapón construido para controlar el drenaje ácido es 1 L/s medido 20 m aguas abajo del tapón (Lang, 1999). Sin embargo, para taponos usados en minería en los que puede haber un impacto ambiental potencial debido a una filtración alrededor del tapón, se deben cumplir otros criterios ambientales más exigentes, por esta razón y en este diseño específico, se debe aplicar un criterio de menor filtración que se limitará a goteos ocasionales en el tapón que sean menores a 0,5 L/s medidos 20 m aguas abajo del tapón. Cabe destacar que el factor más importante que controla la filtración es la permeabilidad natural del macizo rocoso (Lang, 1999) que rodea el tapón y en algunos casos, se requieren inyecciones de lechada en el perímetro del tapón para controlar las filtraciones alrededor del tapón.

La siguiente tabla muestra los parámetros de diseño del tapón verificados:

Tabla 5.73 Resultados de dimensionamiento del tapón.

Parámetros	Valor	Unidades
Longitud mínima del tapón requerida para carga estática	39,00	m
Longitud mínima del tapón para carga total (estática + dinámica)	42,00	m
Presión Hidrostática	5395,50	kPa
A = Área transversal del tapón	30,40	m ²
Fuerza final sobre el tapón=Presión Hidrostática*Área	164023,20	kN
Pe = Perímetro transversal del tapón	23,60	m
Área de corte de la interfaz=Perímetro*Longitud del Tapón	995,05	m²
Interfaz del esfuerzo de corte=Fuerza final sobre el tapón/Área de corte de la interfaz	164,84	kPa
164,84 kPa <350 kPa → Se cumple.		
Gradiente Hidráulico=Presión Hidrostática/Longitud del tapón	137,34	kPa/m
137,34 kpa/m <500 KPa/m → Se cumple.		

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se utilizaron los gradientes de presión máximos permitidos disponibles en la literatura (Tabla 5.74) y la presión hidrostática para calcular la longitud del tapón.

Tabla 5.74 Gradientes de presión máximos recomendados.

Propuestas por	Gradientes de Presión Máximas		Tasa de Filtración aceptable (L/s)
	Interfase concreto/roca sin inyección (kPa/m)	Interfase concreto/roca con inyección (kPa/m)	
Garrett & Campbell-Pitt (1961)	-	-	0.25 a 1
Lang (1999)	-	-	1 (e.g., 1L/s a 20 m corriente abajo de tapones ARD)
Benson (1989)	2 * (RMR-5) (no mayor de 5 para roca POBRE y hasta 30 para masas rocosas con juntas amplias, sólidas y masivas)		-
S. African – Garrett & Campbell-Pitt (1958)	470 (o 118 para un factor de seguridad de 4)	3660 (915, para a F.S. de 4)	-
Directrices de EEUU (1985)	565		-
Manual de ingeniería de minas (1973)	565	905	-
Dahlø et al. (1992) – experiencia noruega	200 a 500		

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2007).

Las longitudes del tapón calculadas teniendo en cuenta los gradientes de presión máximos recomendados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 5.75 Longitud del tapón calculada según gradientes de presión máximos recomendados.

Propuesto por	Longitud del tapón (m)
(Garrett & Campbell-Pitt, 1958) en el contacto concreto/roca con inyección	6,0
(Manual de Ingeniería de Minas, 1973) en el contacto concreto/roca con inyección	18,0
(Guías Americanas, 1985)	9,5-29,0
Según la experiencia Noruega, (Dahlø et al, 1992) para el contacto concreto/roca	11,0-27,0

Fuente: Elaboración propia.

La longitud del tapón requerida para el contacto concreto/roca con inyección es 6 m.

Tabla 5.76 Longitud del tapón calculada en el contacto concreto/roca sin inyección.

Propuesto por	Longitud del tapón (m)
(Garrett & Campbell-Pitt, 1958)	46,0
(Manual de Ingeniería de Minas, 1973)	29,0

Fuente: Elaboración propia.

5.21.5. Mecanismos físicoquímicos a largo plazo

El tapón de hormigón quedará expuesto a las aguas ácidas, de tipo sulfatadas cálcicas con rangos de acidez entre 515 y 3062 mg/L de CaCO_3 , valores de pH que varían entre 2,45 y 4,91, altas concentraciones de sulfatos que varían entre 1236 y 4272 mg/L y altas concentraciones de metales disueltos, principalmente hierro, aluminio, manganeso, cobre y zinc. Con el tiempo, estas aguas pueden reducir la integridad del hormigón del tapón propuesto. El agua presenta una concentración de sulfatos promedio de 3295 mg/L, lo cual sugiere un deterioro del concreto del tapón causada por el ataque de sulfatos y por consiguiente, se requiere un hormigón con cemento resistente a los sulfatos (tales como los Tipo II, Tipo V, Tipo IP, Tipo IPM o añadiendo puzolanas.) De acuerdo con la Asociación de Normas Canadienses (1994), los cementos Portland Tipo 50 (resistentes a los sulfatos) se deben usar cuando es importante la protección contra el ataque de sulfatos severo. Para la construcción del tapón, se propone utilizar el cemento Melón Extra que tiene una resistencia a la compresión mínima a 28 días de 50 Mpa, se emplea en la fabricación de hormigones de alta resistencia y según la Norma ASTM C595 se clasifica como Tipo IP (Portland-Puzolánico), debido a su moderada resistencia a los sulfatos, a los hormigones les confiere una excelente protección frente a los sulfatos. También tiene un excelente desempeño para aplicaciones de hormigón proyectado. Las aguas que estarán en contacto con el tapón presentan altas concentraciones de sólidos disueltos totales que varían entre 2114 y 6604 mg/L, on una concentración promedio de 4628,35 mg/L.

5.22. Instrumentación

La instrumentación geotécnica de un tapón puede consistir en diversos componentes (Figura 5.53), que dependerán de las condiciones de esfuerzos identificadas alrededor del tapón y de las condiciones geomecánicas y geológicas de la zona donde se ubicará, lo cual permitirá evaluar el grado de instrumentación necesaria para garantizar la estabilidad futura del tapón. Asimismo, el programa de monitoreo dependerá de las condiciones mencionadas, para garantizar la seguridad y estabilidad física y química. Se recomienda instalar sensores de cuerda vibrante para medir la presión de agua en el macizo rocoso que rodea el tapón e incluir telemetría para monitorear la presión.

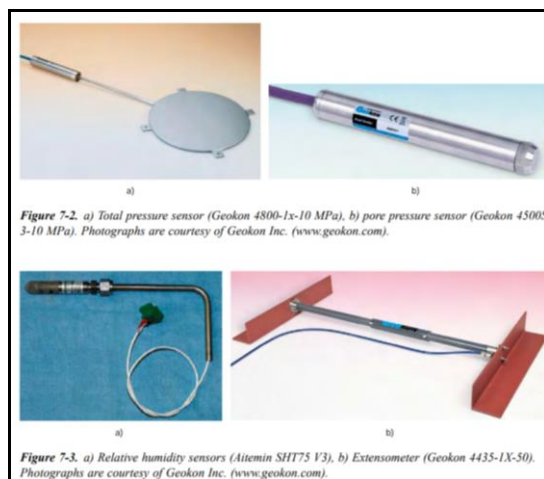


Figura 5.53 Sensores e instrumentos instalados en tapones.

Fuente: (Graham, Malm, & Eriksson, 2015).

6. CONCLUSIONES

Las aguas analizadas del túnel del caso de estudio, se caracterizan por ser de tipo sulfatadas cálcicas, con rangos de pH ácidos que varían entre 2,45 y 4,91, altas concentraciones de acidez que varían entre 515 mg/L de CaCO_3 y 3062 mg/L de CaCO_3 , altas concentraciones de sulfatos que fluctúan entre 1236,39 mg/L y 4272 mg/L y altas concentraciones de metales disueltos, particularmente hierro, aluminio, manganeso, cobre, zinc y arsénico, por consiguiente estas concentraciones exceden los límites máximos permitidos por las normas Chilenas NCh. 1333 y la NCh. 401, de modo que el agua del túnel no se puede utilizar para riego agrícola, ni para consumo humano o animal.

El túnel está ubicado en un contexto geológico caracterizado por un sistema epitermal de alta sulfuración con una alteración hidrotermal argílica avanzada, caracterizada por la asociación alunita-pirita-enargita, que se originó a partir de fluidos hidrotermales con alta concentración de ácido sulfhídrico, el cual causó la abundante presencia de pirita diseminada en el área de estudio. Además, las aguas del arroyo cercano al túnel son ácidas, de tipo sulfatadas cálcicas, con altas concentraciones de sulfatos y metales disueltos. Las aguas que salen del túnel y las que fluyen por el arroyo tienen características similares que sugieren un origen común.

Durante la excavación, gran parte del túnel interceptó zonas de falla o con alto fracturamiento, es decir zonas con mayor permeabilidad que favorecen el ingreso de agua ácida al túnel que debe conducirse y tratarse. Además, la presencia de aguas ácidas impacta la estabilidad del túnel, oxidando los pernos, la malla y deteriorando el shotcrete, por ende como medida de prevención, se requiere la selección de materiales resistentes a la corrosión durante toda la vida útil del túnel. Por lo tanto, las medidas propuestas para el caso de estudio se basan en la instalación de pernos de fibra de vidrio, malla electrosoldada fabricada con acero de alta resistencia y la utilización de hormigón proyectado MELÓN AD que es resistente al ataque de sulfatos y evita la corrosión de las armaduras.

Los niveles de agua registrados en los pozos entre 2007 y 2013, demostraron que el nivel freático a lo largo de la traza del túnel disminuyó durante la construcción, debido a que el túnel operó como dren, evacuando localmente importantes flujos de agua del macizo rocoso que afectan la estabilidad del túnel y en consecuencia, pone en riesgo la seguridad de los trabajadores antes y durante la instalación de la fortificación.

Los impactos ambientales que se identificaron asociados a las marinas expuestas a la meteorización son la alteración de la calidad de aguas superficiales por interacción de aguas meteóricas (lluvia y/o nieve) con la marina y la alteración de la calidad de aguas subterráneas producto de la infiltración de aguas ácidas a los acuíferos poco profundos. Por esta razón, como medidas de control ambiental se propone segregar las marinas con alto potencial para generar drenaje ácido de las marinas que tienen bajo a incierto potencial y se recomienda mezclar las marinas con cal, impermeabilizar toda la base del acopio de las marinas y cubrirla con un geotextil; construir y dejar operativo un sistema de intercepción y acumulación de los drenajes que están debajo de los acopios de marinas, donde éstos se monitorearán y manejarán; el monitoreo semestral que incluya

medición de niveles estáticos y/o dinámicos y realizar un muestreo hidroquímico para determinar la calidad del agua subterránea. En caso de aparición de drenajes ácidos en la base del acopio de marinas, se deberá recolectar y tratar el drenaje ácido en un tanque de mezcla vertical que usa cal hidratada como reactivo neutralizante.

Respecto a la presencia de aguas ácidas en los hastiales y bóveda del túnel durante la construcción, se determinó que se debe realizar un seccionamiento del túnel delimitando los tramos con mayores caudales. Se deben seleccionar tramos para perforar drenes horizontales, habilitarlos con tubería ranurada de PVC e instalar balsas con bombas sumergibles y sensores de nivel para evitar rebalses o conectar los drenes con tubería HDPE a una estación de bombeo.

Durante la operación del túnel, el impacto de las aguas ácidas que se logró identificar fue el deterioro de la calidad del agua superficial por la descarga accidental de aguas ácidas a ríos, quebradas o arroyos, lo cual podría afectar a la comunidad por impedir el uso del agua para riego agrícola o recreación.

Para el tratamiento del drenaje ácido del túnel del caso de estudio durante la operación. Se seleccionó la alternativa 3, que corresponde a la neutralización con cal hidratada mediante el proceso de lodos de alta densidad (HDS), debido a que puede tratar cargas muy altas de acidez (18,48 ton de CaCO_3 /día), tiene una alta eficiencia de neutralización (90%) que reduce el consumo de cal, y alta eficiencia de eliminación de metales, produce lodos más densos (25% en peso de sólidos). Se logró una reducción del volumen de lodos del 80%, lo cual implica un ahorro en la eliminación de lodos. Adicionalmente, con el proceso HDS, se obtienen lodos más estables químicamente.

En la etapa de cierre del túnel, el impacto ambiental de las aguas ácidas que se logró identificar fue la alteración de la calidad del agua superficial y/o subterránea (acuíferos poco profundos) por infiltración de drenaje ácido. Se propuso la instalación de un tapón de hormigón de lados paralelos con drenaje permanente de agua para evitar gradientes hidráulicos excesivos que pongan en riesgo no solo al tapón en la salida inferior sino también a toda la zona cercana a esta salida. El dimensionamiento dio como resultado un tapón de 42 m de longitud para soportar la presión hidráulica total. Otra opción viable es la instalación de varios tapones intermedios que permitiría distribuir la presión total y eventualmente, restablecer el acuífero a las condiciones previas al túnel, lo cual implicaría un mayor costo, pero evitaría el tratamiento de agua ácida a perpetuidad. También, se utilizó el criterio Noruego para el cálculo de la cobertura de roca mínima y se obtuvo una columna de roca mínima de 275 m sobre el tapón para soportar una columna de agua estática de 550 m y prevenir el fracturamiento hidráulico alrededor del túnel y la pérdida de agua ácida a través de las fracturas.

Las aguas ácidas pueden reducir la integridad del hormigón del tapón, por este motivo se seleccionó un hormigón con alta resistencia a la compresión (50 MPa) para evitar la desintegración del hormigón que puedan causar las aguas ácidas a largo plazo. Adicionalmente, se debe evaluar la instrumentación que se instalará en el tapón para garantizar su estabilidad futura.

7. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las recomendaciones para futuros túneles mineros:

Se recomienda formar un equipo multidisciplinario con amplia experiencia para abordar la gestión de aguas ácidas desde etapas previas a la construcción del túnel. Este equipo se encargará del levantamiento de información hidrogeológica, geotécnica y de la elaboración y ejecución de un plan de predicción de drenajes ácidos en túneles.

Se recomienda la instalación de sensores de cuerda vibrante en los pozos de monitoreo ubicados a lo largo de la traza del túnel y la medición de niveles estáticos durante toda su vida útil para monitorear las variaciones piezométricas.

También, se debe llevar a cabo un monitoreo mensual en los tramos con humedad y filtraciones y en las zonas con alto fracturamiento al interior del túnel, priorizando los tramos con mayor infiltración, medir los caudales y los parámetros fisicoquímicos con un equipo multiparámetros, principalmente el pH, el potencial redox (Eh), la conductividad eléctrica, la temperatura y sólidos disueltos totales. Además, es necesario realizar un muestreo y análisis hidroquímico mensual en los pozos de monitoreo ubicados sobre la traza del túnel, con el fin de monitorear los parámetros indicadores de drenaje ácido, tales como: el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, las concentraciones de sulfatos, las concentraciones de hierro total y disuelto, las concentraciones de los iones ferroso y férrico, las concentraciones de aluminio, manganeso, arsénico, cobre y zinc.

Se recomienda medir los esfuerzos in situ de la roca que rodeará al tapón antes de finalizar el diseño para calcular el esfuerzo de sobrecarga (presión litostática), con el fin de evitar el hidrofracturamiento de la roca alrededor al tapón y el ingreso de agua ácida a las fracturas. También, se recomienda realizar pruebas "*Packer test*" para obtener los rangos de permeabilidad de la roca y estimar la presión de ruptura de la formación.

Se sugiere realizar el test de balance ácido-base (ABA) y el test de celdas de humedad a las marinas presentes en los desarrollos de los túneles para determinar el potencial de generación ácido.

Se recomienda realizar visitas técnicas a la zona de estudio para cuantificar las condiciones geológicas y geotécnicas en la ubicación del tapón y recopilar datos concretos para el diseño de tapones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abandoned Mine Drainage | Schuykill Action Network. (2021). Recuperado 28 Enero 2021, de <https://www.schuykillwaters.org/our-work/abandoned-mine-drainage>
- Aceleración sísmica. (2019). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Recuperado 15 Febrero 2021, de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aceleraci%C3%B3n_s%C3%ADsmica&oldid=120035310
- ACI. (1995). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Prepared by American Concrete Institute, ACI 318-95.
- Acuerdo Marco de Producción Limpia. (2002). *Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera, Sector Gran Minería, Buenas Prácticas y Gestión Ambiental*. Chile.
- Adivire, O., López Jimeno, C., & Adivire, H. (2000). *Guía de Abandono y Clausura de Minas Subterráneas*. Madrid: ETSI Minas de Madrid.
- Adivire, O. (2018). Dimensionado de Sistemas de Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina. *Medio Ambiente y Minería*, (5), pp.1-11. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522018000200001&script=sci_arttext
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal Of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.09.006
- AMEC PERÚ S.A. (2007). *Estudio de Factibilidad y Evaluación Ambiental de la Planta de Tratamiento de Aguas Ácidas del Túnel Kingsmill* (p. 34). Departamento de Junín, Perú. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/estudios/kingsmill/Resumen.pdf>
- Argo Mill and Tunnel (Idaho Springs). (2019). Recuperado 15 Abril 2021, de https://www.tripadvisor.es/Attraction_Review-g333485-d2155318-Reviews-Argo_Mill_and_Tunnel-Idaho_Springs_Colorado.html#photos:aggregationId=101&albumid=101&filter=7&ff=399318894
- Argo Mill and Tunnel (Idaho Springs). (2019). Recuperado 15 Abril 2021, de https://www.tripadvisor.es/Attraction_Review-g333485-d2155318-Reviews-Argo_Mill_and_Tunnel-Idaho_Springs_Colorado.html#photos:aggregationId=101&albumid=101&filter=7&ff=399318895
- Arrieta, A. (2010). Chinalco invirtió más de US\$ 44 millones en planta de tratamiento de aguas ácidas del Túnel Kingsmill. *Agencia Peruana de Noticias (ANDINA)*, Edwin Bardales, enviado especial. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-chinalco-invirtio-mas-44-millones-planta-tratamiento-aguas-acidas-del-tunel-kingsmill-317431.aspx>

- Armienta, M.A., Talavera, O., Morton, O., & Barrera, M. (2003). Geochemistry of metals from mine tailings in Taxco, México. *Bull. Environ. Contam. Toxicol*, (71), 387-393.
- Árcega-Cabrera, F., Castillo-Blum, E., & Armienta, M.A. (2010). Tetraethyl lead release from sediments in a mine-impacted tropical river. *Rev. Int. Contam. Ambie*, (26), 119-127.
- Asociación Española de Normalización. (2000). *Norma Española UNE 104424:2000. Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P.*
- Asociación Española de Normalización. (2007). *Norma Española UNE-EN 480-14. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 14: Determinación del efecto sobre la susceptibilidad a la corrosión del acero para armaduras por medio de un ensayo electroquímico potencioestático.*
- Aubé, B & Lee, D. (2015). The High Density Sludge (HDS) Process and Sulphate Control, 10th ICARD & IMWA Annual Conference. p.5.
- Auld, F. (1983). Design of Underground Plugs. *International Journal Of Mining Engineering*, (Vol. 1), 189 – 228.
- Baker, B.J, & Banfield, J.F (2003). MiniReview: Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiol. Ecol*, (44), 139-152.
- Banks, D., Younger, P., Amesen, R., Iversen, E., & Banks, S.B. (1997). Mine-water chemistry: The good, the bad and the ugly. *Environ. Geol*, (32), 157-174.
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6(4), 189-239.
- Barton, N., Løset, F., Lien, R. and Lunde, J. (1980). Application of the Q-system in design decisions. In *Subsurface space*, (ed. M. Bergman) 2, 553-561. New York: Pergamon.
- Barrick. (2011). Lama trabaja en la Construcción del Túnel. *Novedades PASCUA-LAMA*, (10), 30.
- Barrick. (2012). *Proyecto Pascua-Lama*. Presentación, Recuperado de <https://ssa.sma.gob.cl/Documento/Descargar/13211>
- Barrick Pascua-Lama. (2015). *Plan de Cierre Temporal “Proyecto Pascua Lama”* (pp. 1-122).
- Barrick. (2016). *Túnel: Requerimiento del estudio por parte de Barrick*. Presentación.
- Bedoya, D. (2010). Planta Kingsmill, ya es una realidad. *Diario Correo*, Elizabeth Gómez, Enviada Especial. Recuperado de <https://diariocorreo.pe/peru/planta-kingsmill-ya-es-una-realidad-377998/?ref=dcr>
- Bednar, A., Garbarino, J., Ranville, J., & Wildeman, T. (2005). Effects of iron on arsenic speciation and redox chemistry in acid mine water. *Journal Of Geochemical Exploration*, 85(2), 55-62. doi: 10.1016/j.gexplo.2004.10.001

- Benson, R. (1989). Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels. *Tunneling And Underground Space Technology*, 4(2), 155-170.
- Bergh-Christensen, J. (1988). *Design of High Pressure Concrete Plugs For Hydropower Projects*. Paper presented at the ISRM International Symposium, Madrid, Spain.
- Berríos, L. (2017). Consideraciones para la Impermeabilización de Túneles y Obras Subterráneas. *EMB Construcción*, 18.
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2001). Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile. Recuperado 3 Junio 2021, de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=182637&f=2001-03-07>
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Bonnefoy, V., & Holmes, D.S (2012). Genomic insights into microbial iron oxidation and iron uptake strategies in extremely acidic environments. *Environ. Microbiol*, (14), 1597-1611.
- Broughton, L. & Robertson, A., (1992). Acid Rock Drainage From Mines: Where We Are Now. IMM Minerals, Metals and Environment Conference, Manchester, U.K., February 4-6, 1992.
- Bowell RJ, Dey BM, Sapsford DJ, Williams C, Williams KP (2013). Geochemical assessment of legacy mine sites: assigning values and seeking new opportunities. In: Tibbet M, Fourie AB, Dinby C (eds), Mine Closure 2013. Australian Center for Geomechanics, Perth, 583-596.
- Canadian Mining Journal. (2018). GOLD: Chilean court orders Barrick to close Pascua-Lama permanently. *Canadian Mining Journal*. Recuperado de <https://www.canadianminingjournal.com/news/gold-chilean-court-orders-barrick-to-close-pascua-lama-permanently/>
- Canadian Standards Association (1994). CSA International, A23.1-00/A23.2-00. Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Methods of Test for Concrete.
- Cavello, C. (2019). Koehler Tunnel Mine Drainage. Recuperado 18 Abril 2021, de <https://www.mindat.org/gallery.php?pco=2&loc=118976>
- CESEL Ingenieros S.A. (2005). *Plan de Cierre de la Unidad Minera Recuperada*. Lima: CIA Minera Buenaventura.
- Chaparro, R. (2017). Impermeabilización en Obras Subterráneas y Túneles a Prueba de Filtraciones. *EMB Construcción*, 16.
- Chapelle, F.H. (2005). Geochemistry of Groundwater. in Drever, J.I., ed. *Surface And Ground Water, Weathering And Soils, Treatise On Geochemistry*, (Volume 5).
- Chekan, G. (1985). Design of Bulkheads for Controlling Water in Underground Mines, Information circular 9020 Bureau of Mines, United States Department of Interior, Technology & Engineering (p. 36).
- Claussen, H. (2017). Impermeabilización en Obras Subterráneas y Túneles a Prueba de Filtraciones. *EMB Construcción*, 16.

- Colorado Department of Public Health and Environment. (2015). *Update Fact Sheet, Central City/Clear Creek Superfund Site* (p. 3). Colorado: Colorado Department of Public Health and Environment. Recuperado de https://www.colorado.gov/pacific/sites/default/files/HM_sf-cccc-2015-factsheet.pdf
- Colorado Division of Reclamation, Mining & Safety. *Koehler Two Drilling and Grouting. Project Summary*. (pp. 1-4). Colorado.
- Colorado Department of Natural Resources. (2020). *Underground Bulkheads in The Upper Animas Watershed*. Recuperado 16 Abril 2021, de <https://www.bonitapeakcag.org/wp-content/uploads/2020/02/BULKHEADS-and-IMPOUNDED-WATER-CAG-Jan-2020.pdf>
- Compañía Minera Nevada SpA. (2009). *Capítulo Descripción del Entorno, acápite Meteorología. Plan de Cierre Faenas Mineras Proyecto Pascua-Lama*.
- Cuadrado, L., & Ollero, F. (2011). *Contaminación del Río Mantaro afecta a la agricultura del Valle del Mantaro*. Presentación, Universidad ESAN, Lima, Perú.
- Custodio, E., & Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea* (p. 2359). Barcelona: Omega.
- Dahlø, T.S., Bergh-Christensen, J., & Broch, E. (1992). A Review of Norwegian High Pressure Concrete Plugs. In *Proc. Hydropower'92* (pp. 61 - 68). Broch & Lysne (eds), Balkema.
- Dirección General de Servicios Técnicos (2016). *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
- Dixon, D.A., Börgesson, L., Gunnarsson, D., & Hansen, J. (2009). *Plugs for deposition tunnels in a deep geologic repository in granitic rock, Concepts and experience* (p. 43). Stockholm: SKB.
- Dold, B. (2003). Aguas ácidas: formación, predicción, control y prevención. *MINERIA*, (309).
- Dold, B. (2010). Basic concepts in environmental geochemistry of sulfide mine-waste management. In: Sunil Kumar (Ed.) *"Waste Management"*. ISBN 978-953-7619-84-8, SCIYO.com open access publications. (pp. 173-198).
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal Of Geochemical Exploration*, (172), 120-132. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216302333>
- Dopson, M., & Johnson, D. (2012). Biodiversity, metabolism and applications of acidophilic sulfur-metabolizing microorganisms. *Environmental Microbiology*, 14(10), 2620-2631.
- DSI Underground Chile. (2017). *Local Presence-Global Competence, Minería y Construcción de Túneles [Catálogo]* (p. 24). Santiago, Lima y Medellín: DSI Underground. Recuperado de

<https://www.dsiunderground.cl/fileadmin/downloads/dsi-underground.cl/dsi-mineria-y-construccion-de-tuneles-la.pdf>

- Dynal Industrial S.A. (2019). *Sistemas Integrales Túneles y Minería*. Recuperado de <https://www.dynal.cl/wp-content/uploads/2020/05/DYNAL-Sistemas-Integrales-Tuneles-y-Mineria-V.11.19.pdf>
- Dueñas, C.G., & Candia, J.R (2010). *Generación de Drenaje Ácido*. Presentado por Fundación Chile, Iquique, Chile.
- Earth Systems & INAP. (2012). ABATES (Versión V.1.41) [Windows]. Australia.
- Earth Systems. (2021). Vertical Mixing Systems. Recuperado 12 Junio 2021, de <https://earthsystems.com.au/services/water-treatment/portable-treatment-systems/vertical-mixing-systems/>
- Einarson, D.S., & Abel, J.F. (1990). Tunnel Bulkhead for Acid Mine Drainage. In *Proc. Symp. on Unique Underground Structures* (pp. 1-71).
- EMB Construcción. (2017). Impermeabilización en obras subterráneas y túneles a prueba de filtraciones. *EMB Construcción*, 15-17.
- Espinosa-Rodríguez, M.A., Hidalgo-Millán, A., & Delgado-Delgado, R. (2016). Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS). *Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 20(2), 67. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467/46750928001>
- Fernández Remolar, D.C., Morris, R.V., Gruener, J.E., Amils, R., & Knoll, A.H (2005). The Rio Tinto Basin, Spain: Mineralogy, sedimentology geobiology, and implication of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars. *Earth And Planetary Science Letters*, (240), 149-167.
- Fernández, C.I., & Ramírez, C.H. (2018). *Estudio de sistemas de fortificación para la mina subterránea "Olkusz-Pomorzany" de Polonia* (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3390>
- Forbes, E., Trumm, D., Pope, J., & Bell, D. (2018). *Comparison of diversion well substrates for the treatment of acid mine drainage Bellvue Mine, West Coast, New Zealand*. 11th ICARD | IMWA | MWD Conference – “Risk to Opportunity”.
- Fourth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). (1997). *Short Course Chemical Prediction Techniques for ARD*. Vancouver, B.C. Canadá.
- Fundación Chile & SERNAGEOMIN. (2015). *Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras* (p. 14). Chile.
- Garrett, W.S., & Campbell Pitt, L.T. (1958). Tests on an Experimental Underground Bulkhead for High Pressures. *J. S. African Inst. Min. And Metall*, 123- 143.
- Garrett, W.S., & Campbell Pitt, L.T. (1961). Design and Construction of Underground Bulkhead and Water Barriers. In *Transactions of the 7th Commonwealth Mining and*

- Metallurgy Congress* (pp. 1283- 1302). South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Gestión Ambiental Consultores S.A. (2019). *Ampliación Plan de Cierre Temporal Parcial "Proyecto Pascua Lama"* (pp. 1-94). Región de Atacama. Recuperado de https://s25.q4cdn.com/322814910/files/doc_downloads/chile/Ampliacion%20Plan-de-Cierre-Temporal-y-Parcial-Pascua-Lama.pdf
- Gobierno de Chile. (2019). *Diagnóstico Amenazas Naturales y Exposición Sistemas Estratégicos. Plan Regional de Ordenamiento Territorial* (p. 46). Región de Atacama.
- Golder Associates. (2007). *Mapeos Geológicos geotécnicos, prospecciones adicionales y caracterización geológico-geotécnicas de las obras subterráneas del sistema chancador primario al túnel-correa.*
- Golder Associates. (2013). *Mapeo geológico durante 2011-2013.*
- Golder Associates. (2014). *Información descrita en el acápite 3.2.3 Geología del Plan de Cierre Faenas Mineras Proyecto Pascua Lama.*
- Google. (2013). Koehler Tunnel. Recuperado 18 Abril 2021, de <https://www.google.com/maps/place/Koehler+Tunnel/@37.895273,-107.7114501,3a,75y/data=!3m8!1e2!3m6!1sAF1QipOMzj9pX-5hGLqEhPd-5PiGsHs1KMOAKpMfgYjq!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Fh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipOMzj9pX-5hGLqEhPd-5PiGsHs1KMOAKpMfgYjq%3Dw129-h86-kno!7i4256!8i2832!4m5!3m4!1s0x873ede6396ccfeff:0x3732dde5d27aa2ca!8m2!3d37.895273!4d-107.7114501?hl=es>
- Google Maps. (2021). Recuperado 10 Junio 2021, de <https://www.google.cl/maps/@-11.6324453,-76.0553316,494m/data=!3m1!1e3>
- Gusek, J.J. (1994). *Avoiding and Remediating Acid Rock Drainage*. Presented at Latin American Mining Opportunities, Randol at Vancouver '94, Oct. 30-Nov. 2, 1994.
- Guerrero, N. (2000). Tratamiento y Derivación de las aguas del Túnel Kingsmill y su Integración al Proyecto de Transvase Pomacocha-Río Blanco. In *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Guerrero, C.E. (2013). *Túneles bajo nivel del mar para Solución Anti-tsunami en Sistema de agua de enfriamiento en Centrales Termoeléctricas a Carbón* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Grahm, P., Malm, R., & Eriksson, D. (2015). *System design and full-scale testing of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels* (p. 110). Stockholm: SKB. Recuperado de <http://www.skb.com/publication/2483956/TR-14-23.pdf>
- Hansen, L., & Martna, J. (1988). Tunnelling in a complex rock mass: Experience from Vietas, Swedish Lapland. *Tunnelling And Underground Space Technology*, 3(3), 283-294. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0886779888900557>

- Hedrich, S., Lünsdorf, H., Kleeberg, R., Heide, G., Seifert, J., & Schlömann, M. (2011). Schwertmannite formation adjacent to bacterial cells in a mine water treatment plant and in pure cultures of *Ferrovum myxofaciens*. *Environ. Sci. Technol*, (45), 7685-7692.
- Ilbert, M., & Bonnefoy, V. (2013). Insight into the evolution of the iron oxidation pathways. *Biochim Biophys Acta*, 1827(2), 161-175.
- INAP. (2009). GARDGuide. Recuperado 28 Enero 2021, de <http://www.gardguide.com>
- INAP. (2012). Chapter 7 - GARDGuide. Recuperado 11 Febrero 2021, de http://www.gardguide.com/index.php?title=Chapter_7
- INAP. (2012). GARDGuide. Recuperado 30 Enero 2021, de <http://www.gardguide.com/>
- INAP. (2012). Aeration systems for treating CMD - GARDGuide. Recuperado 11 Febrero 2021, de http://www.gardguide.com/index.php?title=Aeration_systems_for_treating_CMD
- Inocencio-Flores, D., Velázquez-Machuca, M.A., Pimentel-Equihua, J.L., Montañez-Soto, J.L., & Venegas-González, J. (2013). Hydrochemistry of groundwater in the Duero River basin and regulations for domestic use. *Water Technology And Sciences*, 4(5), 111-126.
- Instituto Nacional de Normalización. (1968). *Norma Chilena NCh 148.Of68. Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales*. Santiago: División de Normas del Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización. (1997). *Norma Chilena NCh 2262. Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación de la impermeabilidad al agua - Método de la penetración de agua bajo presión*. Santiago: División de Normas del Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización. (2010). *Norma Chilena NCh 2182:2010. Hormigón y mortero - Aditivos - Clasificación y requisitos*. Santiago: División de Normas del Instituto Nacional de Normalización.
- IPAT-UNESCO. (2000). *Pesquisa e desenvolvimento de metodologias para o controle de drenagem ácida e tratamento de efluentes de indústria carbonífera*. Relatorio técnico. Criciúma: Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas, Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- Jiao, W., Ouyang, W., Hao, F., Huang, H., Shan, Y., & Geng, X. (2014). Combine the soil water assessment tool (SWAT) with sediment geochemistry to evaluate diffuse heavy metal loadings at watershed scale. *Environmental Science And Pollution Research*, 21(9), 5960-5971.
- Jiron, F. (2020). Justicia aprueba conciliación entre Barrick y el CDE y cierra proceso por daño ambiental contra Pascua Lama - Diario Chañarcillo. Recuperado 11 Febrero 2021, de http://www.chanarcillo.cl/justicia-aprueba-conciliacion-entre-barrick-y-el-cde-y-cierra-proceso-por-dano-ambiental-contr-pascua-lama/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=justicia-aprueba-

[conciliacion-entre-barrick-y-el-cde-y-cierra-proceso-por-dano-ambiental-contra-pascua-lama](#)

- Johnson, D.B, & Hallberg, K.B (2003). The microbiology of acidic mine waters. *Res. Microbiol*, (154), 466-473.
- Jones, D. I. S., Kohl, C., Grettenberger, C., Larson, L.N., Burgos, W., & Macalady, J.L. (2015). Geochemical niches of iron-oxidizing acidophiles in acidic coal mine drainage. *Applied And Environmental Microbiology*, (81(4), 1242-1250.
- Joshi, K.B. (2014). Microbes: Mini iron factories. *Indian J. Microbiol.*, 54(4), 483-485.
- Kepler, D., & McCleary, E. (1997). *Passive aluminum treatment success*. In: Proceedings of the 18th West Virginia surface mine drainage task force symposium, Morgantown, WV.
- Kopeliovich, D. (2012). Pourbaix diagrams [SubsTech]. Recuperado 3 Marzo 2021, de https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pourbaix_diagrams
- Köppen, W. (1948). *Climatología: Con un estudio de los climas de la tierra*. (1st ed., p. 478). México: Fondo de Cultura Económica.
- Korehi, H., Bloethe, M., & Schippers, A. (2014). Microbial diversity at the moderate acidic stage in three different sulfidic mine tailings dumps generating acid mine drainage. *Research In Microbiology*, 165(9), 713-718.
- Klein, R., Tischler, J.S, Muhling, M., & Schlomann, M. (2013). Bioremediation of mine water. *Advances In Biochemical Engineering-Biotechnology*, (141), 109-172.
- Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. (2007). *Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies* (p. 1358). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Kuyucak, N., Chávez, J., del Castillo, J.R., & Ruiz, J. (2003). Technical feasibility studies and uses of treated acid mine drainage at Kingsmill tunnel, Peru. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage, Cairns, Queensland, Australia, 12-18 July* (pp. 772-774). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/265423697_Technical_Feasibility_Studies_and_Uses_of_Treated_Acid_Mine_Drainage_at_Kingsmill_Tunnel_Peru
- Knight Piésold Consultores S.A. (2009). *Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto Toromocho, Minera Chinalco Perú S.A.* (p. 4). Lima.
- Laboratorio Oficial J. M. Madariaga. (2015). *Guía Sobre Control Geotécnico en Minería Subterránea* (p. 40). Recuperado de <https://energia.gob.es/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf>
- Lang, B. (1999). Permanent Sealing of Tunnels to Retain Tailings or Acid Rock Drainage. In Fernández Rubio, R (ed). *IMWA Congress-Mine, Water & Environment II*, (pp. 647–655). Sevilla, Spain.
- Lemke, S., Enciso, J.L., & Rey, A. (2008). Impermeabilización de túneles: especificación y estado del arte. *Ingeniería Civil*, (151).

- Lewis, C., & Boynton, R. *Acid Neutralization with Lime for Environmental Control and Manufacturing Processes* Bulletin N°216 (p. 8). National Lime Association.
- Lottermoser, B.G (2007). *Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts*, (Second Edition).
- Loofbourow, L. (1973). *Underground Bulkheads and Plugs*. Mining Engineering Handbook. Section 26.7.1. Ground Water and Ground Water Control. Ch. 26 (pp. 26-48). I.A. Given. ed., SME.
- Lowson, A. R., & Bieniawski, Z. T. (2013). Critical assessment of RMR-based tunnel design practices: A practical engineer's approach. *Rapid Excavation & Tunneling Conference*.
- Luna, M. (2013). *Meteorología Proyecto Pascua-Lama, Estadística Trimestral Hidrológica Enero - Marzo 2013* (pp. 1-19).
- Macias, J., & Bruland, A. (2014). *D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method*. Conference: The 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2014) At: Vigo, Spain, Volume: Proceedings EUROCK 2014.
- Maest, A.S., Kuipers, J.R., Travers, C.L., & Atkins, D.A. (2005). *Predicting Water Quality at Hardrock Mines: Methods and Models, Uncertainties, and State-of-the-Art*.
- Malmros, J., Mernild, S., Wilson, R., Yde, J., & Fensholt, R. (2016). Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955–2013/14. *Journal Of Glaciology*, 62(232), 391-401.
- Masiokas, M., Solomina, O., Bradley, R., Jomelli, V., Geirsdottir, A., & Kaufman, D. et al. (2016). Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, (149), 61-90. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379116301196>
- Maza, S.N. (2015). *Estudio de unidades asociadas a paleo-drenaje ácido en la región central de Famatina y su comparación con el actual drenaje ácido de minas* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba (inédita). Córdoba.
- Melón S.A. (2017). *Melón EXTRA [Ficha Técnica]* (pp. 1-2). Melón Cementos. Recuperado de https://www.melon.cl/wp-content/uploads/2018/10/Ficha-cemento-extra-Melon_oct2018.pdf
- MEND. (2009). *Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials*. Mine Environment Neutral Drainage Report 1.20.1.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2007). *Guía para el Diseño de Tapones para el Cierre de Labores Mineras* (pp. 1-163). Lima: Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros.
- Mining Press. (2017). Qué dijo San Juan sobre el agua del túnel de Pascua Lama. El Comunicado de Barrick Gold. *Mining Press*. Recuperado de <http://miningpress.com/nota/304681/que-dijo-san-juan-sobre-el-agua-del-tunel-de-pascua-lama-el-comunicado-de-barrick-gold>

- Mining Press. (2018). San Juan inspeccionó nuevamente el túnel de Lama. *Mining Press*. Recuperado de <http://miningpress.com/nota/318603/san-juan-inspecciono-nuevamente-el-tunel-de-lama>
- Minera Chinalco Perú. (2019). Minera Chinalco Perú. Recuperado 21 Abril 2021, de <https://www.facebook.com/minerachinalco.peru/photos/pcb.2155796537870100/2155795254536895/?type=3&theater>
- Minera Chinalco Perú. (2019). Minera Chinalco Perú. Recuperado 21 Abril 2021, de <https://www.facebook.com/minerachinalco.peru/photos/pcb.2155796537870100/2155795131203574/?type=3&theater>
- Minera Chinalco Perú. (2019). Minera Chinalco Perú. Recuperado 21 Abril 2021, de <https://www.facebook.com/minerachinalco.peru/photos/pcb.2155796537870100/2155795234536897/?type=3&theater>
- Minera Chinalco Perú S.A. (2009). | Minera Chinalco Perú - Proyecto Toromocho. Recuperado 21 Abril 2021, de <https://proveedores.chinalco.com.pe/es/planta-de-tratamiento-de-aguas-del-t%C3%BAnel-kingsmill>
- Minera Perú Copper. (2008). *Conclusión a las Observaciones Formuladas al Estudio de Factibilidad y Evaluación Ambiental de la Planta de Tratamiento de las Aguas Ácidas del Túnel Kingsmill* (p. 1). Departamento de Junín, Perú: Cosapi S.A & NAWS (North American Water Systems). Recuperado de <https://docplayer.es/91688232-Minera-peru-copper-departamento-de-junin-peru.html>
- Minera Perú Copper S.A. (2007). *Minera Perú Copper y el Túnel Kingsmill*. Presentación, Recuperado de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/estudios/kingsmill/Presentacion_Congreso.pdf
- Morales, A. (2003). Determinación y Mitigación del Potencial de Generación Ácido en Botaderos de Estériles, Mina del Proyecto Desarrollo Teniente, División El Teniente, Codelco-Chile. In *10º Congreso Geológico Chileno* (pp. 1-9). Concepción: Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción.
- Nacional, B. (2000). Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile. Recuperado 28 Enero 2021, de <http://bcn.cl/2epvf>
- Nordstrom, D., Howell, R., Campbell, K., & Alpers, C. (2017). Challenges in Recovering Resources from Acid Mine Drainage. In *IMWA 2017* (p. 1141). Lappeenranta, Finland: Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M, Häkkinen A.
- Nordstrom, D. (2011). Mine Waters: Acidic to Circumneutral. *Elements*, (Vol. 7), 396.
- Osinergmin. (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas* (pp. 146-147). Lima, Perú: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- Parkhurst, D.L. (1995). *User's guide to PHREEQC – A computer program for speciation, reactionpath, advective-transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4227 (p. 143).

- Parkhurst, D.L., & Appelo, C.A (1999). *User's Guide to PHREEQC (version 2) – A Computer Program for Speciation, Batchreaction, One-dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations*. US Geol. Surv. Water-Resour. Invest. Report 99-4259 (p. 312).
- Parkhurst, D.L., & Appelo, C.A. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC, version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods* (book 6, chap. A43., p. 497). Disponible en <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43>.
- Pérez, R. (2008). *Tratamiento de Drenaje Ácido de Minas, División El Teniente, Codelco, Chile* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química.
- Polpaico S.A. (2017). *Cemento P400 Alta Resistencia* [Ficha Técnica] (pp. 1-2). Recuperado de http://www.polpaico.cl/wp-content/uploads/Ficha_Cemento_Alta_Resistencia-P400.pdf
- PorterGeo. (2018). PorterGeo Database - Ore Deposit Description. Recuperado 23 April 2021, de <http://www.portergeo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn1318>
- Pourbaix, M. (2012). *pourbaix_diagram.png* [SubsTech]. Recuperado 3 Marzo 2021, de https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=pourbaix_diagrams&cache=cache&media=pourbaix_diagram.png
- Pozo, J. (2017). *Control del Agua: Drenaje e Impermeabilización*. Presentación para el curso CI5534-1 Construcción de Túneles, otoño 2017. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Plummer, N.L., & Parkhurst, D.J. (1990). *Application of the Pitzer equation to the PHREEQE geochemical model*. In: Melchoir, D.C. and Bassett, R.L., eds., *Chemical Modeling of Aqueous Systems II: ACS Symposium Series 416*, American Chemical Society, (pp. 128-137). Washington, DC.
- Plumlee, G., Smith, K., Montour, M., Ficklin, W., & Mosier, E. (1999). Geologic Controls on the Composition of Natural Waters and Mine Waters Draining Diverse Mineral-Deposit Types. In *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, INC.
- ProlInversión. (2005). *Concurso Público Internacional N° PRI-84-2004 Proyecto de Saneamiento Ambiental del Túnel Kingsmill* (p. 3). República del Perú: Agencia de Promoción de la Inversión Privada. Recuperado de https://www.proyectosapp.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/KINGSMILL_BASES/Bases_Tunel_Kingsmill.pdf
- Romeo, J. (2016). Conference attendees tour proposed Superfund mine sites. Recuperado 16 Abril 2021, de <https://durangoherald.com/articles/107951#modal=article-images-modal,slide=0>
- Rose, A. (2006). *Long-term performance of vertical flow ponds—an update*. Lecture, In: *Proceedings of the 7th ICARD*, St. Louis, MO, pp. 1704–1716.

- Ruiz, G., Murrieta, R., & Poon, C. (2016). *Capítulo 12. Drenaje e impermeabilización*. Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. (1st ed., pp. 1-22). México, D.F: Dirección General de Servicios Técnicos. Recuperado de https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP012.pdf
- Sánchez, J.H. (2018). Tecnología de Punta en Fortificación Subterránea. *Minería Chilena*, (442). Recuperado de https://issuu.com/revistamch/docs/mch422_digital/148
- SEA. (2012). Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA (pp. 1-65). Chile: Servicio de Evaluación Ambiental. Recuperado de https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_aguas_subterranas_seia.pdf
- SEA. (2017). *Guía para la descripción de proyectos de desarrollo minero de cobre y oro-plata en el SEIA*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. *Capítulo 12. Drenaje e impermeabilización* [Manual de diseño y construcción de túneles de carretera] (pp. 1-22). Estados Unidos Mexicanos: Dirección General de Servicios Técnicos. Recuperado de https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP012.pdf
- Sibrell, P., Wildeman, T., Friemuth, M., Chambers, M., & Bless, D. (2005). *Demonstration of a Pulsed Limestone Bed Process for The Treatment of Acid Mine Drainage at The Argo Tunnel Site, Idaho Springs, Colorado*. Paper presented at the 2005 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Breckinridge CO, June 19-23, 2005. Published by ASMR, 3134 Montavesta Rd., Lexington, KY 40502.
- Sika S.A. Chile. *Concrete Túneles y Obras Subterráneas. Impermeabilización de Túneles*. (pp. 103-125). Recuperado de https://chl.sika.com/content/dam/dms/cl01/c/Tuneles%20y%20Obras%20Subterra%CC%81neas_web.pdf
- Sika S.A. Chile. *Impermeabilización Flexible de Túneles con Membranas Sikaplan*. Santiago, Chile. Recuperado de <https://chl.sika.com/content/dam/dms/cl01/7/Impermeabilizacion%20flexible%20tuneles%20con%20Sikaplan.pdf>
- Sika S. A. Chile. Reductor de agua Alta Capacidad. Recuperado 12 Febrero 2021, de <https://chl.sika.com/es/construccion/tecnologia-de-hormigon/shotcrete/reductor-de-aquaaltacapacidad.html>
- Singh, U, Abraham, P, Bellamy, E & Swart, A (2012), 'The design and construction of water impounding plugs using sprayed concrete', in Y Potvin (ed.), *Proceedings of the Sixth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 279-296, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1201_20_singh

- SGS & SIGA. (2020). *Auditoría Ambiental Independiente Proyecto Pascua Lama Período Oct 2019 – Mar 2020* (pp. 1-136). Recuperado de <https://snifa.sma.gob.cl/General/DescargarInformeSeguimiento/238509>
- Schippers, A., Breuker, A., Blazejak, A., Bosecker, K., Kock, D., & Wright, T.L. (2010). The biogeochemistry and microbiology of sulfidic mine waste and bioleaching dumps and heaps, and novel Fe(II)-oxidizing bacteria. *Hydrometallurgy*, (104), 342-350.
- Sherlock, E.J., Lawrence, R.W., & Poulin, R. (1995). On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. *Environ. Geol*, (25), 43–54.
- Skousen, J. (1997). Overview of passive systems for treating acid mine drainage. *Green Lands*, 27(4).
- Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., & Hellier, W. (1998). *Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage* (p. 131). Morgantown: National Mine Land Reclamation Center.
- Skousen, J., Zipper, C., Rose, A., Ziemkiewicz, P., Nairn, R., McDonald, L., & Kleinmann, R. (2017). Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. *Mine Water Environ*, (36), 133–153. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
- Stream Restoration Incorporated and BioMost, Inc. (2017). *Kiski-Conemaugh Basin Treatment System O&M Assessment Report* (p. 15). Philadelphia: Funded by Foundation for Pennsylvania Watersheds' GenOn Settlement Program.
- SRK Consulting Argentina S.A. (2015). *Evaluación del ambiente hidrogeocriológico en el entorno del túnel* (p. 14). San Juan, Argentina: SRK Consulting.
- Stumm, W., & Morgan, J. (1981). *Aquatic chemistry: An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters* [Ebook] (2nd ed.). New York: Wiley-Interscience.
- Sverdrup, H. (1990). *The Kinetics of Base Cation Release Due to Chemical Weathering*. Lund University Press, Lund.
- Taylor, J., Pape, S., & Murphy, N. (2005). *A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD)* Fifth Australian Workshop on Acid Drainage (pp. 1-47). Fremantle: Prepared for the Australian Centre for Minerals Extension and Research (ACMER) by Earth Systems.
- Toro, H. (2017). *Programación Multicriterio de Excavaciones Horizontales en el Corto Plazo* (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Thomas, D., Bayona, D., Durán, J., & Altez, A. (2009). Túnel Kingsmill, próximo activo ambiental. *MINERÍA N°378*, 16. Recuperado de <https://docplayer.es/21741549-Mineria-la-mejor-puerta-de-acceso-al-sector-minero-mineria-378-1.html>
- Thomas, S. *Acid Mine Drainage* [Imagen]. Western Pennsylvania Conservancy. Recuperado de <https://www.schuylkillwaters.org/our-work/abandoned-mine-drainage>
- Trumm, D., Watts, M., Pope, J., & Lindsay, P. (2008). Using pilot trials to test geochemical treatment of acid mine drainage on Stockton Plateau. *New Zealand Journal Of*

Geology And Geophysics, 51 (3), 178. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/00288300809509858>

- Tuovinen, O.H., Panda, F., & Tsuchiya, H. (1979). Nitrogen requirement of iron-oxidizing Thiobacilli for acidic ferric sulfate regeneration. *Appl. Environ. Microbiol*, (37), 954-958.
- Úbeda, M. (2011). *Tratamientos de Impermeabilización con Membranas Geosintéticas en Túneles*. I Encuentro de Túneles y Obras Subterráneas: "La Tunelización del Siglo XXI". Escuela Téc. Superior de Ingenieros de Minas. Madrid.
- UK HSE (2005) United Kingdom Health and Safety Executive. The design and construction of water impounding plugs in working mines, Issue date 15th July 2003, recuperado de <http://www.hse.gov.uk/mining/circulars/waterplu.htm>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Remediation System Evaluation: Central City/Clear Creek Superfund Site* (pp. 1-28). Idaho Springs, Colorado: GeoTrans, Inc. Recuperado de https://clu-in.org/download/remed/hyopt/application/rses/superfund_rses/final_argo_wtp_rse.pdf
- U.S. Geological Survey. (1995). *Adit chemistry determined at low flow for selected sites sampled*. Denver, Colorado.
- Vázquez-Suñe, E. (2009). Hidroquímica. En *Capítulo 7 del libro: Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea*. Editor Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Publicado por Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS).
- Watzlaf, G., & Hyman, D. (1995). *Limitations of passive systems for the treatment of mine drainage*. 17th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana, October, 186-199.
- Watzlaf, G., Schroeder, K., & Kairies, C. (2000). Long-term performance of anoxic limestone drains. *Mine Water Environ*, 19(2), 98-110.
- Watzlaf, G., Kairies, C., Schroeder, K., Danehy, T., & Beam, R. (2002). Quantitative results from the flushing of four reducing and alkalinity-producing systems. In *Proceedings of the 23rd WV surface mine drainage task force symposium*. Morgantown, WV.
- Walsh Perú S.A. (2020). *Modificación del Estudio de Impacto Ambiental para El Proyecto de Expansión de la Unidad Minera Toromocho a 170 000 tpd* (pp. 142,144). Lima. Recuperado de <https://www.chinalco.com.pe/sites/default/files/meia/1.0%20Resumen%20Ejecutivo%20MEIA%20Toromocho.pdf>
- Weibel, L. (2009). *Caracterización Mineralógica y Ambiental de Lastres y Mineralizados de baja Ley, Yacimiento Río Blanco, División Andina, Codelco-Chile*. (Trabajo Integrativo Final para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada). Instituto de Geología Económica Aplicada. Universidad de Concepción.

- Wiertz, J. (2013). El drenaje ácido de mina (DAM) puede llegar a afectar la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas existentes en toda una cuenca. *INDUAMBIENTE*, (122).
- Wiertz, J. (2016). *Mecanismos de generación de aguas ácidas*. Presentación del Diploma de Postítulo Hidrogeología Aplicada a la Minería y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Wiertz, J. (2019). *Taller SANAP: Barreras hidráulicas, aguas naturales y aguas de contacto*. Presentación, South American Network on Acid Prevention.
- Wolkersdorfer, C. (2008). Mine water treatment and ground water protection. In *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines: Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment* (pp. 235-277). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-3-540-77331-3_9
- Wolfe, N., Hedin, R., & Weaver, T. (2010). Sustained treatment of AMD containing Al and Fe³⁺ with limestone aggregate. In *Proceedings of the IMWA symposium* (pp. 237–241). Sydney, NS, Canada.
- Wolf, G. (2009). Chinalco invierte US\$ 24 millones en planta de tratamiento de aguas de túnel Kingsmill. *Agencia Peruana De Noticias (ANDINA)*, p. Edwin Bardales, enviado especial. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-chinalco-invierte-24-millones-planta-tratamiento-aguas-tunel-kingsmill-222697.aspx>
- Ziemkiewicz, P., & Skousen, J. (1998). The use of steel slag in acid mine drainage treatment and control. In *Proceedings of the 19th WV surface mine drainage task force symposium*. Morgantown, WV, USA.
- Zinck, J. (2006). *Disposal, Reprocessing and Reuse Options for Acidic Drainage Treatment Sludge*. 7th ICARD Leadership: Gateway to the future, St. Louis, Missouri, USA.

9. ANEXO A

9.1. Gráficos de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua

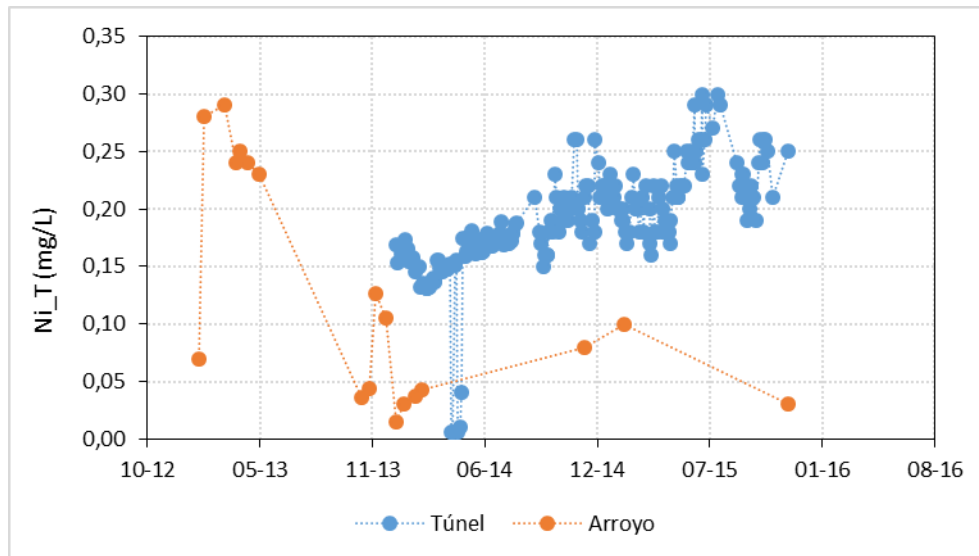


Figura 9.1 Concentraciones de Níquel Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

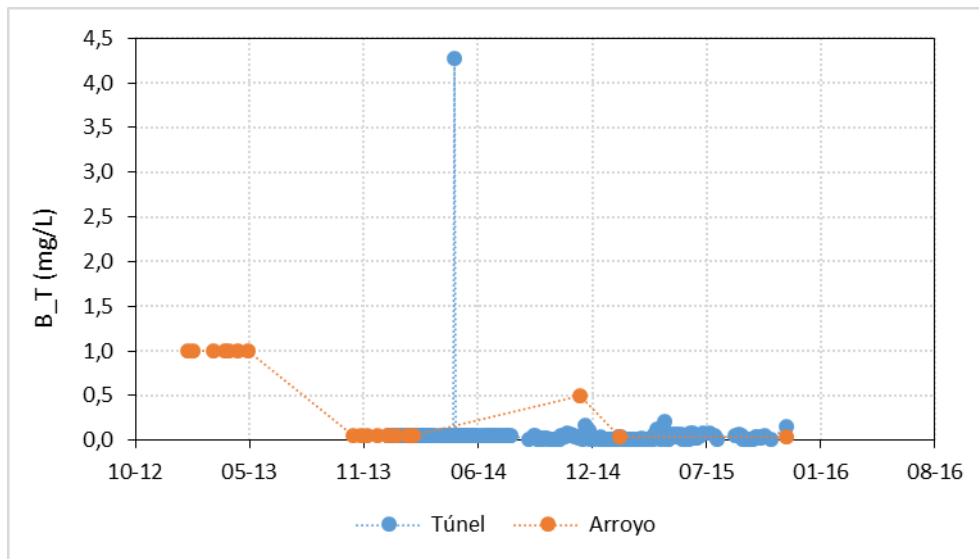


Figura 9.2 Concentraciones de Boro Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

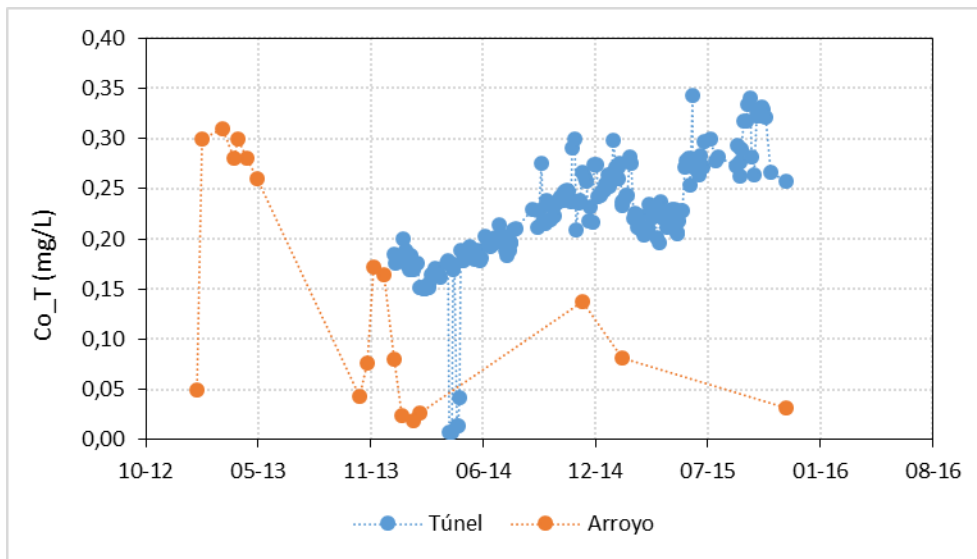


Figura 9.3 Concentraciones de Cobalto Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

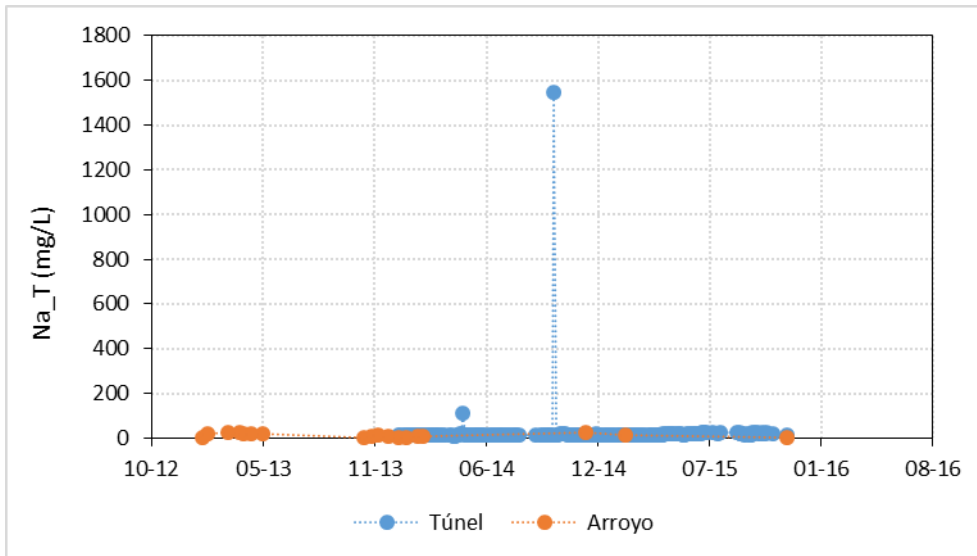


Figura 9.4 Concentraciones de Sodio Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

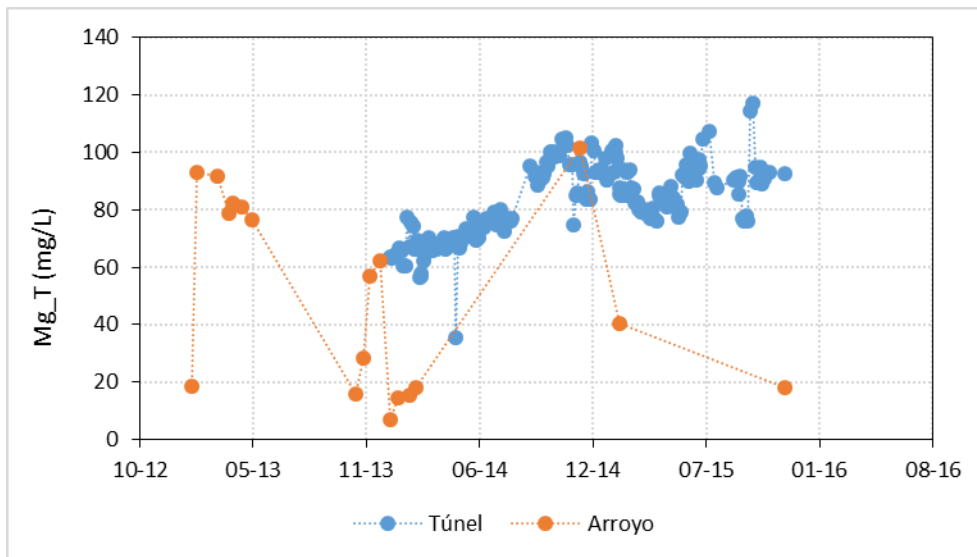


Figura 9.5 Concentraciones de Magnesio Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

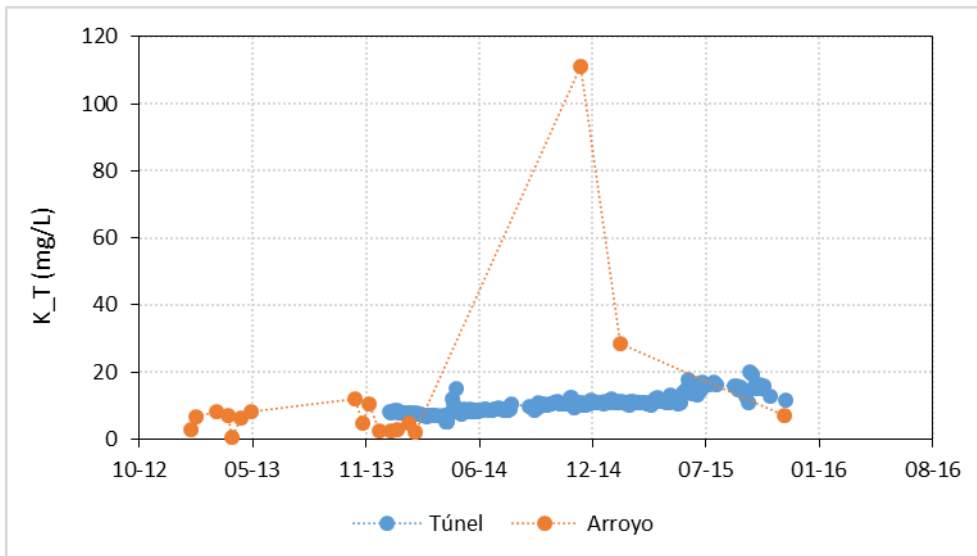


Figura 9.6 Concentraciones de Potasio Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

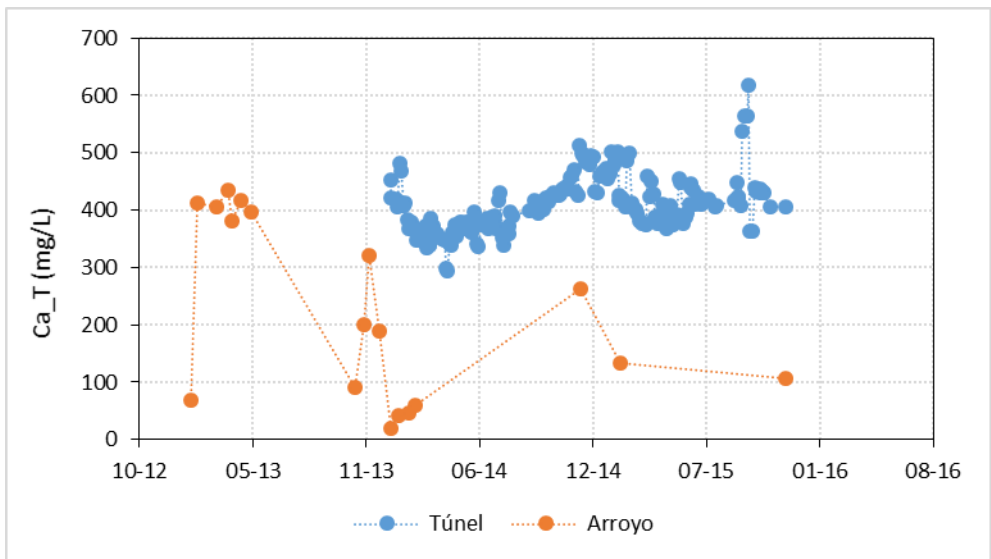


Figura 9.7 Concentraciones de Calcio Total vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

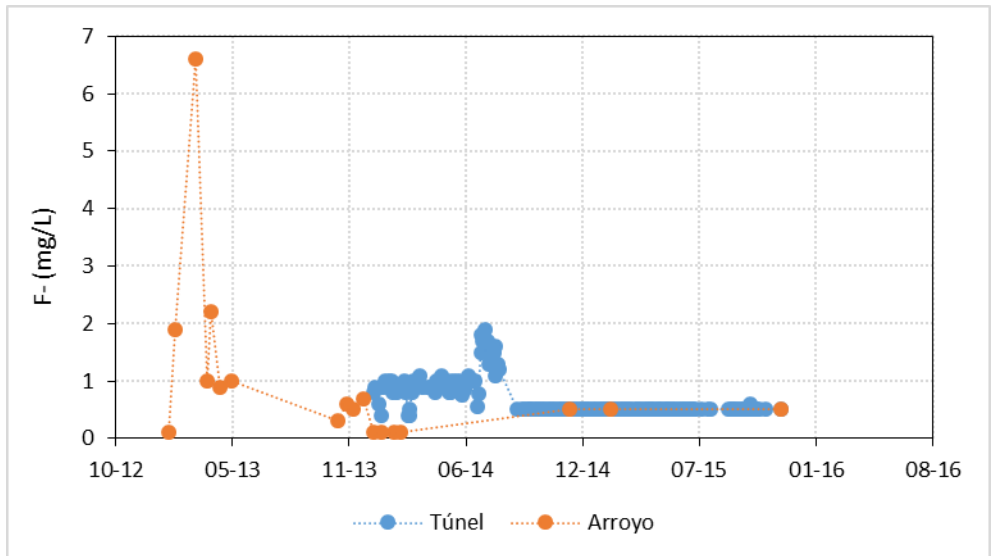


Figura 9.8 Concentraciones de Flúor vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

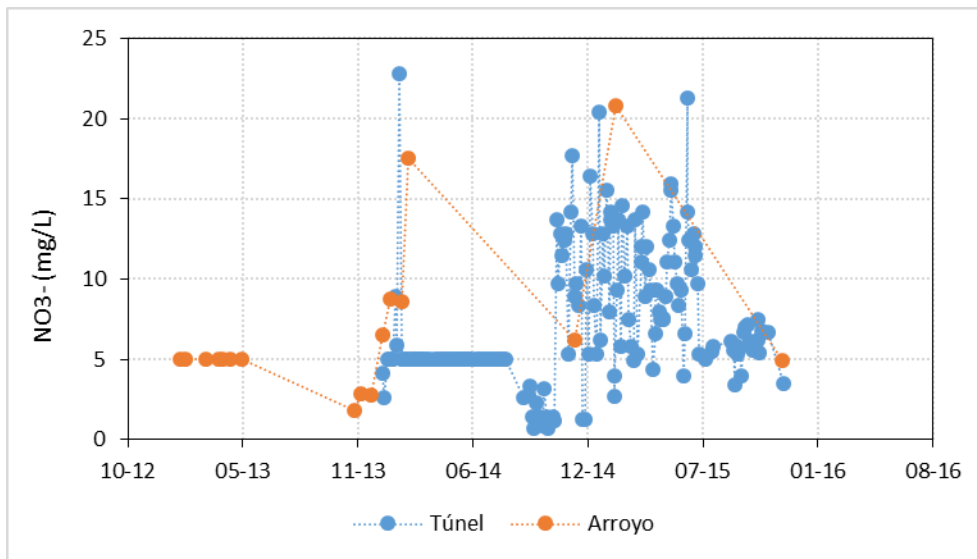


Figura 9.9 Concentraciones de Nitratos vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.