INFORME DE CALIDAD DE AGUA

ESTERO MELILAHUEN

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

"SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DE LA LOCALIDAD DE LICAN RAY"

Octubre, 2026

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 5
2. OBJETIVOS 8
3. FUENTES DE INFORMACIÓN 8
4. USOS Y COSTUMBRES CATASTRADOS 8
4.1. COSTUMBRES OBSERVADAS EN CAUCE RECEPTOR 8
4.2. DERECHOS DE AGUAS DECLARADOS 9
5. Metodología 12
5.1. HIDROLOGÍA 12
5.1.1. Trabajo previo Informe Hidrológico estero Melilahuen 12
5.1.2. Cuencas de estudio 14
5.1.3. Precipitaciones medias representativas 15
5.1.4. Estimación de caudales mediante Método Directo 17
5.2. ESTUDIO CALIDAD DE AGUA 17
5.2.1. Normativa Aplicable 17
5.2.2. Cambio Climático 18
5.3. MODELACIÓN HIDRÁULICA 20
5.4. MODELO NUMÉRICO DE CALIDAD DE AGUA 21
6. RESULTADOS 22
6.1. HIDROLOGÍA 22
6.1.1. Precipitaciones medias 22
6.1.2. Caudales medios en estero Melilahuen 22
6.1.3. Caudal efluente PTAS 23
6.2. ESTUDIO CALIDAD DE AGUA 23
6.2.1. Escenarios de Modelación 24
6.2.2. Caracterización hidroquímica del cuerpo receptor 24

6.2.3. Caracterización hidroquímica del efluente 31
6.2.4. Modelo Hidráulico 32
6.2.5. Modelo Numérico de Calidad de Agua 40
7. ÁREA DE INFLUENCIA 45
8. CONCLUSIONES 47
9. REFERENCIAS 49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Derechos de aprovechamiento de agua superficial concedidos, cercanos a futura descarga PTAS 11
Tabla 5.1. Registro de aforo de caudal. 13
Tabla 5.2. Características estación fluviométrica (UTM WGS84 HUSO 19) 14
Tabla 5.3. Áreas de cuencas de interés. 15
Tabla 5.4. Características estaciones meteorológicas. 16
Tabla 5.5. Regulación normativa de calidad de agua. 18
Tabla 5.6. Caudales medios en escenario de cambio climático. 20
Tabla 6.1. Precipitaciones medias mensuales estación meteorológica "Lago Caburgua". 22
Tabla 6.2. Precipitaciones medias mensuales estación meteorológica "Lago Calafquén". 22
Tabla 6.3. Caudales medios del estero Melilahuen en el punto de descarga PTAS. 23
Tabla 6.4. Caudales de efluente PTAS. 23
Tabla 6.5. Características estación calidad de agua (UTM WGS84 HUSO 18S) 25
Tabla 6.6. Coordenadas punto de muestreo 2010, 2018, 2019 y 2020 (UTM WGS84 HUSO 18S) 26
Tabla 6.7. Coordenadas punto de muestreo año 2026 (UTM WGS84 HUSO 18S) 26
Tabla 6.8. Registro compuesto de Nitrógeno Total. 26
Tabla 6.9. Registro compuesto de Fósforo Total. 28
Tabla 6.10. Registro compuesto de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5). 29
Tabla 6.11. Registro compuesto de Sólidos Suspendidos Totales (SST). 30
Tabla 6.12. Características hidroquímicas estero Melilahuen – Línea Base 31
Tabla 6.13. Concentraciones de efluente utilizado en la modelación de calidad de agua. 31
Tabla 6.14. Factores de Cowan y rugosidad estero Melilahuen. 33

Tabla 6.15. Parámetros modelo hidráulico. 34
Tabla 6.16. Caudales modelación HEC-RAS. 36
Tabla 7.1. Resumen longitudes de estabilización 46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación general de las partes y obras del proyecto. 6
Figura 1.2. Ubicación PTAS y nueva descarga. 7
Figura 1.3. Corte del último trazado de la descarga proyectada. 7
Figura 4.1. Ubicación derechos de aprovechamiento de agua superficial 10
Figura 5.1. Distribución estaciones fluviométricas. 12
Figura 5.2. Cuencas de interés. 13
Figura 5.3. Contraste de Hidrograma estimado para estero Melilahuen versus caudal aforado. 14
Figura 5.4. Áreas tributarias de interés. 15
Figura 5.5. Ubicación estaciones meteorológicas. 16
Figura 5.6. Ubicación del Proyecto y sectorización de proyecciones de precipitación. 19
Figura 6.1. Ubicación puntos de muestreo. 25
Figura 6.2. Descarga Proyectada y Perfiles Transversales. 35
Figura 6.3. Representación tridimensional de la modelación hidráulica CP. 36
Figura 6.4. Eje hidráulico longitudinal. 37
Figura 6.5. Gráfico velocidad media. 38
Figura 6.6. Gráfico número de Froude. 40
Figura 6.7. Distribución de Concentración Nitrógeno Total. 41
Figura 6.8. Distribución de Concentración Fósforo Total. 42
Figura 6.9. Distribución de Concentración DBO_5. 43
Figura 6.10. Distribución de Concentración Sólidos Suspendidos Totales. 44
Figura 7.1. Área de Influencia calidad de agua. 47

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto "Sistema de Recolección y Tratamiento de Aguas Servidas de la localidad de Lican Ray", ubicado en la comuna de Villarrica, es sometido al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental mediante un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

El proyecto contempla la construcción y operación de un sistema de recolección, tratamiento y disposición final de las aguas servidas de la localidad de Lican Ray. Sus principales obras corresponden a un colector troncal, dos plantas elevadoras de aguas servidas (PEAS), una planta de tratamiento (PTAS) con tecnología de reactores batch secuenciales (SBR), una planta elevadora de agua tratada (PEAT) y una tubería para descargar el efluente tratado en el estero Melilahuen.

La red de alcantarillado contempla la construcción del colector troncal Cacique Puñulef, de 1.350 m de longitud. Su trazado se inicia en la intersección de las calles Hugolino Lillo y Cacique Coliñanco, y continúa por calle Cacique Coliñanco y avenida Cacique Puñulef. Las aguas servidas recolectadas serán conducidas hacia la PEAS 1. La PEAS 1 se ubicará en la intersección de las calles Cacique Carimán y Cacique Puñulef; recibirá las aguas servidas del sector oeste de Lican Ray y las impulsará hasta la PEAS 2. La PEAS 2 se ubicará en la intersección de las calles Cacique Carimán y Hugolino Lillo. Recibirá las aguas servidas provenientes del colector Cacique Carimán y de la PEAS 1, y las impulsará hasta la PTAS. Desde esta planta elevadora, la tubería de impulsión continuará por calle Cacique Carimán hasta la ruta a Coñaripe; luego se extenderá por la faja fiscal de dicha ruta hasta el acceso al camino Llantén y, finalmente, hasta el predio donde se emplazará la PTAS.

Las dos PEAS serán enterradas y estarán equipadas con filtros de carbón activado para el control de olores, además de una cámara de rejas y un canastillo para retener materiales ajenos a las aguas servidas.

La PTAS se ubicará fuera del límite urbano definido por el Plan Regulador vigente de Lican Ray. De las 2,91 ha que comprende el predio, aproximadamente 1,15 ha serán ocupadas por la infraestructura, las dependencias y las vialidades internas. La planta operará mediante un sistema de lodos activados con tecnología SBR. El efluente tratado deberá cumplir los límites establecidos en la Tabla 3 del Decreto Supremo N°90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, aplicable a las descargas de residuos líquidos en cuerpos de agua lacustres.

El efluente será descargado en el estero Melilahuen, afluente del lago Calafquén, aproximadamente 1.900 m aguas arriba de su desembocadura en el lago. Para ello se utilizará una tubería de acero de

450 mm de diámetro nominal, cuyo tramo final, de aproximadamente 24 m, se instalará enterrado y sumergido en el lecho del estero.

A continuación, se presentan figuras explicativas de lo descrito.

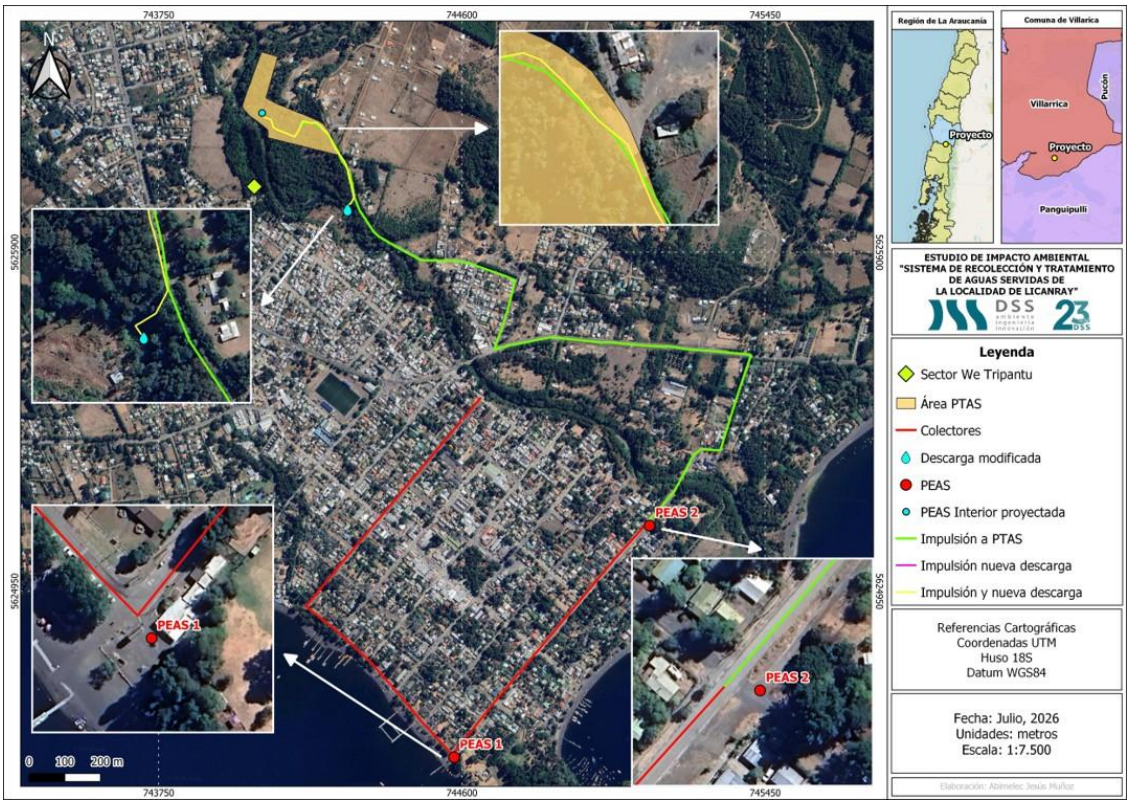


Figura 1.1. Ubicación general de las partes y obras del proyecto.
Fuente: DSS S.A.

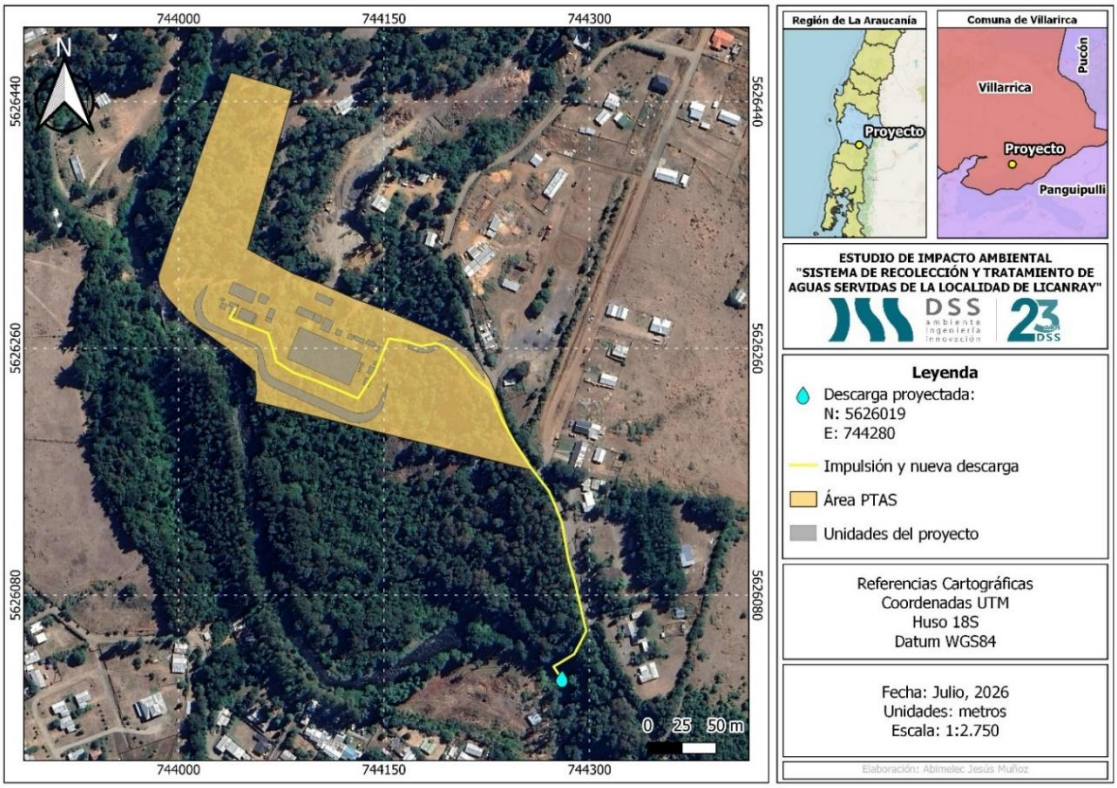


Figura 1.2. Ubicación PTAS y nueva descarga.
Fuente: DSS S.A.

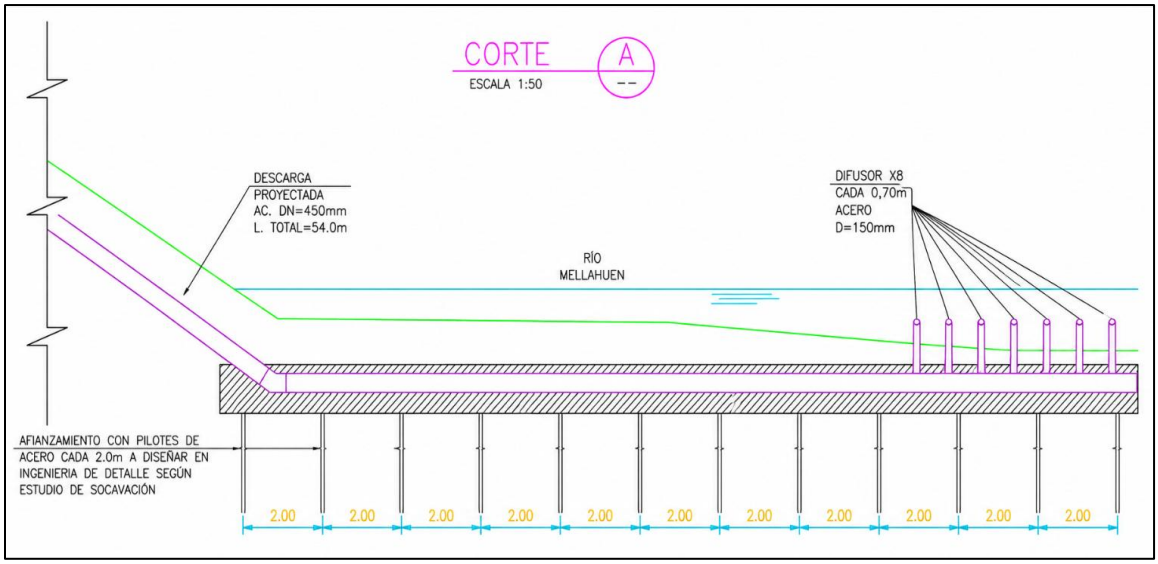


Figura 1.3. Corte del último trazado de la descarga proyectada.
Fuente: DSS S.A.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del informe es evaluar y estimar el comportamiento hidroquímico de la calidad de agua del estero Melilahuen, generada por la descarga del efluente proveniente desde la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) ubicada aproximadamente a 1,9 km aguas arriba de desembocadura del estero al lago Calafquén.

Para alcanzar el objetivo general, se determinaron los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar y revisar información relevante para el estudio, tales como, registros y estadística histórica de calidad hidroquímica, normativa aplicable y estudios de envergadura similar cercanos al estero Melilahuen.
- Caracterizar la hidroquímica típica del estero Melilahuen y la concentración proyectada para distintos escenarios hidrológicos esperables a ocurrir durante la operación de la PTAS.
- Evaluar los resultados obtenidos en contraste a normativa aplicable, línea base química del estero y guías referenciales para determinar grado de afectación sobre el cauce receptor.

3. FUENTES DE INFORMACIÓN

Durante el desarrollo del estudio se ejecutaron diferentes actividades que permitieron recopilar los antecedentes necesarios y formaron la pauta para cumplir los objetivos planteados.

El estudio de calidad de agua presentado se sustenta en la revisión de los siguientes documentos:

- Informe Catastro de usos y actividades estero Melilahuen. DSS/Aguas Araucanía (Cap. 6.3.3 de EIA).
- Informe Hidrológico estero Melilahuen DSS/Aguas Araucanía (Cap. 6.3.2 de EIA).
- Informe Hidráulico estero Melilahuen DSS/Aguas Araucanía (Cap. 6.3.4 de EIA).

4. USOS Y COSTUMBRES CATASTRADOS

4.1. Costumbres observadas en cauce receptor

De acuerdo con informe realizado y presentado en el EIA en Capítulo 6.3.3 Informe Catastro de usos y costumbres estero Melilahuen, en la visita a terreno se observó que la ribera norte se caracteriza por poseer una pendiente pronunciada que dificulta el acceso al estero. En la ribera sur ocurre una

situación similar en la topografía, pero corresponden a terrenos de privados. En ambas riberas se observó abundante vegetación bordeando la zona donde se proyecta la descarga.

De las observaciones en terreno, se detectaron como usos:

- Estética: Se considera como uso debido a que en las cercanías del estero existen viviendas y complejos turísticos donde los visitantes pudiesen acceder al estero, especialmente considerando que este es colindante a la ciudad a partir del puente Melilahuen.
- Recreación: La localidad de Lican Ray cuenta con un Club de caza y pesca, el cual realiza sus actividades principalmente en el estero y lago en una proporción desconocida.
- Vida acuática: Debido a la presencia de fauna propia del sector y desarrollo de pesca recreativa observada en terreno en el sector aguas abajo del puente Melilahuen.

4.2. Derechos de aguas declarados

Se revisaron los derechos de agua concedidos por la DGA a fecha de agosto de 2018 cercanos al punto de descarga, los cuales se mantienen a la fecha de julio 2026.

En la Figura 4.1, se presenta la distribución espacial de los puntos identificados y se observa que los derechos de agua se ubican aguas arriba de la descarga proyectada, por lo que su uso no se verá interrumpido con la incorporación de esta.

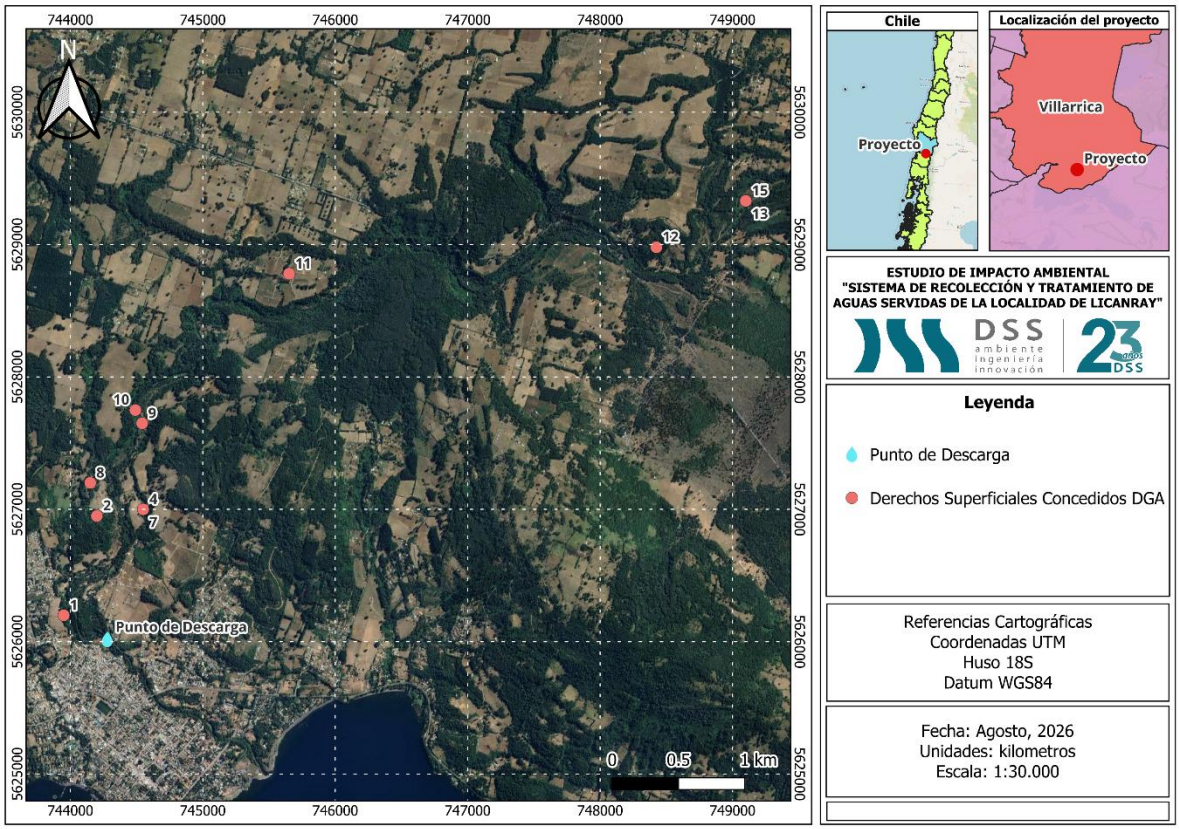


Figura 4.1. Ubicación derechos de aprovechamiento de agua superficial
Fuente: DGA

La Tabla 4.1 presenta un resumen de los derechos de aguas concedidos en la zona, identificando el nombre del solicitante, tipo de derecho, naturaleza del agua y coordenadas de la captación según lo indicado por la DGA.

Tabla 4.1. Derechos de aprovechamiento de agua superficial concedidos, cercanos a futura descarga PTAS.

N°	Código de Expediente	Nombre Solicitante	Tipo derecho	Naturaleza del agua	UTM Norte	UTM Este
1	ND-0902-5898	NORMA ESTER LONCOPAN TREULEN	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.626.200	743.950
2	ND-0902-1489	LUISA QUISULEF QUILEMPAN	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.626.950	744.200
3	ND-0902-801270	JOSE MANUEL JARAMILLO NEUMANN	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.000	744.550
4	ND-0902-801274	CLUDIO FELIPE GONZALEZ CORREA	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.000	744.550
5	ND-0902-801271	JORGE ANTONIO BENNETT URRUTIA	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.000	744.550
6	ND-0902-801269	BERNARDITA MARIA GROVE BEVEN	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.000	744.550
7	ND-0902-1062	MIGUEL ELGUETA CARRASCO	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.000	744.550
8	ND-0902-1997	LEOCADIO CIRILO ANCALEF PUNOLEF	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.200	744.150
9	ND-0902-568	AGUAS ARAUCANIA S.A.	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.650	744.542
10	ND-0902-567	AGUAS ARAUCANIA S.A.	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.627.750	744.491
11	ND-0902-5861	SUSANA ELIZABETH MANRIQUEZ GODOY	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.628.780	745.652
12	ND-0902-3334	BERNHANRD JUNNGGEBURTH	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.628.980	748.425
13	ND-0902-4879	LIDIA BERNARDA CONTRERAS GOMEZ	No Consuntivo	Superficial y Corriente	5.629.330	749.100
14	ND-0902-4879	LIDIA BERNARDA CONTRERAS GOMEZ	No Consuntivo	Superficial y Corriente	5.629.330	749.100
15	ND-0902-4879	LIDIA BERNARDA CONTRERAS GOMEZ	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.629.330	749.100
16	ND-0902-4879	LIDIA BERNARDA CONTRERAS GOMEZ	Consuntivo	Superficial y Corriente	5.629.330	749.100

Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA, 2026.

5. METODOLOGÍA

5.1. Hidrología

5.1.1. Trabajo previo Informe Hidrológico estero Melilahuen

El estero Melilahuen no cuenta con estaciones fluviométricas, por lo que para el Informe Hidrológico estero Melilahuen DSS/Aguas Araucanía (Cap. 6.3.2 de EIA), realiza un análisis de estaciones vecinas (Figura 5.1) para estimar los caudales medios requeridos a través del método de transposición.

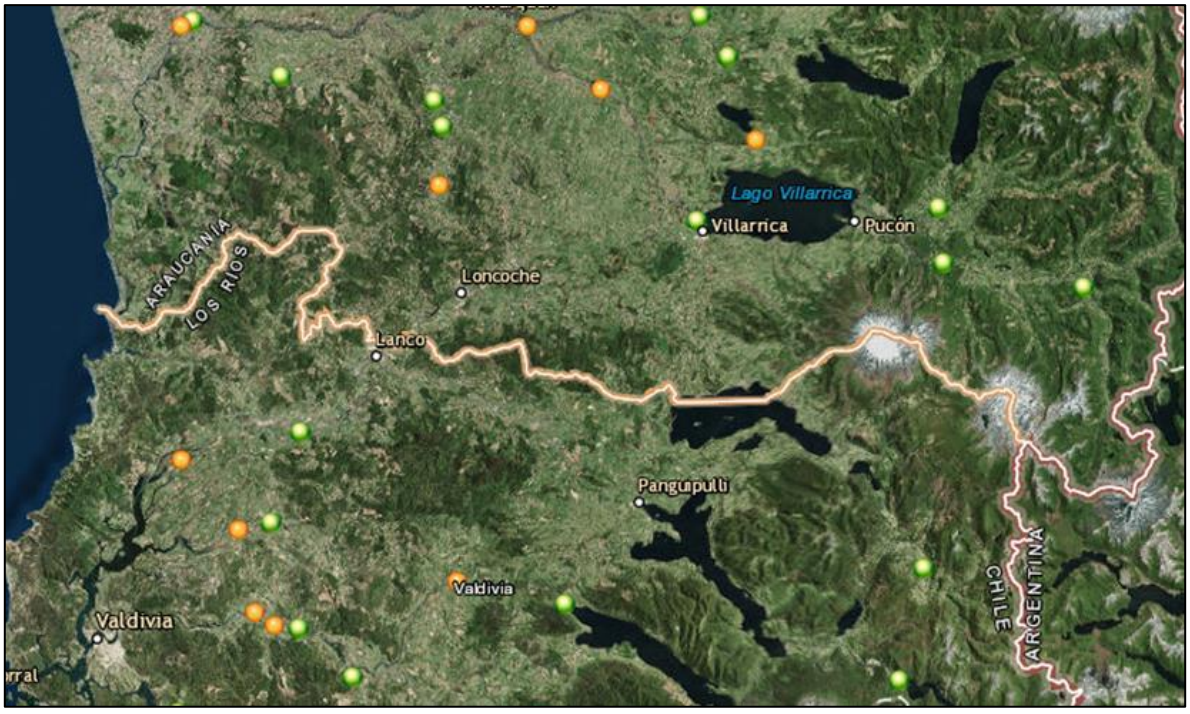


Figura 5.1. Distribución estaciones fluviométricas.
Fuente: Informe Hidrológico estero Melilahuen (Cap. 6.3.2 de EIA)

Se delimitó la cuenca asociada a los tres puntos de interés para analizar sus características geomorfológicas. Se utilizaron Modelos de Elevación Digital (DEM) generando tres cuencas de interés, cada una con su respectivo punto de control (Figura 5.2), los cuales corresponden a: punto de descarga Estero Melilahuen, estación "Río Puyehue en Quitratué" y estación "Río Liucura en Liucura".



Figura 5.2. Cuencas de interés.
Fuente: Informe Hidrológico estero Melilahuen (Cap. 6.3.2 de EIA)

Debido a que existen diferencias tanto de posición como de área aportante y precipitación promedio en las cuencas analizadas, se realizó un análisis final en que se generó una estadística de caudales aplicando el coeficiente de transposición respectivo para cada cuenca y se contrastó con registros de aforos históricos realizados en el Estero Melilahuen. Aguas Araucanía ha realizado en el tiempo cinco aforos de caudal donde se han registrado los caudales señalados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Registro de aforo de caudal.

Descripción	Fecha	Caudal (m^3/s)
Aforo 1- Campaña 2018	30-05-2018	5,04
Aforo 2 – EIA 2011 Verano	23-02-2010	1,93
Aforo 3 – EIA 2011 Otoño	13-04-2010	2,37
Aforo 4 - Registro Información	26-02-2007	1,31
Aforo 5 - Registro Información	31-01-2007	1,57

Fuente: Aguas Araucanía.

En la Figura 5.3 se presenta el contraste del caudal estimado para el estero Melilahuen según los registros de caudales medios mensuales basados en los registros fluviométricos de la estación "Río Puyehue en Quitratué" y en la estación "Río Liucura en Liucura" versus los registros históricos de caudales medidos directamente en el estero. Se observa que los caudales aforados son muy cercanos

a lo estimado de forma teórica utilizando como estación patrón "Río Liucura en Liucura", razón por la cual se escogió como representativa y se implementó para caracterizar el estero Melilahuen.

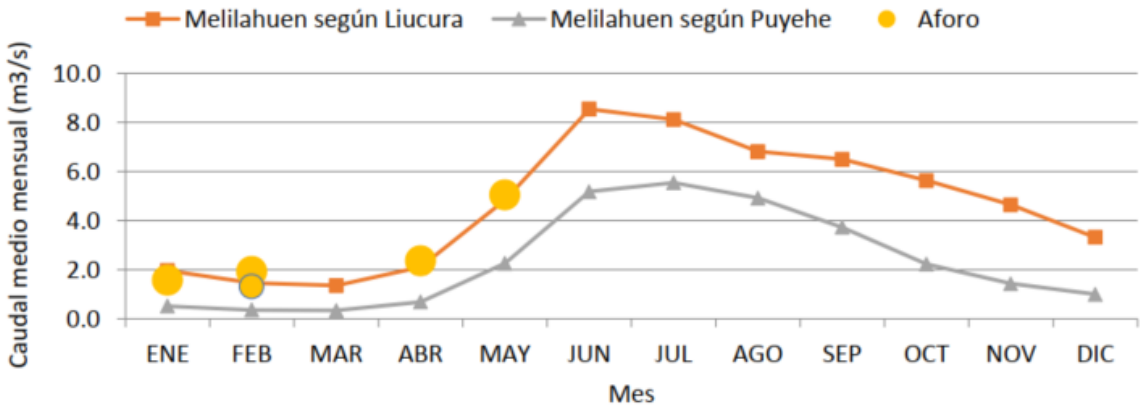


Figura 5.3. Contraste de Hidrograma estimado para estero Melilahuen versus caudal aforado.

Fuente: Informe Hidrológico estero Melilahuen (Cap. 6.3.2 de EIA)

Tabla 5.2. Características estación fluviométrica (UTM WGS84 HUSO 19)

Nombre	Institución	Código BNA	Cota (msnm)	UTM Norte	UTM Este
Río Liucura en Liucura	DGA	09416001-4	402	5.650.510	256.098

Fuente: DGA

5.1.2. Cuencas de estudio

Para determinar las cuencas del punto de descarga y la cuenca de la estación fluviométrica "Rio Liucura en Liucura" se descargó un modelo de elevación digital (DEM) correspondiente a la zona de interés desde la base de datos libre de HydroSheds. Posteriormente, se trabajó con dicho DEM a través de software de procesamiento de información geográfica para determinar las cuencas. La Figura 5.4 muestra el área aportante del estero Melilahuen en el punto de descarga, y de la cuenca asociada a la estación fluviométrica.

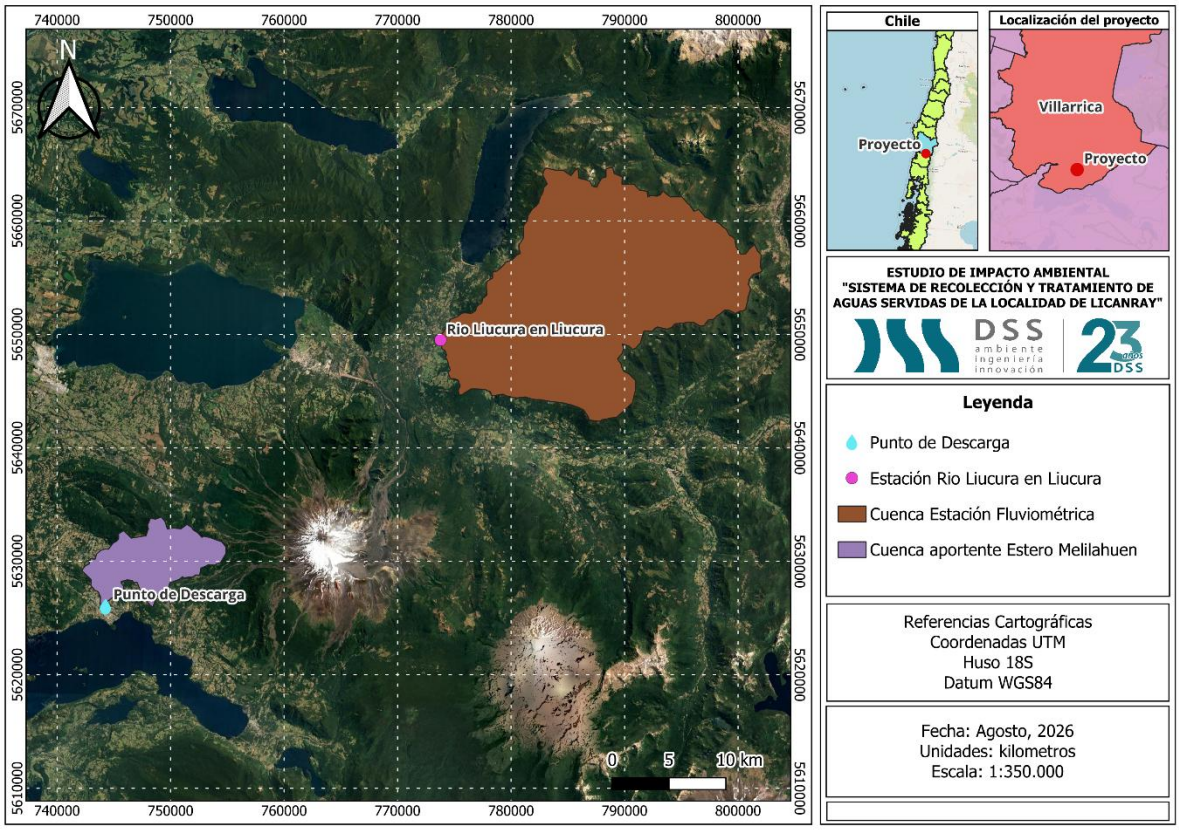


Figura 5.4. Áreas tributarias de interés.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

La Tabla 5.3 indica el área de cada cuenca de interés.

Tabla 5.3. Áreas de cuencas de interés.

Área cuenca Punto de Descarga en estero Melilahuen (km^2)	Área cuenca estación fluviométrica "Rio Liucura en Liucura" (km^2)
52,3 km^2	354,6 km^2

Fuente: Elaboración propia, 2026.

5.1.3. Precipitaciones medias representativas

Considerando lo realizado en Informe Hidrológico estero Melilahuen DSS/Aguas Araucanía (Cap. 6.3.2 de EIA), las estaciones meteorológicas utilizadas para obtener la precipitación media de cada cuenca de interés son "Lago Calafquén" representativa de la cuenca que se genera en el punto de descarga de la PTAS, y la estación "Lago Caburgua" representativa de la cuenca aportante a la estación fluviométrica "Río Liucura en Liucura".

Tabla 5.4. Características estaciones meteorológicas.

Nombre	Institución	Código BNA	UTM Norte	UTM Este
Lago Calafquén	DGA	10106002-2	5.618.836	746.258
Lago Caburgua	DGA	09417001-K	5.658.705	257.231

Fuente: DGA

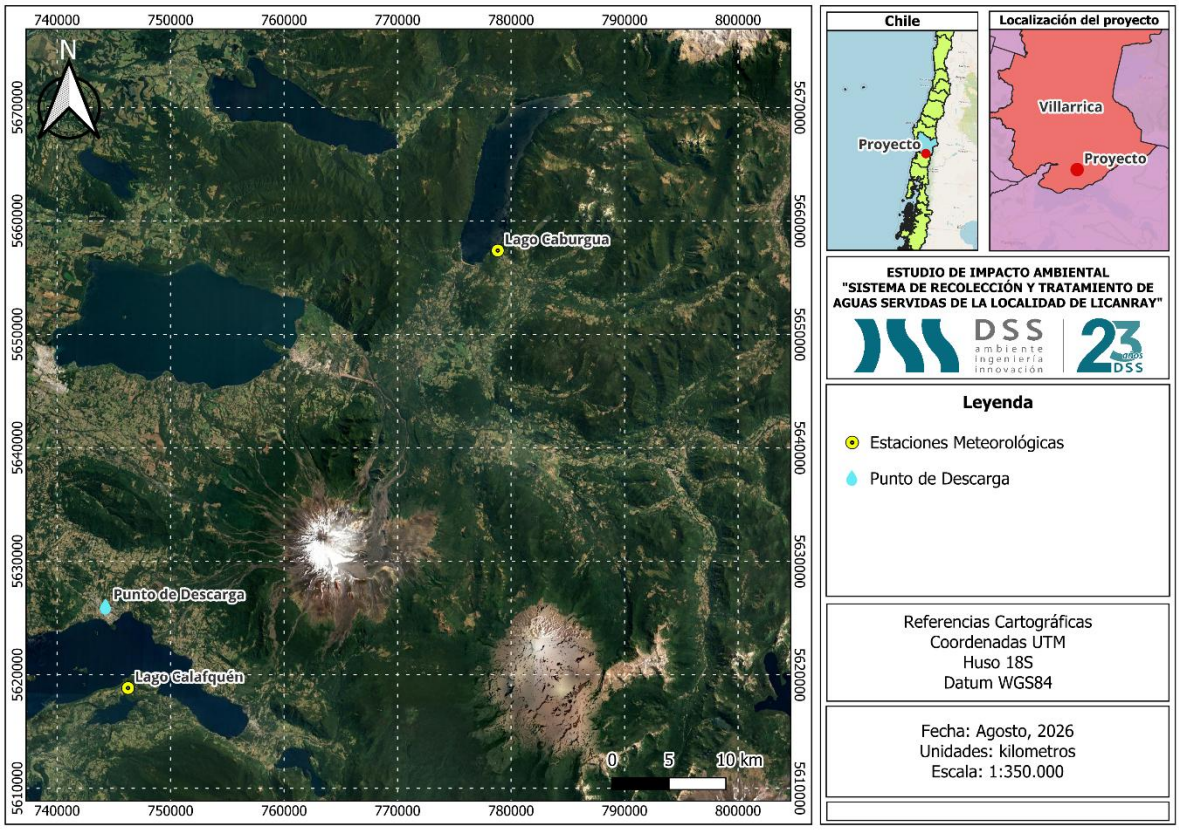


Figura 5.5. Ubicación estaciones meteorológicas.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Se realizó análisis de consistencia de las estaciones meteorológicas a través del método de doble masa acumulada concluyendo que los registros son consistentes por lo que validan su implementación en el análisis.

La estación "Lago Caburgua" no cuenta con registros en el periodo 2000-2008 por lo que, para comparar las precipitaciones promedio mensuales, se utilizó el registro en el periodo 2009-2025.

5.1.4. Estimación de caudales mediante Método Directo

El método de transposición de caudales consiste en transferir los caudales que produce una cuenca, a un punto cercano dentro de la misma o a una cuenca vecina. Para ello se deben analizar los patrones hidro-climáticos y características geomorfológicas de ambas cuencas en que se está realizando la transposición. La expresión utilizada para estimar el caudal en la zona de estudio en base a la estación fluviométrica existente es la siguiente:

$$Q_{pc} = Q_p * \left(\frac{A_{pc}}{A_p}\right) * \left(\frac{P_{pc}}{P_p}\right)$$

Donde:

Q_{pc} = Caudal estimado en el punto de control.

Q_p = Caudal conocido en la cuenca patrón.

A_{pc} = Área de drenaje de la cuenca del punto de control.

A_p = Área de drenaje de la cuenca patrón.

P_{pc} = Precipitación media en la cuenca del punto de control.

P_p = Precipitación media de la cuenca patrón.

La transposición de caudales fue aplicada para obtener los caudales medios mensuales. Se utilizó como principal fuente de información los registros de la estación fluviométrica denominada "Río Liucura en Liucura".

5.2. Estudio Calidad de Agua

5.2.1. Normativa Aplicable

Debido a las características del proyecto, se consideraron dos normativas, la primera referida a los estándares de calidad hidroquímica del agua corresponden a normativas legales que limitan la concentración de diversos parámetros en el agua, y que las convierten en aceptables para ser utilizada con determinados fines. Los objetivos de los estándares de calidad del agua son proteger la salud pública o bienestar, y realizar la calidad del agua de modo consistente con los usos designados, en este caso la NCH1333.Of78 modificada el año 1987 y la segunda que tiene relación con la norma

de emisión que debe cumplir el efluente de la PTAS, asociada a la Tabla 3 Límites máximos permitidos para la descarga de Residuos líquidos a cuerpos de agua lacustres definidos en el Decreto N°90 del MINSEGPRES.

A continuación, se exponen ambas normativas.

Tabla 5.5. Regulación normativa de calidad de agua.

Normativa	Ámbito Normativo
NCh 1333 Of.78 y Mod. 87	Requisitos de calidad de aguas para diferentes usos: Norma que regula las concentraciones permitidas en los cauces de acuerdo con las actividades que realicen en el cauce.
D.S. N°90/2000	Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Regula las concentraciones de residuos líquidos emitidos de acuerdo con el tipo de cuerpo de agua receptor. Aplica sobre efluente emitido por las PTAS.

Fuente: Elaboración propia, 2026.

5.2.2. Cambio Climático

Para cuantificar el efecto probable que tuviera el cambio climático sobre los caudales circundantes en el estero Melilahuen se siguen los lineamientos contenidos en el documento "Criterio de Evaluación en el SEIA: Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico", SEA (2023). En este documento se entregan las directrices generales para la incorporación del Cambio Climático (CC) en la evaluación ambiental de Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) y Estudios de Impacto Ambiental (EIA), según lo estableció la Ley N°21.455/2022 Marco de Cambio Climático, la cual mandata la consideración de la variable de CC en los componentes del medio ambiente que resulten pertinentes en el marco del SEIA.

En este documento se recopilaron distintos escenarios de cambio climático que son aceptados por el Panel Internacional contra el Cambio Climático (IPCC). Estos escenarios fueron procesados y en base a ellos, y los datos meteorológicos y fluviométricos disponibles a nivel nacional se configuró un mapa esquemático que contiene las posibles variaciones porcentuales de precipitación en las distintas zonas del país, este esquema se puede ver en la Figura 5.6.

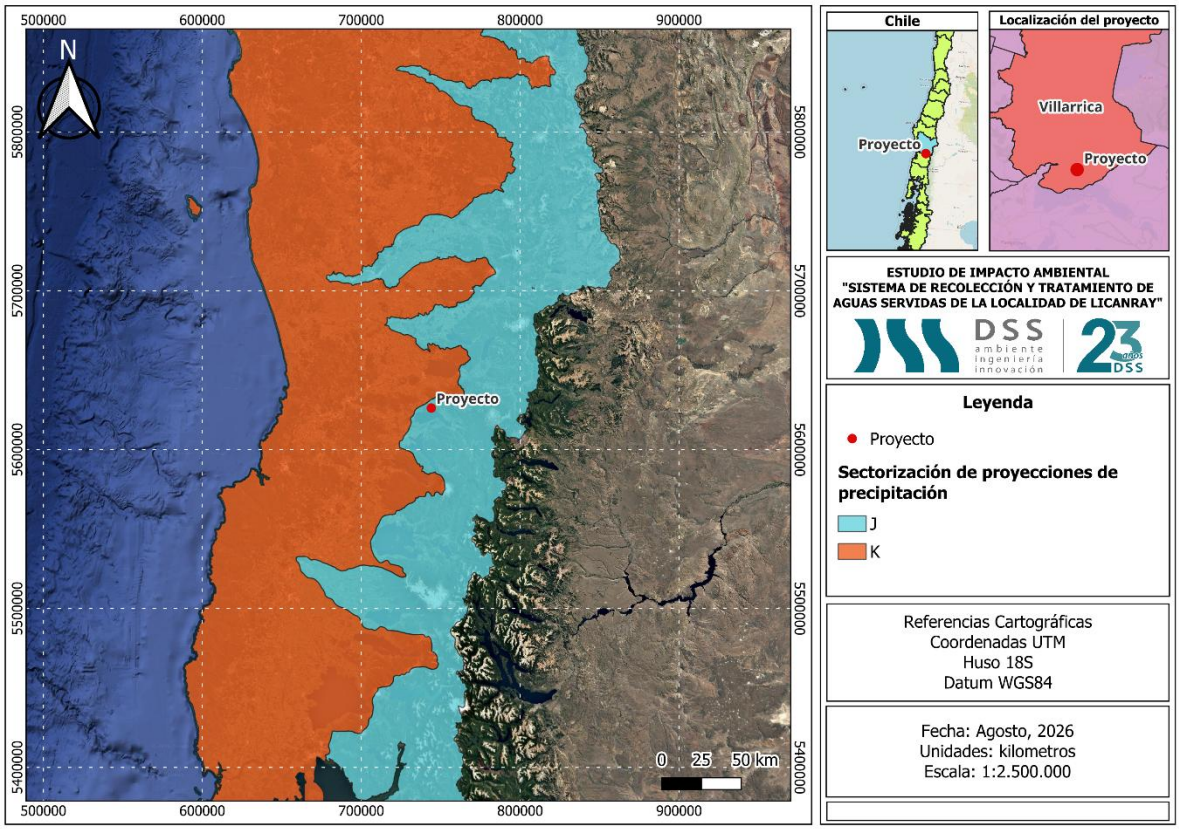


Figura 5.6. Ubicación del Proyecto y sectorización de proyecciones de precipitación.
Fuente: SEA, 2023.

En base a dicho esquema, se identifica la ubicación de proyecto en el sector J. Este sector presenta una disminución proyectada en su precipitación del 18,8% para el escenario más desfavorable p25. Estos valores son llevados de forma directa a caudal, por lo que, para efectos de este estudio los caudales son reducidos un 18,8%.

El escenario percentil 25% (p25) define un valor proyectado de menor magnitud de precipitación. En este caso corresponde al caso más desfavorable, ya que, si se desea predecir el impacto por emisión de residuos líquidos en un cauce superficial, la mayor afectación se generará para un escenario de menor caudal del cuerpo receptor.

A continuación, se presentan los caudales de modelación con la reducción aplicada de la evaluación del cambio climático.

Tabla 5.6. Caudales medios en escenario de cambio climático.

Caudal medio (m^3/s)		
Anual	**Estival**	**Invernal**
2,92	1,34	4,99

Fuente: Elaboración propia, 2026.

5.3. Modelación Hidráulica

La altura de escurrimiento en una sección transversal de un cauce puede ser determinada por la medición directa en terreno o bien a través de técnicas hidráulicas clásicas, que consideran, entre otros aspectos, las condiciones físicas del entorno, caudal, forma y características del cauce.

La caracterización hidráulica del flujo se realiza a través de la modelación del cauce con el software HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center – River Analysis System) en su versión 6.3 HEC-RAS fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, US Corp of Engineers (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/).

Al incluir el cálculo de pérdidas de carga singulares derivadas de las contracciones y expansiones del cauce, HEC-RAS permite considerar alteraciones locales a lo largo de todo el tramo en estudio. El nivel de aguas se determinó a partir del eje hidráulico, el cual se calculó considerando escurrimiento gradualmente variado en el sector de estudio. Los coeficientes de rugosidad para cada tramo del lecho se estimaron mediante el método de Cowan.

La modelación HEC-RAS del cauce requiere la caracterización de los perfiles transversales, el coeficiente de rugosidad de Manning, condición de borde y los caudales a simular. Con estas entradas HEC-RAS es capaz de simular las condiciones de flujo en el cauce deseado, entregando resultados tales como velocidad, alturas de escurrimiento, número de Froude, etc.

Si bien una de las hipótesis básicas en HEC-RAS es la unidimensionalidad del flujo, es posible representar la sección transversal caracterizándola según las planicies de inundación derecha (right over bank) e izquierda (left over bank), separadas ambas por el cauce principal (main channel). Así, cada una de dichas partes debe ser caracterizada con su valor del coeficiente de Manning y su distancia a la sección inmediatamente aguas abajo. Además, es posible obtener una aproximación unidireccional de la distribución de velocidad en el perfil transversal (análisis cuasi-bidimensional).

5.4. Modelo Numérico de Calidad de Agua

Para estimar la variación de la concentración de los compuestos no conservativos en el sentido longitudinal del río se solucionó la ecuación de Advección-Reacción implementando el software HEC-RAS en su módulo de Calidad de Agua. Este corresponde a un sistema de balances de masa dinámico para modelar el destino y transporte de compuestos en aguas superficiales.

Las ecuaciones de transporte consideradas en HEC-RAS están basadas en el principio de la conservación de masa pues se rastrea cada constituyente desde el punto de entrada espacial y temporal a su punto final de salida, conservando la masa en el espacio y el tiempo.

Estos datos de entrada, en conjunto con las ecuaciones de balance de masas generales y las ecuaciones específicas químicas cinéticas, definen un set especial de ecuaciones de calidad de agua. Estas son integradas numéricamente por HEC-RAS a medida que avanza la simulación.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_L + S_B + S_K$$

$\frac{\partial C}{\partial t}: Acumulación$

$-\frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C): Transporte\ Convectivo$

$+\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right): Transporte\ Dispersivo$

$S_K: Témino\ Fuente\ (+)\ o\ Sumidero\ (-)$

Donde,

C: Concentración del compuesto en 'mg/L',

t: El tiempo en 'días',

Ux,y,z : Velocidad advectiva longitudinal, lateral y vertical 'm/día',

Ex,y,z : Coeficiente de difusión longitudinal, lateral y vertical 'm^2/día',

SL : Tasa de carga directa y difusa 'g/m3/día',

SB : Tasa de carga en el borde 'g/m3/día',

SK : Tasa de transformación cinética total.

Para el modelo físico se asume un esquema unidimensional dividido en volúmenes finitos heterogéneos, considerando uniforme la concentración de constituyentes en la sección transversal (flujo pistón).

6. RESULTADOS

6.1. Hidrología

6.1.1. Precipitaciones medias

Las precipitaciones medias mensuales de las estaciones meteorológicas "Lago Caburgua" y "Lago Calafquén" son las que se indican en la Tabla 6.1 y Tabla 6.2, respectivamente. Estas precipitaciones son las utilizadas para el método de transposición de caudales. Como se mencionó anteriormente, debido a la disponibilidad de datos, se utilizó el registro de 2009 a 2025.

Tabla 6.1. Precipitaciones medias mensuales estación meteorológica "Lago Caburgua".

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PP media (mm)	65,49	67,61	94,92	144,31	266,29	395,15	280,25	311,93	212,15	145,23	117,28	93,58

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tabla 6.2. Precipitaciones medias mensuales estación meteorológica "Lago Calafquén".

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PP media (mm)	46,77	53,74	88,63	133,25	244,35	317,78	260,28	252,19	164,64	132,26	90,59	82,25

Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.1.2. Caudales medios en estero Melilahuen

Se estimaron los caudales medios mensuales en el punto de descarga de la PTAS, en el estero Melilahuen, mediante transposición de caudales desde la cuenca de la estación fluviométrica "Río Liucura en Liucura" considerando el factor generado por el área de las cuencas y las precipitaciones medias representativas de cada cuenca, tal como se indica en el Capítulo 5.1.4 del presente informe. La Tabla 6.3 muestra el registro de caudales medios para la cuenca del estero Melilahuen en el punto de descarga. Para el promedio estival se consideraron los meses de diciembre a febrero, mientras que, para el período invernal, los meses de junio a agosto.

Tabla 6.3. Caudales medios del estero Melilahuen en el punto de descarga PTAS.

Caudal medio (m^3/s)		
Anual	**Estival**	**Invernal**
3,59	1,65	6,15
Caudal medio con Cambio Climático (m^3/s)		
Anual	**Estival**	**Invernal**
2,92	1,34	4,99

Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.1.3. Caudal efluente PTAS

Si bien el régimen de caudales procesados por la PTAS presenta variaciones de forma estacional e incluso intradiaria, generalmente se puede deducir una expresión que representa el caudal medio de operación y que, por lo tanto, sea indicativa de los efectos de la descarga en términos medios.

De acuerdo con lo obtenido de datos de Diseño para el año 2034, el balance hídrico del afluente entregaría una entrada de caudal a la PTAS de 42,4 l/s como caudal medio de verano y 24,4 l/s como caudal medio de invierno, siendo el máximo posible para emitir el caudal asociado a la máxima capacidad de las bombas de PEAS N°2, correspondiente a 95 l/s (0,095 m^3/s), sin embargo, es un escenario extremo e improbable. De todas formas, para efectos de este informe, se considera la descarga de 95 l/s, esto con el objetivo de evaluar una situación de emergencia y contingencia.

Tabla 6.4. Caudales de efluente PTAS.

Caudal efluente (m^3/s)		
Máximo	**Verano**	**Invierno**
0,095	0,0424	0,0244

Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.2. Estudio Calidad de Agua

Para el estudio de calidad de agua se consideró la definición de línea base del cauce y, posteriormente, el análisis de la magnitud del efecto generado por la descarga proyectada. Para esto, se caracterizó la hidroquímica del cauce receptor y del efluente. Adicionalmente debido a los usos definidos en el estero Melilahuen, se compara con la NCh 1333 Of. 78 y Mod. 87 de Requisitos de Calidad de Aguas para Diferentes Usos.

6.2.1. Escenarios de Modelación

En base a lo anterior, y para la posterior modelación de calidad de agua, se consideraron los siguientes escenarios bajo cambio climático:

- Escenario Estival: considera el caudal medio estival 1,34 m^3/s del estero Melilahuen, y caudal efluente de verano de 0,0424 m^3/s.
- Escenario Invernal: considera el caudal medio invernal 4,99 m^3/s del estero Melilahuen y caudal efluente de invierno de 0,0244 m^3/s.
- Escenario Máximo: considera el caudal medio estival 1,34 m^3/s del estero Melilahuen, y caudal efluente capacidad máxima de 0,095 m^3/s.

6.2.2. Caracterización hidroquímica del cuerpo receptor

Para observar adecuadamente los efectos del efluente tratado de la PTAS Lican Ray proyectada, en la calidad de agua del estero Melilahuen se definieron las características previas a la condición con descarga activa, es decir, las características actuales de calidad, lo cual se denominó Línea Base o Sin Proyecto.

Se realizó la revisión de los registros históricos y actualización de cada compuesto, para esto se incorporó la información proveniente de distintas fuentes, incluyendo:

- Dirección General de Aguas, registro histórico de estación de calidad de agua "Río Melilahuen en Lago Calafquén" en el período 1997-2009.
- Levantamiento en terreno febrero 2010, laboratorio Hidrolab.
- Levantamiento en terreno abril 2010, laboratorio Hidrolab.
- Levantamiento en terreno junio 2018, laboratorio Aquagestion.
- Levantamiento en terreno julio 2019, laboratorio ANAM.
- Levantamiento en terreno agosto 2019, laboratorio ANAM.
- Levantamiento en terreno septiembre 2019, laboratorio ANAM.
- Levantamiento en terreno enero 2020, laboratorio ERA Sustentable.
- Levantamiento en terreno abril 2026, laboratorio ANAM.
- Levantamiento en terreno junio 2026, laboratorio ANAM.

Debido a que las características de la línea base buscan reflejar las condiciones de las aguas del estero y que estas varían a lo largo del año según las características de la cuenca, del clima, del suelo, entre otras, para reflejar estas variaciones se realizó una separación de los datos, de manera

de contar con una base de datos de periodo seco (representativa de la situación del estero en periodo de verano), y en periodo de lluvias (que representa las condiciones del estero en periodo de abundancia de agua).

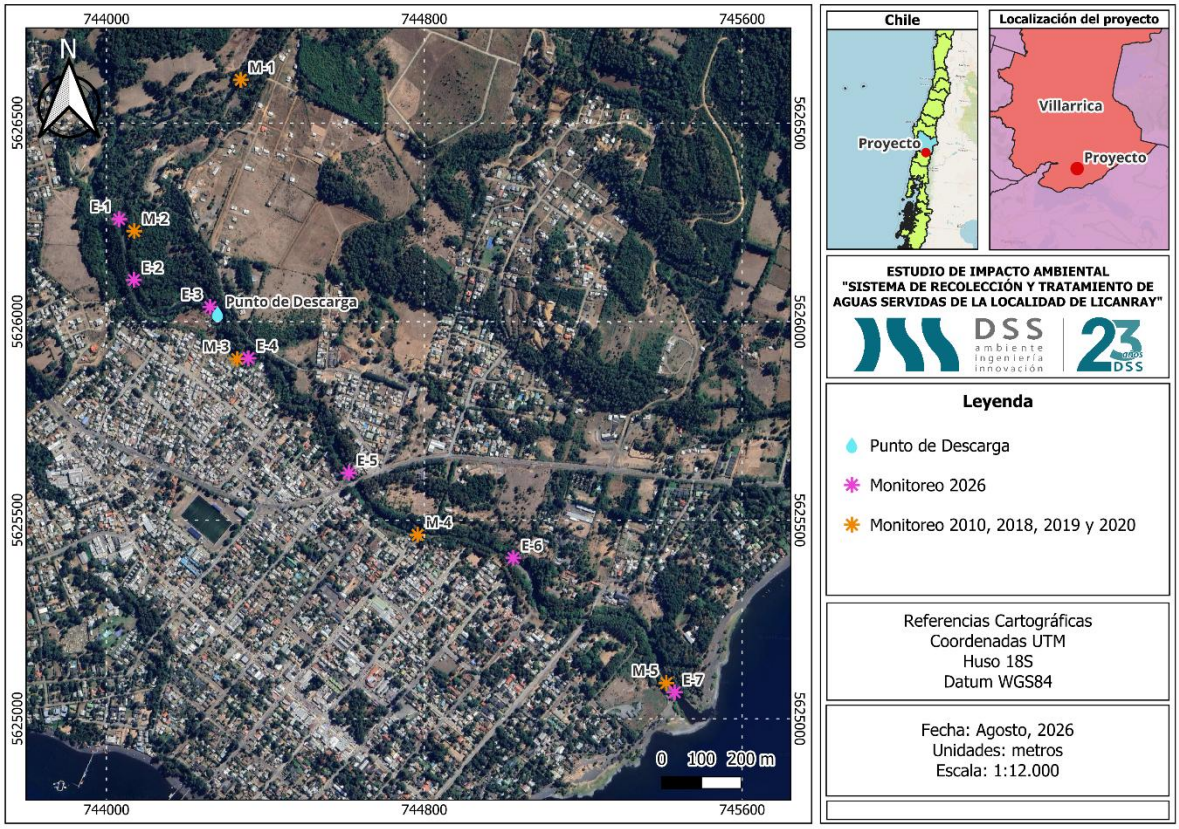


Figura 6.1. Ubicación puntos de muestreo.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tabla 6.5. Características estación calidad de agua (UTM WGS84 HUSO 18S)

Nombre	Institución	Código BNA	Norte	Este
Rio Melilahuen en Lago Calafquén	DGA	10106007-1	5.625.727	744.624

Fuente: DGA

Tabla 6.6. Coordenadas punto de muestreo 2010, 2018, 2019 y 2020 (UTM WGS84 HUSO 18S)

Estación	Lugar	Norte	Este
M-1	Estero Melilahuen	5.626.609	744.338
M-2	Estero Melilahuen	5.626.228	744.070
M-3	Estero Melilahuen	5.625.906	744.329
M-4	Estero Melilahuen	5.625.463	744.783
M-5	Estero Melilahuen sector desembocadura	5.625.090	745.409

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tabla 6.7. Coordenadas punto de muestreo año 2026 (UTM WGS84 HUSO 18S)

Estación	Norte	Este
E-1	5.626.258	744.032
E-2	5.626.105	744.069
E-3	5.626.037	744.261
E-4	5.625.908	744.357
E-5	5.625.619	744.610
E-6	5.625.405	745.024
E-7	5.625.067	745.430

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Acorde a lo señalado, se evalúo cada uno de los compuestos, separando la información en meses considerados de periodo seco y meses considerados de periodo de lluvias. En las tablas siguientes se resume la información.

Tabla 6.8. Registro compuesto de Nitrógeno Total.

Nitrógeno Total periodo seco (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
1997	Diciembre	Primavera	0,179					
1998	Marzo	Verano	0,243					
1998	Diciembre	Primavera	0,196					
2009	Febrero	Verano	0,079					
2010	Febrero	Verano	2,16*	1,53*	1,78*			

Nitrógeno Total periodo seco (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
2010	Abril	Otoño	1,32*	1,70*	1,32*			
2020	Enero	Verano	0,05	0,04	0,05	0,01	0,02	

Nota: Los datos marcados con el símbolo * corresponden a Nitrógeno Total Kjeldahl, en este caso el nitrógeno total sería mayor a este valor ya que incluye nitratos, nitritos y nitrógeno orgánico.

Nitrógeno Total periodo seco (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Abril	Otoño	≤0,01	≤0,01	≤0,01	0,45	≤0,01	0,23	≤0,01	0,01

Nitrógeno Total periodo de lluvia (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
1998	Junio	Otoño	0,242					
1998	Septiembre	Invierno	0,495					
2009	Junio	Otoño	0,020					
2009	Agosto	Invierno	0,113					
2018	Junio	Otoño	2,36	1,66	1,33	≤1,00	1,31	1,00
2019	Julio	Invierno	0,13	0,29	0,20	0,16	0,14	0,01
2019	Agosto	Invierno	0,11	0,10	0,16	0,13	0,12	0,01
2019	Septiembre	Invierno	0,06	0,14	0,10	0,19	0,12	0,01

Nitrógeno Total periodo de lluvia (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Junio	Invierno	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,01	≤0,01	0,01

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tabla 6.9. Registro compuesto de Fósforo Total.

Fósforo Total periodo seco (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
1997	Diciembre	Primavera	0,041					
1998	Marzo	Verano	0,419					
1998	Diciembre	Primavera	0,034					
2009	Febrero	Verano	0,047					
2010	Febrero	Verano	1,13	0,98	0,63			0,20
2010	Abril	Otoño	≤0,20	≤0,20	≤0,20			0,20
2020	Enero	Verano	0,045	0,046	0,043	0,042	0,039	0,0004

Fósforo Total periodo seco (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Abril	Otoño	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	0,07

Fósforo Total periodo de lluvia (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
1998	Junio	Otoño	0,031					
1998	Septiembre	Invierno	0,011					
2009	Junio	Otoño	0,039					
2009	Agosto	Invierno	0,036					
2018	Junio	Otoño	0,027	0,026	0,026	0,027	0,032	0,005
2019	Julio	Invierno	0,016	0,025	0,018	0,016	0,027	0,0004
2019	Agosto	Invierno	0,049	0,012	0,012	0,013	0,024	0,0004
2019	Septiembre	Invierno	0,022	0,027	0,020	0,024	0,017	0,0004

Fósforo Total periodo de lluvia (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Junio	Invierno	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	≤0,07	0,07

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tabla 6.10. Registro compuesto de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5).

DBO5 periodo seco (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
2010	Febrero	Verano	4	4	6			
2010	Abril	Otoño	4	4	2			
2020	Enero	Verano	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	1

DBO5 periodo seco (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Abril	Otoño	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	1

DBO5 periodo de lluvia (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
2018	Junio	Otoño	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	2
2019	Julio	Invierno	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	1
2019	Agosto	Invierno	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	1
2019	Septiembre	Invierno	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	1

DBO5 periodo de lluvia (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Junio	Invierno	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	1

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Tabla 6.11. Registro compuesto de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

SST periodo seco (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
1997	Diciembre	Primavera	20,5					
1998	Marzo	Verano	19,5					
1998	Diciembre	Primavera	12,5					
2010	Febrero	Verano	≤5	≤5	≤5			5
2010	Abril	Otoño	11	≤5	≤5			5
2020	Enero	Verano	1	1	5	2	4	

SST periodo seco (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Abril	Otoño	1	1	1	3	1	≤1	4	1

SST periodo de lluvia (mg/l)								Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
1998	Junio	Otoño	22,8					
1998	Septiembre	Invierno	67,8					
2018	Junio	Otoño	≤2,7	≤2,7	3,0	≤2,7	18,0	2,7
2019	Julio	Invierno	7,6	11,2	7,2	6,8	5,6	1,0
2019	Agosto	Invierno	2,8	2,0	3,2	1,2	14,4	1,0
2019	Septiembre	Invierno	2,0	2,8	3,2	5,2	≤1,0	1,0

SST periodo de lluvia (mg/l)										Límite de detección (mg/l)
Año	Mes	Época	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	
2026	Junio	Invierno	2	3	2	3	4	2	2	1

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Para cada uno de los compuestos se asoció una concentración representativa, calculada como el promedio de los registros históricos, además del valor mínimo y máximo medido que conforman un rango de valores dentro de los cuales se consideran concentraciones normales en el estero.

Finalmente, la línea base definida tanto para periodo seco como para periodo de lluvias se definió acorde a lo presentado en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Características hidroquímicas estero Melilahuen – Línea Base

Compuesto	Unidad	Promedio – Línea Base		Límites periodo seco		Límite periodo de lluvia	
		Periodo seco	Periodo de lluvia	Max	Min	Max	Min
Nitrógeno Total	mg/l	0,52	0,35	2,16	0,01	2,36	0,01
Fósforo Total	mg/l	0,21	0,03	1,13	0,034	0,07	0,01
DBO5	mg/l	2	1,19	6	1	2	1
SST	mg/l	5,4	7,38	20,5	1	67,8	1

Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.2.3. Caracterización hidroquímica del efluente

El proyecto en evaluación cuenta con la tecnología necesaria que permite descargar un efluente que cumpla con la normativa vigente. En particular, el efluente que se proyecta sobre el estero Melilahuen cumplirá con las exigencias de concentración máxima de descarga del Decreto Supremo 90 en su Tabla 3 "Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustre".

La Tabla 6.13 indica el valor de la concentración de los distintos parámetros utilizados en el modelo.

Tabla 6.13. Concentraciones de efluente utilizado en la modelación de calidad de agua.

Parámetro	Unidad	Valor máximo DS 90
Nitrógeno Total	mg/l	10
Fósforo Total	mg/l	2
DBO_5	mg/l	35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	80

Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.2.4. Modelo Hidráulico

Se desarrolló un modelo hidráulico con el software HEC-RAS para analizar las características del flujo ante caudales de distinta magnitud. Adicionalmente, el modelo hidráulico servirá de base para la posterior modelación numérica de calidad de agua. Esto se realiza activado la funcionalidad en HEC-RAS para modelar la ecuación transporte advección-reacción en el estero Melilahuen.

El modelo utilizado fue construido y modelado por DSS S.A. donde el tramo analizado parte 700 m aguas arriba de la descarga proyectada y termina en la desembocadura del estero Melilahuen en el Lago Calafquén, disponiendo de 123 perfiles transversales separados cada 20 metros.

6.2.4.1. Variables y condiciones de borde

Adicional a la caracterización de los perfiles transversales, la modelación hidráulica requiere la definición del coeficiente de rugosidad de Manning y condiciones de borde. Si bien una de las hipótesis básicas en HEC-RAS es la unidimensionalidad del flujo, es posible representar la sección transversal caracterizándola según las planicies de inundación derecha (right over bank) e izquierda (left over bank), separadas ambas por el cauce principal (main channel). Así, cada una de dichas partes debe ser caracterizada con su valor del coeficiente de Manning y su distancia a la sección inmediatamente aguas abajo.

Dadas las características variables del terreno de estudio, y en base a valores definidos en el Método de Cowan para estimación del número de Manning, se determinó la rugosidad para el cauce principal en la zona de laderas y de fondo.

Tradicionalmente, para este tipo de estudios, la metodología utilizada en la estimación del coeficiente de rugosidad es la recomendada en el libro "Hidráulica de Canales Abiertos" de Ven Te Chow (1959), según el método de Cowan. De acuerdo con el método, el coeficiente de rugosidad de Manning se obtiene a partir de la siguiente expresión:

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

Donde:

Donde las variables son valores que dependen de las condiciones del cauce. En este caso se tiene n_0 (material involucrado), n_1 (grado de irregularidad), n_2 (variación de la sección transversal), n_3 (efecto relativo de las obstrucciones), n_4 (vegetación) y m (grado de los efectos por meandros).

Para determinar los factores de Cowan, se consideró lo realizado en el Informe Hidráulico estero Melilahuen DSS/Aguas Araucanía (Cap. 6.3.4 de EIA) donde se dividió el estero Melilahuen en tres tramos siguientes: 1° tramo desde 0 a 1 km, 2° tramo de 1 a 2 km y 3° tramo sector próximo a desembocadura. (C corresponde a cauce, P corresponde a Planicie).

Tabla 6.14. Factores de Cowan y rugosidad estero Melilahuen.

Condiciones del cauce		Valores		1° tramo		2° tramo		3° tramo	
				C	P	C	P	C	P
Material	Tierra	n0	0,020	0,024	0,020	0,024	0,020	0,020	0,020
	Roca cortada		0,025						
	Grava fina		0,024						
	Grava gruesa		0,028						
Grado de Irregularidad	Despreciable	n1	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005
	Leve		0,005						
	Moderado		0,010						
	Alto		0,020						
Variaciones en la sección transversal	Graduales	n2	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005
	Alternándose ocasionalmente		0,005						
	Alternándose frecuentemente		0,010	0,015					
Efecto relativo de los obstáculos	Despreciable	n3	0,000	0,020	0,015	0,015	0,015	0,010	0,015
	Leve		0,010	0,015					
	Apreciable		0,020	0,030					
	Alto		0,040	0,060					
Densidad de vegetación	Baja	n4	0,005	0,005	0,005	0,060	0,005	0,035	0,005	0,025
	Media		0,010	0,025					
	Alta		0,025	0,050					
	Muy alta		0,050	0,100					
Grado de sinuosidad	Leve	m	1,000	1	1	1	1	1	1
	Apreciable		1,150						
	Alto		1,300						

Condiciones del cauce	Valores	1° tramo		2° tramo		3° tramo	
		C	P	C	P	C	P
n Manning		**0,049**	**0,105**	**0,044**	**0,08**	**0,035**	**0,07**

Fuente: Elaboración propia, 2026.4

A continuación, se presenta una tabla resumen con los parámetros utilizados en la modelación hidráulica.

Tabla 6.15. Parámetros modelo hidráulico.

Condición	Descripción
Geometría	DEM construido a partir de levantamiento topo batimétrico. 123 perfiles espaciados cada 20 metros.
Coeficiente de rugosidad de Manning	Según Tabla 6.14
Régimen de modelación	Flujo permanente en escurrimiento mixto.
Condiciones de flujo estero Melilahuen, bajo escenario de cambio climático	Caudal medio en periodo estival: 1,34 m^3/s Caudal medio en periodo invernal: 4,99 m^3/s
Condiciones de Borde	Altura Normal/Pendiente aguas arriba: 0,011 Altura Normal/Pendiente aguas abajo: 0,00758
Caudal efluente proyectado al año 2034	Efluente estival: 42,4 l/s (0,0424 m^3/s) Efluente invernal: 24,4 l/s (0,0244 m^3/s) Efluente capacidad máxima: 95 l/s (0,095 m^3/s)

Fuente: Elaboración propia, 2026.

La modelación hidráulica se realizó utilizando los parámetros de diseño mencionados anteriormente y, considerando la condición morfológica del cauce de acuerdo con el levantamiento topográfico. Los perfiles transversales se observan en la siguiente Figura.



Figura 6.2. Descarga Proyectada y Perfiles Transversales.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.2.4.2. Resultados Modelación Hidráulica

Mediante el software HEC-RAS, se modeló la situación Sin Proyecto, es decir solo los caudales pasantes por el cauce afectados por cambio climático (medio estival e invernal) y también la situación Proyectada, considerando la descarga del caudal estival, invernal y la descarga de capacidad máxima (caudal efluente PTAS), el cual se agregó al modelo en la condición con proyecto a partir de la sección transversal del punto de descarga (denominada "700"), como se muestra en la Figura 6.2

En la Tabla 6.16 se presentan los Caudales utilizados para la Modelación (Caudal en perfil 700 corresponde a la suma del caudal del río sumado a la descarga en m^3/s).

Tabla 6.16. Caudales modelación HEC-RAS.

Perfil	Invernal	Estival	Capacidad Máxima PTAS
0	4,99 m^3/s	1,34 m^3/s	1,34 m^3/s
700	5,01 m^3/s	1,38 m^3/s	1,43 m^3/s

Fuente: Elaboración propia, 2026.

De los resultados de la modelación Hidráulica se obtuvieron propiedades como el Eje hidráulico, Velocidades y Número de Froude, las cuales se presentan en las siguientes figuras.

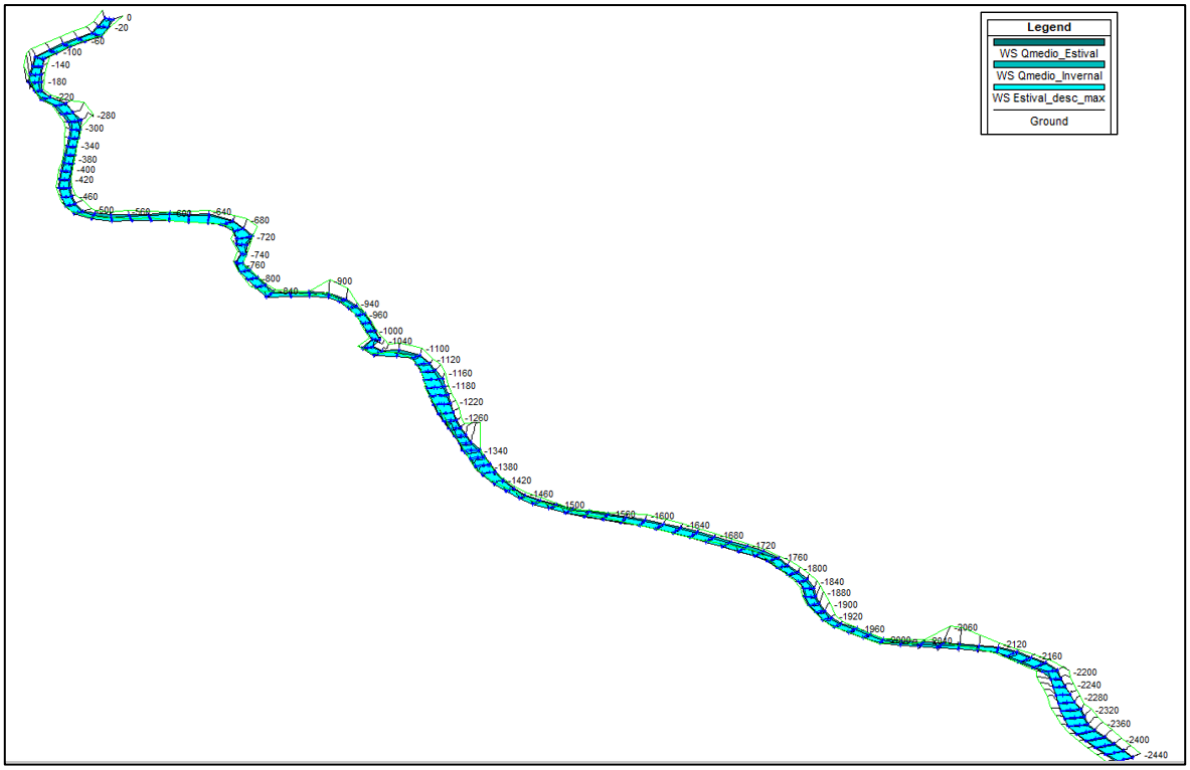
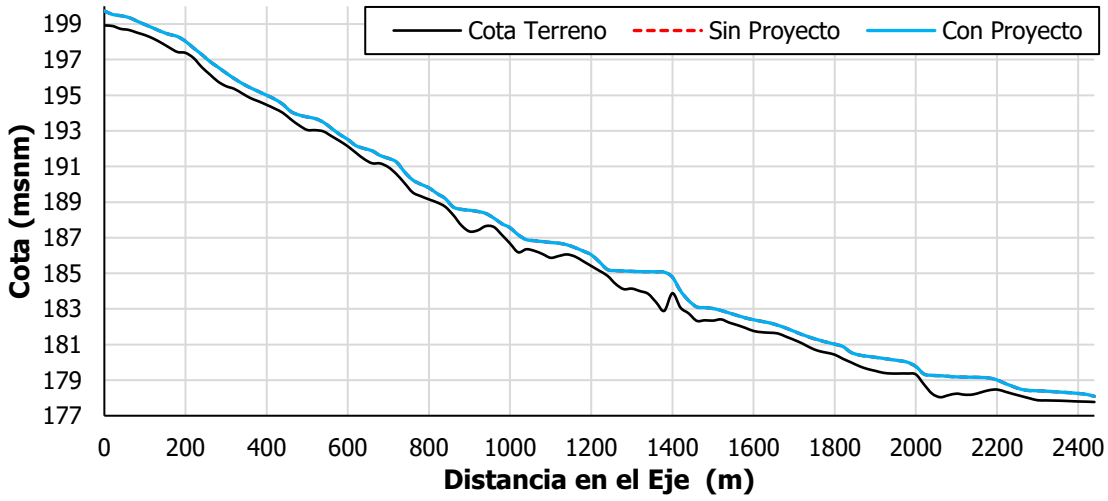


Figura 6.3. Representación tridimensional de la modelación hidráulica CP.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

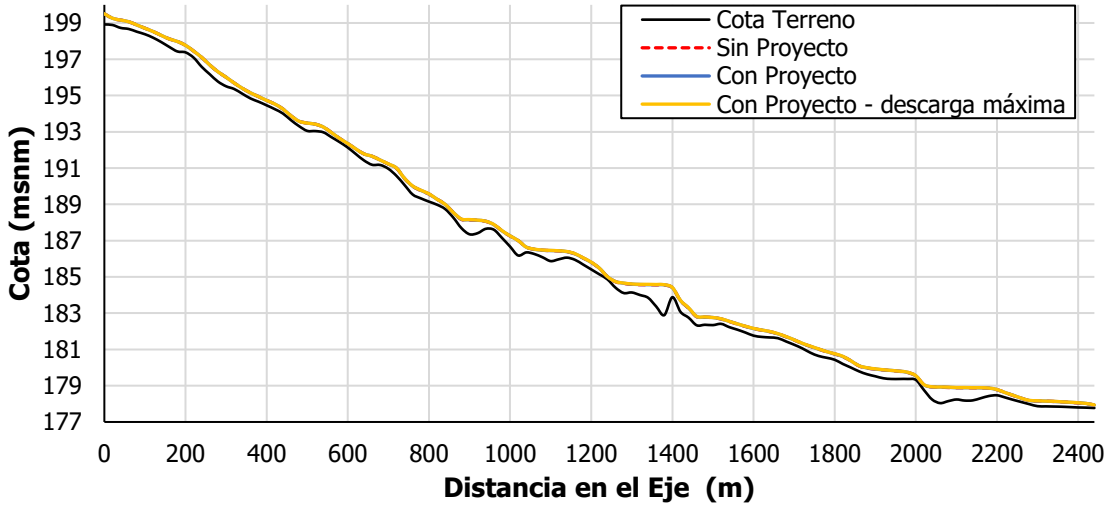
Eje Hidráulico

Es la representación longitudinal de las elevaciones del flujo en el cauce. En la siguiente figura se presentan los valores para este parámetro, donde se señala la situación Sin proyecto (representadas mediante línea punteada), como también la situación Con proyecto (representada mediante línea sólida), para ambos escenarios, es decir, de invierno y estiaje. Se observa de forma clara que la

condición con proyecto no difiere respecto a la situación sin proyecto para los escenarios de invierno y estiaje, ya que ambas líneas se superponen.



a) Escenario Invernal



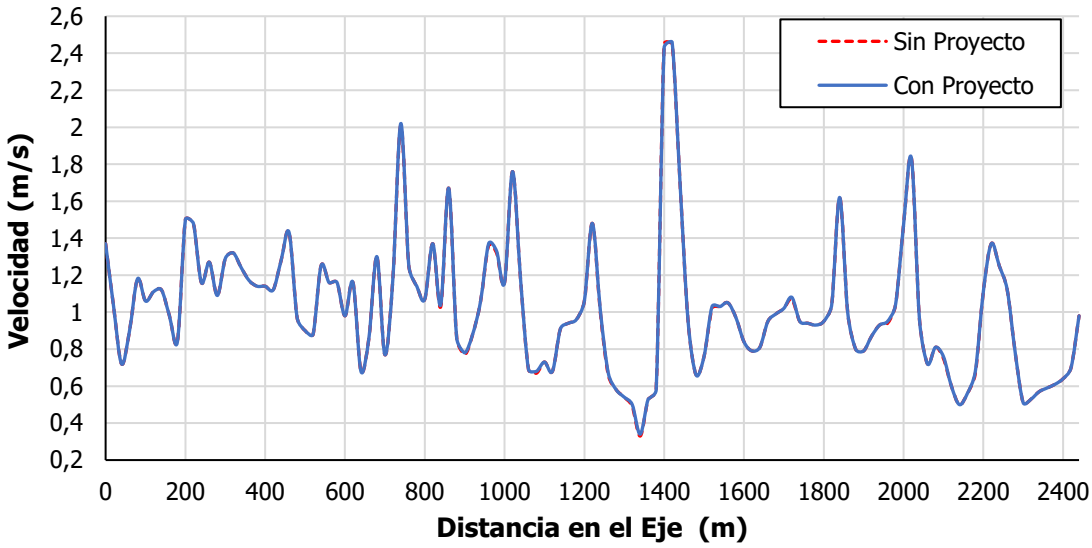
b) Escenario Estival

Figura 6.4. Eje hidráulico longitudinal.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

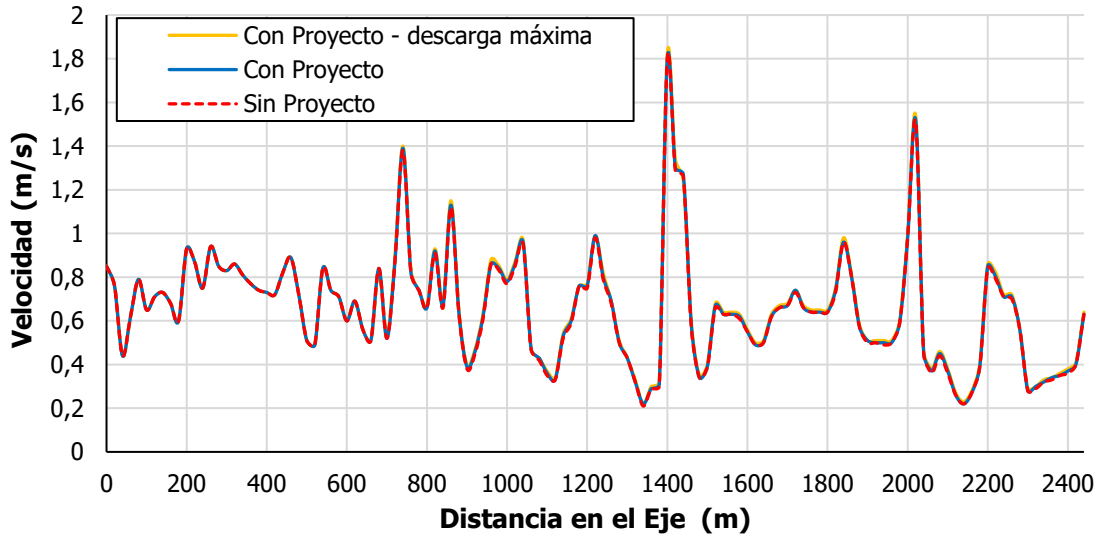
Velocidad

En la siguiente gráfica, se presentan los resultados de la velocidad en la modelación Sin proyecto (representadas mediante línea punteada), como también la situación Con proyecto (representada

mediante línea sólida), para ambos escenarios, es decir, de invierno y estiaje. Se observa de forma clara que la condición con proyecto no difiere respecto a la situación Con proyecto para los escenarios de invierno y estiaje.



a) Escenario Invernal



b) Escenario Estival

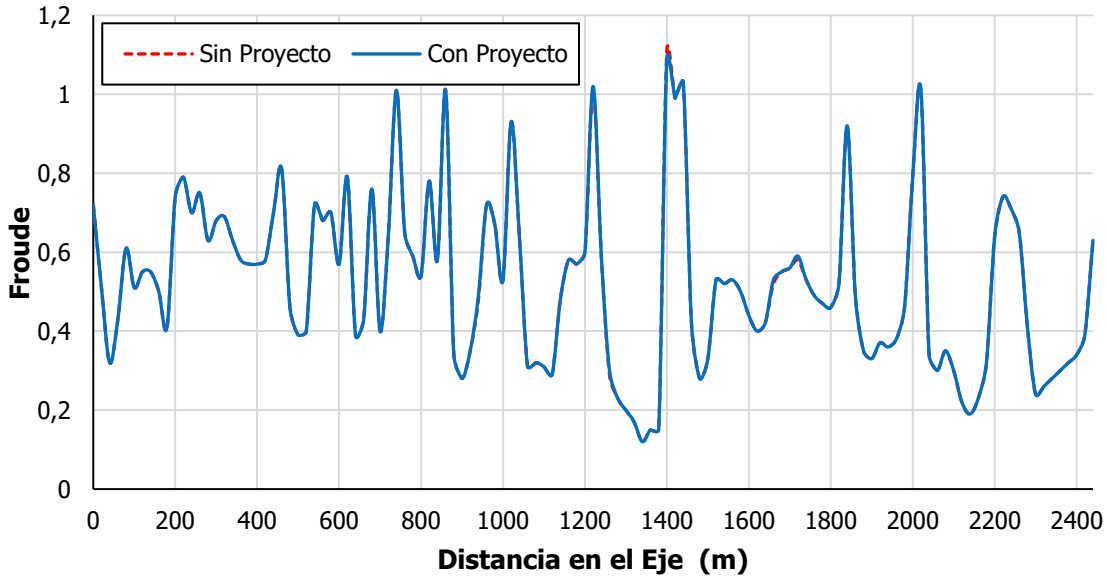
Figura 6.5. Gráfico velocidad media.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Número de Froude

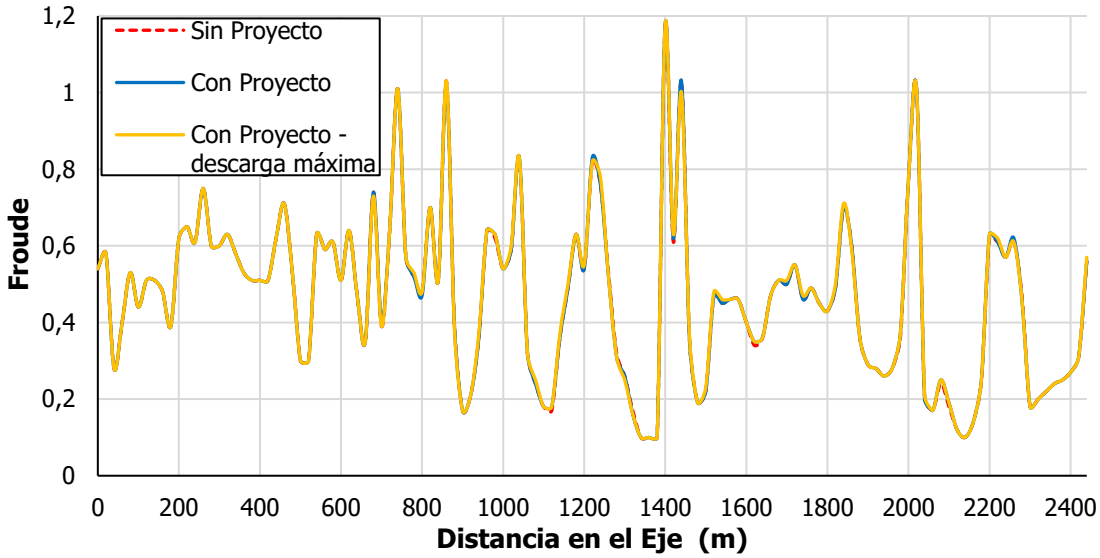
Esta propiedad relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatoria de un fluido y según su valor podemos determinar si es un régimen crítico (Fr = 1), Subcrítico (Fr < 1) o Supercrítico (Fr > 1).

En la siguiente gráfica se presentan los resultados de la modelación respecto al Número de Froude Sin proyecto (representadas mediante línea punteada), como también la situación Con proyecto (representada mediante línea sólida), para ambos escenarios, es decir, de invierno y estiaje.

A partir de lo anterior, se puede observar que el flujo se presenta con un régimen Mixto, pero con predominancia de régimen subcrítico.



a) Escenario Invernal



b) Escenario Estival

Figura 6.6. Gráfico número de Froude.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

6.2.5. Modelo Numérico de Calidad de Agua

A continuación, se presentan los gráficos de los parámetros de interés obtenidos al extraer los resultados de la modelación a lo largo del perfil longitudinal trazado. Adicionalmente, se incluyeron los límites máximos y mínimos de las concentraciones registradas en los monitoreos históricos.

- **Nitrógeno Total**

A continuación, se presentan los resultados de la distribución de Nitrógeno Total a lo largo del perfil longitudinal.

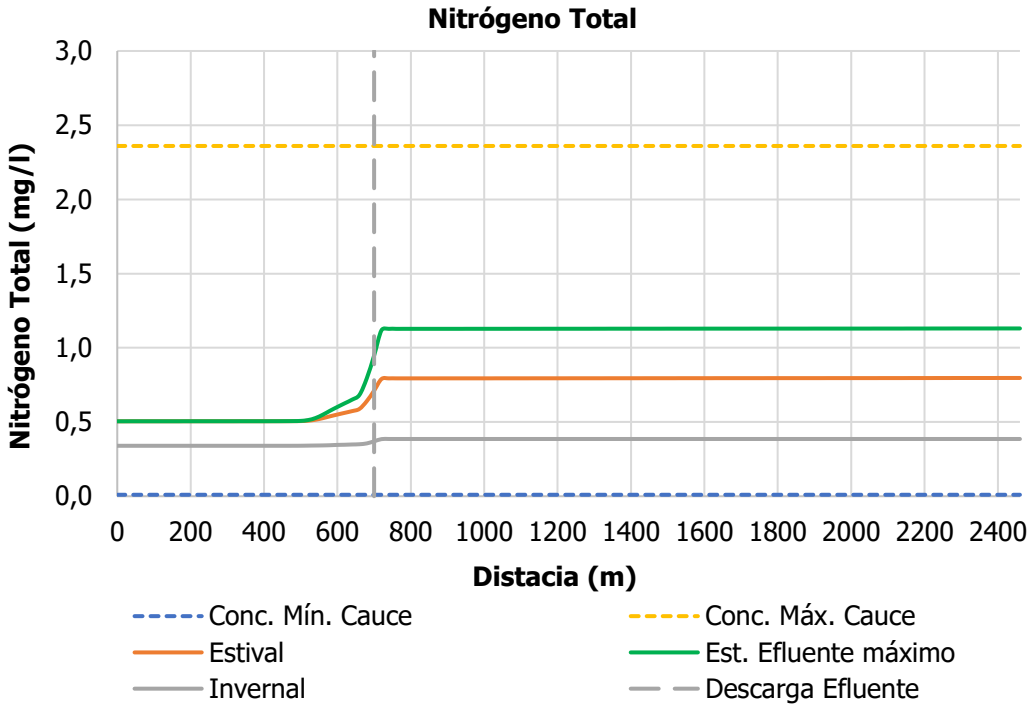


Figura 6.7. Distribución de Concentración Nitrógeno Total.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

A partir de la curva del Nitrógeno Total se puede observar que, para los tres escenarios evaluados (Invernal, Estival y Estival con efluente máximo) las concentraciones parten de acuerdo con la establecido en la Línea Base para posteriormente ir aumentando en el punto de descarga de la PTAS, alcanzando un Peak en la condición estival con descarga de efluente máximo de 1,1 mg/L en el estero Melilahuen. Del gráfico se observa que el nitrógeno total presenta un aumento localizado asociado a la incorporación del efluente tratado; sin embargo, la concentración resultante permanece dentro del rango de variabilidad natural registrado en el estero Melilahuen y no supera los valores máximos observados durante la caracterización ambiental. Por lo anterior, **se descarta un efecto significativo ocasionado por el parámetro Nitrógeno Total a causa de la descarga de la PTAS.**

Entre el punto de descarga del efluente tratado y el punto donde se completa la mezcla hidráulica del efluente con el cuerpo receptor, identificado mediante la modelación de calidad de agua, hay una distancia aproximada de 460 m desde el punto de descarga hasta que el parámetro modelado se

estabiliza. Esto para la condición más desfavorable, que corresponde al caudal medio estival del estero con efluente a máxima capacidad (95 l/s).

- **Fósforo Total**

A continuación, se presentan los resultados de la distribución de Fósforo Total a lo largo del perfil longitudinal.

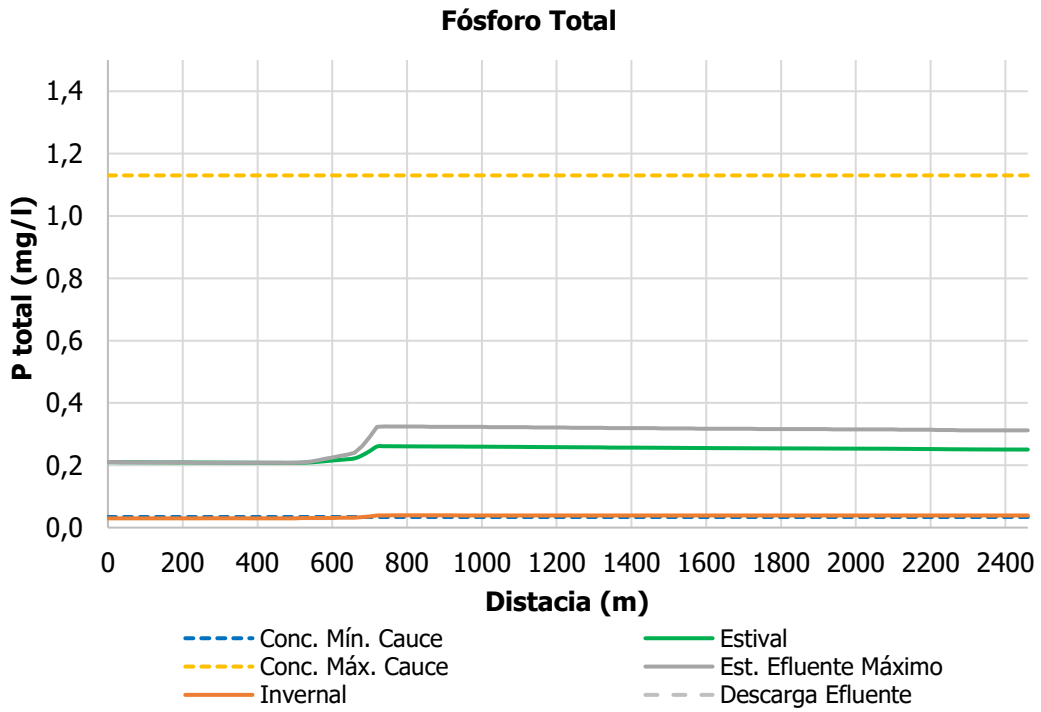


Figura 6.8. Distribución de Concentración Fósforo Total.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

A partir de la curva del Fósforo Total se puede observar que, para los tres escenarios evaluados (Invernal, Estival y Estival con efluente máximo) las concentraciones parten de acuerdo con la establecido en la Línea Base para posteriormente ir aumentando en el punto de descarga de la PTAS, alcanzando un Peak en la condición estival con descarga de efluente máximo de 0,324 mg/L en el estero Melilahuen. Del gráfico se observa que el fósforo total presenta un aumento localizado asociado a la incorporación del efluente tratado; sin embargo, la concentración resultante permanece dentro del rango de variabilidad natural registrado en el estero Melilahuen y no supera los valores máximos observados durante la caracterización ambiental. Por lo anterior, **se descarta un efecto significativo ocasionado por el parámetro Fósforo Total a causa de la descarga de la PTAS.**

Entre el punto de descarga del efluente tratado y el punto donde se completa la mezcla hidráulica del efluente con el cuerpo receptor, identificado mediante la modelación de calidad de agua, hay una distancia aproximada de 220 m desde el punto de descarga hasta que el parámetro modelado se estabiliza. Esto para la condición más desfavorable, que corresponde al caudal medio estival del estero con efluente a máxima capacidad (95 l/s).

- **DBO_5**

A continuación, se presentan los resultados de la distribución de Demanda Bioquímica de Oxígeno a lo largo del perfil longitudinal.

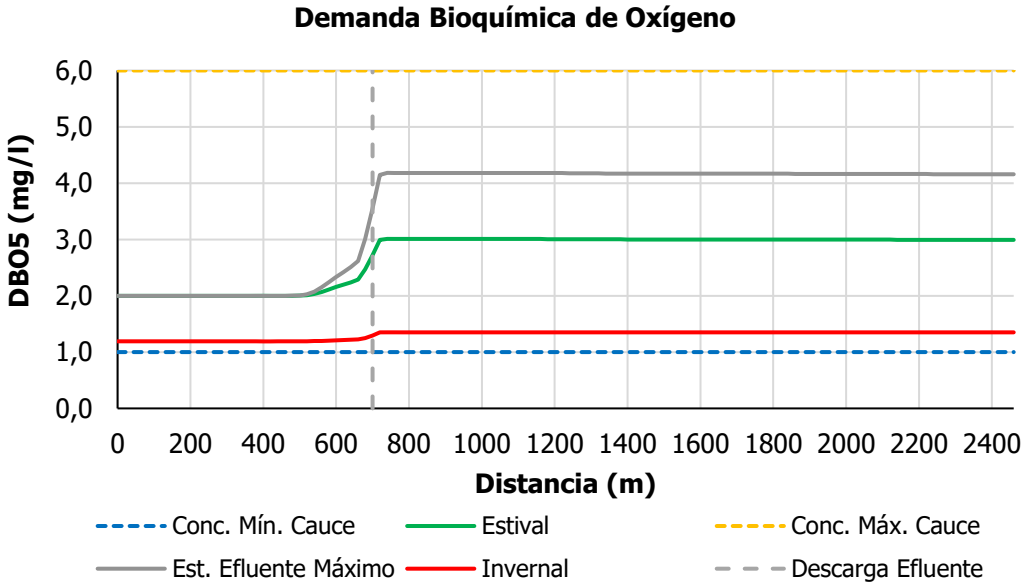


Figura 6.9. Distribución de Concentración DBO_5.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

A partir de la curva del DBO_5 se puede observar que, para los tres escenarios evaluados (Invernal, Estival y Estival con efluente máximo) las concentraciones parten de acuerdo con la establecido en la Línea Base para posteriormente ir aumentando en el punto de descarga de la PTAS, alcanzando un Peak en la condición estival con descarga de efluente máximo de 4,182 mg/L en el estero Melilahuen. Del gráfico se observa que el DBO_5 presenta un aumento localizado asociado a la incorporación del efluente tratado; sin embargo, la concentración resultante permanece dentro del rango de variabilidad natural registrado en el estero Melilahuen y no supera los valores máximos

observados durante la caracterización ambiental. Por lo anterior, **se descarta un efecto significativo ocasionado por el parámetro DBO_5 a causa de la descarga de la PTAS.**

Entre el punto de descarga del efluente tratado y el punto donde se completa la mezcla hidráulica del efluente con el cuerpo receptor, identificado mediante la modelación de calidad de agua, hay una distancia aproximada de 320 m desde el punto de descarga hasta que el parámetro modelado se estabiliza. Esto ocurre en el escenario invernal, que corresponde al caudal medio invernal del estero Melilahuen con efluente de la PTAS estimado para periodo invernal (24,4 l/s).

- **Sólidos Suspendidos Totales**

A continuación, se presentan los resultados de la distribución de Sólidos Suspendidos Totales a lo largo del perfil longitudinal.

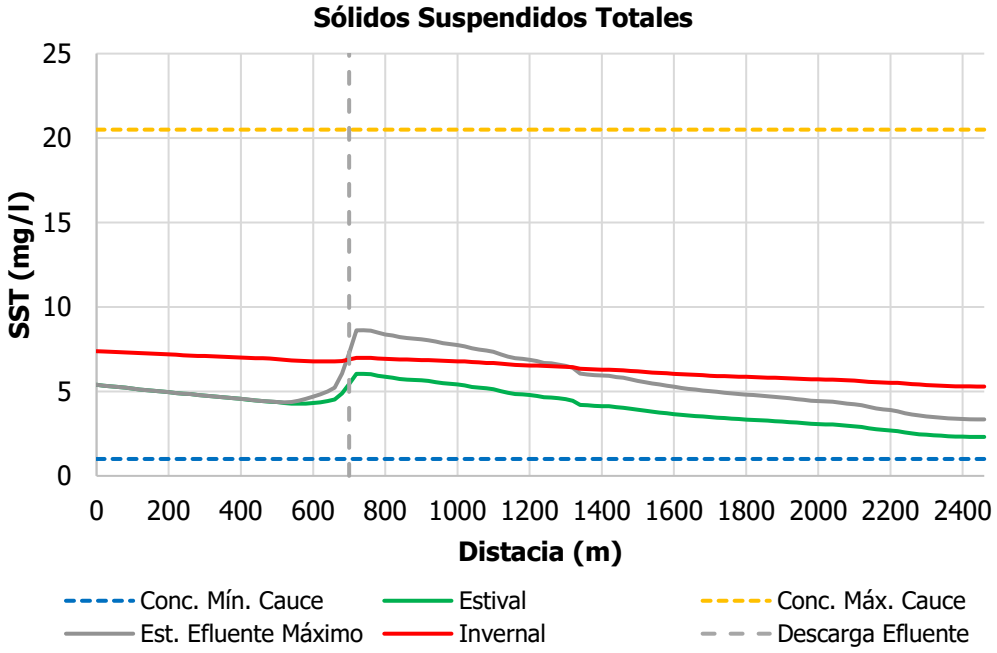


Figura 6.10. Distribución de Concentración Sólidos Suspendidos Totales.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

A partir de la curva del SST se puede observar que, para los tres escenarios evaluados (Invernal, Estival y Estival con efluente máximo) las concentraciones parten de acuerdo con la establecido en la Línea Base para posteriormente ir aumentando en el punto de descarga de la PTAS, alcanzando un Peak en la condición estival con descarga de efluente máximo de 8,61 mg/L en el estero Melilahuen. Del gráfico se observa que el SST presenta un aumento localizado asociado a la

incorporación del efluente tratado; sin embargo, la concentración resultante permanece dentro del rango de variabilidad natural registrado en el estero Melilahuen y no supera los valores máximos observados durante la caracterización ambiental. Por lo anterior, **se descarta un efecto significativo ocasionado por el parámetro SST a causa de la descarga de la PTAS.**

Entre el punto de descarga del efluente tratado y el punto donde se completa la mezcla hidráulica del efluente con el cuerpo receptor, identificado mediante la modelación de calidad de agua, hay una distancia aproximada de 860 m desde el punto de descarga hasta que el parámetro modelado se estabiliza. Esto para la condición más desfavorable, que corresponde al caudal medio estival del estero con efluente a máxima capacidad (95 l/s).

7. ÁREA DE INFLUENCIA

En este acápite se presenta el análisis realizado para delimitar el área de influencia del componente calidad de aguas superficiales, considerando tanto las condiciones hidráulicas del estero Melilahuen y la dispersión de los contaminantes transportados por la corriente. Para ello, se utilizaron los resultados de la modelación de calidad de agua desarrollada mediante HEC-RAS, la cual incorpora las características hidráulicas del cauce y las características del efluente tratado proyectado.

De acuerdo con la Guía Áreas de Influencia en el SEIA (SEA, 2026), "*el área de influencia representa el espacio en donde se predice que los impactos de un proyecto o actividad pueden manifestarse, y se extenderá desde el punto o área de ubicación de las partes, obras o acciones del proyecto o actividad que generen impacto, hasta el extremo geográfico donde ya no es posible detectar la alteración".*

En este contexto, el área de influencia del componente calidad de aguas superficiales corresponde al tramo del estero Melilahuen donde la descarga del efluente tratado genera modificaciones atribuibles al proyecto en la calidad del agua. Su delimitación se fundamenta en los resultados de la modelación de mezcla y dispersión, la cual permitió identificar la distancia necesaria para que las concentraciones de los parámetros modelados alcancen una condición estable aguas abajo del punto de descarga. A partir de dicha condición, las concentraciones permanecen dentro del rango de variabilidad natural del estero y no se observan variaciones espaciales adicionales atribuibles a la descarga proyectada.

La delimitación del área de influencia consideró todos los escenarios de modelación, incluyendo condiciones hidrológicas bajo cambio climático y la condición más desfavorable de operación del

proyecto, correspondiente a la descarga máxima de la PTAS (95 l/s). En consecuencia, el área de influencia se definió sobre la base del escenario más conservador.

La Tabla 7.1 presenta las distancias de estabilización obtenidas para cada uno de los parámetros modelados, indicando el escenario en que se registra la mayor longitud.

Tabla 7.1. Resumen longitudes de estabilización

Parámetro	Longitud	Escenario
Nitrógeno Total	460 m	Estival con efluente máximo
Fósforo Total	220 m	Estival con efluente máximo
DBO5	320 m	Invernal con efluente invernal
SST	860 m	Estival con efluente máximo

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Con el objetivo de definir el área de influencia de manera conservadora, se adoptó la mayor distancia de estabilización obtenida entre los parámetros y escenarios evaluados. En consecuencia, el área de influencia quedó determinada por el comportamiento de los **Sólidos Suspendidos Totales (SST)**, cuya estabilización se alcanza a una distancia de **860 m aguas abajo del punto de descarga**.

Por lo tanto, el área de influencia del componente calidad de aguas superficiales corresponde al tramo del estero Melilahuen comprendido entre el punto de descarga del efluente tratado (**Perfil 700 del modelo hidráulico**) y el punto ubicado **860 m aguas abajo**, donde la modelación evidencia que las concentraciones de los parámetros evaluados alcanzan una condición estable y no presentan cambios espaciales adicionales atribuibles a la descarga del proyecto. Asimismo, las concentraciones simuladas permanecen dentro del rango de variabilidad natural determinado para el estero Melilahuen.

Cabe señalar que el punto de estabilización de las concentraciones se localiza aproximadamente **900 m antes de la desembocadura del estero Melilahuen en el lago Calafquén**, lo que demuestra que el proceso de mezcla y dispersión del efluente se desarrolla completamente dentro del cauce fluvial, sin que exista un proceso de mezcla activo en el ingreso al ambiente lacustre.

La Figura 7.1 presenta la delimitación del área de influencia definida para el componente calidad de aguas superficiales.

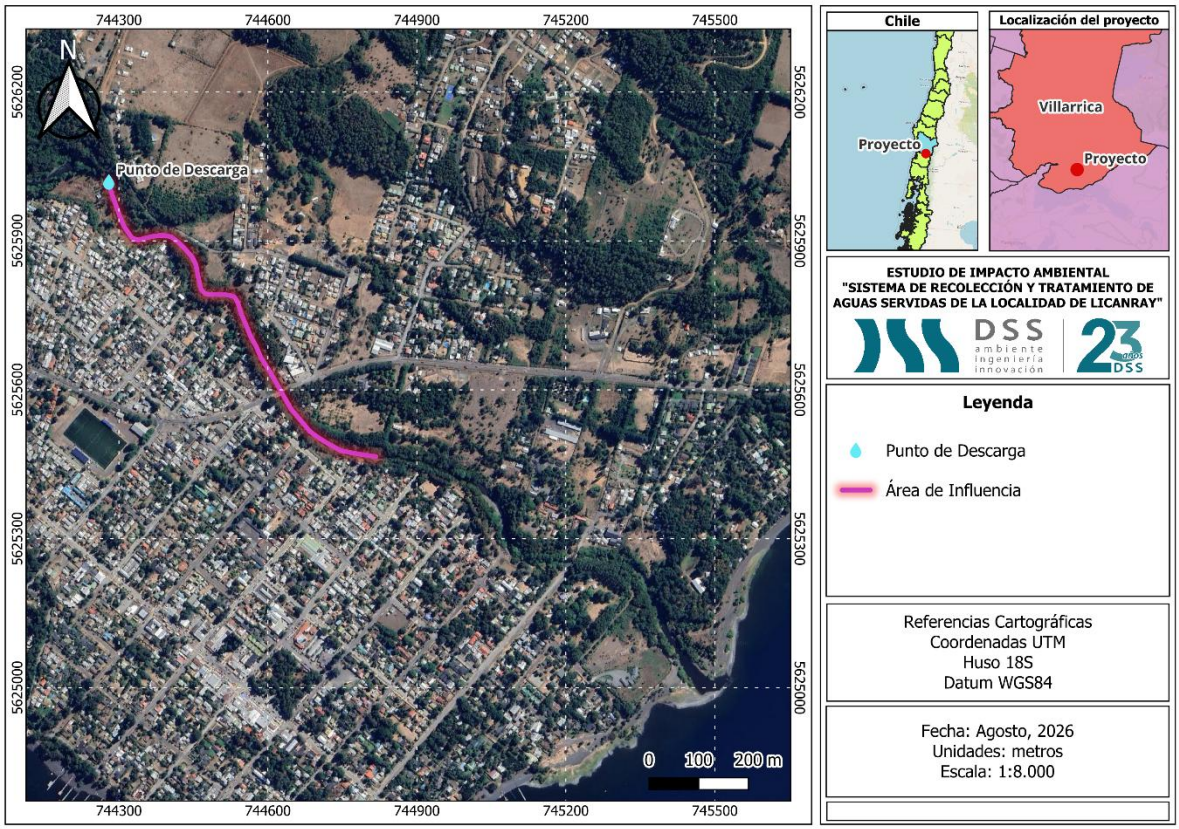


Figura 7.1. Área de Influencia calidad de agua.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

8. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el comportamiento de la calidad de agua del estero Melilahuen frente a la descarga del efluente tratado proveniente de la futura Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de la localidad de Lican Ray, mediante la implementación de un modelo de calidad de agua desarrollado en HEC-RAS. La evaluación consideró escenarios hidrológicos representativos bajo condiciones de cambio climático, incluyendo la condición más desfavorable de operación del proyecto, correspondiente a una descarga máxima de 95 l/s.

Los resultados de la modelación indican que la incorporación del efluente produce incrementos localizados en las concentraciones de DBO_5, nitrógeno total, fósforo total y sólidos suspendidos totales inmediatamente aguas abajo del punto de descarga. Sin embargo, en todos los escenarios evaluados las concentraciones permanecen dentro del rango de variabilidad natural definido para el

estero Melilahuen y no superan los valores máximos registrados durante la caracterización ambiental, por lo que **no se identifican alteraciones significativas en la calidad del cuerpo receptor atribuibles a la operación de la PTAS.**

El análisis de la mezcla y dispersión permitió determinar que las concentraciones alcanzan una condición estable en un tramo acotado aguas abajo del punto de descarga. La mayor distancia de estabilización corresponde al parámetro Sólidos Suspendidos Totales (SST), con una longitud de aproximadamente 860 m bajo el escenario estival con descarga máxima, criterio que fue adoptado para la delimitación conservadora del área de influencia del componente calidad de aguas superficiales.

Asimismo, la estabilización de las concentraciones ocurre aproximadamente 900 m antes de la desembocadura del estero Melilahuen en el lago Calafquén, evidenciando que el proceso de mezcla y dispersión del efluente se desarrolla completamente dentro del cauce fluvial y previo al ingreso al ambiente lacustre.

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten concluir que la descarga del efluente tratado, cumpliendo los límites establecidos en el Decreto Supremo N°90/2000 para cuerpos de agua lacustres, no genera modificaciones significativas en la calidad de las aguas superficiales del estero Melilahuen. Asimismo, la delimitación del área de influencia propuesta representa de manera conservadora la máxima extensión espacial de los cambios atribuibles al proyecto, en concordancia con los criterios establecidos en la Guía Áreas de Influencia del Servicio de Evaluación Ambiental.

9. REFERENCIAS

- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2018). Explorador de Cuencas CAMELS-CL [online].
- Dirección General de Aguas (2026). Datos hidrológicos en tiempo real [online].
- Dirección General de Aguas (2026). Estadística Hidrológica en Línea [online].
- MSI Consultores (2017). Ingeniería Básica para plantas elevadoras, impulsiones, planta de tratamiento y descarga, Localidad de Lican Ray.
- Servicio de Evaluación Ambiental (2023). Criterio de Evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico.
- Servicio de Evaluación Ambiental (2026). Guía Áreas de Influencia en el SEIA.