DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Nueva Subestación Seccionadora Las Delicias y Nueva Subestación Coiquén y Nueva Línea 2x66 kV Las Delicias - Coiquén

Decreto Exento N°257/2022

CAPÍTULO 3/ ANEXO3.7

Permiso Ambiental Sectorial 155

2026

CONTENIDOS

1. CONTEXTO DE APLICACIÓN DEL PAS 155 5

2. CONTENIDOS TÉCNICOS FORMALES 5

2.1 ART. 155 LETRA A) DESCRIPCIÓN DE LA OBRA 6

2.1.1 Plano de ubicación general, identificación del cauce y cuenca afluente 6

2.1.2 Descripción de las obras 11

2.1.3 Descripción de las fases de la obra 15

2.1.4 Cronograma 18

2.2 ART. 155 LETRA B) ESTUDIOS GENERALES DE TOPOGRAFÍA, GEOLOGÍA, HIDROLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA, HIDRÁULICA FLUVIAL, HIDRODINÁMICA Y BALANCE DE AGUAS 18

2.2.1 Topografía 18

2.2.2 Geología e Hidrogeología 21

2.2.3 Hidrología 26

2.2.4 Hidráulica Fluvial e Hidrodinámica 35

2.2.5 Balance de aguas 63

2.3 ART. 155 LETRA C) ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN LA SITUACIÓN SIN PROYECTO Y CON PROYECTO. 64

2.4 ART. 155 LETRA D) MEDIDAS QUE EVITEN LA CONTAMINACIÓN O ALTERACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN LAS FASES DEL PROYECTO. 65

2.5 ART. 155 LETRA E) PLANES DE SEGUIMIENTO Y CONTINGENCIAS, INCLUYENDO PLANES DE CONTROL Y MONITOREO AMBIENTAL AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO DE LA OBRA. 65

2.6 ART. 155 LETRA F) PLANES DE PREVENCIÓN 67

2.7 ART. 155 LETRA G) PLANES DE ACCIÓN 72

2.7.1 Emergencia con origen natural 72

2.7.2 Emergencia con origen en las actividades constructivas u operacionales 73

2.7.3 Emergencias provocadas por actos intencionales como vandalismo 74

2.7.4 Manejo general de emergencias 74

3. BIBLIOGRAFÍA 76

4. APÉNDICES DIGITALES 78

APÉNDICE 1 – SIG 78

APÉNDICE 2 – HIDROLOGÍA 78

APÉNDICE 3 – MODELACIÓN HIDRÁULICA 78

APÉNDICE 4 – TOPOGRAFÍA 78

APÉNDICE 5 – RESULTADOS 78

APÉNDICE 6 – SUELOS 78

APÉNDICE 7 – SOCAVACIÓN 78
APÉNDICE 8 – PLANOS 78

TABLAS

TABLA 2-1: IDENTIFICACIÓN DEL CAUCE E INFRAESTRUCTURA PROYECTADA. 8
TABLA 2-2: INFORMACIÓN GEOMORFOLÓGICA BÁSICA DE LA CUENCA APORTANTE. 9
TABLA 2-3: COORDENADAS Y COTAS DE LA SE COIQUÉN. DATUM WGS84, HUSO 18S. 11
TABLA 2-4: COORDENADAS UTM Y COTAS EN LA ENTRADA Y SALIDA DEL ACUEDUCTO. DATUM WGS84, HUSO 18S. 14
TABLA 2-5: CARTA GANTT CON ESTIMACIÓN DE PLAZOS DE CONSTRUCCIÓN DEL ACUEDUCTO. 18
TABLA 2-6: COORDENADAS UTM 18S DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA (PR) 19
TABLA 2-7: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS EN EL PROYECTO. 26
TABLA 2-8: PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS SEGÚN EL PERIODO DE RETORNO (T). 29
TABLA 2-9: COEFICIENTE DE DURACIÓN ASOCIADOS A LA ESTACIÓN CONCEPCIÓN. 30
TABLA 2-10: TIEMPO DE CONCENTRACIÓN ESTIMADOS PARA CADA CUENCA. 32
TABLA 2-11: COEFICIENTE DE DURACIÓN (CD) DEFINIDO PARA LA ESTACIÓN CONCEPCIÓN. 32
TABLA 2-12: INTENSIDADES DE LAS LLUVIAS DE DISEÑO PARA LA CUENCA EN ESTUDIO. 32
TABLA 2-13: FACTORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA ASOCIADO A 10 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. FUENTE: MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 3, TABLA 3.702.503.B. 33
TABLA 2-14: COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA OBTENIDOS PARA CUENCA EN ESTUDIO. 34
TABLA 2-15: FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA SEGÚN PERIODO DE RETORNO. 35
TABLA 2-16: CAUDALES LÍQUIDOS DE CRECIDA PARA LA CUENCA EN ESTUDIO (M^3/S). 35
TABLA 2-17: CONDICIONES DE BORDE. 40
TABLA 2-18: PARÁMETROS PARA EL MÉTODO DE COWAN. FUENTE: MANUAL DE CARRETERAS VOL. 3, TABLA 3.707.104.B. 41
TABLA 2-19: DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS CALICATAS JUNTO CON EL $n0$ CALCULADO 43
TABLA 2-20: COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ESTIMADO PARA CADA TIPO DE COBERTURA DE SUELO. 43
TABLA 2-21: DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO. 54
TABLA 2-22: RESULTADOS SOCAVACIÓN GENERAL AL PIE DE LAS OBRAS. 57
TABLA 2-23: VARIABLES UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE SOCAVACIÓN LOCAL. 59
TABLA 2-24: RESULTADOS DE SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DEL ENROCADO. 59
TABLA 2-25: RESULTADOS SOCAVACIÓN TOTAL DE LAS OBRAS. 59
TABLA 2-26: VERIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO DE LAS OBRAS PROYECTADAS. 62
TABLA 2-27: VERIFICACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE DISEÑO DEL DIENTE DE FUNDACIÓN DE LAS OBRAS DE PROYECTADAS. 62
TABLA 2-28: RESULTADOS ECUACIÓN DE ISBASH PARA ENROCADOS. 63
TABLA 2-29: COORDENADAS PROPUESTAS DE LOS PUNTOS DE MONITOREO DE CALIDAD DE LAS AGUAS. COORDENADAS EN DATUM WGS84, HUSO 18S. 66
TABLA 2-30: PARÁMETROS DE MONITOREO ESTIPULADOS POR LA NORMA CHILENA N°1.333. 66
TABLA 2-31: IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN 67

TABLA 2-32: IDENTIFICACIÓN DE TIPOS DE FALLA DE LA OBRA Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN 69

FIGURAS

FIGURA 1-1: ALTURAS DE ESCURRIMIENTO PARA T = 100 AÑOS EN LA SUBESTACIÓN COIQUÉN PARA LA CONDICIÓN ACTUAL. FUENTE: ANEXO 3.10 - ANÁLISIS DE APLICABILIDAD PAS 155/156/157 5
FIGURA 2-1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SE COIQUÉN Y EL ACUEDUCTO PROYECTADO. 6
FIGURA 2-2: IDENTIFICACIÓN DE CAUCES SEGÚN CARTOGRAFÍA IGM Y RED HÍDRICA LOCAL. 7
FIGURA 2-3: CUENCA APORTANTE C3.2.7 Y RED DE HÍDRICA EN EL SECTOR DE EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO. 8
FIGURA 2-4: SECCIÓN DEL CAUCE C3.2.7 EN LA ZONA DE ESTUDIO Y TRANSICIÓN A VEGETACIÓN DENSA 9
FIGURA 2-5: UBICACIÓN GEOGRÁFICA ATRAVIESO. 10
FIGURA 2-6: FOTOGRAFÍA DEL ATRAVIESO TOMADA EN TERRENO 10
FIGURA 2-7: VISTA EN PLANTA DEL TERRAPLÉN DE LA SUBESTACIÓN COIQUÉN. 11
FIGURA 2-8: OBRA TIPO ACUEDUCTO TIPO CAJÓN CON MURO DE CABECERA Y ALAS. FUENTE: MANUAL DE CARRETERAS, VOLUMEN 4 12
FIGURA 2-9: OBRA TIPO DE LA MAMPOSTERÍA DE PIEDRA Y ENROCADO CONSOLIDADO. 13
FIGURA 2-10: PERFIL LONGITUDINAL DE LA OBRA DE ACUEDUCTO. 13
FIGURA 2-11: VISTA EN PLANTA DE LA OBRA DE ACUEDUCTO PROYECTADA. 14
FIGURA 2-12: MONOGRAFÍA DEL PUNTO DE REFERENCIA 19
FIGURA 2-13: ORTOFOTO EN LA ZONA DEL PROYECTO 20
FIGURA 2-14: MODELO DIGITAL DE TERRENO 21
FIGURA 2-15: MAPA GEOLÓGICO LOCAL. FUENTE: MODIFICADO DE DGA (2011). 22
FIGURA 2-16: MAPA HIDROGEOLÓGICO LOCAL. 23
FIGURA 2-17: MAPA SHACS DE LA ZONA DE ESTUDIO 24
FIGURA 2-18: MAPA CAPTACIONES PROFUNDAS ANALIZADAS. 25
FIGURA 2-19: PUNTO DE CAPTACIÓN ANALIZADO MÁS CERCANO AL ACUEDUCTO. 25
FIGURA 2-20: UBICACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ANALIZADAS CON RESPECTO A LAS OBRAS PROYECTADAS 27
FIGURA 2-21: SERIE DE PRECIPITACIONES DIARIAS MÁXIMAS EN 24 HORAS DE LA ESTACIÓN COELEMU. 28
FIGURA 2-22: AJUSTE DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN GEV SOBRE LOS DATOS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS. 29
FIGURA 2-23: CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA ASOCIADAS A LA ESTACIÓN COELEMU. 30
FIGURA 2-24. A, B Y C: PANORÁMICAS REALIZADAS EN EL SECTOR DEL MODELO. D: CALICATA N°2 DEL INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS. 34
FIGURA 2-25: DOMINIO DE MODELACIÓN, MDT Y CONDICIONES DE BORDE. 37
FIGURA 2-26: INCORPORACIÓN DEL TERRAPLÉN DEL CAMINO EN EL MDT. 38
FIGURA 2-27: INCORPORACIÓN DEL ABOVEDAMIENTO AL MDT. 39
FIGURA 2-28: DETALLE REFINAMIENTO DEL CAUCE Y ATRAVIESO. 39
FIGURA 2-29: DETALLE REFINAMIENTO ACUEDUCTO ABOVEDADO 40

FIGURA 2-30: FOTOGRAFÍAS TOMADAS EN TERRENO. 42
FIGURA 2-31: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LAS CALICATAS REALIZADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO. 42
FIGURA 2-32: DENSIDAD DE VEGETACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO. 43
FIGURA 2-33: CAPA VECTORIAL DE LAS COBERTURAS DE SUELO SP. 44
FIGURA 2-34: CAPA VECTORIAL DE LAS COBERTURAS DE SUELO CP. 44
FIGURA 2-35: ALTURAS DE ESCURRIMIENTO PARA EL ESCENARIO SP (T=100 AÑOS). 46
FIGURA 2-36: VELOCIDADES DE ESCURRIMIENTO PARA EL ESCENARIO SP (T=100 AÑOS). 47
FIGURA 2-37: NÚMERO DE FROUDE PARA EL ESCENARIO SP (T=100 AÑOS). 48
FIGURA 2-38: ALTURAS DE ESCURRIMIENTO PARA EL ESCENARIO CP (T=100 AÑOS). 49
FIGURA 2-39: VELOCIDADES DE ESCURRIMIENTO PARA EL ESCENARIO CP (T=100 AÑOS). 50
FIGURA 2-40: NÚMERO DE FROUDE PARA EL ESCENARIO CP (T=100 AÑOS). 50
FIGURA 2-41: PERFIL LONGITUDINAL DEL EJE HIDRÁULICO EN EL ACUEDUCTO PARA LA CRECIDA T100. 51
FIGURA 2-42: ALTURAS DE ESCURRIMIENTO PARA EL ESCENARIO CP (T=150 AÑOS). 52
FIGURA 2-43: VELOCIDADES DE ESCURRIMIENTO PARA EL ESCENARIO CP, (T=150 AÑOS). 52
FIGURA 2-44: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS CALICATAS. 54
FIGURA 2-45: RESULTADOS DE SOCAVACIÓN GENERAL EN LA SITUACIÓN SIN PROYECTO. T=100 AÑOS. 56
FIGURA 2-46: RESULTADOS DE SOCAVACIÓN GENERAL EN LA SITUACIÓN CON PROYECTO. T=100 AÑOS. 57
FIGURA 2-47: DETALLE DEL PERFIL LONGITUDINAL DEL EJE HIDRÁULICO EN EL ACUEDUCTO PARA LA CRECIDA T100. 58
FIGURA 2-48: ESQUEMA DE LA ESTIMACIÓN DE SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DE RADIERES PRODUCIDA POR RÍOS. 58
FIGURA 2-49: PERFILES LONGITUDINALES DEL EJE HIDRÁULICO AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO DEL ACUEDUCTO. 60
FIGURA 2-50: ENERGÍA ESPECÍFICA EN EL ACUEDUCTO. 61
FIGURA 2-51: REVANCHA DEL ACUEDUCTO PARA LA CRECIDA DE DISEÑO. 61
FIGURA 2-52: REVANCHA DEL ACUEDUCTO PARA LA CRECIDA DE VERIFICACIÓN. 62
FIGURA 2-53: DIAGRAMA UNIFILAR DEL DRENAJE DE LA QUEBRADA. A) SITUACIÓN SIN PROYECTO. B) SITUACIÓN CON PROYECTO. 64

1. CONTEXTO DE APLICACIÓN DEL PAS 155

En el contexto del proyecto "Nueva Subestación Seccionadora Las Delicias, Nueva Subestación Coiquén y Nueva Línea 2x66 kV Las Delicias – Coiquén" (en adelante, el Proyecto), se requiere tramitar el Permiso Ambiental Sectorial contemplado en el artículo 155 del RSEIA (PAS 155), correspondiente al *Permiso para la construcción de ciertas obras hidráulicas*. Lo anterior se debe a la construcción de un acueducto abovedado, diseñado para portear un caudal de 2,1 m³/s, destinado a dar continuidad al escurrimiento de la quebrada C3.2.7 bajo el terraplén de la Subestación Coiquén. Esta obra permitirá mantener la continuidad hidráulica de la quebrada y evitar la inundación de la subestación, de la torre ML-Coiquén y del camino de acceso a la torre E-37, de acuerdo con los resultados presentados en el **Anexo 3.10: Análisis de Aplicabilidad PAS 155/156/157.**

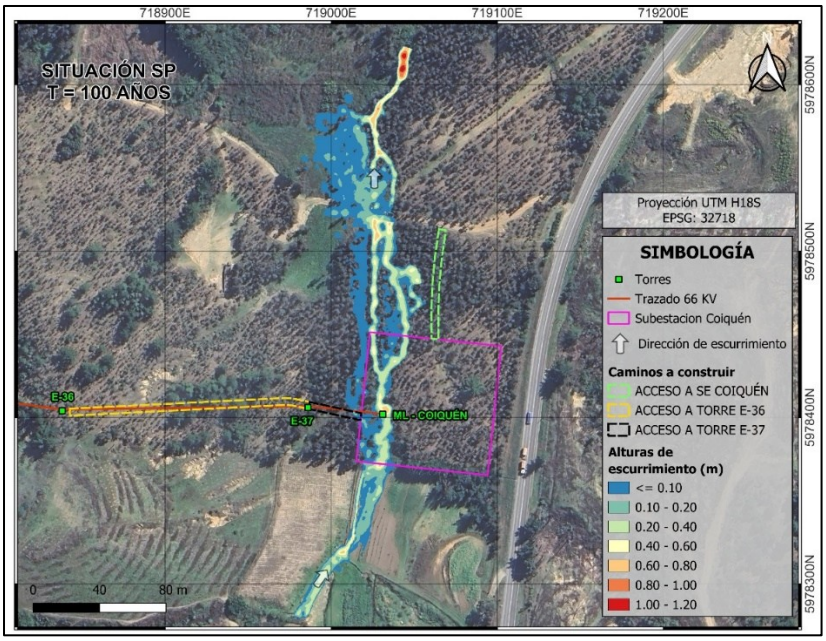


Figura 1-1: Alturas de escurrimiento para T = 100 años en la Subestación Coiquén para la condición actual. Fuente: Anexo 3.10 - Análisis de Aplicabilidad PAS 155/156/157.

2. CONTENIDOS TÉCNICOS FORMALES

El requisito para el otorgamiento del presente Permiso Ambiental Sectorial consiste en asegurar que la ejecución y operación de las obras no producirán contaminación de las aguas, por lo que en la presente sección se exhiben los contenidos técnicos y formales de carácter ambiental requeridos para acreditar su estricto cumplimiento.

a) Descripción de la obra

b) Estudios generales de topografía, geología, hidrología, hidrogeología, hidráulica fluvial, hidrodinámica y balance de aguas.

c) Análisis del comportamiento de la calidad de las aguas en la situación sin proyecto y con proyecto.

d) Medidas que eviten la contaminación o alteración de la calidad de las aguas en las fases del proyecto

e) Planes de seguimiento y contingencias, incluyendo planes de control y monitoreo ambiental aguas arriba y aguas abajo de la obra.

f) Planes de prevención.

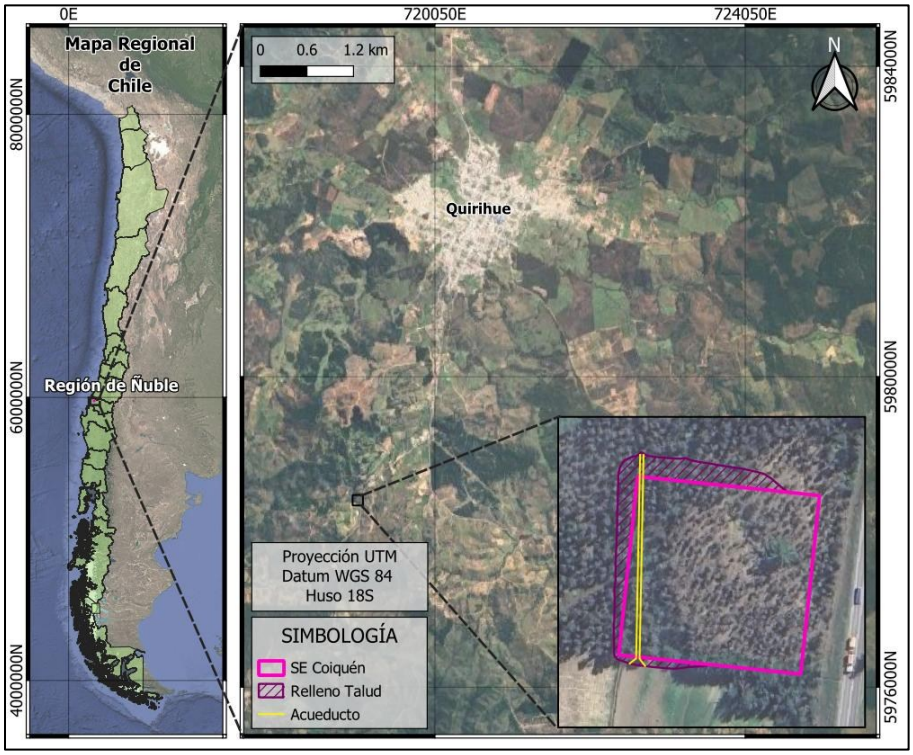
g) Planes de acción.

2.1 ART. 155 LETRA A) DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

2.1.1 Plano de ubicación general, identificación del cauce y cuenca afluente.

El acueducto, el cual se proyecta bajo la Subestación Coiquén, se emplaza en la comuna de Quirihue, región de Ñuble. En la Figura 2-1 se presenta la ubicación geográfica de la SE Coiquén y el acueducto proyectado.

Figura 2-1: Ubicación geográfica de la SE Coiquén y el acueducto proyectado.



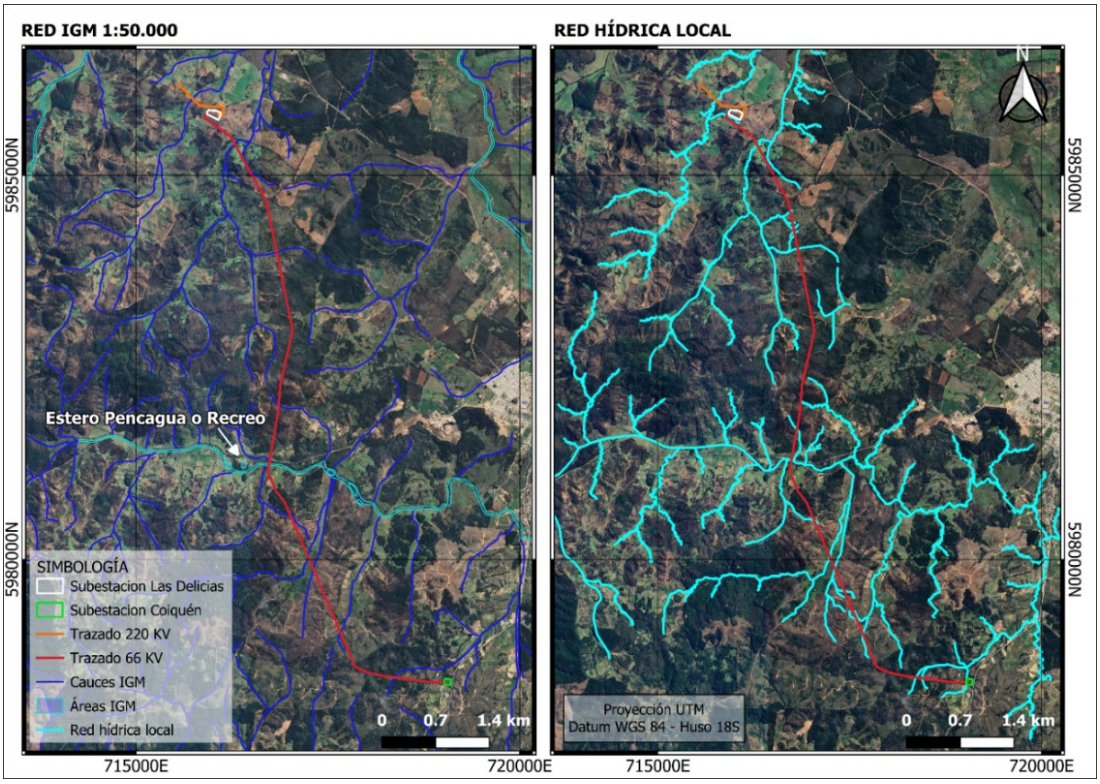
Desde la plataforma "Mapoteca Digital de la DGA", del Ministerio de Obras Públicas (MOP), se obtuvo la información relativa a la delimitación de cuencas, subcuencas y subsubcuencas del Banco Nacional de Aguas (BNA). De acuerdo con dicha información, el acueducto se emplaza en la cuenca "Costeras entre Límite Región y Río Itata", específicamente en la subcuenca "Costeras entre Límite Región y Río Taucu (Incluido)" y en la subsubcuenca homónima.

En el marco del Proyecto, se realizó la identificación de cauces mediante la revisión de las redes hidrográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) y de la Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE). Se constató que la cartografía del IGM presenta una mayor densidad de cauces e incluye la totalidad de los identificados en la cartografía del IDE.

Con el propósito de complementar estas fuentes y precisar la identificación de los cauces, se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) ALOS-PALSAR para generar una red hídrica, considerando un umbral mínimo de 0,1 km² de superficie aportante. La red obtenida se contrastó con la cartografía del IGM y se complementó con el levantamiento topográfico del Proyecto, incorporando cauces no representados en las fuentes cartográficas consultadas. De esta manera, se obtuvo una red hídrica de mayor detalle que integra las distintas fuentes de información y comprende la totalidad de los cauces identificados en la cartografía del IGM.

La Figura 2-2 muestra los cauces identificados en la cartografía del IGM a escala 1:50.000 (izquierda) y la red hídrica local delimitada para el Proyecto (derecha), siendo esta última la que se utiliza como red hidrográfica.

Figura 2-2: Identificación de cauces según cartografía IGM y red hídrica local.



La Figura 2-3 presenta un acercamiento al sector de emplazamiento del acueducto, mostrando la red hídrica identificada y la correspondiente cuenca aportante, delimitada a partir del DEM ALOS-PALSAR y del modelo digital de elevación de detalle del Proyecto. Por su parte, la Tabla 2-1 identifica la quebrada que será modificada, la cual no se encuentra identificada en la cartografía IGM y que, para efectos del Proyecto, se denomina C3.2.7. Asimismo, se presentan las principales características geomorfológicas de su cuenca aportante (Tabla 2-2).

Figura 2-3: Cuenca Aportante C3.2.7 y Red de Hídrica en el sector de emplazamiento del Proyecto.

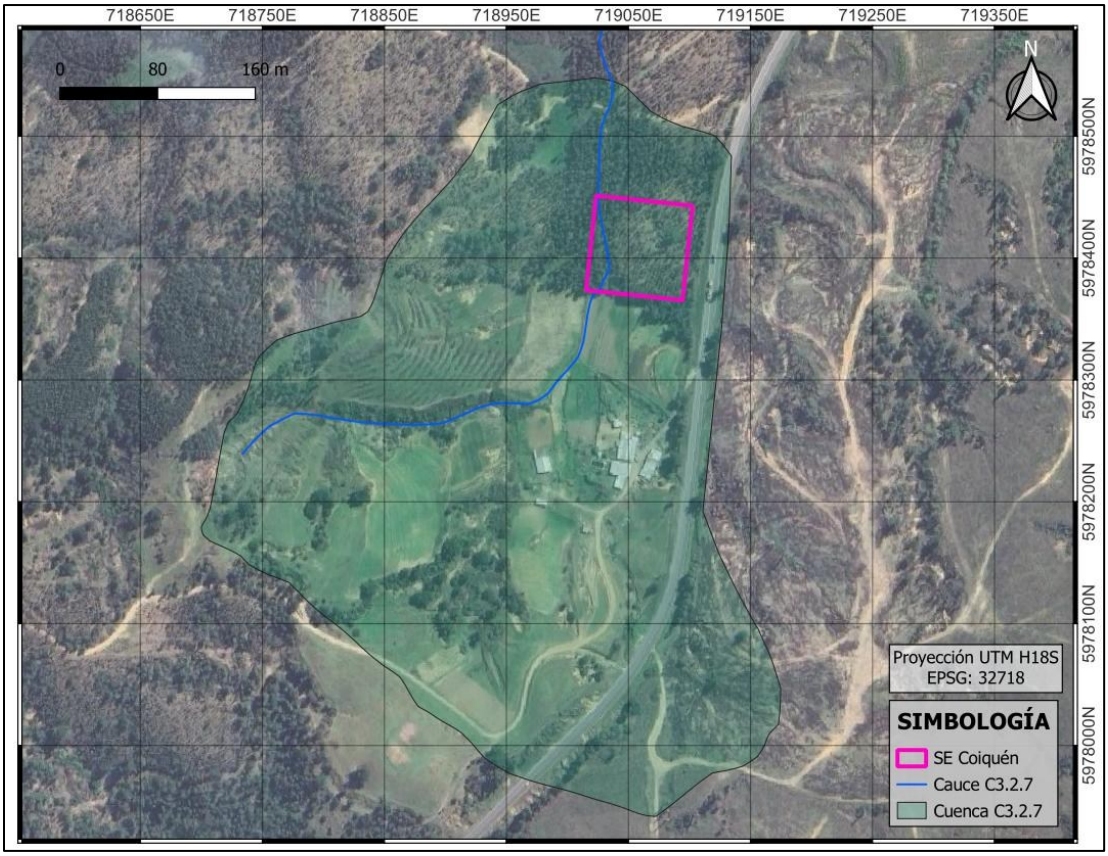


Tabla 2-1: Identificación del cauce e infraestructura proyectada.

Obra	Cauce	Toponimia Oficial	Cuenca	Subcuenca	Subsubcuenca
Acueducto abovedado	C3.2.7	Quebrada Sin Nombre (No IGM)	Costeras entre limite Región y Río Itata	Costeras entre Limite Región y Río Taucu (Incluido)	Costeras Entre Limite Región y Rio Taucu (Incluido)

Tabla 2-2: Información geomorfológica básica de la cuenca aportante.

Cuenca	Área (km2)	Altura Mínima (m s.n.m)	Altura Máxima (m s.n.m)	Altura Media (m s.n.m)	Pendiente Media Cuenca (m/m)	Pendiente Media Cauce (m/m)	Largo Cauce Principal (km)	Curva Número (-)
C3.2.7	0,18	231	296	263	0,15	0,14	0,57	78,75

Cabe señalar que la quebrada C3.2.7 corresponde a un cauce de escurrimiento eventual o impermanente, activándose únicamente en respuesta a eventos de precipitación. Aguas arriba del emplazamiento de la Subestación (SE) proyectada se observa una canalización con un ancho del orden de 1 m, la cual finaliza pocos metros antes de la obra proyectada. Asimismo, el cauce presenta una pendiente media aproximada de 5,7 % en la zona del Proyecto. En el sector de intervención se observa una cobertura predominante de vegetación arbórea, tal como se muestra en la Figura 2-4.

A su vez, aguas abajo del proyecto, se identifica la presencia de un atravieso de camino con una tubería de HDPE de 60 cm de diámetro aproximadamente, la cual se observó embancada y con abundante vegetación. En la Figura 2-5 se presenta la ubicación geográfica del atravieso, mientras que en la Figura 2-6 se muestran una fotografía tomada en terreno de la tubería.

Figura 2-4: Sección del cauce C3.2.7 en la zona de estudio y transición a vegetación densa.

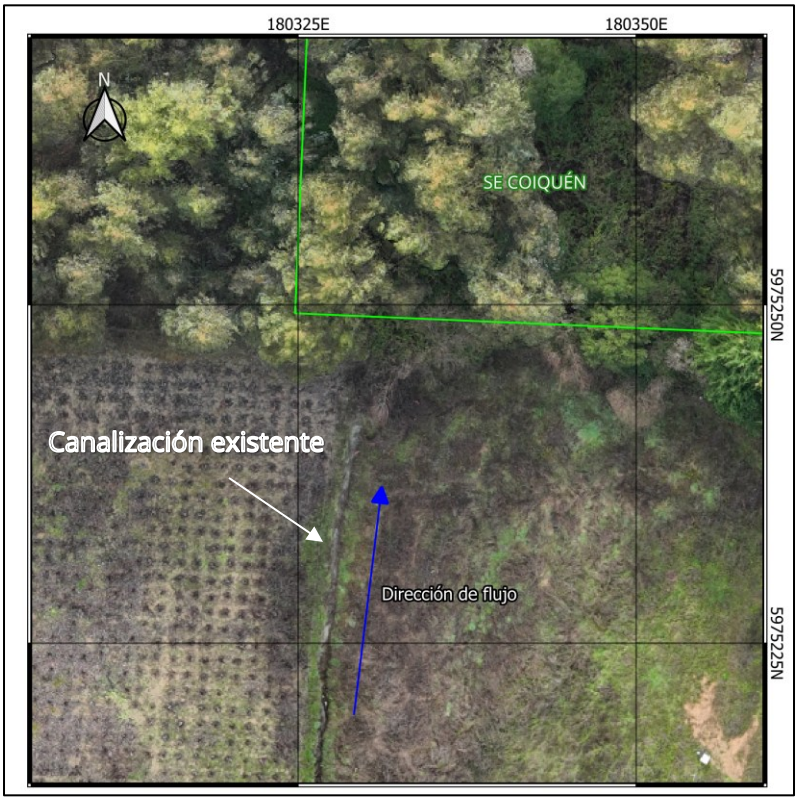


Figura 2-5: Ubicación geográfica atravieso.

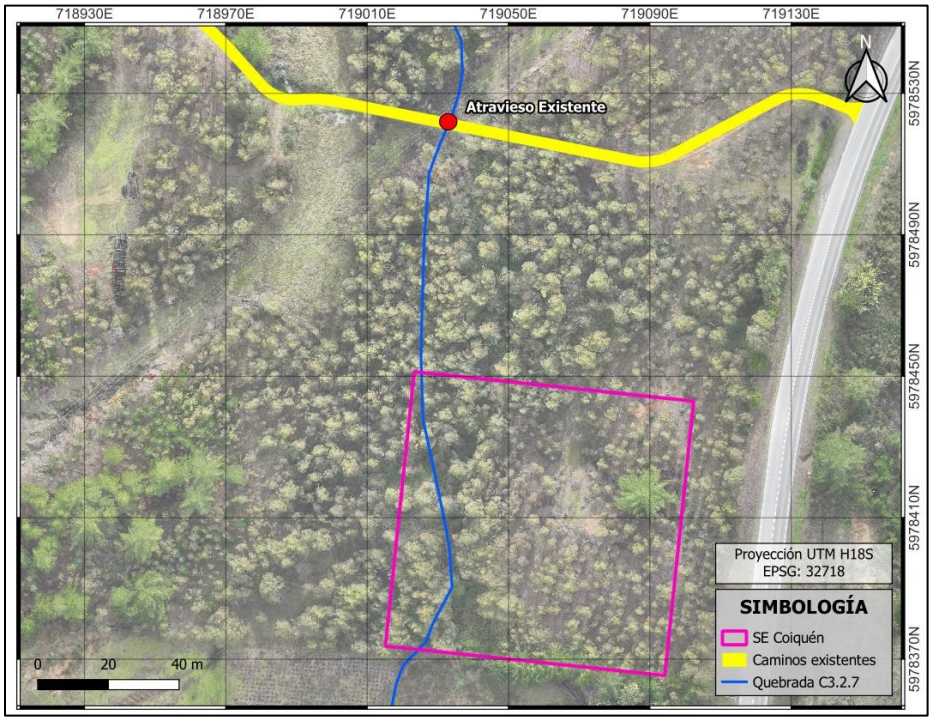


Figura 2-6: Fotografía del atravieso tomada en terreno



En el **Apéndice 8 – Planos** del presente permiso ambiental, se adjunta un plano topográfico en planta, en el cual se detalla la ubicación de las obras proyectadas, la extensión longitudinal del cauce sujeto a modificación y su cuenca aportante.

2.1.2 Descripción de las obras

La SE Coiquén se emplaza sobre una plataforma rectangular de 6.198,5 m², con una pendiente del 1 % tanto en dirección este como norte. Esta plataforma se proyecta sobre un terraplén que contempla una sección de corte y otra de relleno. Sin embargo, el presente estudio se centra exclusivamente en la sección de relleno, debido a que esta ocupa parte del lecho de la quebrada C3.2.7. El talud de relleno considera una pendiente de 1,5:1 (H) y abarca una superficie total de 1.114,5 m².

En la Figura 2-7 se muestra la proyección en planta del terraplén de la SE Coiquén, mientras que en la Tabla 2-3 se presentan las coordenadas geográficas y las cotas de los vértices de la plataforma.

Figura 2-7: Vista en planta del terraplén de la Subestación Coiquén.

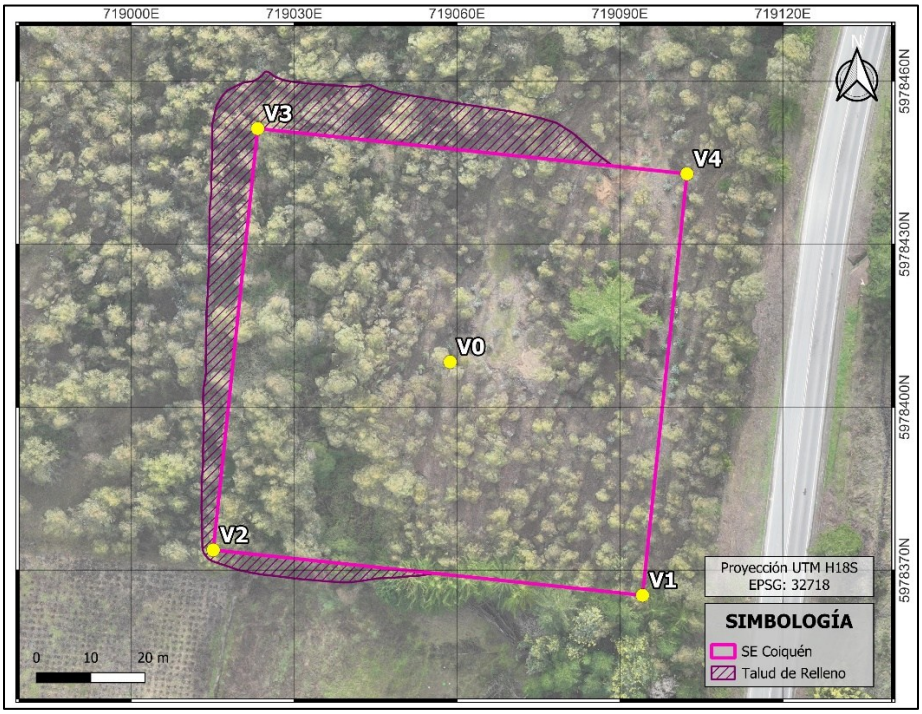


Tabla 2-3: Coordenadas y cotas de la SE Coiquén. Datum WGS84, Huso 18S.

Vértice	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)
V0	719.059	5.978.408	235,00
V1	719.094	5.978.365	235,79
V2	719.015	5.978.374	234,99
V3	719.023	5.978.451	234,21
V4	719.102	5.978.443	235,01

Debido a que el talud de relleno del terraplén ocupa parte del lecho de la quebrada C3.2.7, se proyecta una obra de abovedamiento consistente en un acueducto abovedado, cuyo propósito es conducir las aguas a través del terraplén y mantener la continuidad del escurrimiento natural de la quebrada.

El acueducto corresponde a un cajón de hormigón de 1,5 × 1,5 m, que atraviesa longitudinalmente el terraplén de la SE Coiquén a lo largo de 91 m, con una pendiente de 5,7 %. En la entrada del acueducto se proyecta una obra de captación conformada por un muro de cabecera con alas, que considera un revestimiento de mampostería de piedra de 30 cm de espesor y un diente de fundación de 1 m de profundidad, la cual se dispone sobre la superficie del terreno comprendida entre ambas alas. Por su parte, en la descarga se contempla un revestimiento de enrocado en doble capa consolidado con hormigón, compuesto por elementos de 200 kg de peso y 525 mm de diámetro, con un diente de fundación de 3,5 m y una extensión de 5 m desde la salida del acueducto.

En la Figura 2-8,

Figura 2-9,

Figura 2-10 y

Figura 2-11 se presenta la obras tipo, la vista en planta, el perfil longitudinal de las obras, mientras que en la Tabla 2-4 se indican las coordenadas geográficas y las cotas de entrada y salida del acueducto.

Figura 2-8: Obra tipo acueducto tipo cajón con muro de cabecera y alas. Fuente: Manual de Carreteras, Volumen 4.

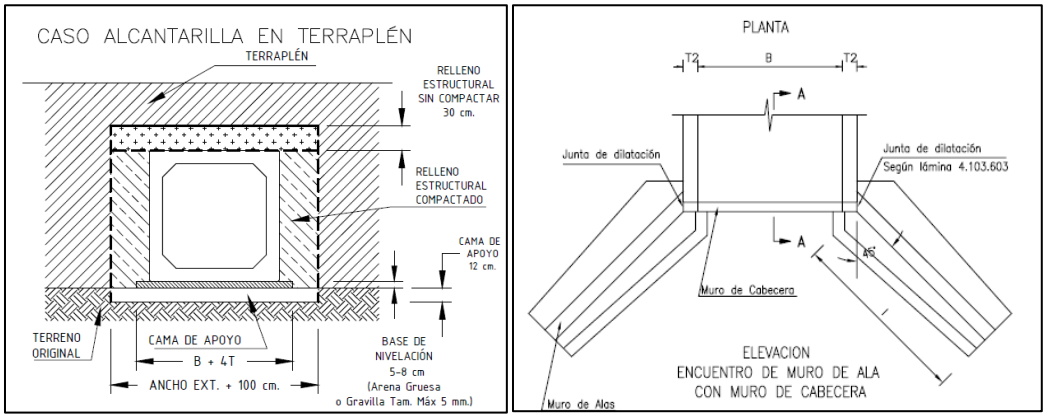


Figura 2-9: Obra tipo de la mampostería de piedra y enrocado consolidado.

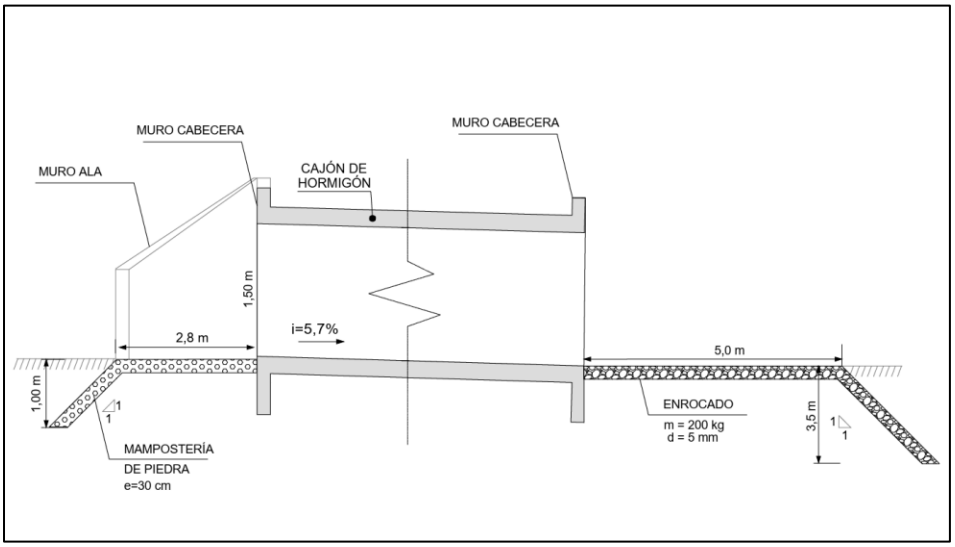


Figura 2-10: Perfil longitudinal de la obra de acueducto.

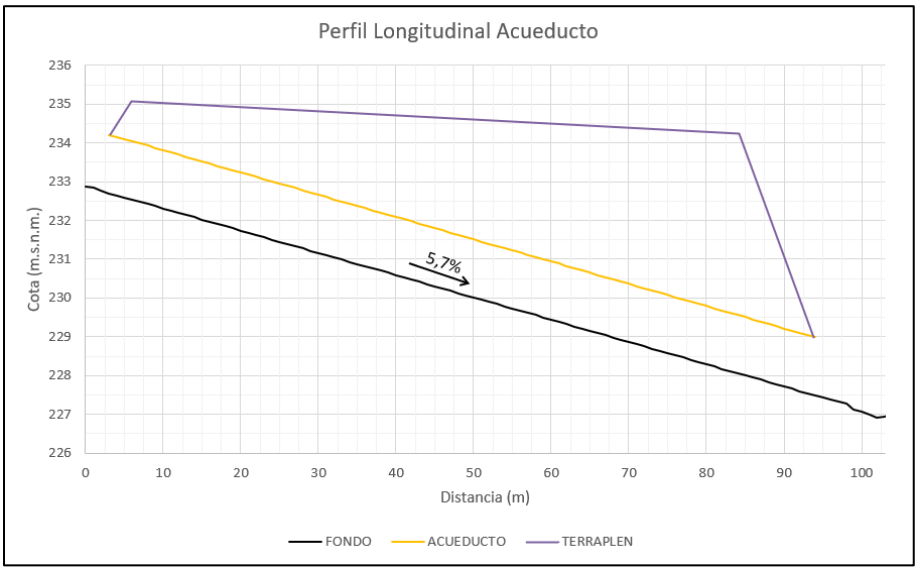


Figura 2-11: Vista en planta de la obra de acueducto proyectada.

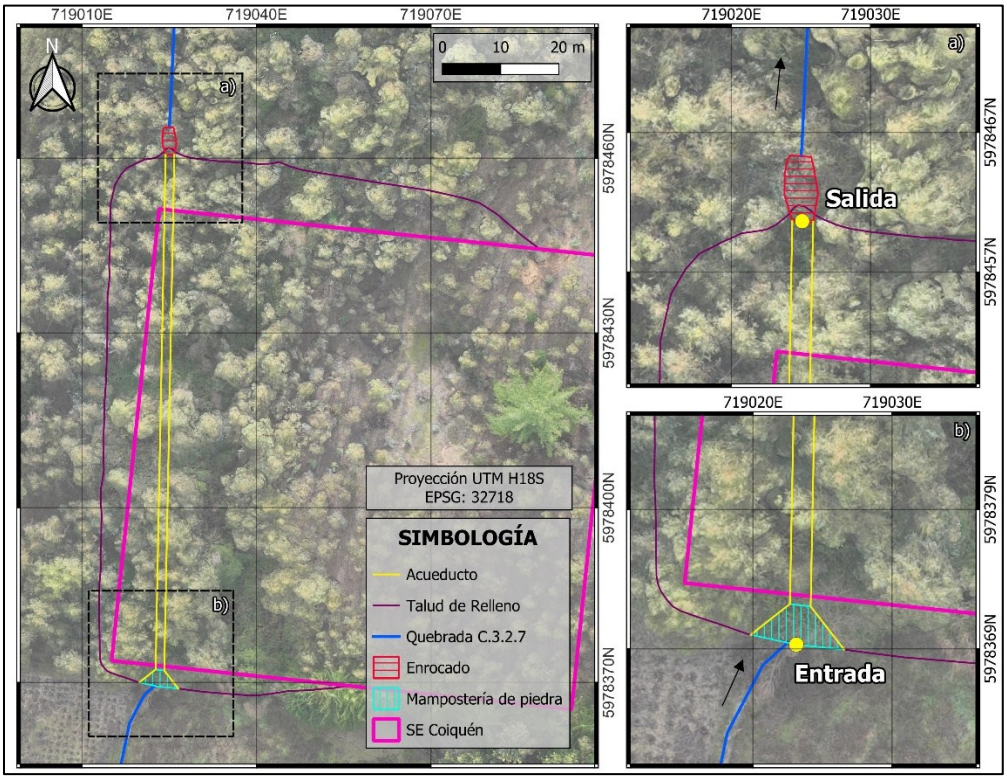


Tabla 2-4: Coordenadas UTM y cotas en la entrada y salida del acueducto. Datum WGS84, Huso 18S.

Vértice	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)
Entrada	719.023	5.978.369	232,73
Salida	719.025	5.978.461	227,50

Los criterios de diseño considerados para las obras correspondientes al acueducto abovedado se obtienen a partir de las "Guías Metodológicas para Presentación y Revisión Técnica de Proyectos de Modificación de Cauces Naturales y Artificiales" (DGA, 2016), el "Manual de Carreteras, Volumen 3" (MOP, 2025a) y el Decreto Supremo 50: reglamento de obras mayores (MOP, 2015). En esta línea, se establece que las obras de abovedamiento requieren un periodo de retorno de diseño de 100 años (Q=2,1 m^3/s) y un periodo de retorno de verificación de 150 años (Q=2,35 m^3/s). A continuación, se resumen los criterios de diseño adoptados para las obras proyectas en el presente permiso.

- La condición Con Proyecto deberá mantener las características hidráulicas originales en la primera y última sección de análisis.

- Solo en casos justificados se aceptará régimen de torrente.
- El escurrimiento en el acueducto deberá estar alejado de la energía específica crítica en, al menos, un 10%. La excepción de lo anterior lo constituyen aquellas secciones en la cuales se alcanza en forma puntual el escurrimiento crítico.
- El escurrimiento debe ser de lámina libre (no en presión), con una revancha de un 30% de la altura del acueducto para el periodo de retorno de diseño.
- Para el periodo de retorno de verificación, la revancha mínima debe ser un 10% de la altura del acueducto.
- La velocidad máxima admisible en el acueducto (hormigón) es de 6 m/s para la crecida de diseño, considerando que son flujos eventuales.
- La velocidad máxima admisible en la mampostería de piedra es de 4,5 m/s para la crecida de diseño.
- La socavación total en las obras de protección deberá ser menor o igual a la profundidad del diente de fundación.
- El enrocado será diseñado de tal forma que las velocidades no superen la velocidad de arrastre.

2.1.3 Descripción de las fases de la obra

2.1.3.1 Descripción de la fase de construcción

Las actividades de esta fase se desarrollarán de acuerdo con lo establecido en el Volumen N°5 del Manual de Carreteras (MOP, 2025c), contemplando la siguiente secuencia constructiva:

a) Despeje y limpieza de la faja: Se ejecutará de acuerdo con la Sección 5.102. Comprenderá la tala, roce, retiro de vegetación, escarpe de suelo vegetal y remoción de material no apto en el área de emplazamiento de las obras. Se delimitarán y señalizarán los ejes y anchos de la franja de trabajo mediante el replanteo topográfico del proyecto.

b) Excavación de la zanja: Conforme a lo especificado en la Sección 5.202 (Excavación para Drenajes, Puentes y Estructuras), se ejecutará la excavación de la zanja a tajo abierto siguiendo la pendiente longitudinal, cotas de fondo y alineaciones de diseño. En caso de requerirse, se considerarán obras de agotamiento de napa o entibaciones para garantizar la estabilidad de las paredes de la zanja.

c) Preparación y conformación del sello de fundación (cama de apoyo y base de nivelación): Se nivelará y compactará el sello de fundación hasta alcanzar como mínimo el 90% de la DMCS, de acuerdo con la Sección 5.612 (Cajones Prefabricados de Hormigón Armado). Posteriormente se colocará una cama de apoyo de material granular conforme a la Sección 5.206 (Relleno Estructural) y una base de nivelación de arena gruesa o gravilla de 5 a 8 cm de espesor, de modo de dar un apoyo continuo y uniforme a la base del cajón.

d) Suministro, colocación y ensamblado de los cajones: Se ejecutará de acuerdo con la Sección 5.612 (Cajones Prefabricados de Hormigón Armado) y la Lámina 4.110.001 del Volumen N°4 del Manual de Carreteras (MOP, 2025b). Los cajones serán de hormigón armado prefabricado, diseñados y fabricados conforme a NCh 184 Parte 3 o ASTM C1433, por una empresa certificada

ISO CASCO 5. Su control y recepción se efectuarán conforme a las Secciones 5.501 (Hormigones) y 5.503 (Acero para Armaduras y Alta Resistencia), considerando que son elementos prefabricados. Se verificará una altura mínima de relleno sobre la clave de 0,60 m.

- **Ajuste y alineación:** Izaje y descenso de los cajones mediante grúa, utilizando los insertos de izaje, e instalación iniciando por el extremo de aguas abajo, con el extremo hembra hacia aguas arriba, verificando cotas, alineación y pendiente de diseño.
- **Unión de elementos:** Ejecución del sellado de las juntas mediante sello flexible preformado (de bitumen o goma butilo, según ASTM C990) o sello rígido de mortero o grouting aprobado por el proveedor, para garantizar la hermeticidad de la conducción hidráulica.

e) Relleno estructural y compactación (Relleno lateral y superior): En conformidad con la Sección 5.206 (*Relleno Estructural*) y la Sección 5.612 (Cajones Prefabricados de Hormigón Armado), se ejecutará el relleno de la zanja en capas uniformes, colocadas en forma simultánea y pareja a ambos lados del cajón y sobre éste, mediante material granular seleccionado:

- **Relleno lateral (Acostillado):** Colocación y compactación simétrica a ambos lados del cajón para evitar desplazamientos horizontales y garantizar el soporte estructural del conducto.
- **Relleno superior (Relleno de protección):** Colocación de una primera capa de 30 cm sobre la clave del cajón, sin compactar o solo apisonada manualmente, y posterior colocación y compactación de capas hasta alcanzar la cota de terreno o subrasante proyectada, con la densidad especificada (mínimo 95% de la D.M.C.S.). Mientras no esté terminada la sección proyectada, se mantendrá sobre el cajón un recubrimiento de suelo compactado de al menos 1,0 m para el tránsito de la maquinaria de faena.

F) Obras de entrega, captación y terminaciones: Construcción de las estructuras de entrada y salida (muro de cabecera con alas y cámaras de inspección) en hormigón armado, conforme a las Secciones 5.501 (Hormigones), 5.503 (Acero para Armaduras y Alta Resistencia) y 5.504 (Moldajes) y a la Lámina 4.103.201 del Volumen N°4, amarradas al cajón prefabricado según la Lámina 4.110.001. En el punto de descarga se considerará un revestimiento de protección contra la erosión de mampostería de piedra, conforme a la Sección 5.508 (Mampostería de Piedra).

g) Limpieza, restitución y retiro de faenas: De acuerdo con lo dispuesto en la Sección 5.003, se retirarán excedentes a botaderos autorizados, se perfilarán los taludes colindantes y se dejará la zona de trabajo limpia y restituida.

Maquinaria principal prevista: Retroexcavadora, grúa móvil, placa compactadora, camiones tolva, camión mixer y equipo topográfico.

2.1.3.2 Descripción de la fase de operación

Durante la fase de operación, el acueducto cerrado de la Quebrada C3.2.7 funcionará como una estructura de conducción de los flujos provenientes de eventos extremos de precipitación, evitando que dichos flujos alcancen e impacten la subestación.

Para asegurar su funcionamiento continuo y eficiencia hidráulica, se implementará un plan de inspección y mantención periódica, conforme al Volumen N°7 del Manual de Carreteras (Mantenimiento Vial), que distingue las siguientes actividades según su oportunidad respecto de las crecidas:

- **Antes de las crecidas (preventivo):** Inspección visual del cajón, las cámaras y las obras de entrada y salida. Limpieza de sedimentos, ramas y basura en el cajón, las cámaras y las zonas de entrada y salida, según la Operación 7.303.2 (Limpieza de Alcantarillas y Sifones). Verificación de los muros y de la mampostería de salida.
- **Durante las crecidas:** No se ejecutarán intervenciones en la obra ni en el cauce mientras dure el escurrimiento.
- **Después de las crecidas:** Verificación de socavaciones y erosión en entrada y salida, sedimentos, integridad del cajón y estado de juntas y sellos, con registro fotográfico y limpieza cuando corresponda.
- **Reparación:** Reparación de grietas o deterioros del hormigón y del revestimiento de salida. Si el daño compromete la estructura, reposición de los módulos afectados, según las operaciones de reacondicionamiento y reposición de alcantarillas del Capítulo 7.300, aplicando los procedimientos de la fase de construcción.

Estas acciones permitirán preservar la capacidad de porte hidráulico de diseño y prolongar la vida útil de la obra de conducción.

2.1.3.3 Descripción de la fase de cierre

Dada la naturaleza del Proyecto, asociado a la transmisión de energía eléctrica, no se contempla una fase de cierre propiamente tal, debido a que su vida útil es indefinida. No obstante, en caso de que se determine la remoción del acueducto, se consideran, de manera referencial, las siguientes actividades:

- **Remoción del acueducto:** Retiro de cajones, muros de ala y de cabecera y mampostería, conforme a la Sección 5.101 (Demoliciones y Remociones).
- **Restitución del cauce:** Relleno de las excavaciones con material del sector, de granulometría similar a la del cauce, hasta alcanzar la cota original, y perfilado del lecho y las riberas.
- **Disposición de materiales:** Los escombros y excedentes se trasladarán a botaderos autorizados, conforme a la Sección 5.003 (Consideraciones Ambientales y de Sustentabilidad).

Se utilizarán, en términos generales, las mismas maquinarias y equipos considerados durante la fase de construcción.

2.1.4 Cronograma

La fase de construcción del acueducto tendrá una duración estimada de 8 semanas, a contar del inicio del proyecto. El cronograma presentado en la Tabla 2-5 muestra la secuencia y duración de las actividades principales asociadas a la ejecución de la obra. El mes de inicio estará sujeto a la programación general del proyecto, la que deberá ser informada oportunamente una vez definida. No obstante, se recomienda que dicho inicio sea programado preferentemente durante períodos de estiaje, a fin de minimizar riesgos asociados a crecidas por precipitaciones.

Tabla 2-5: Carta Gantt con estimación de plazos de construcción del acueducto.

ID	Ítem	Semanas							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Despeje, limpieza y replanteo								
2	Excavación de la zanja								
3	Sello de fundación, cama de apoyo y base de nivelación								
4	Instalación de cajones prefabricados								
5	Relleno estructural y compactación								
6	Obras de entrega, captación y terminaciones								
7	Limpieza, restitución y retiro de faenas								

2.2 ART. 155 LETRA B) ESTUDIOS GENERALES DE TOPOGRAFÍA, GEOLOGÍA, HIDROLOGÍA, HIDRO-GEOLOGÍA, HIDRÁULICA FLUVIAL, HIDRODINÁMICA Y BALANCE DE AGUAS

2.2.1 Topografía

El levantamiento topográfico del sector se realizó mediante un vuelo de dron con tecnología LiDAR, efectuado el 24 de julio de 2026. Para ello, se utilizó un dron DJI Matrice 350 RTK equipado con un sensor LiDAR y RGB DJI Zenmuse L2. Esta tecnología permitió obtener una nube de puntos de alta densidad, con una capacidad de captura de hasta 1.200.000 puntos por segundo y cinco retornos por pulso, favoreciendo la penetración de la cobertura vegetal en sectores arbolados.

La descripción detallada de la metodología empleada, los equipos utilizados y los productos obtenidos se presenta en el **Apéndice 4 – Topografía**.

2.2.1.1 Puntos de Referencia y Georreferenciación

Previo a la campaña de terreno, se dispuso de la información de PR existentes, materializados en campañas topográficas anteriores. Estos puntos fueron utilizados para aplicar la corrección PPK a los vuelos realizados con dron. Mediante mediciones GNSS en modo estático utilizando un receptor Emlid Reach RS3, se ocupó el Punto de Referencia (PR) denominado DL-2, el cual está materializado en terreno mediante un monolito de hormigón y cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 2-6. El sistema de coordenadas de referencia utilizado corresponde a la proyección UTM WGS-84.

Tabla 2-6: Coordenadas UTM 18S de los Puntos de Referencia (PR)

ID	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m s.n.m.)
DL-2	715.999,254	5.985.834,756	267,304

Figura 2-12: Monografía del punto de referencia



2.2.1.2 Modelo Digital de Terreno

A partir de la nube de puntos obtenida en el levantamiento LiDAR se generó un modelo digital de superficie (DSM) que representa la topografía detallada del área de estudio. Mediante procesos de filtrado para la remoción de vegetación y la integración de las obras existentes, se elaboró un modelo digital de terreno (DEM) con resolución espacial de 20 x 20 cm, el cual se utiliza como base para la modelación hidráulica. En la Figura 2-13 se presenta la ortofoto resultante del

levantamiento realizado, mientras que en la Figura 2-14 se ilustra el Modelo Digital de Terreno resultante de este procedimiento.



Figura 2-13: Ortofoto en la zona del proyecto

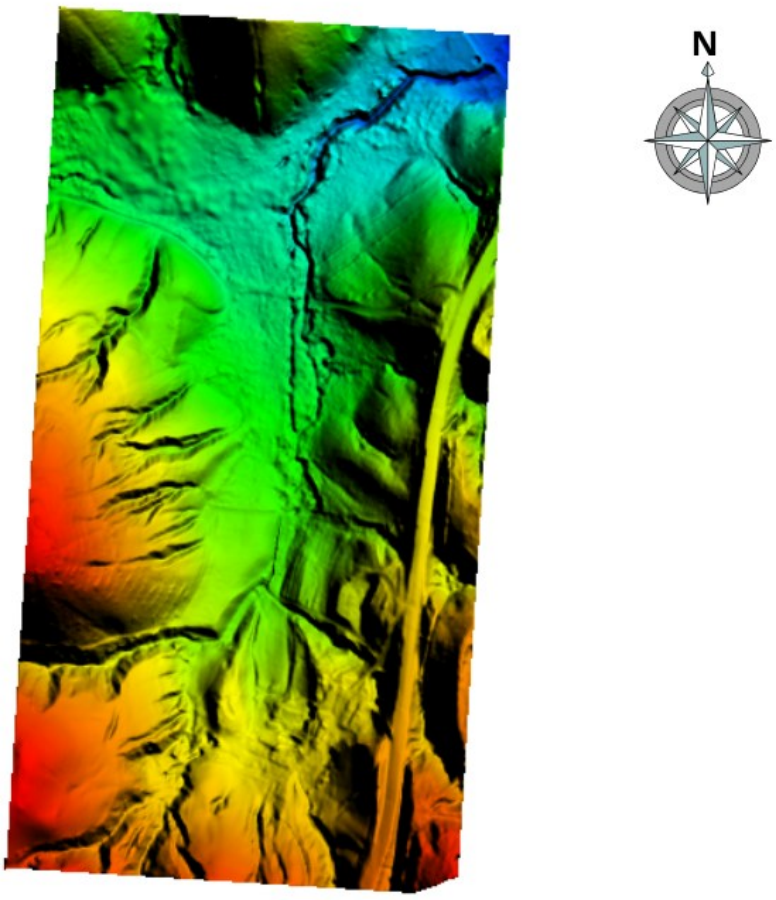


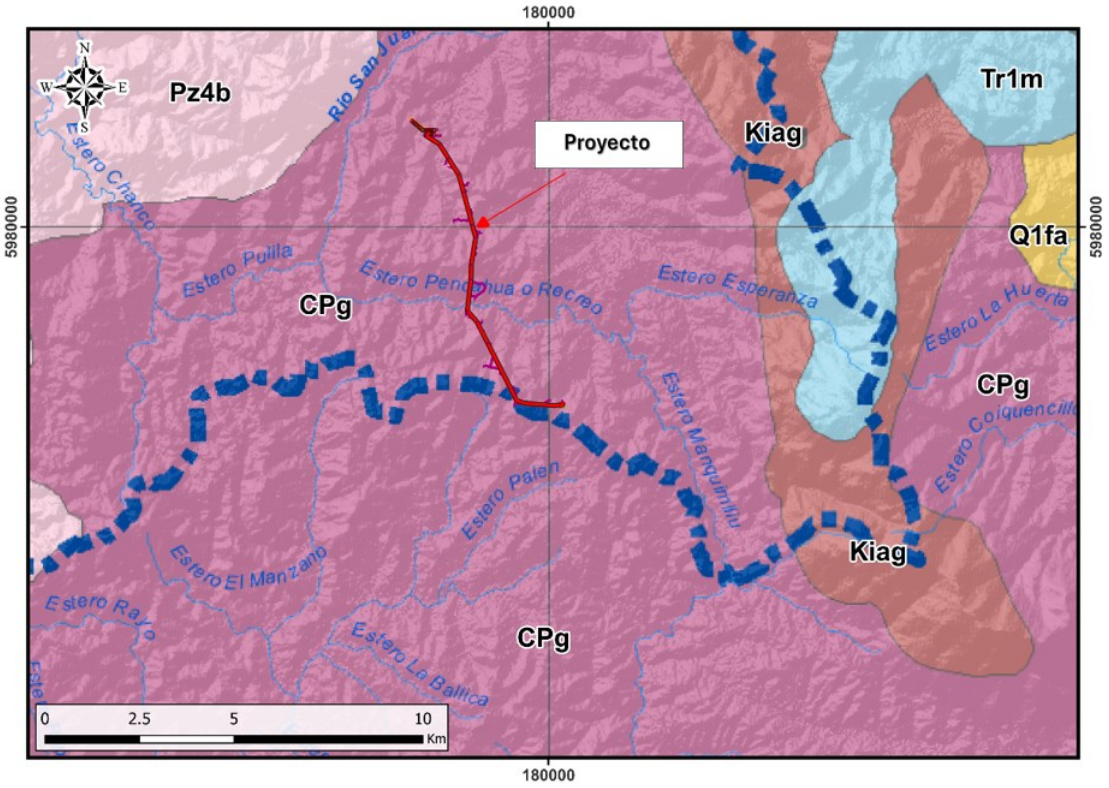
Figura 2-14: Modelo digital de terreno

2.2.2 Geología e Hidrogeología

Con tal de caracterizar la geología e hidrogeología en las inmediaciones de la obra, se presentan algunos resultados de la Caracterización Hidrogeológica del Proyecto (Anexo 2.6).

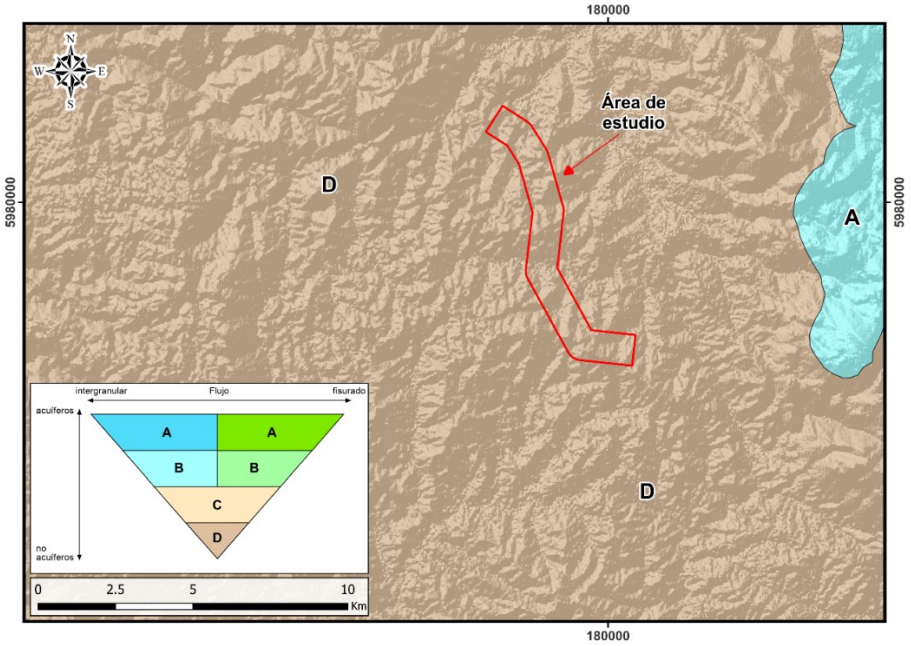
Respecto a la geología, la zona de estudio se emplaza en el sector occidental de la Región de Ñuble, dentro de la Cordillera de la Costa, donde predominan rocas ígneas intrusivas paleozoicas asociadas al Batolito de la Costa (CPg en Figura 2-15). Esta unidad, correspondiente a los Intrusivos Carbonífero-Pérmicos (CPg), está constituida principalmente por tonalitas y granodioritas, con variaciones locales hacia dioritas cuarcíferas y granitos. Estas rocas forman parte del denominado Batolito de la Costa y afloran extensamente en la Cordillera de la Costa como una franja continua de orientación NNE-SSW. Corresponden a rocas de textura fanerítica, alta competencia mecánica y moderado a intenso fracturamiento superficial asociado a procesos tectónicos y meteóricos posteriores (Gajardo, 1981; González-Bonorino, 1970; Hervé et al., 1976).

Figura 2-15: Mapa Geológico Local. Fuente: Modificado de DGA (2011).



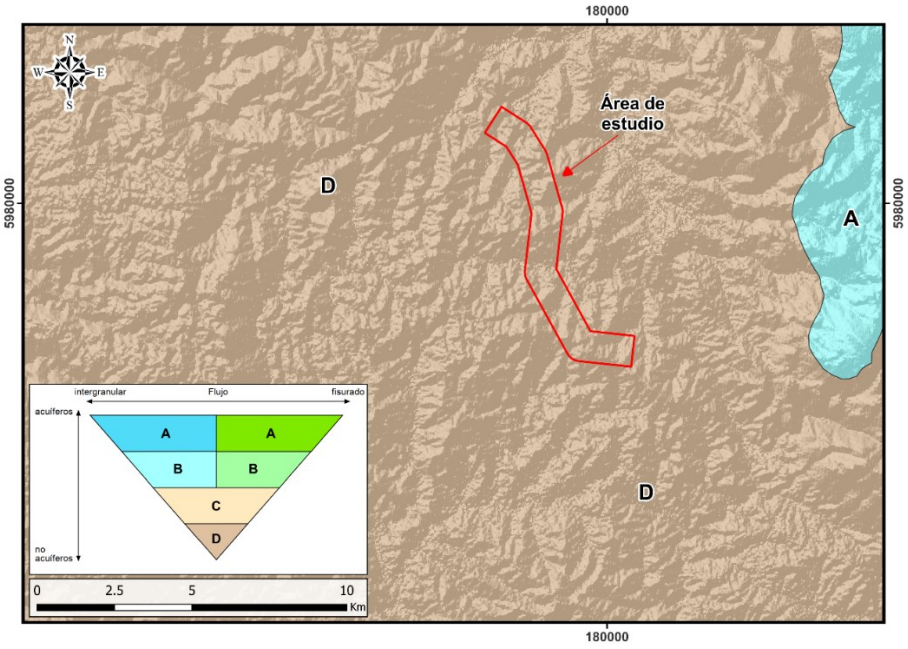
Desde el punto de vista de la aguas subterráneas, con el objetivo de representar las condiciones hidrogeológicas del área de estudio a una escala adecuada para el proyecto, se elaboró un mapa hidrogeológico local (

Figura 2-16: Mapa Hidrogeológico Local.



) mediante la integración de la cartografía geológica disponible para la zona (DGA, 2011) y las unidades hidrogeológicas definidas por la Dirección General de Aguas para la cuenca N.° 080, denominada *Costeras entre Límite Regional y Río Itata* (DGA, 2013). La clasificación hidrogeológica fue asignada considerando la correspondencia entre las unidades geológicas aflorantes, sus características litológicas y las propiedades hidráulicas descritas para cada unidad hidrogeológica regional.

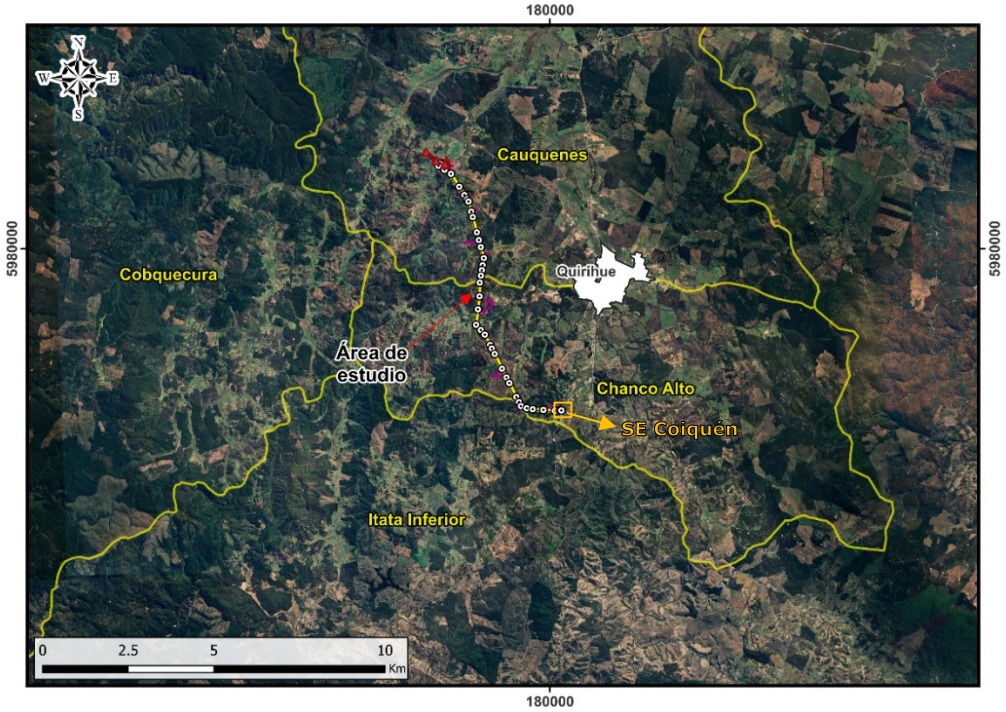
Figura 2-16: Mapa Hidrogeológico Local.



El área de estudio se asocia a las Unidades Hidrogeológicas de *Muy Bajo* a *Nulo* Potencial en Rocas, las cuales corresponden a sectores donde las condiciones geológicas no favorecen el desarrollo de acuíferos de importancia regional. Esta clasificación es consistente con la geología local, dominada por rocas intrusivas del Batolito de la Costa (unidad CPg), compuestas principalmente por tonalitas y granodioritas de baja permeabilidad primaria. En estas unidades, la presencia y circulación de agua subterránea se restringe principalmente a zonas localizadas de fracturamiento o meteorización, por lo que regionalmente se comportan como un basamento de escaso potencial hidrogeológico.

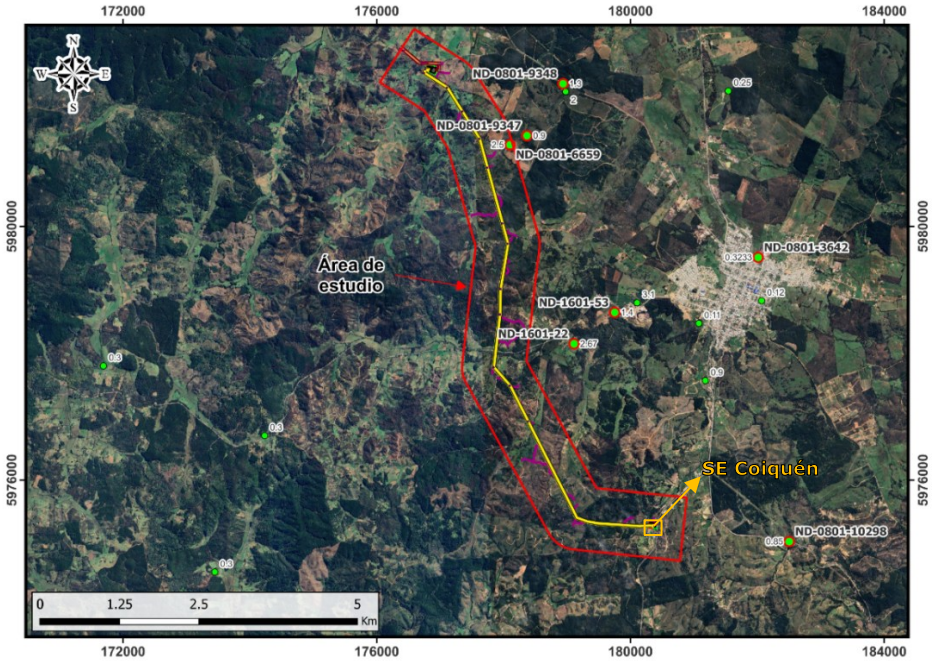
Según la clasificación administrativa de la DGA, el proyecto se ubica en el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Chancho Alto, el cual forma parte de la cuenca Costeras entre Límite Regional y río Itata (Figura 2-17). Según DGA (2013), este sector se caracteriza por el predominio de rocas paleozoicas metamórficas e intrusivas, mientras que los depósitos cuaternarios permeables se restringen principalmente a una estrecha franja costera. Debido a ello, el potencial hidrogeológico es limitado y las captaciones existentes se desarrollan mayoritariamente en sectores de roca fracturada. El estudio señala además que el flujo subterráneo a nivel de la cuenca presenta una dirección predominante este-oeste, condicionado localmente por la red de drenaje y la topografía (DGA, 2013). Dicho esto, el SHAC presenta un comportamiento coherente con la caracterización hidrogeológica, ya que predominan unidades del basamento cristalino con bajo potencial hidrogeológico, donde el almacenamiento y circulación de agua subterránea dependen principalmente de zonas puntales con fracturamiento.

Figura 2-17: Mapa SHACs de la zona de estudio.



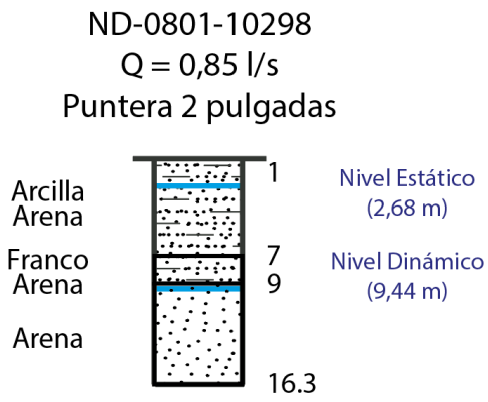
Acorde a la Caracterización Hidrogeológica (Anexo 2.5), las captaciones analizadas en las inmediaciones del Proyecto (Figura 2-18) muestran un claro predominio de materiales finos, principalmente arcillas y arcillas arenosas, con intercalaciones locales de arenas y gravas. Los caudales registrados son generalmente bajos, variando entre 0,32 y 2,67 l/s para pozos profundos, mientras que para norias y punteras se extraen caudales entre 0,04 a 0,9 l/s. Estos antecedentes son consistentes con las características hidrogeológicas regionales del sector, donde predominan unidades asociadas a rocas cristalinas e intrusivas de muy baja permeabilidad, en las cuales el almacenamiento y circulación de agua subterránea se restringen principalmente a niveles meteorizados superficiales y a fracturas locales del macizo rocoso.

Figura 2-18: Mapa captaciones profundas analizadas.



Finalmente, calicatas ejecutadas en la subestación Coiquén, con profundidades entre 3,6 y 4,0 m, no evidenciaron la presencia de un nivel freático. La subestación se emplaza en un sector topográficamente elevado. Por otra parte, las captaciones de terceros, ubicadas principalmente en sectores de valle, evidencian la presencia de niveles freáticos someros asociados a suelos arcillosos saturados, los cuales se vinculan a la acumulación estacional de aguas infiltradas durante eventos de precipitación.

Figura 2-19: Punto de captación analizado más cercano al acueducto.



En este contexto, considerando el limitado potencial hidrogeológico del área de estudio, se considera que los afloramientos de aguas subterráneas durante la excavación de las fundaciones de las obras del proyecto son poco probables y no serán recurrentes durante la fase de construcción. Por lo tanto, en caso de que eventualmente se produzca un afloramiento de aguas subterráneas, este será abordado por medio del Plan de Contingencias y Emergencias.

2.2.3 Hidrología

En esta sección se describen los procedimientos aplicados para la estimación de los caudales de crecida asociados a la Quebrada C3.2.7, caracterizada previamente en la sección 2.1.1, mediante la aplicación de las metodologías recomendadas por las "Guías Metodológicas para Presentación y Revisión Técnica de Proyectos de Modificación de Cauces Naturales y Artificiales" (DGA, 2016), el "Manual de Cálculo de Crecidas en Cuencas sin Control Fluviométrico" (DGA, 1995) y el "Manual de Carreteras, Volumen 3" (MOP, 2025a).

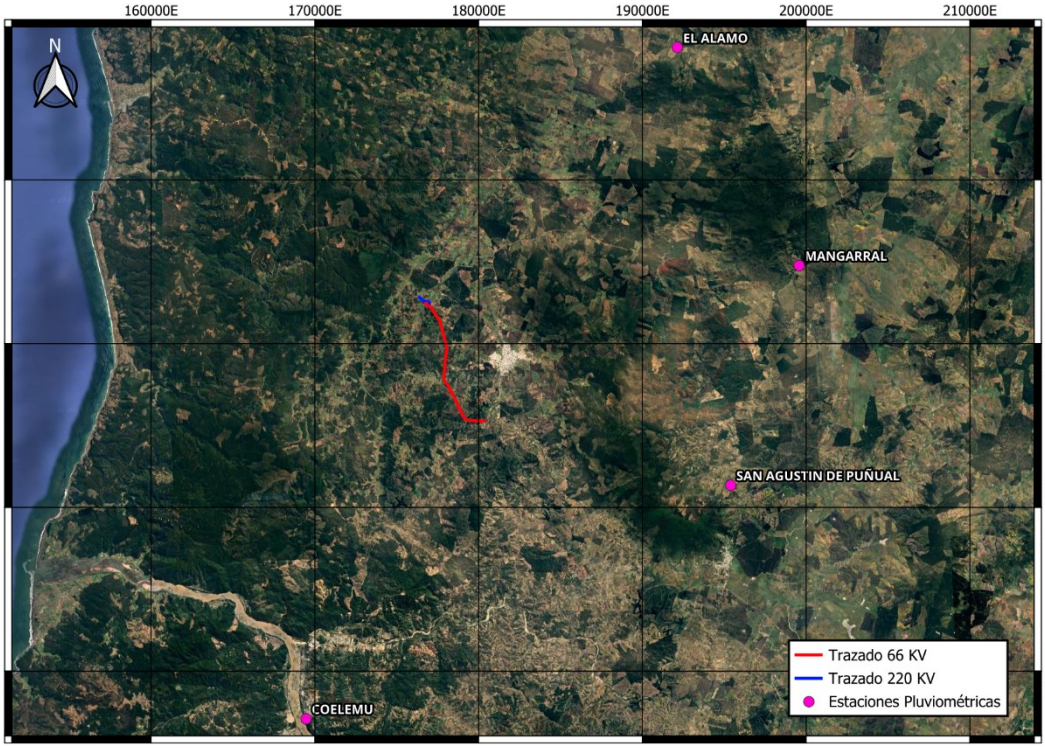
2.2.3.1 Antecedentes y Fuentes de Información

Para el análisis de precipitaciones se realizó un barrido de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) cercanas a las cuencas en análisis. La Tabla 2-7 detalla las estaciones pluviométricas más cercanas, junto a su código de identificación, altura y coordenadas UTM huso 18S. Complementariamente la Figura 2-20 muestra su ubicación geográfica en relación con la línea de alta tensión proyectada.

Tabla 2-7: Características geográficas de las estaciones pluviométricas consideradas en el proyecto.

BNA	Nombre	Altura (m s.n.m)	Este (m)	Norte (m)
07336003-K	EL ALAMO	180	732.184	6.000.437
08141002-K	COELEMU	40	707.052	5.960.945
08142001-7	MANGARRAL	140	738.813	5.986.680
08118004-0	SAN AGUSTIN DE PUÑUAL	138	733.807	5.973.556

Figura 2-20: Ubicación de estaciones pluviométricas analizadas con respecto a las obras proyectadas



Para efectos de los análisis estadísticos de precipitación, se consideraron únicamente aquellas estaciones con series de registro superiores a 30 años, descartándose aquellas que no cumplan dicho requisito. Bajo este criterio, se seleccionó la estación Coelemu para estimar las precipitaciones de diseño, dada su disponibilidad de registros diarios desde el año 1962 y su baja proporción de datos faltantes. Estas características, junto a su cercanía al Proyecto, permiten asegurar una serie extensa y representativa de las condiciones locales de precipitación, reduciendo considerablemente la incertidumbre asociada a la estimación de periodos de retorno superiores a la longitud del registro.

2.2.3.2 Diagnóstico y Relleno de Series de Tiempo

Se descargó la serie de precipitación acumulada diaria para la estación Coelemu desde el repositorio oficial de la DGA. A partir de esta serie se identificaron los eventos máximos anuales para todos los años con registros, estableciendo así una serie de precipitaciones máximas diarias desde 1962 hasta 2025. Esta última fue posteriormente transformada en una serie de precipitación máxima en 24 horas mediante la aplicación de un factor de corrección de 1,1 a cada registro anual, tal como indica la tabla 3.702.404.A del Volumen 3 del Manual de Carreteras (MOP, 2025a). La Figura 2-21 muestra la serie de precipitaciones máximas en 24 horas resultante. En términos medios, el evento máximo de un año cualquiera alcanza aproximadamente 71,6 mm en 24 horas, no obstante, destacan eventos extremos de precipitación mayor a 100 mm a lo largo de todo el

registro. Específicamente resalta el evento máximo registrado el año 2005 con aproximadamente 191,4 mm en 24 horas.

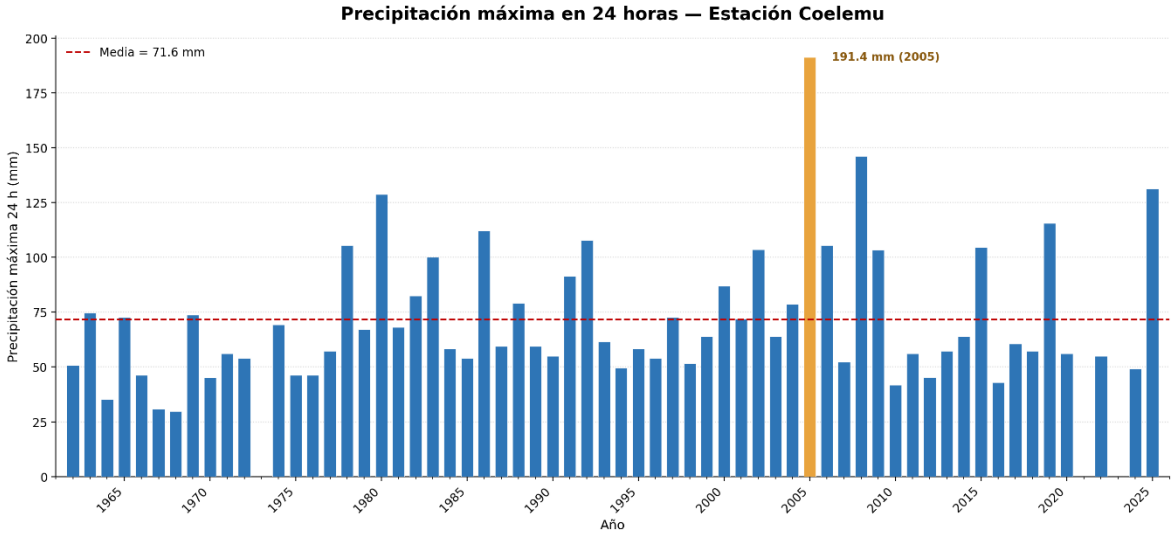


Figura 2-21: Serie de precipitaciones diarias máximas en 24 horas de la estación Coelemu.

Respecto a los años sin registro, sólo faltan los eventos máximos de los años 1973, 2021 y 2023. Los cuales no pudieron ser rellenados ya que las estaciones vecinas tampoco cuentan con registros en dichos años. A pesar de esto la extensión de la serie se considera lo suficientemente larga para contar con una muestra representativa (N=61) de eventos extremos de precipitación, lo cual asegura un análisis de frecuencias robusto como se expone a continuación.

2.2.3.3 Eventos Meteorológicos Extremos

Con la muestra de precipitaciones máximas en 24 horas, se ajustan los modelos probabilísticos de las distribuciones Normal, Lognormal, Pearson III, Log-Pearson III, Gumbel y de valores extremos generalizados GEV. Los parámetros de todas las distribuciones fueron obtenidos a través de tres métodos de estimación: (i) Método de Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE); (ii) Método de los Momentos Estimados (MME); (iii) Método de los L-Momentos. En todos los casos se evaluó la bondad del ajuste en términos del test de Kolmogorov-Smirnov (KS), el test de χ^2 y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). En base al análisis de los ajustes realizados y su inspección visual, se escoge la distribución GEV como el mejor ajuste, ya que esta no sólo aprueba los tests de bondad de ajuste mínimos, sino que es el modelo que mejor se ajusta a la cola superior de la distribución (periodos de retorno altos). La Figura 2-22 expone dicho ajuste, evidenciando la magnitud de la precipitación de diseño en función del periodo de retorno.

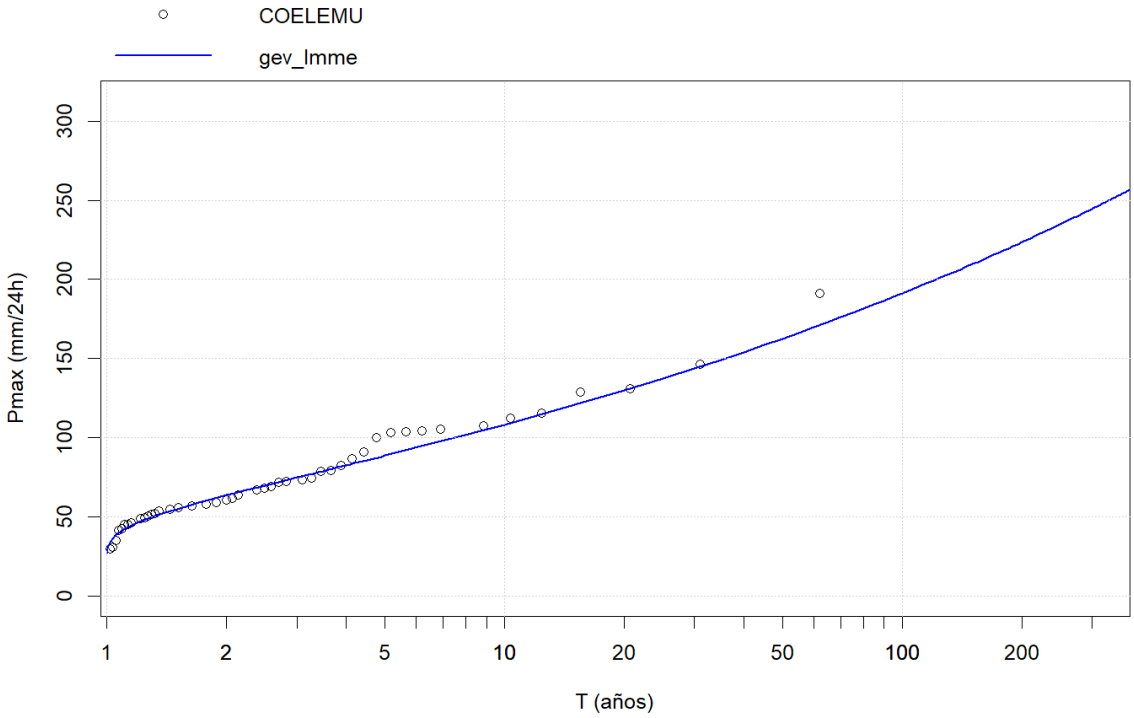


Figura 2-22: Ajuste del modelo de distribución GEV sobre los datos de precipitaciones máximas en 24 horas.

El detalle de todas las distribuciones de probabilidad evaluadas, en conjunto con los resultados de las pruebas de bondad de ajuste, se encuentra en el Apéndice B – Hidrología. Finalmente, con el ajuste seleccionado se estiman las precipitaciones para los periodos de retorno T igual a 2, 5, 10, 20, 25, 50, 75, 100, 150 y 200 años, los cuales se indican a continuación en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8: Precipitación máxima en 24 horas según el periodo de retorno (T).

T (años)	Precipitación (mm/24hr)
2	63,8
5	88,7
10	108,3
20	129,9
25	137,4
50	162,6
100	191,1
150	209,6
200	223,5

El cálculo de caudales de crecida, independiente de la cuenca o cauce en estudio, suele requerir valores de precipitación para diferentes duraciones de lluvia. Para esto se determinan las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), las cuales para efectos de este proyecto se determinan mediante la siguiente fórmula:

$$i(t,T) = \frac{C_d(t) \cdot P_{24}(T)}{t}$$

donde *i* es la intensidad de precipitación en mm/hr, *Cd* el coeficiente de duración, *P24* la lluvia máxima en 24 horas y *t* la duración de la tormenta. Para el cálculo del coeficiente de duración se consideran los valores dados por el Manual de Carreteras para la estación Concepción, la cual de las más cercanas al proyecto es la que entrega resultados más conservadores. La Tabla 2-9 indica los valores considerados para dicho coeficiente.

Tabla 2-9: Coeficiente de duración asociados a la estación Concepción.

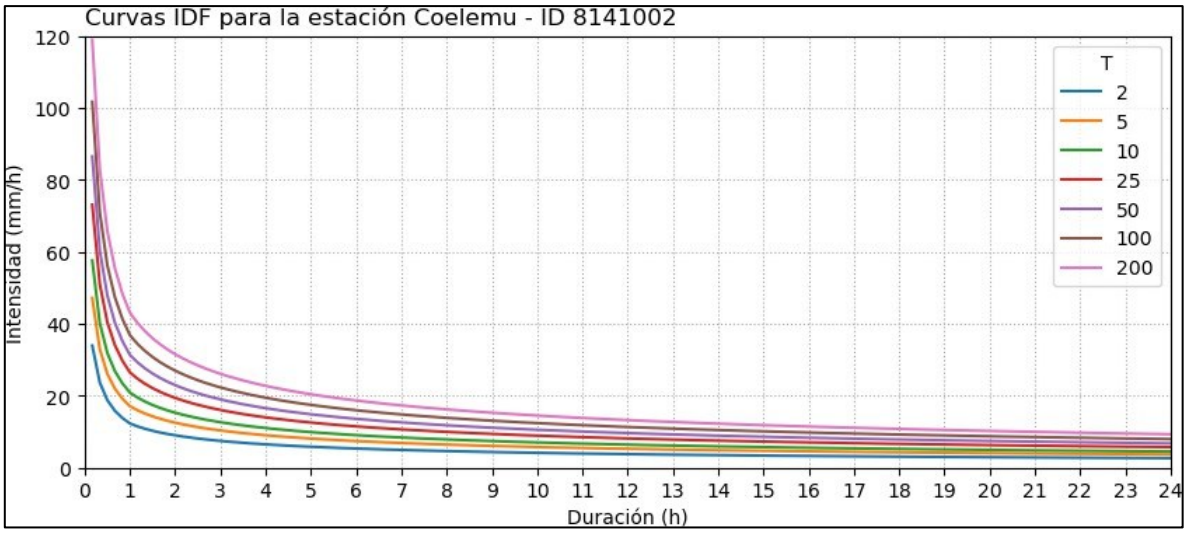
Duración (horas)	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
Cd (-)	0,19	0,30	0,39	0,48	0,56	0,64	0,70	0,76	0,90	1,00

En el caso de duraciones menores a 1 hora se considera la ecuación de Bell, la cual permite estimar nuevos coeficientes de duración a partir de la siguiente fórmula:

$$C_d(t) = C_d(t = 1hr) \cdot (0.54 \cdot t^{0.25} - 0.5)$$

donde *Cd(t=1hr)* es el coeficiente de duración asociado a una lluvia de 1 hora y *t* es nuevamente la duración de la tormenta en minutos. Finalmente, dados estos antecedentes la Figura 2-23 indica las curvas IDF asociadas a la estación Coelemu.

Figura 2-23: Curvas intensidad-duración-frecuencia asociadas a la estación Coelemu.



2.2.3.4 Estimación de Caudales

Dado que la cuenca en estudio posee un área menor a 20 km^2, se utiliza el método racional convencional, el cual consiste en estimar el caudal peak de crecida (Q) mediante la relación:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3{,}6}$$

donde C es el coeficiente adimensional de escorrentía, i la intensidad de precipitación para una lluvia de duración igual al tiempo de concentración t_c en milímetros por hora y A el área de la cuenca en kilómetros cuadrados.

Tiempos de concentración

Para estimar el tiempo de concentración, se evalúan las cuatro expresiones recomendadas en la Tabla 3.702.501.A del Manual de Carreteras (2025), considerando un valor mínimo de t_c = 10 minutos. Las ecuaciones utilizadas se presentan a continuación:

$$t_c = 57\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

$$t_c = \frac{18 \cdot L^{0.76}}{S^{0.19}}$$

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}}$$

$$t_c = \frac{3.28 \cdot L^{0.8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{1140 \cdot S^{0.5}}$$

Donde la primera, segunda, tercera y cuarta ecuación son las relaciones de *California*, *Norma Española*, *Giandotti* y *SCS* respectivamente. L es el largo del cauce principal en kilómetros, H la diferencia entre la cota máxima y mínima de la cuenca en metros, ΔH la diferencia entre la cota media y la cota mínima, CN la curva número y S la pendiente media de la cuenca expresada como porcentaje.

Los resultados del cálculo del tiempo de concentración se exponen en la Tabla 2-10. Para el caso particular de la fórmula de *Giandotti* se considera la condición de aplicabilidad $L/5{,}4 < t_c < L/3{,}6$ sugerida por Stowhas (2016), la cual de aplicarse sugiere que dicho cálculo no es el adecuado para estas cuencas. Asimismo, la fórmula de *California,* recomendada para cuencas montañosas según el Manual de Carreteras (2025), no resulta adecuada ya que estas cuencas son del tipo rural con pendientes medidas asociadas a sólo cerros y lomajes. En consecuencia, de las cuatro referencias, sólo las fórmulas de *Normas Españolas* y del *SCS* resultan apropiadas, optando para el diseño los valores de esta última al ser la recomendada para cuencas rurales y por entregar los valores más conservadores del t_c.

Tabla 2-10: Tiempo de concentración estimados para cada cuenca.

Cuenca	California (hr)	N. Española (hr)	Giandotti (hr)	SCS (hr)	Optado (hr)
C3.2.7	0,100	0,288	0,567	0,233	**0,233**

Intensidades de precipitación

Con el tiempo de concentración ya calculado, se procede a determinar la intensidad de lluvia asociada a dicha duración. Para ello, se utilizan las precipitaciones de diseño indicadas previamente, las cuales, al estar referidas a eventos de 24 horas, deben ajustarse a la duración correspondiente al t_c de la cuenca. Esta transformación se realiza mediante los coeficientes de duración dados por la fórmula de Bell y aquellos asociados a la estación Concepción, los cuales se encuentran incluidos en la Tabla 3.702.403.A del Manual de Carreteras (2025) y se exponen a continuación.

$$C_d(t) = (0.54 \cdot t^{0.25} - 0.5) \cdot C_d(t = 1hr)$$

Tabla 2-11: Coeficiente de duración (Cd) definido para la estación Concepción.

Horas	Cd (-)
1	0,19
2	0,30
4	0,39
6	0,48
8	0,56
10	0,64
12	0,70
14	0,76
18	0,90
24	1,00

Donde t es la duración objetivo en minutos. Dado el coeficiente de duración, la intensidad de diseño (curva IDF) se puede calcular para cualquier periodo de retorno T a partir de la precipitación y duración igual a t mediante la siguiente ecuación:

$$i(t,T) = \frac{1}{t} \cdot C_d(t) \cdot P_{24}(T)$$

Específicamente, las intensidades asociadas a cada periodo de retorno se indican en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12: Intensidades de las lluvias de diseño para la cuenca en estudio.

Cuenca	Periodo de retorno (T años) Intensidades de diseño (mm/h)								
	2	5	10	20	25	50	100	150	200
C3.2.7	28,3	39,3	48,0	57,6	60,9	72,1	84,7	92,9	99,1

Coeficiente de Escorrentía

Para el cálculo del coeficiente adimensional de escorrentía *C*, se aplica la metodología expuesta en la Tabla 3.702.503.B del Manual de Carreteras (2025), la cual considera cuatro factores principales: el relieve, la infiltración, la vegetación y la capacidad de almacenamiento de agua. Los valores recomendados para estos factores, según las directrices del manual, se presentan en la Tabla 2-13.

Tabla 2-13: Factores del coeficiente de escorrentía asociado a 10 años de periodo de retorno. Fuente: Manual de Carreteras Volumen 3, Tabla 3.702.503.B.

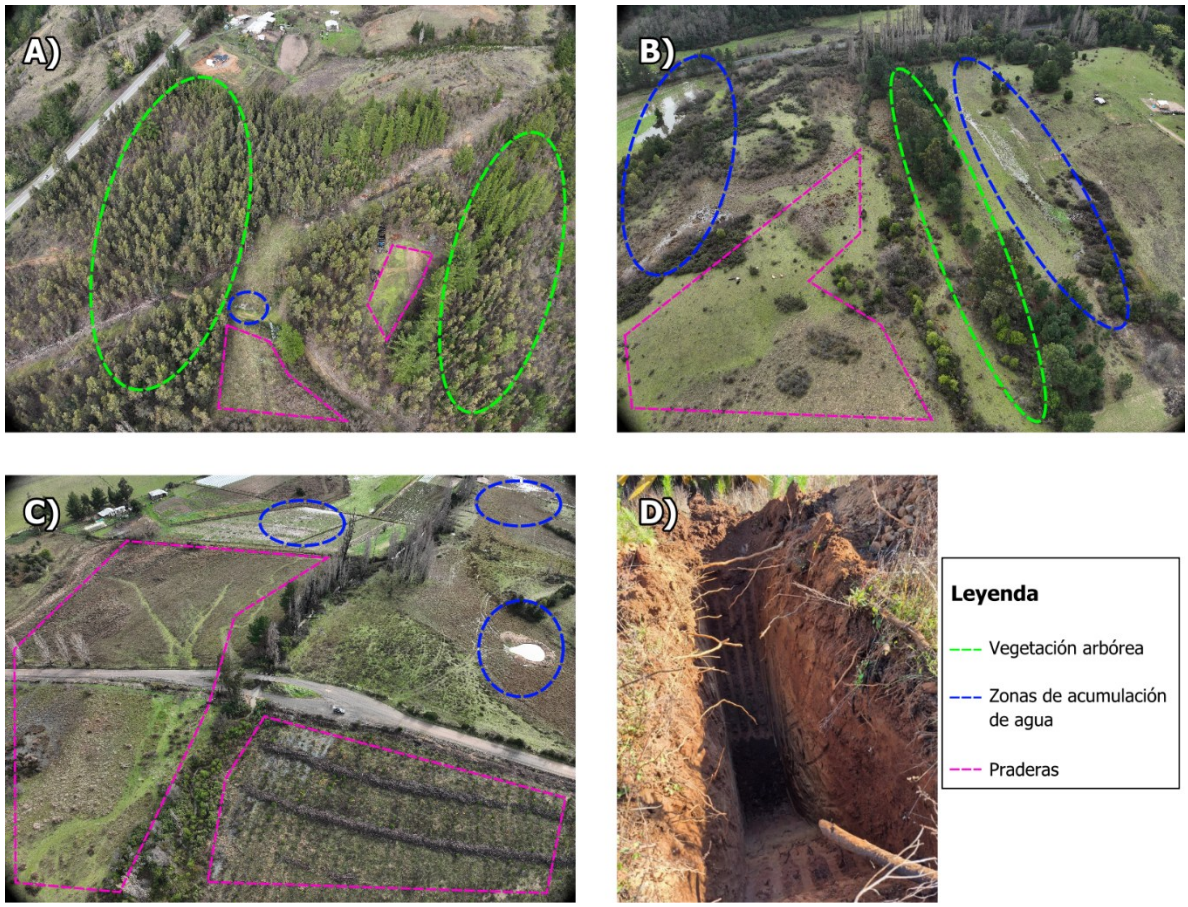
Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28 – 0,35 Escarpado, pendientes > 30%	0,20 – 0,28 Montañoso, pendientes 10–30%	0,14 – 0,20 Con cerros, pendientes 5–10%	0,08 – 0,14 Relativamente plano, pendientes < 5%
Infiltración	0,12 – 0,16 Suelo rocoso o arcilloso, infiltración despreciable	0,08 – 0,12 Arcillosos o limosos, baja infiltración, mal drenados	0,06 – 0,08 Normales, bien drenados, textura mediana	0,04 – 0,06 Suelos profundos de arena, alta infiltración
Cobertura Vegetal	0,12 – 0,16 Cobertura escasa o sin vegetación	0,08 – 0,12 Poca vegetación, < 20% con buena cobertura	0,06 – 0,08 Regular a buena; 50% del área con praderas o bosques	0,04 – 0,06 Buena a excelente; 90% con praderas o bosques
Almacenamiento Superficial	0,10 – 0,12 Despreciable, sin zonas húmedas	0,08 – 0,10 Baja, cauces pequeños bien definido	0,06 – 0,08 Normal, zonas húmedas, pantanos y lagunas	0,04 – 0,06 Capacidad alta, planicies de inundación o zonas húmedas extensas

La selección de los valores correspondientes a cada factor se realizó considerando las características observadas en terreno y determinadas para las cuencas de estudio, las cuales se evidencian en la Figura 2-24A, Figura 2-24B, Figura 2-24C y Figura 2-24D. Para el factor relieve, se consideraron las pendientes calculadas mediante la caracterización geomorfológica de las cuencas. Para el factor infiltración, se consideraron las características de los suelos identificadas en terreno, correspondientes a materiales de textura areno-limosa, propias de infiltración intermedia. Para la cobertura vegetal, se consideró la presencia de una cobertura regular a buena, con predominio de praderas y sectores con vegetación arbórea. Finalmente, para el almacenamiento superficial, se consideró la presencia de sectores bajos y áreas con evidencia de acumulación de agua y zonas inundables observadas durante la inspección de terreno. Luego, la suma de los valores seleccionados para los cuatro factores permite obtener el coeficiente de escorrentía correspondiente a un periodo de retorno de 10 años en cada cuenca. Los valores adoptados para cada cuenca y el coeficiente resultante se presentan en la Tabla 2-14.

Tabla 2-14: Coeficientes de escorrentía obtenidos para cuenca en estudio.

Cuenca	Relieve	Infiltración	Cobertura Vegetal	Almacenamiento Superficial	Coeficiente Escorrentía
C3.2.7	0,2	0,08	0,06	0,06	0,4

Figura 2-24. A, B y C: Panorámicas realizadas en el sector del modelo. D: Calicata N°2 del informe de Mecánica de suelos.



Posteriormente, para determinar los coeficientes de escorrentía asociados a otros periodos de retorno, este valor fue amplificado según los factores indicados en la Tabla 2-15.

Tabla 2-15: Factores de amplificación para coeficientes de escorrentía según periodo de retorno.

Periodo de retorno T (años)	Factor	Coef. Escorrentía
2	1,00	0,40
5	1,00	0,40
10	1,00	0,40
20	1,10	0,44
25	1,15	0,46
50	1,20	0,48
75	1,23	0,49
100	1,25	0,50
150	1,28	0,51
200	1,30	0,52

Finalmente, con los coeficientes de escorrentía presentados en la tabla anterior, las intensidades definidas previamente, el área de la cuenca, los coeficientes de duración correspondientes y la ecuación del método racional, se obtienen los caudales de crecidas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 150 y 200 años presentados en la Tabla 2-16.

Tabla 2-16: Caudales líquidos de crecida para la cuenca en estudio (m³/s).

Cuenca	Periodo de retorno (T años)								
	2	5	10	20	25	50	100	150	200
C3.2.7	0,56	0,78	0,95	1,26	1,39	1,72	2,10	2,35	2,56

2.2.4 Hidráulica Fluvial e Hidrodinámica

A continuación, se presenta el estudio de hidráulica fluvial e hidrodinámica para las situaciones actual y proyectada. Para ello, se realizaron modelaciones hidráulicas bidimensionales de ambos escenarios, con el objetivo de caracterizar las condiciones de escurrimiento en la zona de estudio. A partir de los resultados obtenidos, se calcularon las socavaciones generales del cauce y las socavaciones locales asociadas a las obras proyectadas en el marco de este permiso. Finalmente, mediante el análisis de los resultados de las modelaciones hidráulicas y de las socavaciones calculadas, se verifican los criterios adoptados para el diseño de las obras, presentados en la sección 2.1.2 de este informe.

2.2.4.1 Modelación Hidráulica 2D

2.2.4.1.1 Generalidades

En la presente sección se exponen los criterios y definiciones adoptados para las modelaciones hidráulicas bidimensionales (2D) de la Quebrada C3.2.7, implementadas mediante el software HEC-RAS versión 6.6, desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center*. Dichas modelaciones tienen por objetivo analizar el comportamiento del escurrimiento en la zona del Proyecto, tanto para la situación actual como para la situación proyectada, así como verificar el diseño del acueducto abovedado que atraviesa el terraplén de la SE Coiquén.

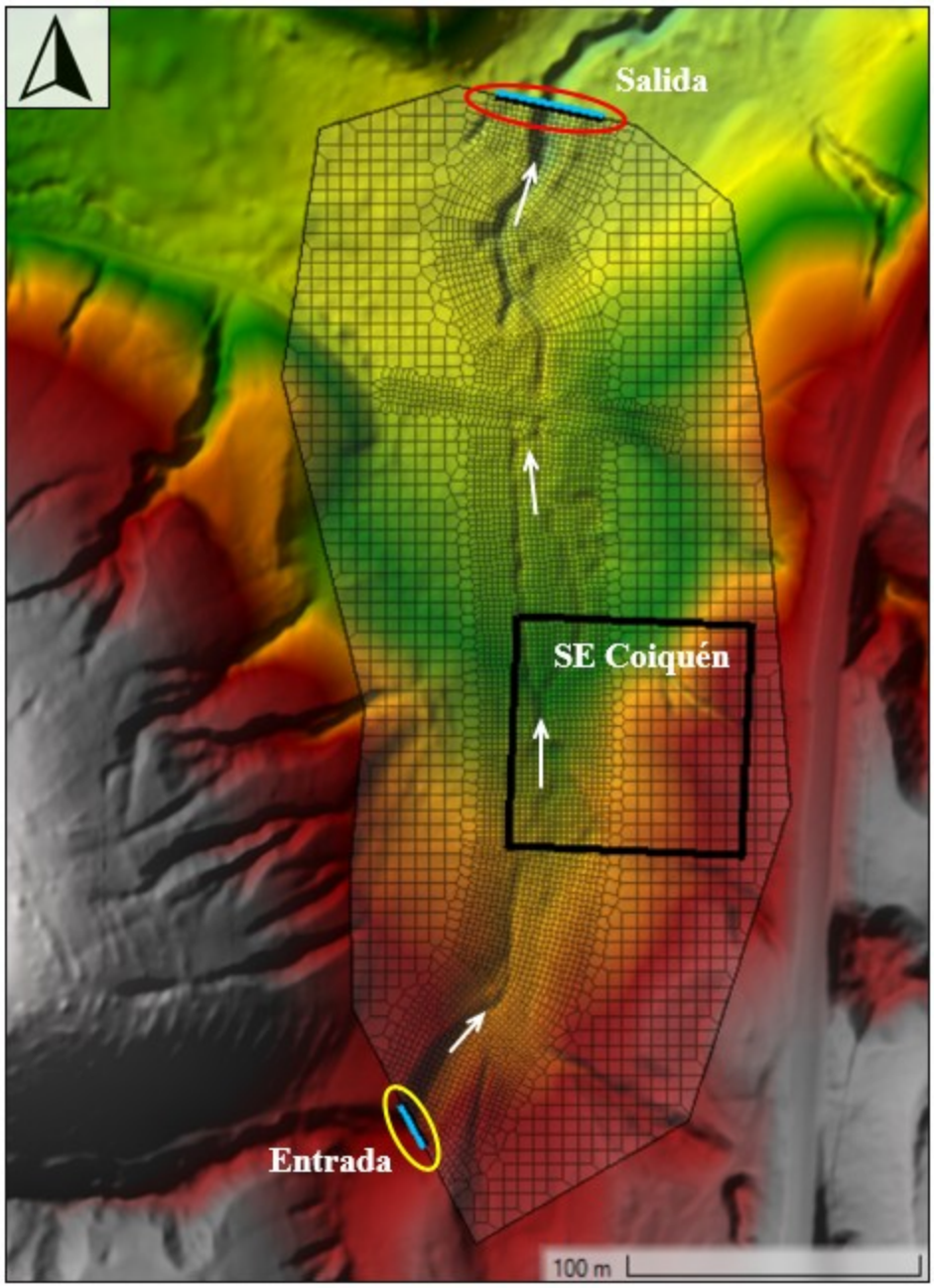
El módulo bidimensional de HEC-RAS resuelve las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento de aguas someras (SWE, por sus siglas en inglés), obtenidas a partir del promedio vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes, mediante un esquema implícito de volúmenes finitos sobre una malla no estructurada compuesta por celdas de hasta ocho caras. En esta formulación, el esfuerzo de fondo, término asociado a la representación de la fricción hidráulica, se incorpora mediante el coeficiente de rugosidad de Manning, cuyo valor se estima a partir de la información obtenida en las calicatas y de la clasificación de las coberturas de suelo presentes en el área de estudio.

Las simulaciones hidráulicas se realizan bajo condiciones de flujo permanente, considerando un lecho fijo no erosionable y los caudales determinados en la sección 2.2.3 como condiciones de borde de entrada. Como superficie base del terreno se empleó un modelo digital de terreno generado a partir del levantamiento topográfico realizado en el marco del presente estudio, el cual representa las condiciones actuales del terreno en la zona de interés. Los archivos ejecutables de los modelos numéricos se incluyen en el **Apéndice 3 – Modelación Hidráulica**.

2.2.4.1.2 Dominio de Modelación y Superficie Base

Con el propósito de minimizar la influencia de las condiciones de borde sobre los resultados, el dominio de modelación se extiende longitudinalmente 104 m aguas arriba y 169 m aguas abajo de la subestación, hasta alcanzar las respectivas condiciones de borde del modelo. En cuanto a la superficie base, en el **Apéndice 4 – Topografía** se adjunta el archivo en formato TIFF utilizado en la modelación, el cual contiene el modelo digital del terreno (MDT) obtenido a partir del levantamiento topográfico de la zona de estudio. En la Figura 2-25, se presenta el dominio de modelación junto con la superficie utilizada.

Figura 2-25: Dominio de modelación, MDT y condiciones de borde.



En particular, la Figura 2-26 muestra un atravieso existente en un camino cercano al área proyectada para la SE Coiquén, constituido por una tubería de HDPE de aproximadamente 60 cm de diámetro, que actualmente se encuentra obstruida por vegetación y sedimentos. Considerando esta condición, y con el propósito de adoptar un escenario conservador en la estimación de las áreas de inundación, el modelo hidráulico representa únicamente el terraplén del camino, sin incorporar la tubería, tal como se muestra en la Figura 2-26c. Este criterio permite evaluar la

eventual sobreelevación del nivel de agua aguas arriba del terraplén y, en consecuencia, determinar las posibles afectaciones a las obras proyectadas.

Para representar la situación proyectada, se modificó el MDT incorporando las obras consideradas en el presente permiso. En el caso del terraplén donde se emplazará la SE Coiquén, se generó una superficie a partir de las cotas de diseño, considerando taludes con una pendiente de 1,5:1 (H) hasta su conexión con el terreno natural. Por su parte, el acueducto de cajón de hormigón se representó como un canal abierto que atraviesa el terraplén, dando continuidad al cauce (ver Figura 2-27). Esta representación permite analizar en detalle las condiciones de escurrimiento a través de dicha estructura.

Figura 2-26: Incorporación del terraplén del camino en el MDT.

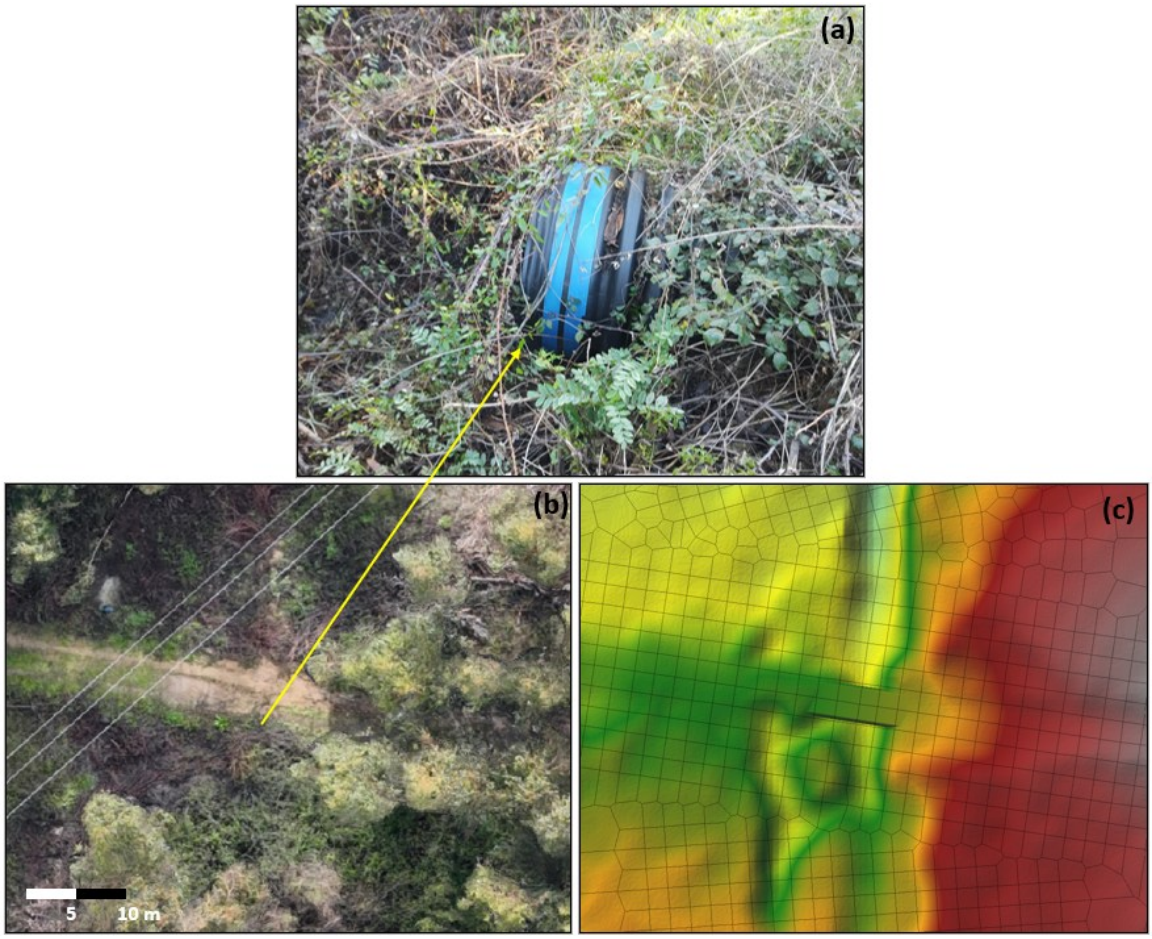
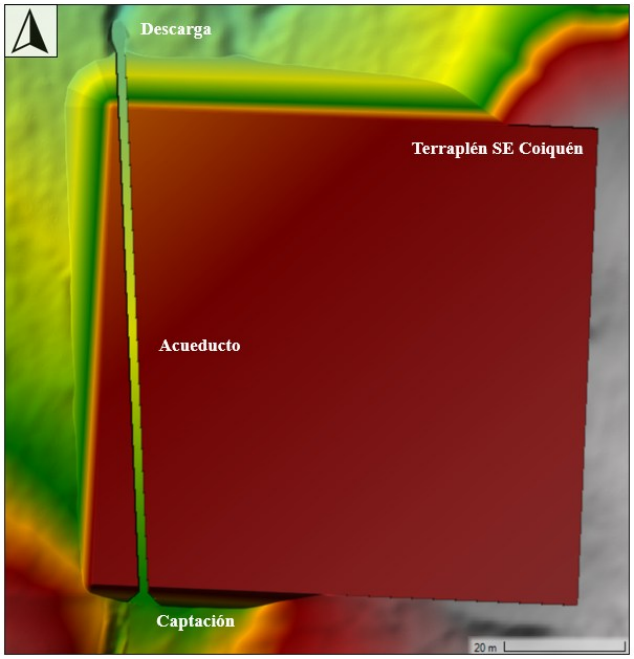


Figura 2-27: Incorporación del abovedamiento al MDT.



2.2.4.1.3 Malla de Cálculo

Se configura una malla de cálculo no-estructurada capaz de adaptarse a las características topográficas del cauce, cuyas caras se alinean a la dirección predominante del flujo, la cual consiste en celdas de un tamaño base de 5 m y un refinamiento con celdas de hasta 2 m en el eje del cauce y en una obra de atravieso existente (ver Figura 2-28). En particular, en la situación proyectada se agrega un refinamiento con celdas de 0,75 m en el acueducto tipo cajón de hormigón (

Figura 2-29).

Figura 2-28: Detalle refinamiento del cauce y atravieso.

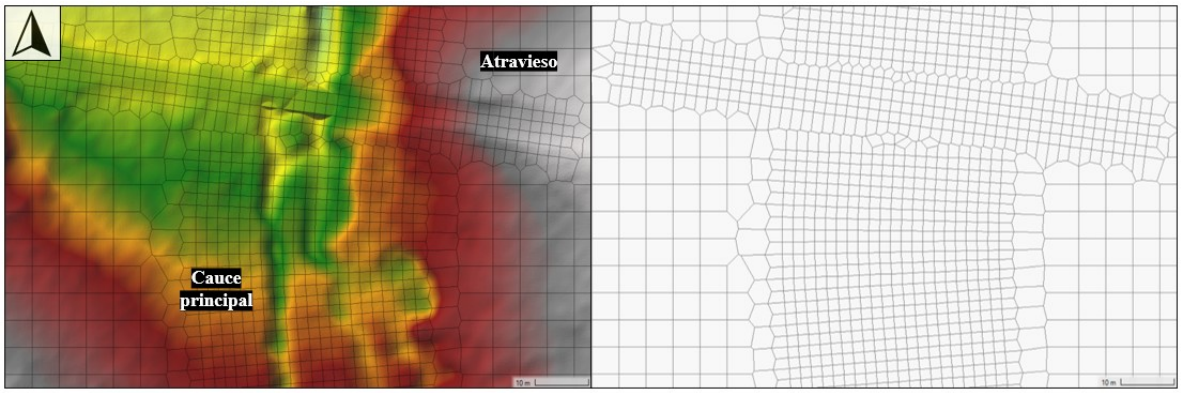
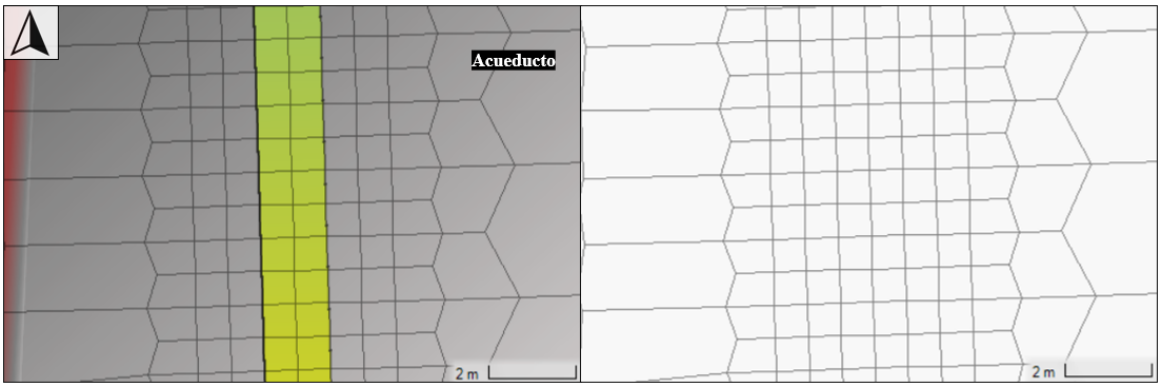


Figura 2-29: Detalle refinamiento acueducto abovedado.



2.2.4.1.4 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde de entrada se definen en el inicio de los cauces mediante una condición del tipo "*Flow Hydrograph*" de HEC-RAS, imponiendo así un caudal constante correspondiente a los periodos de retorno de 100 y 150 (ver sección 2.2.3) y una pendiente de energía igual a la pendiente local del terreno. En el borde de salida, se utilizó una condición de borde del tipo *"Normal Depth"*, con una pendiente de energía equivalente a la pendiente local del terreno. En la Tabla 2-17 se resumen los caudales, pendientes y criterios considerados en las condiciones de borde de la modelación.

Tabla 2-17: Condiciones de borde.

CB	Caudal (m^3/s)		Pendiente (%)
	T100	T150	
Entrada	2,1	2,35	6,0
Salida	*Altura Normal*		0,4

2.2.4.1.5 Estimación del Coeficiente de Rugosidad

Dadas las características de escurrimiento libre de un cauce natural, se utiliza como ley friccional la fórmula de Manning. Para estimar el coeficiente "n" de Manning se utiliza la metodología descrita por Cowan. Según este procedimiento el valor de "n" puede ser calculado según la ecuación:

$$n = m \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

Donde n_0 es el coeficiente de Manning base, asociado a la granulometría del lecho, n_1 es el aporte relativo al grado de irregularidad del perímetro mojado del cauce, n_2 es el aporte relativo a la variación de forma y tamaño de la sección transversal del escurrimiento, n_3 el aporte relativo al efecto de las obstrucciones en el cauce, n_4 es el aporte relativo a la vegetación y m el aporte relativo a la sinuosidad y frecuencia de meandros.

La magnitud recomendada de los factores mencionados anteriormente se muestra en la Tabla 2-18, sin embargo, como se indica en la referencia técnica "*Selection and Application of Manning's Roughness Values in Two-Dimensional Hydraulic Models" (*NCHRP, 2024), en simulaciones

hidráulicas bidimensionales (2D), se deben excluir los factores n_1, n_2, n_3 y m, al ser procesos ya considerados de forma explícita en la topografía y el mallado numérico. De este modo, el valor de n se estima para distintas coberturas de suelo presentes en la zona de estudio, considerando únicamente el valor base n_0 y el aporte correspondiente al grado de vegetación n_4, resultando en $n = n_0 + n_4$.

Tabla 2-18: Parámetros para el método de Cowan. Fuente: Manual de Carreteras Vol. 3, Tabla 3.707.104.B.

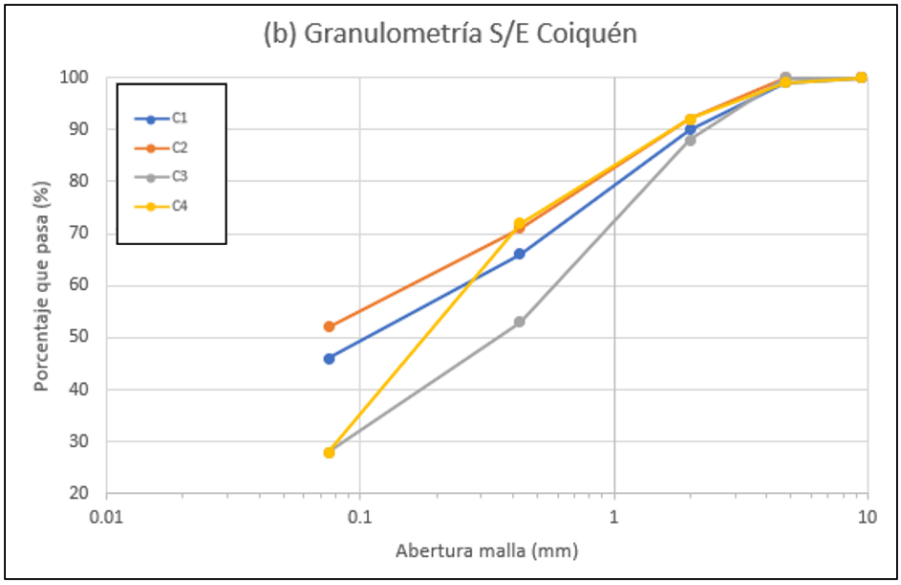
Condiciones del Canal	Descripción	Valor
Material del lecho (n_0)	Tierra	0,020
	Roca	0,025
	Grava Fina	0,024
	Grava Gruesa	0,028
Grado de Irregularidad (n_1)	Despreciable	0,000
	Leve	0,005
	Moderado	0,010
	Alto	0,020
Variaciones de Secciones Transversales (n_2)	Graduales	0,000
	Alternándose Ocasionalmente	0,005
	Alternándose Frecuentemente	0,010 - 0,015
Efecto Relativo de Obstrucciones (n_3)	Despreciable	0,000
	Leve	0,010 - 0,015
	Apreciable	0,020 - 0,030
	Alto	0,040 - 0,060
Densidad de Vegetación (n_4)	Baja	0,005 - 0,010
	Media	0,010 - 0,025
	Alta	0,025 - 0,050
	Muy Alta	0,050 - 0,100
Frecuencia de Meandros (m)	Leve	1,000
	Apreciable	1,150
	Alto	1,300

Respecto al valor de n_0, respectivo al material del lecho, durante la visita a terreno realizada el 16 de junio del 2026 se observó un material del lecho abundante en sedimentos finos (ver Figura 2-30). Por su parte, la empresa "Ingeniería Agrosonda SpA" realizó 4 calicatas en la S/E Coiquén en el marco del estudio de Suelos del Proyecto (ver **Apéndice 6 – Suelos**). En dicho trabajo, todas las muestras de suelo recolectadas en el sector se clasificaron como arenas limosas, o bien limos inorgánicos de baja plasticidad. En la Figura 2-31, se muestran las curvas granulométricas de todas las muestras, evidenciando una distribución equivalente entre las muestras.

Figura 2-30: Fotografías tomadas en terreno.



Figura 2-31: Curva granulométrica de las calicatas realizadas en la zona de estudio.



Adicionalmente, se calculó el valor de n_0 a partir de la ecuación de Strickler considerando como diámetro representativo (d) del lecho el valor de D_{90} obtenido del análisis granulométrico de las 4 calicatas. De esta forma, el n_0 máximo obtenido de las 4 calicatas es de 0,014 (ver Tabla 2-19), por lo que se termina considerando un valor más conservador de $n_0 = 0{,}02$, correspondiente a un material del lecho de tierra.

$$n_0 = \frac{d^{\frac{1}{6}}}{26{,}4}$$

Tabla 2-19: Diámetros característicos de las calicatas junto con el $n_0$calculado.

Calicata	D_{90} (mm)	n_0
C-1	2	0,013
C-2	1,85	0,013
C-3	2,46	0,014
C-4	1,84	0,013

En cuanto al valor de n_4, en la visita a terreno se evidenció que los cauces y sus planicies de inundación presentan una cobertura de vegetación heterogénea (ver Figura 2-32). De esta forma, se clasifican los tramos de los cauces y sus planicies de inundación según la densidad de vegetación en cobertura baja, media y alta, a las cuales se asocia un valor de n_4 de 0,01, 0,025 y 0,05, respectivamente.

Figura 2-32: Densidad de vegetación en la zona de estudio.



Luego, se establece un coeficiente de rugosidad referencial para el camino de tierra que atraviesa la quebrada, el hormigón del cajón del acueducto, la mampostería de piedra proyectada en la captación del acueducto y el enrocado proyectado en la descarga del acueducto en la situación proyectada, los cuales fueron obtenidos a partir de la Tabla 5-6 del libro "Hidráulica de Canales Abiertos" (Ven Te Chow, 1994). En la Tabla 2-20 se resumen los valores del coeficiente de rugosidad de Manning para cada clasificación de cobertura de suelo.

Tabla 2-20: Coeficiente de rugosidad estimado para cada tipo de cobertura de suelo.

Cobertura de Suelo	n_0	n_4	n
Vegetación Baja	0,02	0,01	0,03
Vegetación Media	0,02	0,025	0,045
Vegetación Alta	0,02	0,05	0,07
Camino de Tierra	-	-	0,025
Hormigón	-	-	0,014
Mampostería de piedra			0,025
Enrocado	-	-	0,035

Por último, se genera una capa vectorial que represente cada tipo de cobertura de suelo clasificada anteriormente para implementar el coeficiente de rugosidad de Manning n en la modelación hidráulica. En las Figura 2-33 y Figura 2-34 se presentan las clasificaciones de suelo generadas para la situación actual (SP) y la situación proyectada (CP), respectivamente.

Figura 2-33: Capa vectorial de las coberturas de suelo SP.

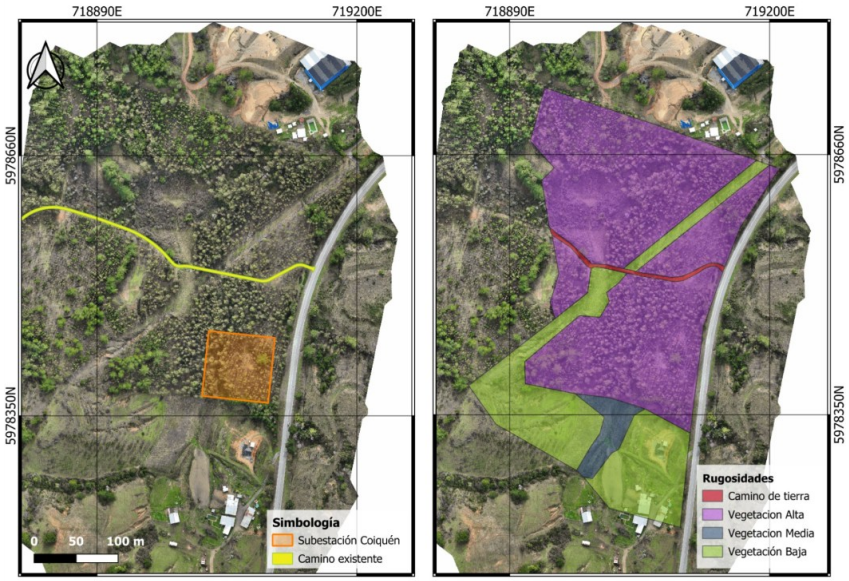
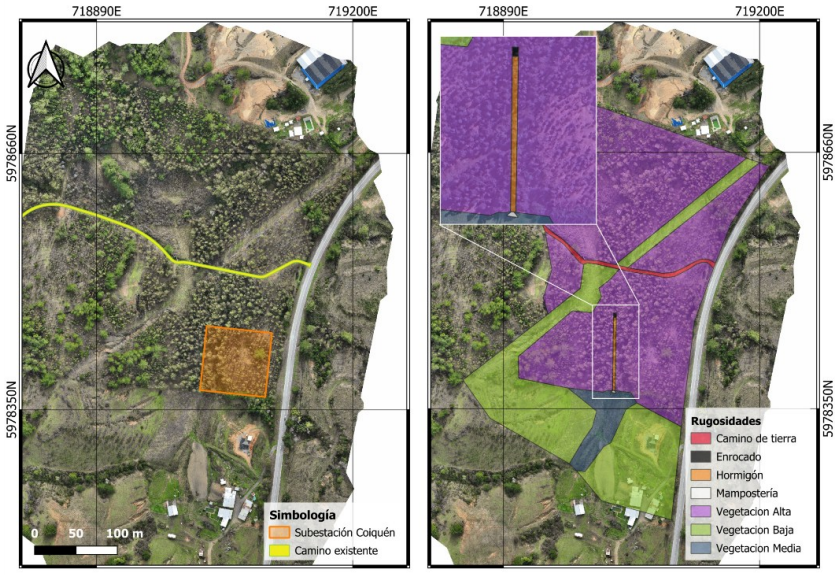


Figura 2-34: Capa vectorial de las coberturas de suelo CP.



2.2.4.1.6 Configuración del modelo numérico

Las simulaciones se basan en el conjunto de ecuaciones de Saint-Venant utilizando el método Euleriano-Lagrangiano disponible en HEC-RAS (SWE-ELM). Por otro lado, el criterio de convergencia y estabilidad sugerido por Courant-Friedrichs-Lewy impone un límite sobre el número de Courant (C). En las simulaciones realizadas, el número de Courant se limita a valores menores a 1, buscando asegurar la estabilidad y convergencia del modelo.

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

Donde:

- u: Velocidad del flujo.
- Δt: Intervalo de tiempo.
- Δx: Tamaño de la malla.

2.2.4.2 Resultados Modelación Hidráulica

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de las modelaciones hidráulicas descritas en la sección 2.2.4.1, considerando las alturas y velocidades de escurrimiento, las cotas de la superficie de agua y las condiciones del flujo. A partir de estos resultados, se verifica el cumplimiento de los criterios de diseño adoptados en la sección 2.1.2 para las obras incluidas en el presente permiso.

2.2.4.2.1 Situación Actual (SP), T = 100 años

En la Figura 2-35,

Figura 2-36 y Figura 2-37 se presentan las alturas y velocidades de escurrimiento, así como la distribución del número de Froude, obtenidas en la modelación hidráulica de la situación SP de la quebrada C3.2.7 para la crecida de diseño (T100).

En las proximidades del Proyecto, las alturas de escurrimiento en la caja del cauce se sitúan en torno a los 40 cm, alcanzando valores de hasta 80 cm en algunos sectores localizados. Por su parte, las velocidades de escurrimiento en esta misma zona presentan valores cercanos a 1,5 m/s, con máximos de hasta 2,2 m/s en sectores puntuales del cauce.

Respecto al número de Froude, los resultados muestran que, si bien el flujo presenta condiciones supercríticas en la entrada del modelo, en las proximidades del Proyecto predomina un régimen de escurrimiento subcrítico.

Figura 2-35: Alturas de escurrimiento para el escenario SP (T=100 años).

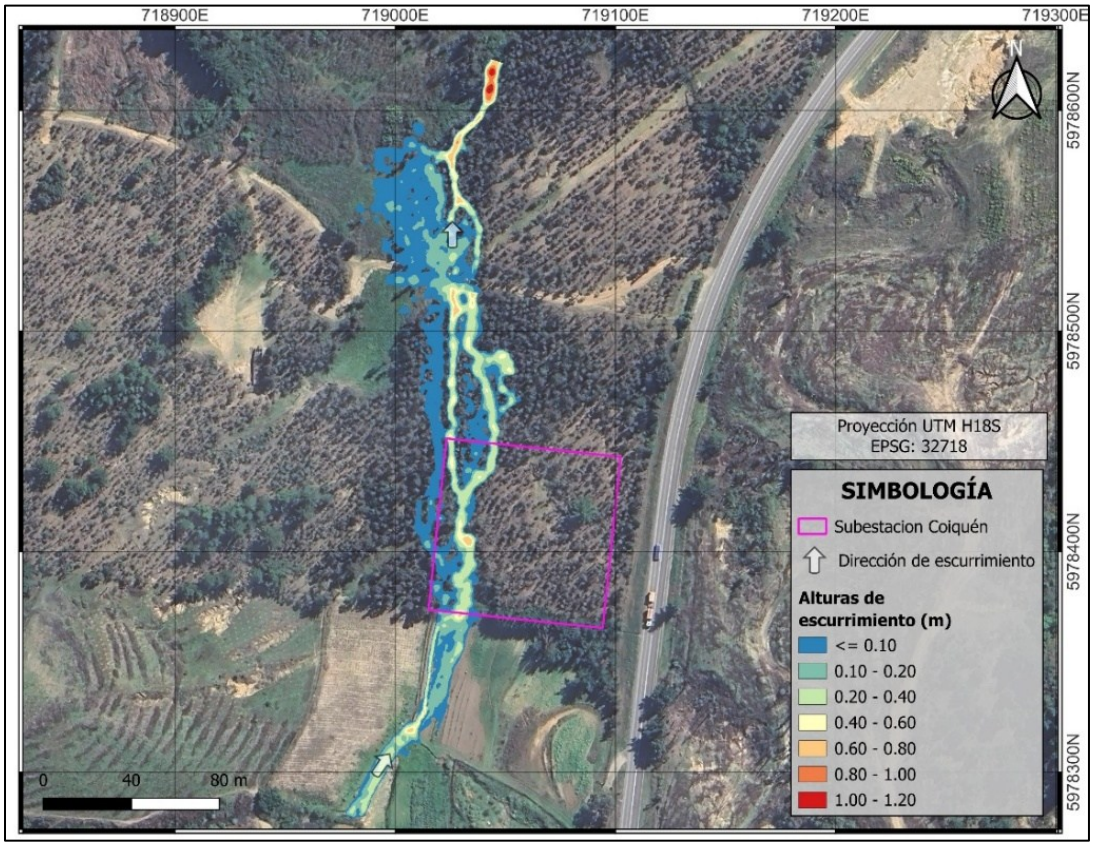


Figura 2-36: Velocidades de escurrimiento para el escenario SP (T=100 años).

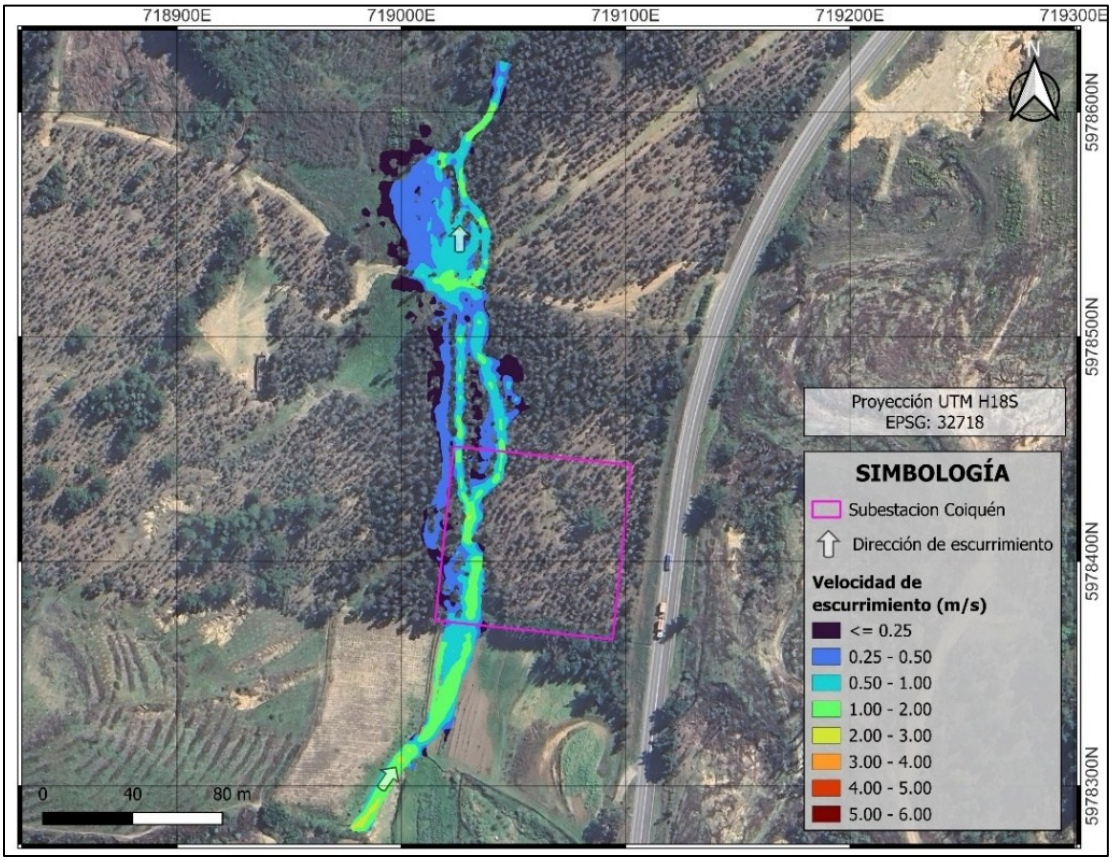
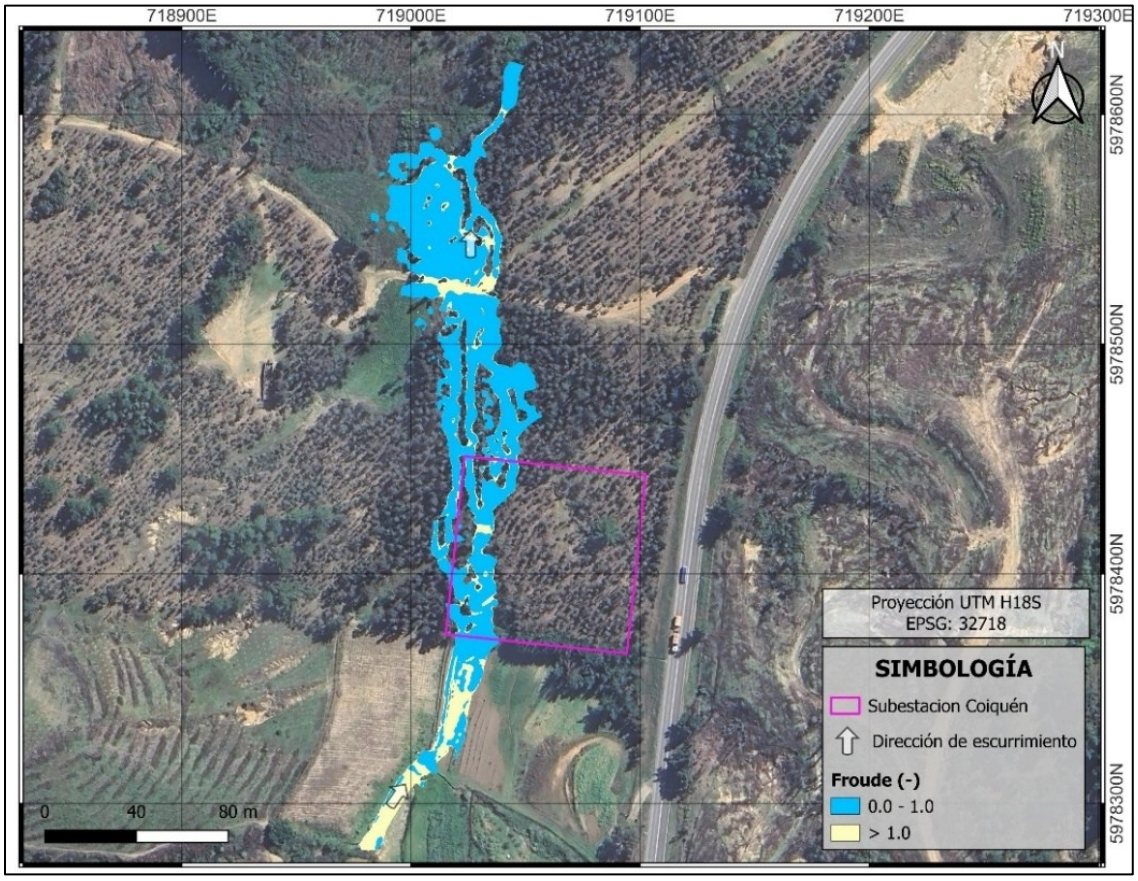


Figura 2-37: Número de Froude para el escenario SP (T=100 años).



2.2.4.2.2 Situación Proyectada (CP), T = 100 años

En la Figura 2-38, Figura 2-39 y Figura 2-40 se presentan las alturas y velocidades de escurrimiento, así como la distribución del número de Froude, obtenidas en la modelación hidráulica de la situación CP de la quebrada C3.2.7 para la crecida de diseño (T100).

En primer lugar, de manera general se mantienen las mismas condiciones de escurrimiento que la situación SP, exceptuando cambios a escala local en torno a la obra. En particular, se produce un pequeño embalsamiento del cauce, asociado al encauzamiento de la quebrada en la entrada del acueducto, que se extiende 15 m aguas arriba de la obra de captación, sin embargo, en la zona no se encuentra ningún tipo de vivienda u otro elemento que pueda verse afectado por dicha condición.

En cuanto a las alturas de escurrimiento, se observan valores de hasta 75 cm en la obra de captación del abovedamiento, los cuales disminuyen abruptamente al ingresar al acueducto, donde se registran alturas en torno a los 23 cm. En la descarga del acueducto, las alturas aumentan nuevamente, alcanzando valores de hasta 80 cm aguas abajo de la descarga.

Respecto a las velocidades de escurrimiento, se observan valores bajos (inferiores a 0,5 m/s) aguas arriba de la obra de captación, debido al embalsamiento del flujo generado por el abovedamiento. En la obra de captación, sobre la mampostería de piedra, se observan velocidades de hasta 2 m/s. Luego, al ingresar al acueducto, las velocidades aumentan significativamente alcanzando valores de hasta 5,4 m/s. Posteriormente, en la obra de descarga, las velocidades disminuyen hasta valores en torno a 1,5 m/s.

Por su parte, la distribución del número de Froude indica que el flujo presenta un régimen subcrítico en la entrada de la obra de captación. Al ingresar al acueducto, se produce una crisis debido al angostamiento de la caja del cauce, lo que produce un régimen de escurrimiento supercrítico que se mantiene a lo largo de la estructura. Finalmente, en la descarga del acueducto, particularmente en el sector del enrocado de protección, se observa la formación de un resalto libre, asociado a la transición desde el régimen supercrítico del acueducto hacia el régimen subcrítico predominante en la quebrada.

Por último, en la Figura 2-41 se presenta el perfil longitudinal del eje hidráulico a lo largo de la obra de abovedamiento, en el que se aprecia el embalsamiento del flujo aguas arriba de la obra de captación, la formación de la crisis al inicio del acueducto y el resalto hidráulico en la obra de descarga.

Figura 2-38: Alturas de escurrimiento para el escenario CP (T=100 años).

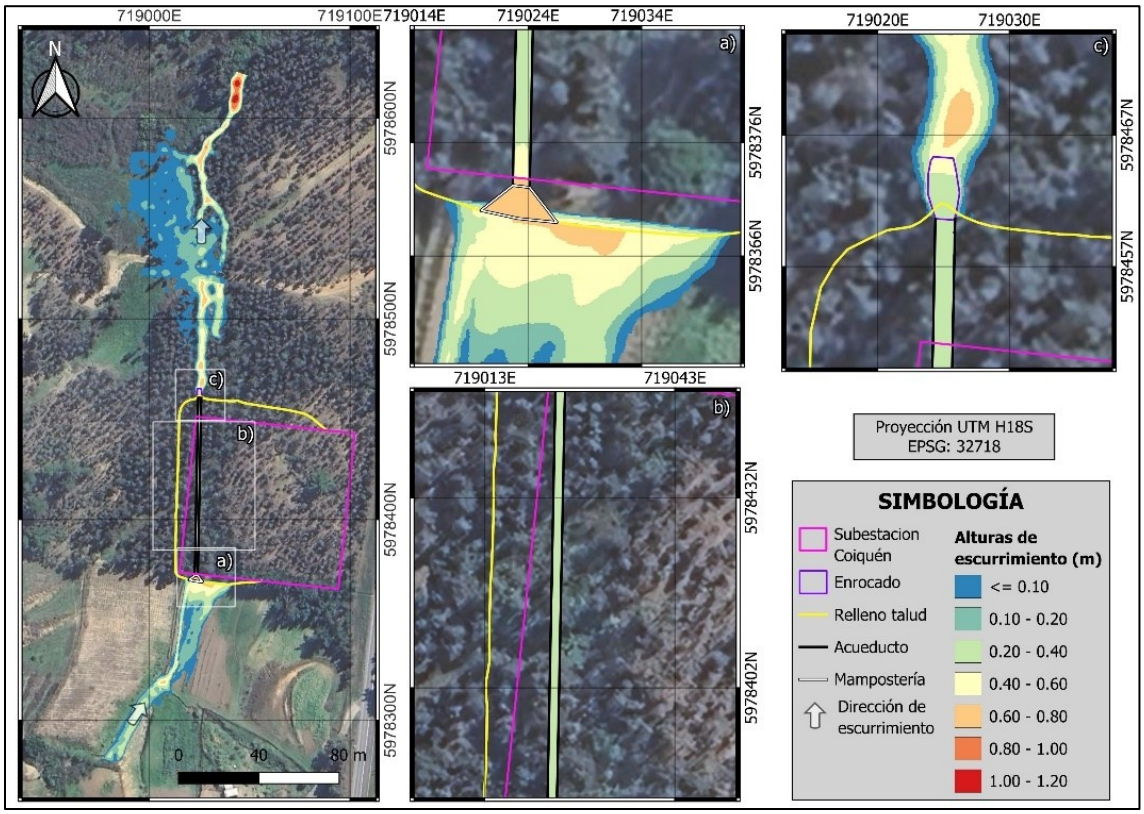


Figura 2-39: Velocidades de escurrimiento para el escenario CP (T=100 años).

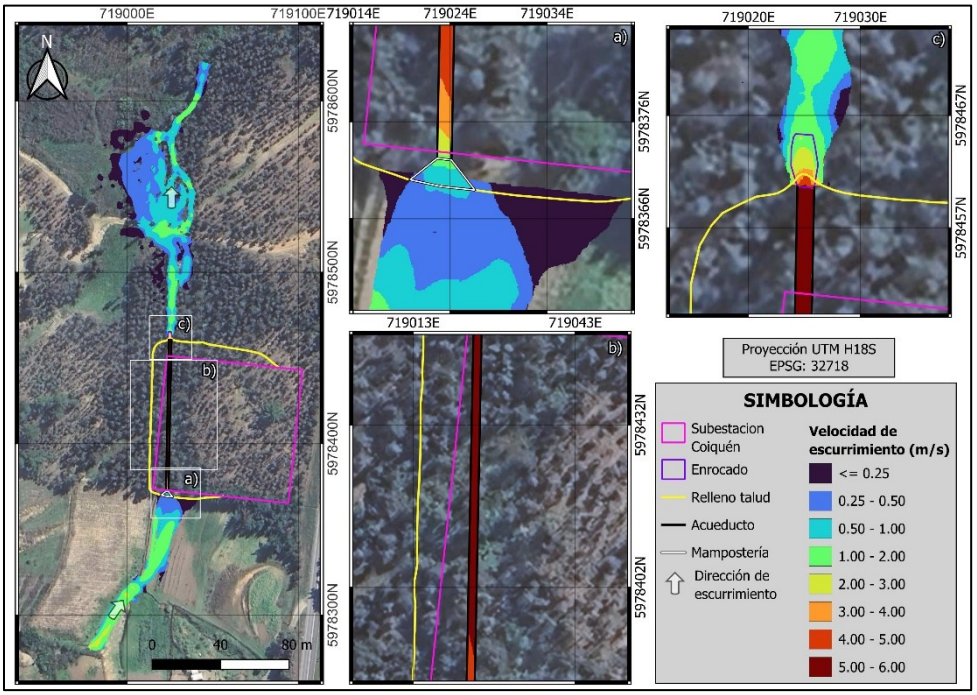


Figura 2-40: Número de Froude para el escenario CP (T=100 años).

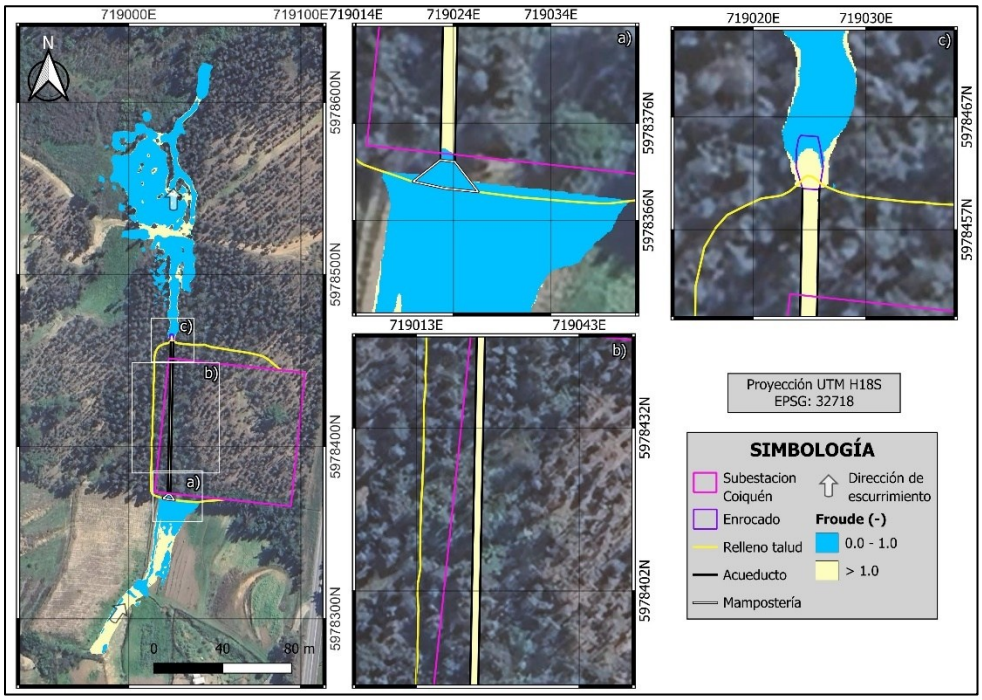
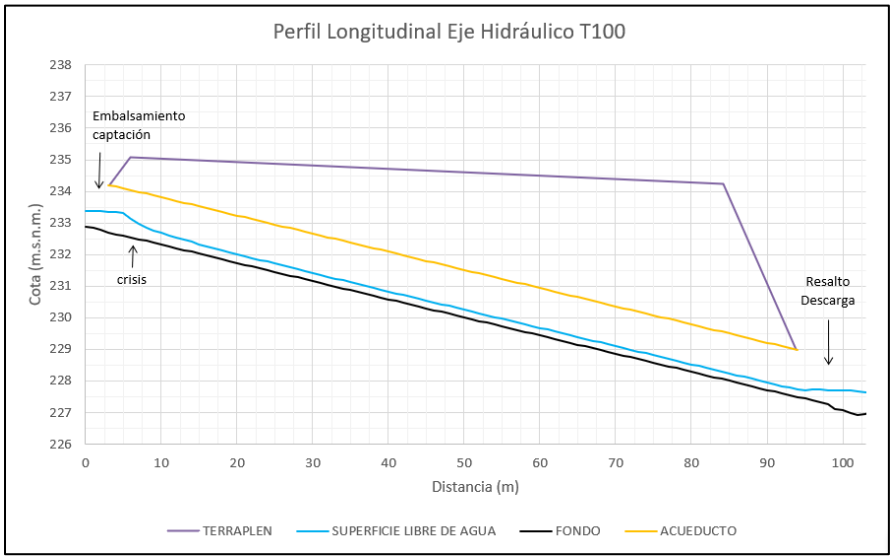


Figura 2-41: Perfil longitudinal del eje hidráulico en el acueducto para la crecida T100.



2.2.4.2.3 Situación Proyectada (CP), T = 150 años

En la Figura 2-42 y Figura 2-43 se presentan las alturas y velocidades de escurrimiento obtenidas en la modelación hidráulica de la situación CP de la quebrada C3.2.7 para la crecida de verificación (T150).

De manera general, se mantienen las condiciones del escurrimiento obtenidos para la crecida de diseño (T100), considerando el embalsamiento aguas arriba de la captación, la crisis al comienzo del acueducto y el resalto libre en la descarga. Sin embargo, se observan pequeñas variaciones en los valores de las alturas y velocidades de escurrimiento.

En cuanto a las alturas de escurrimiento, se observan valores de hasta 80 cm en la obra de captación, alturas en torno al 26 cm en el tramo del acueducto y alcanzando valores de hasta 82 cm aguas abajo de la obra de descarga. Esto indica un aumento en la altura de escurrimiento de 2 a 5 cm en las cercanías de la obra.

Respecto a las velocidades de escurrimiento, se mantienen los valores bajos (inferiores a 0,5 m/s) aguas arriba de la obra de captación. Al ingresar al acueducto, las velocidades alcanzan valores de hasta a 5,9 m/s. En particular, en el tramo del acueducto las velocidades aumentan en torno a los 0,15 m/s.

Figura 2-42: Alturas de escurrimiento para el escenario CP (T=150 años).

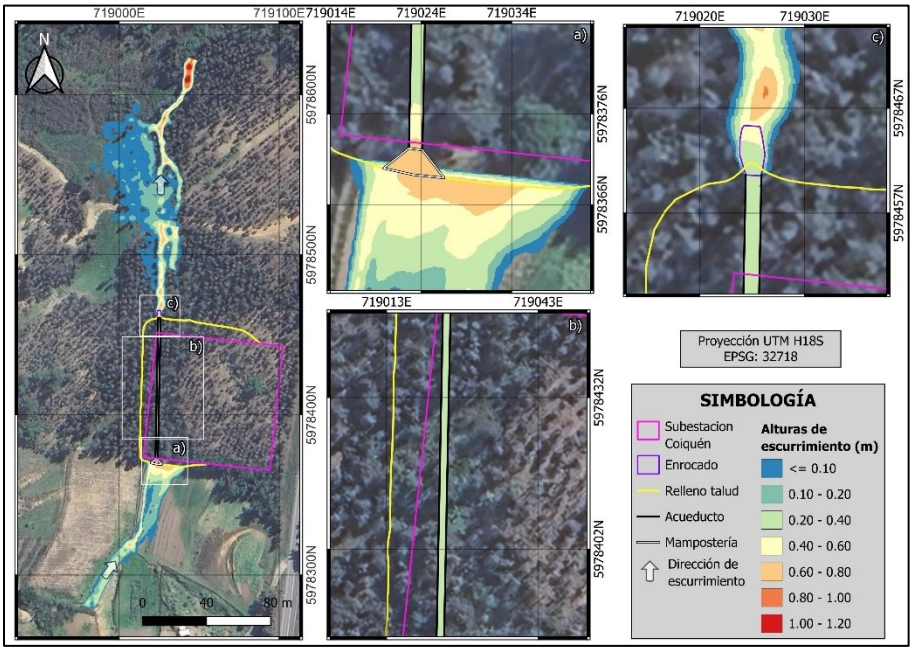
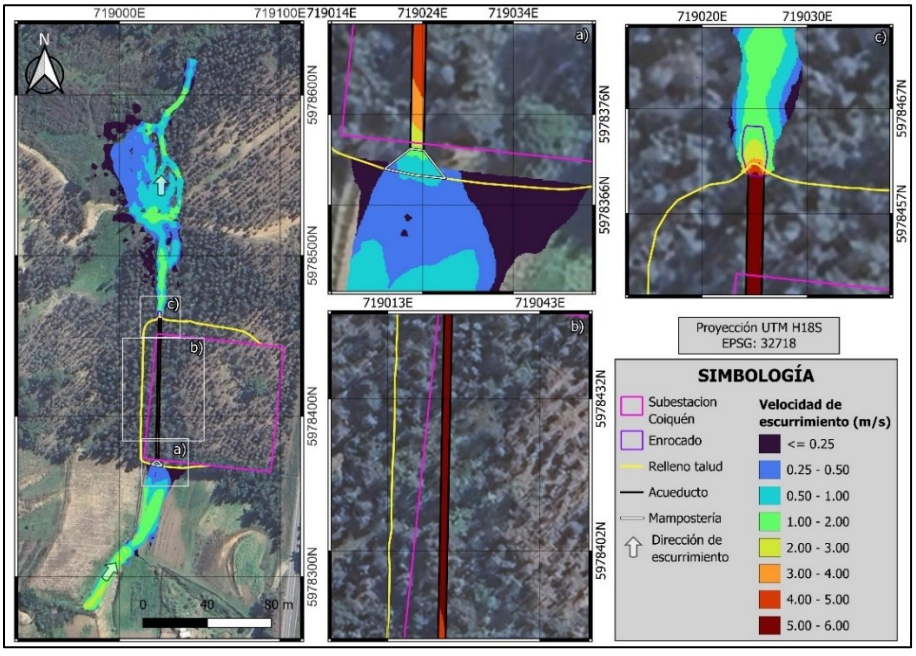


Figura 2-43: Velocidades de escurrimiento para el escenario CP, (T=150 años).



Los archivos ráster con los resultados de las modelaciones hidráulicas de diseño y verificación son presentados en el **Apéndice 5 – Resultados**.

2.2.4.3 Análisis de Socavaciones

2.2.4.3.1 Socavación General

A continuación, se presenta la estimación de la socavación general asociada a la crecida de diseño (T = 100 años) de la quebrada C3.2.7 en el dominio de estudio. Para ello, se consideraron los antecedentes del estudio de suelos realizado en la zona, los resultados de la modelación hidráulica y las ecuaciones de Lischtvan-Levediev y Neill, descritas en el Manual de Carreteras, Volumen 3.

Para caracterizar el lecho del cauce en la zona de interés, se utilizaron los antecedentes del estudio de suelos elaborado por la empresa Ingeniería Agrosonda SpA en el marco del Proyecto (ver **Apéndice F – Suelos**). Dicho estudio incluyó el análisis granulométrico de 4 calicatas, cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 2-44. A partir de este análisis, se determinaron los diámetros característicos del material presente en la zona, los cuales se presentan en la Tabla 2-21.

De las 4 calicatas realizadas en el marco del estudio de suelos, las calicatas C-1 y C-2 son de particular interés para el presente informe, ya que se ubican más cerca del lecho del cauce en estudio. Los resultados indicaron que las muestras de suelo de la calicata C-1 se clasifican como arenas limosas, mientras que las correspondientes a la calicata C-2 se clasifican como limos inorgánicos. Considerando que la muestra C-2 presenta cohesión ($c' = 7\ T/m^2$) y, por tanto, puede ofrecer una mayor resistencia a la erosión que el material predominantemente arenoso de la muestra C-1, se seleccionó esta última para el análisis de socavación general, con el propósito de representar una condición más conservadora.

Dicho esto, para la estimación de socavación general de la quebrada C3.2.7 se utilizan los métodos de Neil para sedimentos finos y Lischtvan-Levediev para sedimentos no cohesivos.

Figura 2-44: Ubicación geográfica de las calicatas.

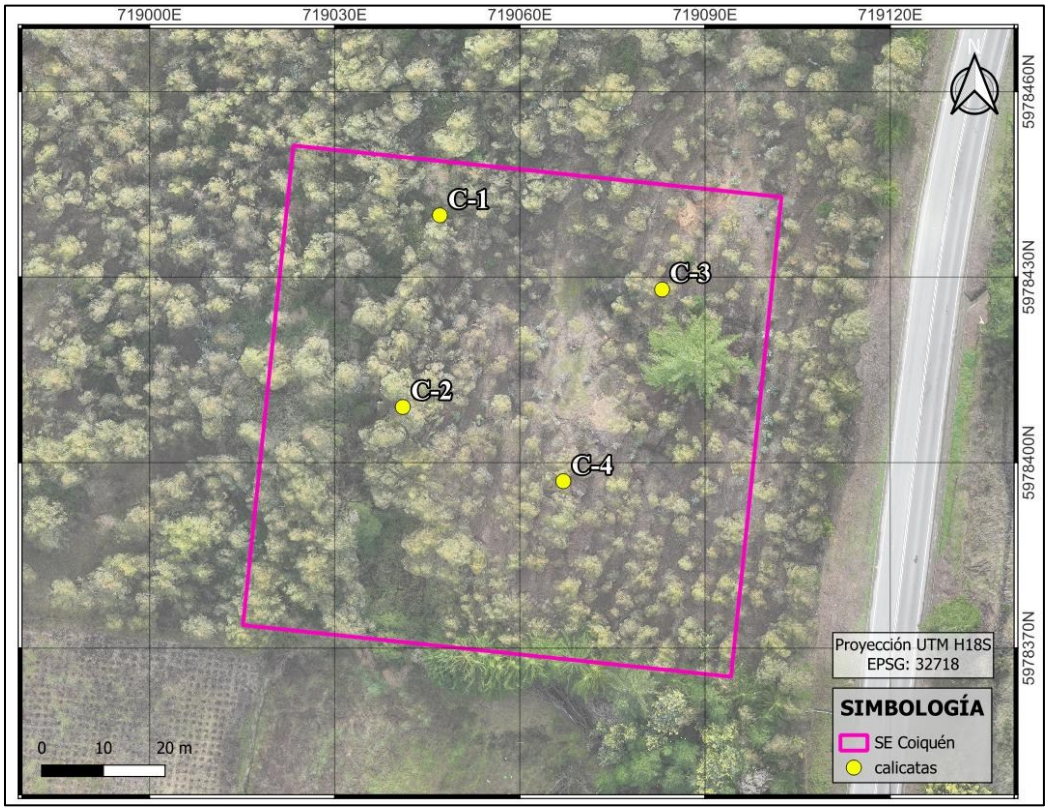


Tabla 2-21: Diámetros característicos del análisis granulométrico.

Calicata	D_{50} (mm)	D_{65} (mm)	D_{90} (mm)
C-1	0,145	0,408	2,000
C-2	<0,075	0,314	1,850
C-3	0,383	0,965	2,453
C-4	0,250	0,369	1,843

Método de Neill para sedimentos finos:

$$S_j = h_{cj} - h_j$$

$$h_{cj} \cdot Ln\left(\frac{12 \cdot h_{cj}}{k_s}\right) = \frac{q_j}{0{,}787\sqrt{g \cdot D}}$$

Donde:

- S_j: Socavación en la celda j (m).
- h_{cj}: Altura socavada en la celda j (m).
- h_j: Altura de escurrimiento en la celda sin socavar (m).

- q_j: Caudal por unidad de ancho en la celda j (m^3/s/m).
- g: Aceleración de la gravedad ($\mathrm{m/s}^2$).
- D: Diámetro representativo de los sedimentos D_{50} (mm).
- k_s: Rugosidad determinante de la pérdida de carga D_{65} (mm).
-

Método de Lischtvan-Levediev para sedimentos no cohesivos:

$$h_j = \left(\frac{q_j}{0{,}68 \cdot \beta \cdot D^{0{,}28} \cdot \psi}\right)^{\frac{1}{X+1}}$$

Donde:

- q_j: Caudal por unidad de ancho de la celda j (m^3/s/m).
- h_j: Altura de escurrimiento socavada en la celda j (m).
- β: Coeficiente en función de la probabilidad de excedencia del caudal de diseño (según Tabla 3.707.405.A del Manual de Carreteras Vol. 3)
- D: Diámetro representativo de los sedimentos D_{50} (mm).
- ψ: Coeficiente que considera la influencia del sedimento en suspensión (según Tabla 3.707.405.B del Manual de Carreteras Vol. 3).
- X: Parámetro de la fórmula de arrastre crítico (según Tabla 3.707.405.C del Manual de Carreteras Vol. 3).

Para efectos de este proyecto, se adoptó $\psi = 1{,}00$ por considerarse agua sin sedimentos en suspensión, $X = 0{,}42$ correspondiente a un $D_{50} = 0{,}145$ mm y $\beta = 1$ para el periodo de retorno de 100 años.

El cálculo de la socavación general se realiza utilizando los archivos raster de altura y velocidad de escurrimiento obtenidos de las simulaciones hidráulicas. Estos archivos se procesan mediante una rutina de Python, donde se aplican las ecuaciones de Neill y Lischtvan Levediev a cada celda del raster y se obtiene el valor de socavación máximo entre los 2 métodos utilizados distribuido espacialmente en el dominio de modelación. Para realizar este cálculo, el caudal unitario pasante por cada celda es estimado mediante la ponderación de la velocidad y la altura de escurrimiento en la misma celda.

En las Figuras Figura 2-45 y Figura 2-46 se presentan los resultados de la socavación general máxima del cauce para las situaciones SP y CP, respectivamente, asociados a la crecida de diseño (T100). Para la situación SP, los resultados indican que la socavación general en el área de emplazamiento de la SE Coiquén es inferior a 1,8 m. Por su parte, para la situación CP, la socavación general alcanza valores de hasta 2,2 m aguas abajo de la obra de descarga, mientras que aguas arriba de la obra de captación no supera los 0,94 m (ver

Tabla 2-22).

En función de lo anterior, las principales diferencias en los procesos de socavación entre ambas situaciones se concentran en el entorno del acueducto. En los sectores más alejados del acueducto,

los valores de socavación general se mantienen en un orden de magnitud similar entre las situaciones SP y CP.

Los rásters con los resultados de la máxima socavación para la situación SP y CP (T=100 años) se encuentran adjuntos en el **Apéndice 7 – Socavación** del presente informe.

Figura 2-45: Resultados de socavación general en la situación Sin Proyecto. T=100 años.

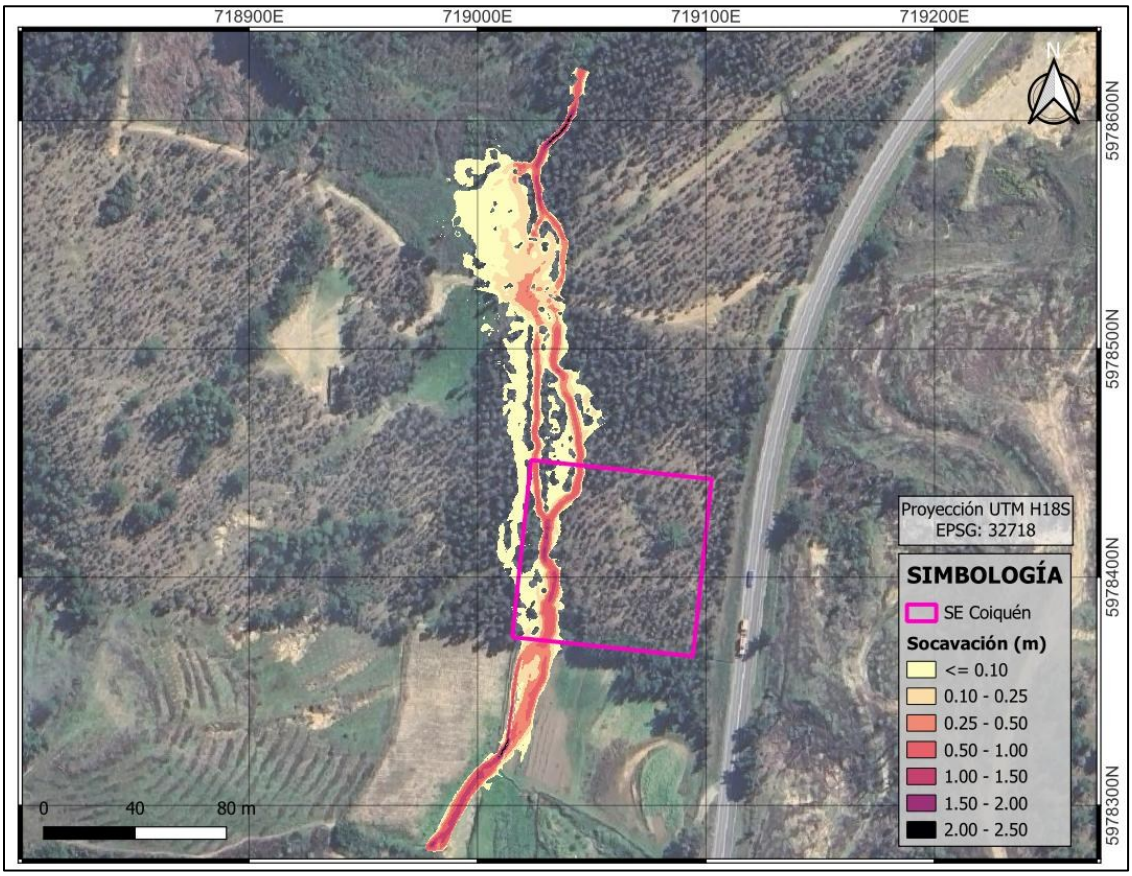


Figura 2-46: Resultados de socavación general en la situación Con Proyecto. T=100 años.

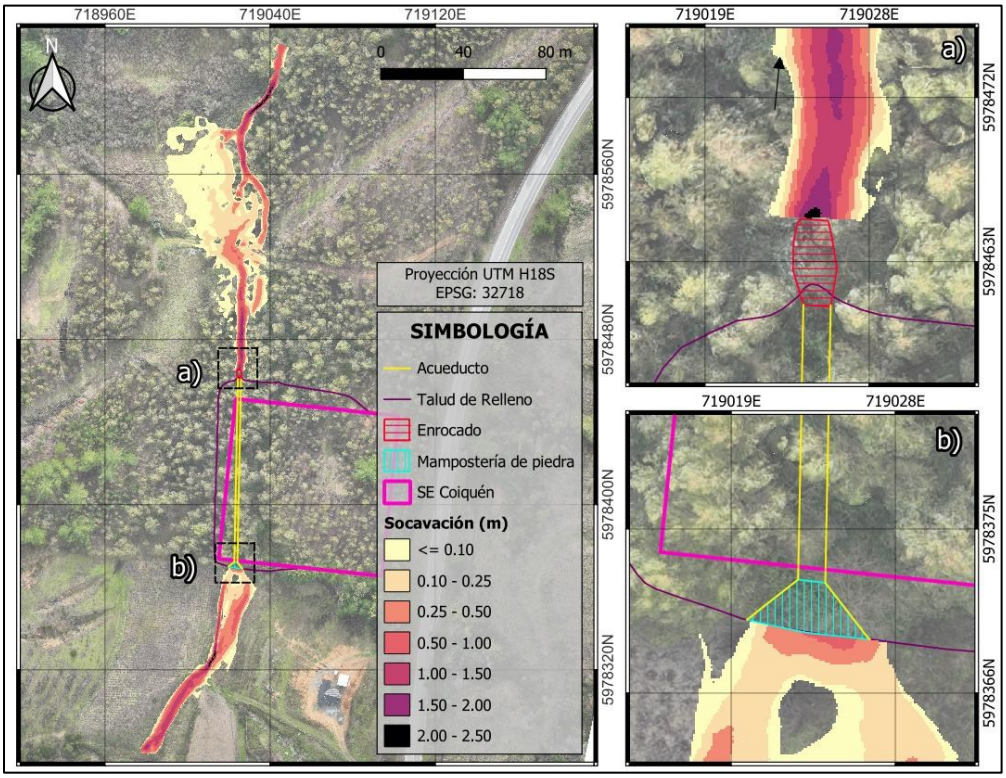


Tabla 2-22: Resultados socavación general al pie de las obras.

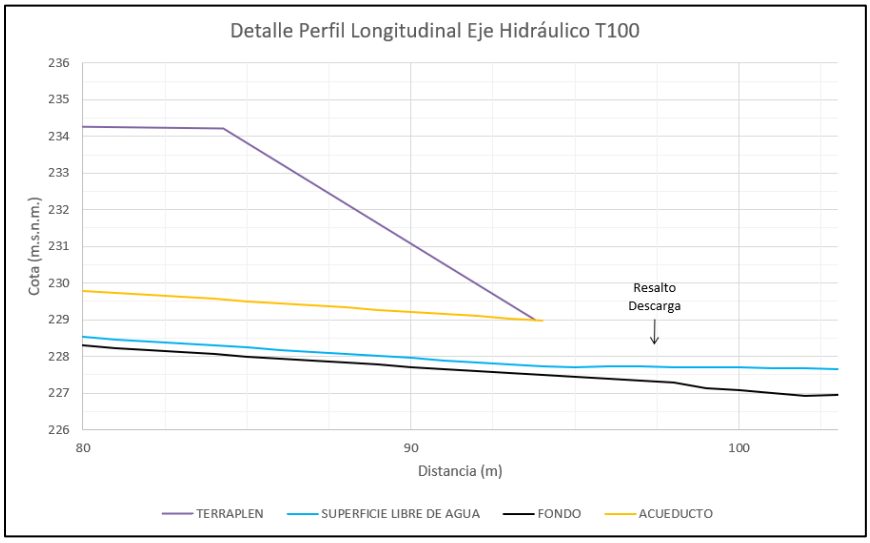
Obra	SG (m)
Mampostería de Piedra	0,94
Enrocado	2,2

2.2.4.3.2 Socavación Local

A continuación, se presenta la estimación de la socavación general asociada a la crecida de diseño (T = 100 años) al pie del enrocado dispuesto en la descarga del acueducto. Para ello, se consideraron los resultados de la modelación hidráulica y las ecuaciones de socavación al pie de radieres, descritas en el Manual de Carreteras, Volumen 3.

Tal como se comentó previamente en la sección 2.2.4.2, en la situación proyectada se observa la presencia de un resalto libre sobre el enrocado proyectado (ver Figura 2-47), el cual permite compatibilizar el escurrimiento supercrítico que se genera en el acueducto con la condición subcrítica del cauce natural aguas abajo. Es por esto que, de acuerdo con los resultados del modelo hidráulico, al pie del radier se presenta un régimen de escurrimiento de río.

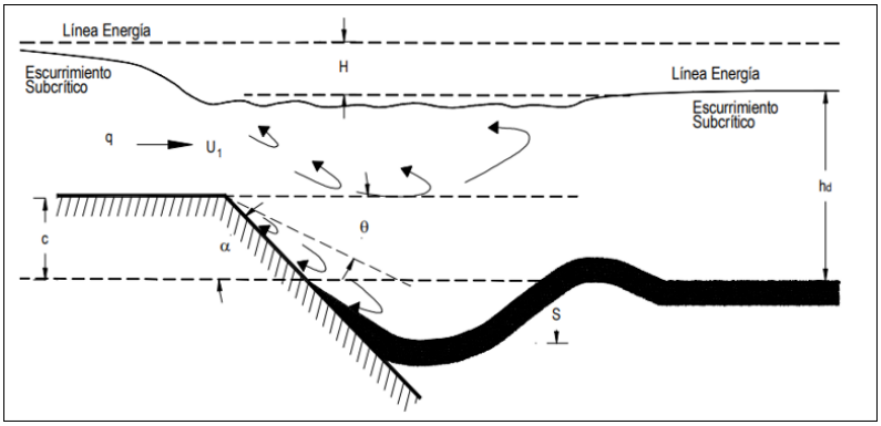
Figura 2-47: Detalle del perfil longitudinal del eje hidráulico en el acueducto para la crecida T100.



Socavación al pie de radieres producida por ríos

Los métodos utilizados para el cálculo de socavación producida por ríos corresponden a las fórmulas de Fahlbusch - Hoffmans y de Bormann y Julien, cuyas definiciones de variables se presentan en la Figura 2-48. En la Tabla 2-23 se presentan los valores utilizados para el cálculo de la socavación producida por ríos, mientras que en Tabla 2-24, se resumen los resultados obtenidos de la estimación de la socavación local al pie del enrocado. Finalmente, se escoge el valor más conservador de socavación estimado entre ambos métodos utilizados.

Figura 2-48: Esquema de la estimación de socavación local al pie de radieres producida por ríos.



Formula de Fahlbusch - Hoffmans:

$$S + h_d = \frac{6{,}4}{\lambda}\sqrt{q \cdot U_1 \cdot \sin(\theta)}$$

Formula de Bormann y Julien:

$$S + c = 3{,}19 \cdot \left(\frac{q^{0,6} \cdot U_1}{D_{90}^{0,4}}\right) \cdot \sin(\theta) \cdot \left(\frac{\sin(\phi)}{\sin(\phi + \theta)}\right)$$

Donde:

- S: Socavación al pie de radier (m).
- q_j: Caudal por unidad de ancho al término del radier (m^3/s/m).
- U_1: Velocidad al término del radier (m/s).
- D_{90}: Diámetro característico del lecho (mm).
- c: Desnivel entre el radier y el lecho (m).
- h_d: Altura de escurrimiento aguas abajo del radier (m).
- θ: Ángulo de inclinación de la napa vertiente en el borde del radier (°).
- ϕ: Ángulo de reposo de las partículas (°).
- λ: Factor de corrección para la ecuación de Fahlbusch - Hoffmans.

Tabla 2-23: Variables utilizadas para el cálculo de socavación local.

Variable	Valor
q (m^3/s/m)	1,05
U_1 (m/s)	2,1
D_{90} (mm)	2
c (m)	0
θ (°)	20
ϕ (°)	35
h_d	0,8
λ	3,7

Tabla 2-24: Resultados de socavación local al pie del enrocado.

Método	SL (m)
Bormann y Julienn	**1,25**
Fahlbusch - Hoffmans	0,7

2.2.4.3.3 Socavación Total

A continuación, en la Tabla 2-25 se exponen los resultados de socavación total, los cuales corresponden a la suma de la socavación general y socavación local de las obras de captación y descarga del acueducto.

Tabla 2-25: Resultados socavación total de las obras.

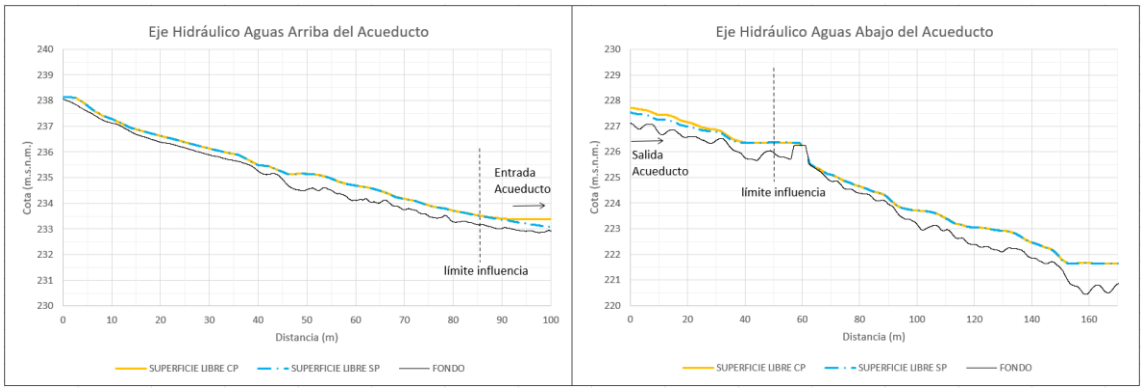
Obra	SG (m)	SL (m)	ST (m)
Mampostería de Piedra	0,94	-	0,94
Enrocado	2,2	1,25	3,45

2.2.4.4 Verificación de obras

A continuación, se verifica el diseño de las obras según los criterios adoptados en la sección 2.1.2 a partir del análisis de los resultados y de las socavaciones presentados anteriormente:

La cota de escurrimiento libre condiciona el escurrimiento hasta 15 m aguas arriba y 50 m aguas abajo (ver Figura 2-49), por lo que se concluye que la obra influencia el escurrimiento solamente de manera local, por lo que se mantienen las condiciones hidráulicas generales originales de la quebrada tras la implementación de las obras.

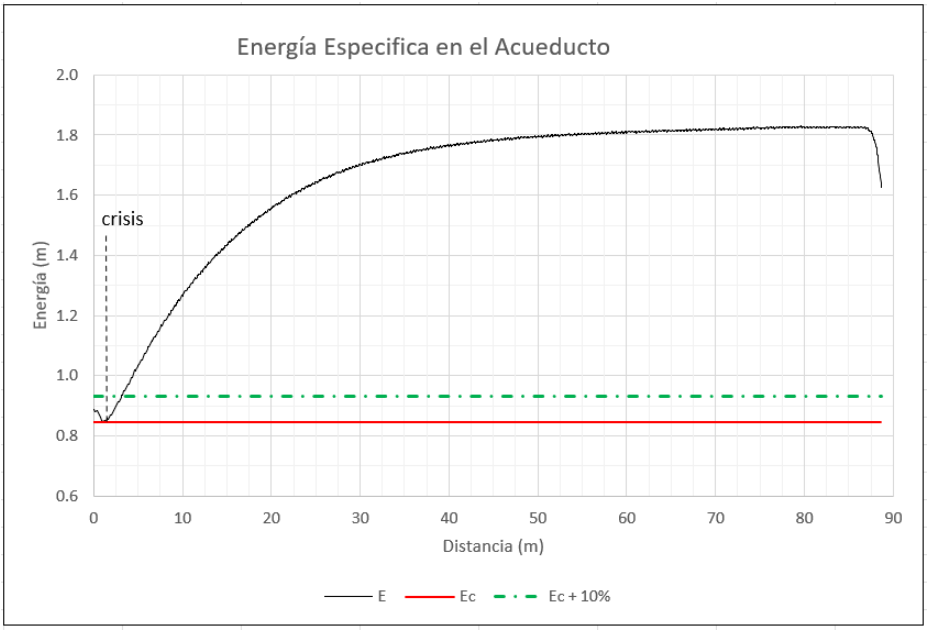
Figura 2-49: Perfiles longitudinales del eje hidráulico aguas arriba y aguas abajo del acueducto.



Si bien en la situación SP el régimen de escurrimiento de la quebrada es de río (subcrítico), no es posible mantener esta condición en la situación CP. Esto se debe a que, pese a que el acueducto mantiene la pendiente natural de la quebrada (i = 5,7 %), el angostamiento de la sección de escurrimiento y la disminución del coeficiente de rugosidad generan crisis en la entrada del acueducto, modificando el tipo de escurrimiento hacia un régimen de torrente (supercrítico) al interior del acueducto. Finalmente, en el enrocado que se dispondrá en la salida del acueducto se genera un resalto libre que modifica nuevamente el tipo de escurrimiento hacia un régimen de río (subcrítico), volviendo a la condición natural del escurrimiento en la situación actual (SP).

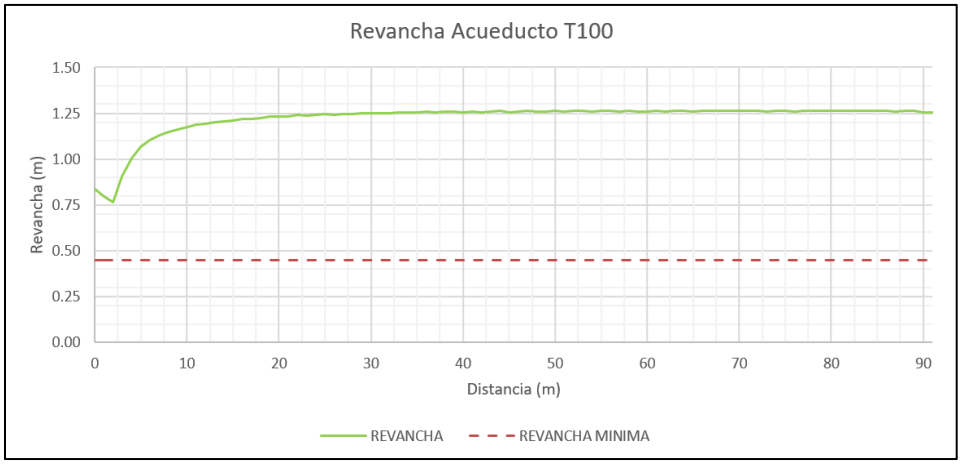
Considerando la geometría del acueducto y el caudal diseño, se obtiene una energía específica crítica (E_c) de 0,88 m. En la Figura 2-50 se presenta la distribución de la energía específica (E) a lo largo del acueducto. Se observa que esta se mantiene sobre el 10 % respecto de la energía específica crítica en la mayor parte del tramo, a excepción de los primeros 3 m, donde se produce la crisis que genera el cambio de régimen de escurrimiento de río a torrente al comienzo del acueducto.

Figura 2-50: Energía específica en el acueducto.



Para la crecida de diseño (T = 100 años), el escurrimiento al interior del acueducto se mantiene a superficie libre, sin alcanzar condiciones de flujo en presión, y cumple con la revancha mínima del 30 % de la altura del acueducto, equivalente a 0,45 m (ver Figura 2-51).

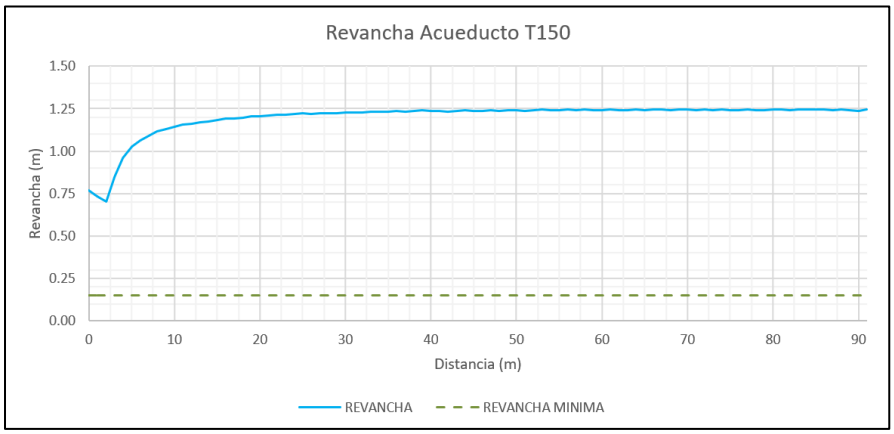
Figura 2-51: Revancha del acueducto para la crecida de diseño.



Para la crecida de verificación (T = 150 años), el escurrimiento al interior del acueducto también se mantiene a superficie libre, sin alcanzar condiciones de flujo en presión, y cumple con la revancha mínima del 10 % de la altura del acueducto, equivalente a 0,15 m (ver

Figura **2-52**).

Figura 2-52: Revancha del acueducto para la crecida de verificación.



En la Tabla 2-26, se resumen las velocidades resultantes para la crecida de diseño en el acueducto y la mampostería de piedra, donde se verifica que dichas velocidades son menores a las velocidades máximas admisibles establecidas en la sección 2.1.2.

Tabla 2-26: Verificación de la velocidad de diseño de las obras proyectadas.

Obra	$v_{diseño}$ (m/s)	v_{max} (m/s)
Mampostería de Piedra	2	4,5
Acueducto	5,4	6

En la Tabla 2-27, se resumen los valores de socavación obtenidos para la crecida de diseño al pie del enrocado y la mampostería de piedra, donde se verifica dichas socavaciones son menores o iguales a la profundidad de los dientes de fundación establecida en la sección 2.1.2.

Tabla 2-27: Verificación de la profundidad de diseño del diente de fundación de las obras de proyectadas.

Obra	ST (m)	H_{diente} (m)
Mampostería de Piedra	0,94	1
Enrocado	3,45	3,5

Para la verificación de la velocidad de diseño, se utiliza la ecuación de Isbash para enrocados trabados (Mery, 2013):

$$v_{max} = 1,2 \cdot \sqrt{2g(s-1)d_s \cos(\theta)}$$

A partir de la velocidad de diseño en la obra de descarga (5,4 m/s), se obtendrán las dimensiones del enrocado necesarias para evitar el arrastre producido por la crecida de diseño.

Según los resultados presentados en la Tabla 2-28, para la velocidad de diseño se requiere un enrocado equivalente a una masa M = 400 kg y diámetro d_s = 660 mm. Sin embargo, al considerar un enrocado consolidado, la masa de diseño puede reducirse a un tercio de la masa inicial (M* = M/3), con lo cual se obtiene un requerimiento de masa y diámetro de M*=133 kg y d_s* = 450, respectivamente.

Finalmente, el diseño del enrocado consolidado presentado en la sección 2.1.2 de masa M=200 kg y d_s = 525 mm, resulta suficiente para evitar el arrastre.

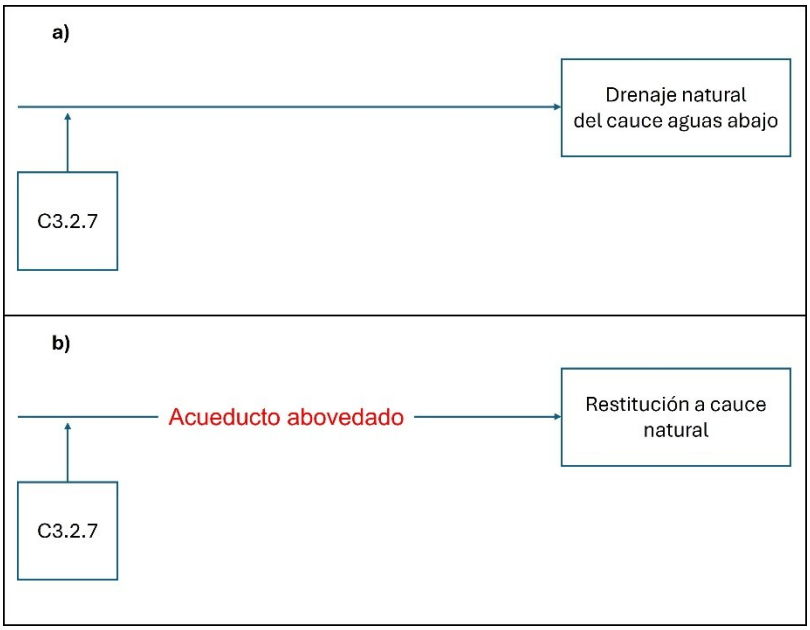
Tabla 2-28: Resultados ecuación de Isbash para enrocados.

Variables	Valores
v_{max} (m/s)	5,4
s (g/cm^3)	2,65
θ (°)	0
d_s (mm)	660
M (kg)	400
d_s* (mm)	450
M* (kg)	133

2.2.5 Balance de aguas

En este proyecto, la intervención no implica el uso consuntivo del recurso hídrico, por lo que no se prevé una alteración del ciclo estacional y natural de los cauces, sino únicamente una modificación de su trazado. La quebrada se reconoce como una depresión natural de escurrimiento eventual; por ello, la modificación de cauce asociada al acueducto se considera únicamente como sistema de evacuación de aguas lluvias, sin generar alteraciones en el balance hídrico superficial o subterráneo de la cuenca. A modo de resumen, la Figura 2-53 indica un diagrama unifilar del drenaje de la quebrada en la situación actual y con proyecto.

Figura 2-53: Diagrama unifilar del drenaje de la quebrada. a) Situación Sin Proyecto. b) Situación Con Proyecto.



2.3 ART. 155 LETRA C) ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN LA SITUACIÓN SIN PROYECTO Y CON PROYECTO.

La obra proyectada tiene por finalidad conducir las aguas lluvias provenientes de la Quebrada C3.2.7 a través de la Subestación Coiquén, para posteriormente descargarlas en la misma quebrada, aguas abajo de la subestación. En este sentido, la obra no modifica la fuente ni la naturaleza de las aguas conducidas. Además, es importante destacar que la quebrada presenta escurrimientos intermitentes.

El acueducto proyectado será construido en hormigón, material que no interactúa con la calidad de las aguas que transporta. Dado que el flujo captado corresponde exclusivamente a escorrentía natural de las quebradas mencionadas, y que no se incorporan descargas adicionales de origen antrópico, no se generan cambios en la calidad del agua respecto al escenario sin proyecto. En consecuencia, se mantiene la condición natural del recurso hídrico en ambos escenarios.

Durante la fase constructiva, se han establecido medidas específicas orientadas a evitar que las actividades de obra generen interferencias con la calidad del agua, principalmente mediante el manejo adecuado de materiales, la delimitación de áreas de trabajo y la correcta operación de la maquinaria. Asimismo, los puntos de monitoreo definidos permiten verificar, aguas arriba y aguas abajo, que la calidad del agua no se ve afectada por la ejecución del acueducto. Estas medidas y procedimientos se describen en detalle en la sección e) del presente permiso.

2.4 ART. 155 LETRA D) MEDIDAS QUE EVITEN LA CONTAMINACIÓN O ALTERACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS EN LAS FASES DEL PROYECTO.

Fase de construcción

- Se instruirá al personal en buenas prácticas ambientales, evitando la disposición de materiales, residuos, líquidos, combustibles, entre otros dentro del cauce.
- La construcción de las obras se realizará evitando perturbar el escurrimiento natural del cauce, en caso de existir.
- La maquinaria y los equipos operarán en perfecto estado de funcionamiento y con mantención al día, con el fin de evitar la caída de cualquier elemento mecánico o el derrame de cualquier elemento líquido (aceites o petróleo) al interior del cauce, que pueda posteriormente afectar la calidad de las aguas.
- El material de excavación, el suelo vegetal y los materiales de construcción se acopiarán fuera del cauce, con protección contra el arrastre por lluvia o viento. Los excedentes se dispondrán en botaderos autorizados.
- La construcción de las obras contempla la generación de residuos en su construcción, principalmente asociadas a enfierraduras, descartes de material pétreo y hormigón de los rellenos en sus fundaciones, para la cual se tendrá especial cuidado de no afectar el cauce natural, disponiendo éstos fuera del cauce.
- El área de trabajo estará delimitada y señalizada, con ingreso restringido al personal del proyecto.

Fase de operación

- Se realizarán inspecciones visuales regulares y posterior a eventos extraordinarios, con el fin de evitar que elementos extraños obstruyan o alteren el libre escurrimiento.

2.5 ART. 155 LETRA E) PLANES DE SEGUIMIENTO Y CONTINGENCIAS, INCLUYENDO PLANES DE CONTROL Y MONITOREO AMBIENTAL AGUAS ARRIBA Y AGUAS ABAJO DE LA OBRA.

Se contempla la realización del siguiente plan de seguimiento de la calidad de las aguas durante la etapa de construcción en la zona donde se realizarán las obras:

- Considerando que la quebrada analizada presenta un escurrimiento eventual, se realizará el monitoreo de calidad del agua solo ante la presencia de un escurrimiento superficial que alcance a la zona donde se proyectan las obras. Considerando que este escenario ocurrirá ante crecidas extraordinarias, se realizará un registro fotográfico del cauce durante la construcción de las obras para verificar la ausencia de un escurrimiento ante un evento de precipitación.

- Los puntos de monitoreo se ubicarán en el cauce aguas arriba de la obra y en el cauce aguas abajo de la obra. La Tabla 2-29 muestra las coordenadas de los puntos a monitorear.
- El monitoreo contempla los parámetros establecidos en la Norma Chilena N°1.333 para el uso de aguas destinadas a riego (ver Tabla 2-30), siguiendo una metodología acorde a lo estipulado en la Norma Chilena N°411.
- En caso de existir un evento de precipitación que genere un escurrimiento superficial, se emitirá un informe a la SMA que contendrá el registro fotográfico, el monitoreo realizado, los resultados de calidad de las aguas y el estado de avance de las obras. Este informe será emitido al quinto día de haber obtenido los resultados del monitoreo.
- Durante la construcción de las obras sometidas al presente permiso, se elaborará un informe con frecuencia mensual que será remitido a la SMA. El último informe se corresponderá con el término de las obras sometidas al presente permiso.
- Los reportes darán cumplimiento a lo establecido en la Resolución Exenta N°894, de 24 de junio de 2019, de la Superintendencia del Medio Ambiente, que dicta instrucciones para la elaboración y remisión de informes de seguimiento ambiental del componente ambiental agua y a los contenidos mínimos establecidos en la Resolución N°223, de 26 de marzo de 2015, de la Superintendencia del Medio Ambiente.

Tabla 2-29: Coordenadas propuestas de los puntos de monitoreo de calidad de las aguas. Coordenadas en Datum WGS84, Huso 18S.

Punto de Monitoreo	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
	Coordenadas		Coordenadas	
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)
PM1	719.015	5.978.345	719.015	5.978.492

Tabla 2-30: Parámetros de monitoreo estipulados por la Norma Chilena N°1.333.

Parámetro	Unidad de medida	Límite NCh N° 1.333
pH	-	5,5 - 9,0
Aluminio	mg/l	5
Arsénico	mg/l	0,1
Bario	mg/l	4
Berilio	mg/l	0,1
Boro	mg/l	0,75
Cadmio	mg/l	0,01
Cianuro	mg/l	0,2
Cloruro	mg/l	200
Cobalto	mg/l	0,05
Cobre	mg/l	0,2
Cromo	mg/l	0,1

Parámetro	Unidad de medida	Límite NCh N° 1.333
Fluoruro	mg/l	1
Hierro	mg/l	5
Litio	mg/l	2,5
Manganeso	mg/l	0,2
Mercurio	mg/l	0,001
Molibdeno	mg/l	0,01
Níquel	mg/l	0,2
Plata	mg/l	0,2
Plomo	mg/l	5
Selenio	mg/l	0,02
Sulfato	mg/l	250
Vanadio	mg/l	0,1
Zinc	mg/l	2
Sodio porcentual	%	35
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1000

2.6 ART. 155 LETRA F) PLANES DE PREVENCIÓN

En la presente sección se identifican los riesgos asociados a las etapas de construcción y operación de las obras, como base para la formulación del plan de prevención. Para cada riesgo se indican sus causas, los efectos que podría generar sobre las personas, la infraestructura y el medio ambiente, y las medidas definidas para abordarlo. Estas medidas se distinguen entre medidas de prevención, orientadas a reducir la probabilidad de ocurrencia del evento, y medidas de mitigación o respuesta, orientadas a reducir sus consecuencias una vez ocurrido.

En la

Tabla 2-31: se identifican los riesgos asociados durante la etapa de construcción y operación de las obras, sus consecuencias y medidas de prevención o mitigación. Por otro lado, en la Tabla 2-32 se identifican las causas, efectos y medidas de prevención ante posibles fallas de la obra.

Tabla 2-31: Identificación de Riesgos y Medidas de Prevención

Riesgo	Etapa	Consecuencias	Medidas de Prevención
Desprendimiento de Tierras	Construcción y Operación	Lesiones de personas, daños en infraestructura, socavación.	Instalaciones de faenas fuera de las áreas de riesgo de desprendimiento. En áreas de emplazamiento de obras, se adecuarán las pendientes de los cortes a las características estables del suelo. Se realizarán inspecciones regulares de cortes y terraplenes. Si es necesario, se implementarán sistemas de

Riesgo	Etapa	Consecuencias	Medidas de Prevención
			entibación y apuntalamiento, garantizando la estabilidad de las paredes de la zanja. Se activará Plan de Acción ante cualquier desprendimiento detectado.
Inundaciones	Construcción y Operación	Pérdidas de infraestructura, arrastre de materiales y elementos peligrosos como combustible.	Instalaciones de faenas fuera de las áreas expuestas a inundaciones. Diseño adecuado de las obras de manejo de aguas. Se activará Plan de Acción caso de Alerta Amarilla o Roja emitida por SENAPRED.
Sismos	Construcción y Operación	Daños a personas, pérdidas de infraestructura, colapso de alguna obra.	El diseño de ingeniería y la construcción de las obras se ajustan a normas y estándares nacionales para su adecuada resistencia ante tales eventos. Se evacuará personal. Se activará Plan de Acción ante cualquier Sismo mayor a una magnitud 5.0.
Incendios	Construcción y Operación	Daños a personas e infraestructura.	Almacenamiento de combustibles en lugar habilitados. Inspecciones durante el manejo de combustibles. Disponibilidad de elementos de amago de incendios. Capacitación de trabajadores. Se activará Plan de Acción ante cualquier detección de fuego.
Presencia de agua en excavaciones	Construcción	Daños a personas, inestabilidad de taludes y paredes de excavación, daños en infraestructura, aporte de sedimentos y contaminantes al cauce.	Revisión del nivel freático definido en el estudio geotécnico antes de iniciar las excavaciones. Programación de las excavaciones cercanas al cauce en período seco. Excavación por tramos cortos, con relleno u hormigonado en el menor plazo posible. Disponibilidad en faena de motobombas para ejecutar obras de agotamiento de napa. Inspecciones regulares de las excavaciones. Se activará Plan de Acción ante cualquier ingreso de agua que comprometa la estabilidad de la excavación o supere la capacidad de agotamiento.

Riesgo	Etapa	Consecuencias	Medidas de Prevención
Accidentes de Tránsito	Construcción y Operación	Daños a personas, infraestructura y vehículos.	Exigencia de licencias de conducir según Ley de Tránsito. Inspección del correcto estado y funcionamiento de vehículos. Implementación de señalización adecuada. Implementación de sistema de comunicaciones. Peso de camiones cargados con equipos o materiales no deberán exceder máximos permitidos. Se activará Plan de Acción ante cualquier accidente grave.
Derrame de Sustancias Peligrosas	Construcción	Daños a personas y medioambiente.	El transporte de líquidos, tales como combustibles y otros que se puedan requerir en la faena, se regirán por las disposiciones de la legislación vigente. Los conductores contarán con capacitación en el manejo y manipulación de las sustancias que trasportan. Se capacitará al personal que manipule y almacene este tipo de sustancias. El almacenamiento cumplirá con Se activará Plan de Acción ante cualquier derrame de una sustancia peligrosa.

Tabla 2-32: Identificación de Tipos de Falla de la Obra y Medidas de Prevención

Tipo de Falla	Causa	Efecto	Medidas	Observaciones
Desmoronamiento de taludes en sectores de entrada y salida del flujo a la obra	Falla de diseño o construcción.	Sobreelevación del nivel de aguas. Pérdida de capacidad.	Monitoreo permanente una vez construido el acueducto, durante los primeros meses hasta el paso de la primera crecida.	Monitoreo durante la operación según los planes de inspecciones regulares. Inspección de obra luego de evento de crecidas o sismo de magnitud importante.
Embancamiento	Falta de limpieza.	Pérdida de capacidad de la obra.	Limpiezas regulares. Verificación visual luego de eventos de crecidas.	Una de las limpiezas se realiza previo inicio de invierno.
Obstrucción con escombros	Caída de vegetación o escombros.	Desborde del acueducto,	Limpiezas regulares y verificación visual.	Una de las limpiezas se realiza previo inicio de invierno.

		pérdida de capacidad.		
Falla de estructura por sismo	Diseño inadecuado.	Pérdida de capacidad	Monitoreo regular de obras, en particular luego de un fenómeno natural.	Diseño sigue las recomendaciones del Manual de Carreteras.

Por otro lado, como parte del Plan de Prevención se consideran inspecciones regulares a la obra. Las inspecciones consideran los escenarios de riesgo y las posibles fallas identificadas en la

Tabla 2-31: y Tabla 2-32 para la obra en estudio, tanto en la construcción como en la operación.

Su objetivo es verificar en terreno que la obra funcione satisfactoriamente y detectar a tiempo cualquier anomalía que pueda derivar en una falla, de modo de aplicar las medidas correctivas antes de que afecte la capacidad de las obras o a terceros.

La frecuencia se ajustará a medida que se conozca el comportamiento de cada obra, según el siguiente esquema:

- **Construcción:** inspecciones diarias de los frentes de trabajo. Incluyen las excavaciones, los desvíos provisorios y los acopios cercanos al cauce.
- **Operación, primer año o hasta el paso de la primera crecida significativa (lo que ocurra después):** inspecciones quincenales de todas las obras. Incluyen el estado de las estructuras de hormigón.
- **Operación posterior:** inspecciones bimestrales, siempre que las inspecciones anteriores no hayan detectado anomalías recurrentes.
- **Inspecciones extraordinarias:** dentro de las 48 horas siguientes a una crecida, a precipitaciones intensas o a un sismo de magnitud importante.
- **Inspección previa al invierno:** cada año, antes del inicio de la temporada de lluvias, coordinada con la limpieza programada de las obras.

El Plan de Inspección considera lo siguiente:

- Observar los niveles de escurrimiento y verificar las revanchas (si hay presencia de agua).
- Verificar la sección y el contorno hidráulico del acueducto. Revisar el estado del revestimiento: grietas, desprendimientos, juntas abiertas y erosión.
- Verificar la estabilidad de los taludes: deslizamientos, desmoronamientos y erosión.
- Verificar que no haya acumulación de sedimentos, escombros ni basura, ni vegetación que reduzca la sección.
- Verificar el estado de la estructura de entrada y salida, junto a las obras de protección.

- Observar socavación local aguas arriba y aguas abajo de las obras de protección.

Las inspecciones serán registradas y documentadas. Se incluirá un registro fotográfico.

Por último, para evitar la alteración de la calidad de las aguas y prevenir contingencias durante la construcción y operación del acueducto, se establecen las siguientes medidas de prevención:

- **Buenas prácticas ambientales:** Se instruirá al personal sobre buenas prácticas durante la ejecución de las obras, prohibiendo la disposición de materiales, escombros, residuos o sustancias combustibles dentro del cauce de la quebrada C3.2.7.
- **Continuidad del escurrimiento:** La construcción de la obra de captación, del cajón rectangular de hormigón y de la obra de descarga se ejecutará evitando perturbar el escurrimiento natural en caso de presentarse eventos de precipitación.
- **Control de maquinarias:** Se utilizará maquinaria en perfecto estado de funcionamiento, realizando revisiones técnicas periódicas para evitar filtraciones o derrames de lubricantes, aceites o combustibles que puedan afectar la calidad del agua o del suelo.
- **Restricción de acceso:** El área de trabajo contará con cerco perimetral y acceso restringido solo a personal autorizado.

2.7 ART. 155 LETRA G) PLANES DE ACCIÓN

Una emergencia es una situación de riesgo que pone en peligro la seguridad de las personas, o que puede causar daño a la propiedad, a la obra o al medio ambiente, en particular a la calidad de las aguas de la quebrada en estudio. Puede originarse por fenómenos naturales extremos, por actividades constructivas u operativas no controladas o por acciones de terceros.

Entre las emergencias de origen natural se incluyen las precipitaciones intensas, las crecidas y los sismos de gran intensidad en la zona. Además del riesgo para las personas y la infraestructura, estos eventos pueden arrastrar hacia el cauce materiales, residuos, combustibles u otras sustancias presentes en el área de trabajo.

Las actividades constructivas u operativas también pueden generar emergencias: accidentes que afecten a las personas, fallas de equipos que causen daño a la propiedad, escapes de gases e incendios. En lo ambiental, interesan especialmente los derrames o fugas de combustibles, aceites, lubricantes u otras sustancias peligrosas, el aporte de sedimentos o escombros al cauce y cualquier otra situación que altere la calidad de las aguas de la quebrada o afecte la flora y la fauna asociadas a ella.

Por último, pueden ocurrir incidentes de carácter externo e intencional, como actos vandálicos, robos, daños a las instalaciones, actos terroristas e incendios intencionales.

Cada emergencia requerirá una serie de acciones que dependerán de su tipo y magnitud. Estas acciones serán lideradas por personal del Titular. El Plan de Acción se activará según las contingencias establecidas en la Tabla 2-31. Las emergencias que afecten el cauce se tratarán con prioridad: se contendrá el agente contaminante, se retirará el material afectado y se informará a la autoridad competente.

El aviso de una emergencia podrá ser dado por personal propio, autoridades o el sistema de control del proyecto.

En este capítulo se indican, además, las formas de controlar las emergencias que requieran atención especial, como los accidentes que afecten a las personas, los daños mayores a la propiedad y las emergencias ambientales que comprometan la calidad de las aguas.

2.7.1 Emergencia con origen natural

Emergencia por lluvias con período de retornos altos

Esta emergencia se aplica a lluvias que se produzcan en cualquier sector del proyecto, así como a otros eventos naturales como flujos de barros. Se activa cuando Senapred declara Alerta Amarilla o Roja para la comuna, o ante desbordes detectados en el cauce.

Una vez activada, se realizarán las siguientes acciones:

- Detener todas las actividades en desarrollo, en especial los trabajos dentro del cauce o cerca de él.
- Retirar del cauce y de las zonas inundables la maquinaria, los equipos, los materiales, los residuos y los combustibles, siempre que pueda hacerse de forma segura y antes de que llegue la crecida.

- Asegurar los acopios y almacenamientos de sustancias peligrosas para evitar que sean arrastrados.
- Evacuar a todo el personal de la faena de forma anticipada, por las rutas definidas. Si el personal rezagado no puede salir, se trasladará a las zonas seguras previamente identificadas, fuera del alcance de la crecida.
- Restringir la circulación vehicular y peatonal por los caminos interiores y de acceso a la faena, salvo para la evacuación y para los vehículos de emergencia.

Cuando termine el evento y se levante la alerta, se hará una inspección extraordinaria de la obra antes de reanudar las actividades. Se revisarán la estructura, las obras de entrada y salida, los taludes y las protecciones, y se verificará que no haya obstrucciones ni materiales arrastrados al cauce y obra.

Sismos

Para la prevención de accidentes, durante los sismos, el personal que participe en la construcción u operación debe estar debidamente instruido para actuar ante la ocurrencia de un sismo de gran envergadura. Se debe mantener la calma y evitar el uso de equipos mecánicos.

Una vez terminado el sismo, y siempre que se alcance el umbral de activación se deberá:

- Detener las actividades en desarrollo y reunir al personal en las zonas seguras.
- Verificar el estado de las personas y prestar primeros auxilios si es necesario.
- Controlar los elementos inestables que puedan causar daño a las personas o a la propiedad.
- Revisar los almacenamientos de combustibles y sustancias peligrosas, para detectar fugas o derrames que puedan alcanzar el cauce.
- Revisar los caminos de acceso y los cruces, y confirmar que se pueden usar sin riesgo antes de que circule el personal.
- Estar atento a posibles réplicas y evacuar al personal si las condiciones lo exigen.

Las actividades solo se reanudarán después de una inspección de la obra que confirme que no presenta daños que comprometan su estabilidad o su funcionamiento.

2.7.2 Emergencia con origen en las actividades constructivas u operacionales

Como se indicó anteriormente, las actividades constructivas u operativas pueden generar emergencias, como accidentes que afecten a las personas, fallas de equipos que causen daño a la propiedad, derrames o fugas de combustibles y otras sustancias peligrosas, escapes de gases e incendios. También puede ocurrir un ingreso de agua a las excavaciones, ya sea por el flujo subsuperficial del cauce o por filtraciones, que comprometa la estabilidad de las paredes y taludes. Por su potencial efecto sobre la calidad de las aguas, se pone especial atención a los derrames y al aporte de materiales o residuos al cauce.

Las acciones de control son similares para la mayoría de estos eventos y consisten en:

- Detener la actividad que originó la emergencia y aislar el área afectada.

- Verificar el estado de las personas, prestar primeros auxilios y, si es necesario, trasladar a los afectados al centro asistencial más cercano.
- En caso de derrame, contener de inmediato la sustancia para evitar que alcance el cauce, retirar el suelo o material contaminado y disponerlo como residuo peligroso en un sitio autorizado.
- Si el derrame alcanzó el cauce, aplicar las medidas de contención aguas abajo e informar a la autoridad competente.
- En caso de ingreso de agua a una excavación, retirar al personal de su interior, alejar la maquinaria y los acopios del borde y no reingresar hasta que el profesional a cargo verifique la estabilidad. Si el ingreso supera la capacidad de agotamiento o la estabilidad está comprometida, rellenar la excavación en forma controlada y evaluar con el especialista geotécnico un cambio en el método constructivo.
- Informar al responsable del Plan de Acción y registrar el evento, las causas identificadas y las acciones adoptadas.
- Reanudar la actividad solo una vez controlada la emergencia y corregida la causa que la originó.

2.7.3 Emergencias provocadas por actos intencionales como vandalismo

Esta categoría incluye los actos vandálicos, los robos, los daños a las instalaciones, los incendios intencionales y otras acciones de terceros que puedan poner en riesgo a las personas, la obra o el medio ambiente.

Acciones ante la ocurrencia de un acto intencional

- No enfrentar a los responsables. Informar de inmediato a Carabineros y al responsable del Plan de Acción.
- Verificar el estado de las personas y prestar primeros auxilios si es necesario.
- Evaluar los daños en las instalaciones y en la obra una vez que el área sea segura.
- Verificar si hubo derrames de combustibles o sustancias peligrosas, o vertido de residuos en el cauce. Si es así, aplicar las acciones de contención y retiro indicadas en la sección 2.7.2.
- Realizar la denuncia correspondiente y registrar el evento, los daños y las acciones adoptadas.
- Reponer o reforzar las medidas de seguridad que resultaron vulneradas.

2.7.4 Manejo general de emergencias

Ante la ocurrencia de una emergencia originada por alguno de los eventos descritos, se adoptarán las acciones generales que se indican a continuación. Su aplicación dependerá del tipo y del grado de la emergencia, por lo que no todas serán necesarias en cada caso, y se ajustarán a las condiciones específicas de la situación. Esta lista no es excluyente: según las características del evento, podrán adoptarse otras acciones que se consideren necesarias:

- Detención de las actividades que se desarrollen en ese momento;
- Demarcación y aislación de los lugares de la ocurrencia de la situación extraordinaria;
- Cierre de los caminos de acceso a las obras, por condiciones de mal tiempo;
- Avisar a las autoridades que correspondan según el tipo de emergencia, coordinándose con sus planes de emergencia. Entre ellas: Senapred, Delegación Presidencial Regional o Provincial, Municipalidad, SEREMI de Salud, DGA, Carabineros, Bomberos y, para incidentes ambientales en proyectos con RCA, la Superintendencia del Medio Ambiente.;
- Formación de un equipo técnico para dar soluciones. El Titular, proveerá los recursos técnicos y económicos necesarios, como profesionales del área de la ingeniería, de acuerdo con la naturaleza del evento;
- Realizar las inspecciones de terreno necesarias, incorporando personal propio, asesores de ingeniería, expertos en seguridad, peritos, autoridades y otro personal que se estime necesario. Incorporar los recursos necesarios, como maquinarias, equipos, mano de obra, materiales;
- Realizar todos los esfuerzos necesarios para retornar las instalaciones a su operación normal, al más breve plazo;
- Realizar todas las investigaciones que corresponda para establecer las causas inmediatas y básicas del evento;
- Realizar los mejoramientos a las obras que corresponda, para evitar repetición de la situación extraordinaria;
- Informar a quien corresponda, la materialización de las acciones que recomendó la investigación del incidente. Se incluirá los registros correspondientes;
- Cierre del incidente o situación extraordinaria.

3. BIBLIOGRAFÍA

Dirección General de Aguas. (1995). Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas. (2011). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Cauquenes. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas. (2013). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas. (2016). Guías metodológicas para la presentación y revisión técnica de proyectos de modificación de cauces naturales y artificiales. Ministerio de Obras Públicas.

Gajardo, A. (1981). Hoja Concepción-Chillán, Región del Bío-Bío [Mapa geológico, escala 1:250.000] (Mapas Geológicos Preliminares de Chile N.° 4). Instituto de Investigaciones Geológicas.

González-Bonorino, F. (1970). Series metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile central (Publicación N.° 24). Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Hervé, F., Munizaga, F., Mantovani, M., & Hervé, M. (1976). Edades Rb-Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. En Actas del 1.er Congreso Geológico Chileno (Vol. 2, pp. F19-F26). Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Liu, X., & Mahdavi Mazdeh, A. (2024). Selection and application of Manning's roughness values in two-dimensional hydraulic models (NCHRP Research Report 1077). The National Academies Press.

Mery, H. (2013). Hidráulica aplicada al diseño de obras. RIL Editores.

Ministerio de Obras Públicas. (2015). Decreto Supremo N.° 50, Aprueba reglamento a que se refiere el artículo 295 inciso 2º del Código de Aguas, estableciendo las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del referido texto legal. Diario Oficial de la República de Chile, 19 de diciembre de 2015 (modificado por decreto publicado el 15 de septiembre de 2021). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Ministerio de Obras Públicas. (2025a). Manual de carreteras: Vol. 3. Instrucciones y criterios de diseño. Dirección de Vialidad.

Ministerio de Obras Públicas. (2025b). Manual de carreteras: Vol. 4. Planos de obras tipo. Dirección de Vialidad.

Ministerio de Obras Públicas. (2025c). Manual de carreteras: Vol. 5. Especificaciones técnicas generales de construcción. Dirección de Vialidad.

Ven Te Chow, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada (1.ª ed.). McGraw-Hill. ISBN 978-958-600-171-7

4. APÉNDICES DIGITALES

APÉNDICE 1 – SIG

APÉNDICE 2 – HIDROLOGÍA

APÉNDICE 3 – MODELACIÓN HIDRÁULICA

APÉNDICE 4 – TOPOGRAFÍA

APÉNDICE 5 – RESULTADOS

APÉNDICE 6 – SUELOS

APÉNDICE 7 – SOCAVACIÓN

APÉNDICE 8 – PLANOS