



**INSTITUTO NACIONAL DE HIDRAULICA
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

INFORME FINAL

**ESTUDIO "DIAGNOSTICO HIDRÁULICO RÍO
MATAQUITO, LICANTÉN A DESEMBOCADURA, REGIÓN
DEL MAULE**

01/ DICIEMBRE / 2025



FICHA TÉCNICA DEL PROYECTO						
PROYECTO REALIZADO PARA DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS						
NOMBRE DEL PROYECTO ESTUDIO "DIAGNOSTICO HIDRÁULICO RÍO MATAQUITO, LICANTÉN A DESEMBOCADURA, REGIÓN DEL MAULE					FECHA 01/12/2025	
MIEMBROS DEL EQUIPO						
Nombre Apellido (NA)		Especialidad, Cargo en el proyecto, Unidad				
Jaime Cotroneo (JC)		Ingeniero Civil, jefe de proyecto, I+d+i				
Francisco Ulloa (FU)		Ingeniero Civil, jefe de proyecto (S), Ingeniería				
Claudia Sanhueza (CS)		Ingeniero Civil, Ingeniera de Proyecto, Ingeniería				
Camila Osorio (CO)		Ing. Civil en Geografía, Ingeniera de Proyecto, Ingeniería				
Marcos Diaz (MD)		Ingeniero Geomensor, responsable trabajos de terreno, Operaciones				
Bastían Venegas (BV)		Dibujante, Dibujante, Operaciones				
Ronald Chamorro (RC)		Ingeniero Geomensor, Geomensor, Operaciones				
CONTRAPARTE TÉCNICA						
Nombre Apellido (NA)		Especialidad, Departamento				
Alexis Quiroz (AQ)		Ingeniero Civil, Inspección Fiscal, DOH				
REVISADO Y APROBADO POR		INH			INSP. FISCAL	
Rev.	Fecha	Preparó	Revisó	Aprobó	Reviso	Aprobó
A	10/11/2025	JC/FU	FU	RH		NP
B	01/12/2025	JC/FU	FU	RH		NP
CLASIFICACION DEL INFORME						
Revisión Cliente						

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. CARACTERIZACIÓN	3
2.1 DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO	3
2.2 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLOGICA	4
2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	6
2.3.1 CLIMA	6
2.3.2 VEGETACIÓN	7
2.3.3 ÁREAS PROTEGIDAS	8
2.4 CARATERIZACIÓN EVENTOS ANTERIORES	9
2.4.1 Evento 2002.....	11
2.4.2 Evento 2006.....	12
2.4.3 Evento 2008.....	12
2.4.4 Eventos 2023	12
3. ESTUDIOS BÁSICOS	14
3.1 LEVANTAMIENTO TOPO BATIMETRICO	14
3.2 CARACTERIZACIÓN GRANULIMÉTRICA	15
3.2.1 CALICATAS	15
3.2.2 MUESTRAS SUPERFICIALES.....	17
3.2.3 ANÁLISIS GRANULOMETRICO	18
3.3 MEDICIONES HIDRAULICAS EN TERRENO.....	19
3.3.1 AFORO	19
3.3.2 ADCP.....	19
3.3.3 MAREOGRAFOS.....	20
3.4 CATASTRO ESTRUCTURA EXISTENTE	22
3.5 HIDROLOGÍA	23
3.5.1 PRECIPITACIÓN	23
3.5.2 CAUDALES	24
3.5.3 ANÁLISIS DE ISOTERMA	26
3.5.4 ANÁLISIS DE CAMBIO CLIMATICO.....	27

3.6	HIDRÁULICA MARÍTIMA	28
3.6.1	ANÁLISIS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL COSTERO	29
3.6.2	ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL ESTUARIO	31
3.6.3	AREA DESEMBOCADURA DEL ESTUARIO	32
3.6.4	DETERMINACION DE NIVEL DE MAREA	33
3.7	HIDRÁULICA FLUVIAL.....	33
3.7.1	ESCENARIOS	35
3.7.2	RÉGIMEN SEDIMENTOLÓGICO	36
3.7.3	RESULTADOS	42
4.	DIAGNOSTICO	49
4.1	CONDICIONANTES DE AMENAZAS.....	49
4.1.1	INUNDACIÓN.....	49
4.1.2	MAREA	58
4.1.3	BARRA LITORAL.....	59
4.1.4	TERRAPLEN DE CRUCE A PUENTES	59
4.1.5	EMBANQUES E ISLAS	63
4.2	DIAGNOSTICO DE AMENAZAS	67
4.2.1	INFRAESTRUCTURA FLUVIAL	68
4.2.2	EDIFICACIONES.....	77
4.2.3	INFRAESTRUCTURA ESENCIAL.....	77
4.2.4	PROPIEDADES RURALES	78
4.3	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	79
5.	PROPUESTAS DE MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES	81
5.1	MEDIDAS ESTRUCTURALES	81
5.1.1	TERRAPLENES	82
5.1.2	RESUMEN	92
5.2	PROPUESTA DE MEDIDAS NO ESTRUCTURALES.....	96
5.2.1	Delimitar áreas de acuerdo con la amenaza de inundación	96
5.2.2	Sistema de alerta temprana	101
6.	PROPOSICIÓN DE DESLINDES.....	104
7.	CONCLUSIONES.....	105
8.	REFERENCIAS.....	107

9. ANEXOS.....	111
ANEXO A. TOPOGRAFIA	111
ANEXO B. GEOMORFOLOGIA	111
ANEXO C. HIDROLOGIA	111
ANEXO D. HIDRAULICA.....	111
ANEXO E. PROPOSICION DESLINDES.....	111
ANEXO F. MEDIDAS.....	111
ANEXO G. INFORME POR ETAPA.....	111
ANEXO H. ANTECEDENTES	111
ANEXO I. GIS.....	111
ANEXO J. PLANOS	111

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 : Área de estudio	4
Figura 2-2 : Geomorfología cuenca río Mataquito	5
Figura 2-3 : Climograma estación río Mataquito en Licantén	7
Figura 2-4 : Catastro bosque nativo en el área de estudio (2016)	8
Figura 2-5 : Sitios prioritarios (ERB) e inventario de humedales en área de estudio.	9
Figura 2-6 : Resumen de línea de nieve, precipitación y caudal máximo instantáneo días previos y posteriores al evento de mayo de 2002.	12
Figura 3-1: Topo-batimetría.	15
Figura 3-2: Ubicación general lugares calicatas	16
Figura 3-3: Ubicación general muestras de sedimento superficial.....	17
Figura 3-4: Distribución d50 a lo largo del río. Presentando desde aguas abajo hacia aguas arriba.....	17
Figura 3-5: Distribución granulométrica espacial comparado con la elevación del cauce y su sinuosidad.	18
Figura 3-6 : Medición de caudal con RiverSurveyor	19
Figura 3-7: Series de tiempo de componentes ortogonales del registro más superficial de la corriente (en m/s).....	20
Figura 3-8: Series de tiempo de componentes ortogonales del registro de fondo de la corriente (en m/s).	20
Figura 3-9: Datos obtenidos con los 3 mareógrafos a lo largo de la zona de estudio.....	21
Figura 3-10 : Ubicación general catastro de obras.	22
Figura 3-11 : Diagrama unifilar ríos principales cuenca río Mataquito	23
Figura 3-12 : Precipitación promedio mensual [mm] cuenca zona de proyecto	24
Figura 3-13 : Estaciones fluviométricas analizadas.....	25
Figura 3-14 : Curva de variación estacional cuenca zona de proyecto.....	26
Figura 3-15: Propagación de oleaje aguas someras.....	29
Figura 3-16 : Fotografías aéreas del movimiento de la descarga del río en el tiempo	31
Figura 3-17: a) Esquema del transporte litoral en la zona de Estudio. b) Imagen satelital evento de Agosto 2023	32
Figura 3-18 : Serie determinada con modelo TPX0 para Licantén.....	33
Figura 3-19 : Batimetría utilizada en los casos de modelación.	34
Figura 3-20 Caudal sólido zona Licantén Van Rijn – T = 2 años.	36
Figura 3-21 Caudal sólido zona pasarela los escalones Van Rijn – T = 2 años.....	37
Figura 3-22: Razón entre esfuerzo de fondo y esfuerzo crítico de arrastre para la crecida de periodo de retorno de 2 años.	38

Figura 3-23: Razón entre esfuerzo de fondo y esfuerzo crítico de arrastre para la crecida de periodo de retorno de 5 años.	39
Figura 3-24: Perfil transversal PI-4 (ver Figura 3-25), sector Aeródromo. Desde aguas arriba hacia aguas abajo.	41
Figura 3-25: Mapa de barras fluviales, litoral y planicies de inundación en el área de estudio. Sector de Licantén.	42
Figura 3-26 : Resultado de area de inundacion evento agosto 2023 – Sector Licanten Urbano, puntos de control	43
Figura 3-27 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Licanten	43
Figura 3-28 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Puente Lautaro	44
Figura 3-29 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Licanten	44
Figura 3-30 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Puente Lautaro	45
Figura 3-31 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Licanten.....	46
Figura 3-32 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Pasarella	46
Figura 3-33 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Puente Lautaro	47
Figura 3-34 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 1000 años -Sector Puente Mataquito	47
Figura 3-35 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Zona Costera.....	48
Figura 4-1 : Mapa General con las áreas de inundación para 2, 5 , 10 , 25, 50, y 100 años.	50
Figura 4-2 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Licanten.....	51
Figura 4-3 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Pasarella	51
Figura 4-4 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Puente Lautaro .	52
Figura 4-5 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Puente Mataquito	53
Figura 4-6 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Zona Costera.....	53
Figura 4-7 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Licanten.....	54
Figura 4-8 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Pasarella	54
Figura 4-9 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Puente Lautaro .	55
Figura 4-10 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Puente Mataquito	55
Figura 4-11 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Zona Costera	56
Figura 4-12 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Licanten.....	56
Figura 4-13 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Pasarella.....	57
Figura 4-14 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Puente Lautaro	57

Figura 4-15 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 1000 años -Sector Puente Mataquito	58
Figura 4-16 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Zona Costera.....	58
Figura 4-17: Modificación de terreno para Caso 1	60
Figura 4-18: Perfil transversal en Licantén de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.")	60
Figura 4-19: Perfil transversal en Pasarela los escalones de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.")	61
Figura 4-20: Perfil transversal en Puente Lautaro de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.")	61
Figura 4-21: Perfil longitudinal en terraplén del Puente Lautaro de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.").....	62
Figura 4-22: Perfil longitudinal con cota de agua, desde Licantén a Puente Lautaro, resultados con y sin terraplén (Rojo: 100 años; Verde: 10 años; Azul: 5 años).	62
Figura 4-23: Planta general, con la implementación del canal.....	64
Figura 4-24: Modificación de terreno para Caso 2	66
Figura 4-25: Localidades en sector de estudio.	68
Figura 4-26 : Fotografías de Pasarela Los escalones.....	69
Figura 4-27: Imágenes satelitales en la zona de Pasarela los escalones.	69
Figura 4-28: Perfil 9 Km8+454.....	70
Figura 4-29 : Fotografías del estado del puente Lautaro, abril 2024.	71
Figura 4-30: Imágenes satelitales en la zona de Puente Lautaro.	71
Figura 4-31: Perfil 17 Km16+176 en Puente Lautaro (cota inferior de viga de puente 9.1m)	72
Figura 4-32: Fotografías del estado del puente Mataquito, abril 2024.....	73
Figura 4-33: Imágenes satelitales en la zona de Puente Mataquito.....	73
Figura 4-34: Perfil 28 Km28+656.	74
Figura 4-35: Fotografías del enrocado en sector La Pesca, abril 2024.	75
Figura 4-36: Imágenes satelitales en la zona La pesca	75
Figura 4-37: Perfil a lo largo del enrocado.	76
Figura 4-38: Perfil 41 Km38+157	76
Figura 5-1: Perfil tipo de un terraplén con protección de manta de refuerzo vegetal.	82
Figura 5-2 : Eje del terraplen y sistema de drenaje natural en el sector de Licantén Urbano.	84
Figura 5-3: Sistema de drenaje natural en el sector Paraguay.	85
Figura 5-4: Sistema de drenaje natural en el sector Lora 1.	86
Figura 5-5: Sistema de drenaje natural en el sector Lora 2.	87

Figura 5-6: Sistema de drenaje natural en el sector Lora 3.	88
Figura 5-7: Sistema de drenaje natural en el sector Quelmén.	89
Figura 5-8: Sistema de drenaje natural en el sector Quelmén 2.....	90
Figura 5-9: Sistema de drenaje natural en el sector Calpún.	91
Figura 5-10: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio MOP-DOH, sector Puente Lautaro y Mataquito.	96
Figura 5-11: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio MOP-DOH, sector Puente Lautaro y Mataquito.	97
Figura 5-12: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio MOP-DOH, sector Licantén.	97
Figura 5-13: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio MOP-DOH, sector Licantén.	98
Figura 5-14: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio AIDR, sector Licantén.	99
Figura 5-15: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio DEFRA & Wallingford, sector Licantén.....	99
Figura 5-16: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio AIDR, sector Licantén.	100
Figura 5-17: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio DEFRA & Wallingford, sector Licantén.	100
Figura 5-18: Umbrales de temperatura, isoterma cero y precipitaciones para la generación de la alerta de crecida.	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tipos de geoformas en cuenca del río Mataquito	5
Tabla 2-2: Priorización sectores críticos por daños a la población e infraestructura y agricultura	11
Tabla 3-1: Resultados Diámetros Equivalentes mm y Peso Específico (WGS19S)	16
Tabla 3-2 : Resumen fichas catastro de obras	22
Tabla 3-3 : P_{24}^T [mm] anual cuenca zona de proyecto	24
Tabla 3-4 : Caudal medio mensual [m^3/s] cuenca zona de proyecto	25
Tabla 3-5 : Caudal medio mensual [m^3/s] cuenca estero Curepto	26
Tabla 3-6 : Caudal máximo instantáneo [m^3/s] cuenca zona de proyecto.....	26
Tabla 3-7: Periodo de retorno de la línea de nieve estimada para la cuenca del río Mataquito [m.s.n.m.].....	27
Tabla 3-8 : Caudal máximo instantáneo [m^3/s] zona de proyecto con cambio climático.	28
Tabla 3-9 Resultados de las fórmulas para el transporte de sedimentos litoral.	30
Tabla 3-10 : Escenario de modelación	35
Tabla 3-11 : Resumen clasificación Rosgen por tramo.	40
Tabla 4-1: Edificaciones afectadas (diferencia entre con y sin terraplén).....	63
Tabla 4-2: Porcentaje de áreas afectada por localidad.	63
Tabla 4-3: Porcentaje de áreas afectadas con canal pendiente única implementado.	65
Tabla 4-4: Edificaciones afectadas con implementacion de canal pendiente única	65
Tabla 4-5: Aumento de cotas de inundación en metros.....	67
Tabla 4-6: Edificaciones afectadas y por crecidas considerando cambio climático.	67
Tabla 4-7: Conteo de edificaciones afectadas por localidad y asociadas a crecidas hidrológicas.	77
Tabla 4-8 : Infraestructura Esencial.	78
Tabla 4-9: Conteo de predios afectados por localidad y asociadas a crecidas hidrológicas.	79
Tabla 5-1: Descripción de sectores	83
Tabla 5-2: Cotas de coronamiento de obra.	84
Tabla 5-3: Cotas de coronamiento de obra Paraguay.	85
Tabla 5-4: Cotas de coronamiento de obra Lora 1.....	86
Tabla 5-5: Cotas de coronamiento de obra Lora 2.....	87
Tabla 5-6: Cotas de coronamiento de obra Lora 3.....	88
Tabla 5-7: Cotas de coronamiento de obra Quelmén 1.	89
Tabla 5-8: Cotas de coronamiento de obra Quelmén 2.	90

Tabla 5-9: Cotas de coronamiento de obra Calpún.....	91
Tabla 5-10: Resumen del análisis de obras.	92

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP, responsable de la conservación de los cauces naturales, el 2023 enfrentó una emergencia en las cuencas del Mataquito y Maule. Tras una alerta de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), un sistema frontal severo, intensificado por un "río atmosférico", afectó la zona central entre el 19 y 22 de agosto. Las mayores precipitaciones se concentraron en las zonas cordillerana y precordillerana, impactando directamente la Región del Maule.

En la Región del Maule, el evento meteorológico provocó un aumento crítico de caudal en el Río Mataquito, resultando en la inundación de sus terrazas y en desbordes específicos en ambas riberas. Esta situación dejó en estado de vulnerabilidad a viviendas y terrenos agrícolas ribereños en varias localidades, incluyendo Idahue, Constantue, Docamavida y, de manera significativa, la ciudad de Licantén.

Ante la gravedad y urgencia de la situación, la DOH ha determinado la necesidad de contratar, mediante trato directo, al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) para la consultoría denominada "Diagnóstico Hidráulico Río Mataquito, Licantén a Desembocadura". El objetivo de este estudio es realizar un análisis de ingeniería del comportamiento, a través del análisis del comportamiento hidráulico fluvial del cauce del río Mataquito en la zona de Licantén. El estudio de diagnóstico proporcione medidas estructurales y no estructurales las cuales permitan a la DOH implementar un manejo adecuado del cauce y mitigar el riesgo en los terrenos inundables a futuro.

Para lograr el objetivo, se realiza la revisión de antecedentes asociados a crecidas anteriores, registros de variables hidráulicas, análisis de imágenes satelitales y revisión de estudios anteriores para poder caracterizar la zona de estudio. Lo anterior se complementa con la realización de trabajos de terreno para la medición de topografía, batimetría, registro de caudales, niveles y corrientes, levantamiento de información acerca de infraestructura esencial y obras en el río, recolección de muestras de sedimento.

En base a la revisión de antecedentes y los datos recolectados, se realiza un estudio hidrológico de la cuenca y en particular en la zona de estudio, obteniendo así valores tales como hidrogramas de crecidas, caudales asociados a periodos de retorno hidrológicos y considerando efectos de cambio climático.

Todo esto forma parte de la información de entrada para los modelos marítimos y fluviales necesarios para entender la dinámica hidráulica y sedimentología del sistema.

El clima de oleaje predominante en la zona de la desembocadura se caracterizó mediante un análisis detallado de la propagación del oleaje, esto y estadística de 35 años de oleaje espectral, permitieron la estimación de la tasa de transporte neto y total de sedimentos empleando distintas formulaciones como Kamphuis, CERC y Van Rijn. De este análisis, se evidencia una interacción permanente entre los procesos naturales fluviales y las corrientes marinas, lo que está estrechamente relacionada con la dinámica sedimentaria del estuario. La comprensión de esta compleja interacción es crucial para la gestión costera, especialmente ante la ocurrencia de eventos extremos y la planificación de posibles intervenciones humanas.

El diagnóstico fluvial se aborda mediante modelaciones hidráulicas, incluyendo la calibración con datos de eventos anteriores y la simulación de crecidas hidrológicas con y sin el efecto de cambio climático. El análisis considera distintos escenarios para comprender la interacción de elementos como la barra litoral o los terraplenes de acceso a los puentes Mataquito y Lautaro en la determinación de los niveles de inundación.

Finalmente, el informe presenta una serie de propuestas de mitigación a la amenaza de inundación, incluyendo la definición de terraplenes de protección, el diseño de un sistema de alerta temprana y recomendaciones para la gestión territorial en el área de estudio.

1.1 OBJETIVOS

En el presente estudio de ingeniería, a través del análisis del comportamiento hidráulico fluvial del cauce del río Mataquito en la zona de Licantén, se espera obtener un diagnóstico de la dinámica fluvial y marítima del sector, que permita elaborar una propuesta de medidas estructurales y no estructurales que permitan adoptar un adecuado manejo del cauce y de los terrenos inundables.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, que permitan alcanzar el objetivo general, es posible señalar lo siguiente:

- i. Realizar un diagnóstico hidráulico fluvial del río Mataquito, comuna de Licantén, identificando zonas de inundación y donde existan procesos de erosión de riberas.
- ii. Efectuar una caracterización de la geomorfología del río Mataquito y su evolución en un periodo de tiempo que permita establecer patrones de dinámica fluvial.
- iii. Proponer medidas estructurales que permitan mitigar las inundaciones.
- iv. Proponer medidas no estructurales.
- v. Desarrollar los estudios técnicos y una propuesta preliminar de deslindes del cauce del río Mataquito, conforme a lo señalado en el DS N° 609 del Ministerio de Bienes Nacionales, que sirva como insumo para el Informe Técnico que debe realizar la Dirección de Obras Hidráulicas.
- vi. Realizar un estudio de la dinámica marítima fluvial que permita conocer las condiciones de borde de la descarga del río Mataquito, y posibles medidas estructurales en ese sector.

2. CARACTERIZACIÓN

Esta sección describe la zona de estudio, que abarca el sector poniente de la cuenca del río Mataquito entre Licantén y la desembocadura en el Océano Pacífico, incluyendo partes de las comunas de Licantén y Curepto.

- Descripción y Geomorfológica: Se sitúa la zona dentro del valle del río Mataquito y se caracteriza la geomorfología regional y local, definiendo unidades como la Planicie Marina y el Estuario.
- Climática: Se caracteriza por un clima templado de tipo mediterráneo, con un periodo seco de cuatro a cinco meses. El uso de suelo predominante es terreno agrícola (37.6%), praderas y matorrales (21.7%).
- Áreas protegidas: Destaca la presencia de dos Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad en la desembocadura, incluyendo el Área Marina Huenchullami-Mataquito y la Desembocadura río Mataquito, ambos considerados importantes ecosistémicamente.
- Eventos Anteriores: Recopila información de inundaciones históricas y recientes (incluyendo eventos de 1986, 2008, y junio y agosto de 2023), identificando Licantén como la comuna más afectada

2.1 DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el sector poniente de la cuenca del Río Mataquito, en la Región del Maule, e incluye las comunas de Licantén (Curicó) y Curepto (Talca). Su delimitación va desde el límite urbano de Licantén hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico. El área total es de 78.31 km², lo que representa el 1.27% de la cuenca del Mataquito, y porcentajes administrativos del 10.66% de Licantén y 4.58% de Curepto.

Licantén presente el mayor centro poblado dentro del área de estudio. Esta localidad está conectada a Curepto, Iloca y Hualañé (esta última agua arriba del río) mediante las rutas pavimentadas K-60 y J-60, respectivamente. Respecto al río, el Mataquito se forma por la confluencia de los ríos Teno y Lontué. Desde su origen, recorre 95 km hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, recibiendo solo los aportes hídricos de las quebradas laterales a lo largo del valle.

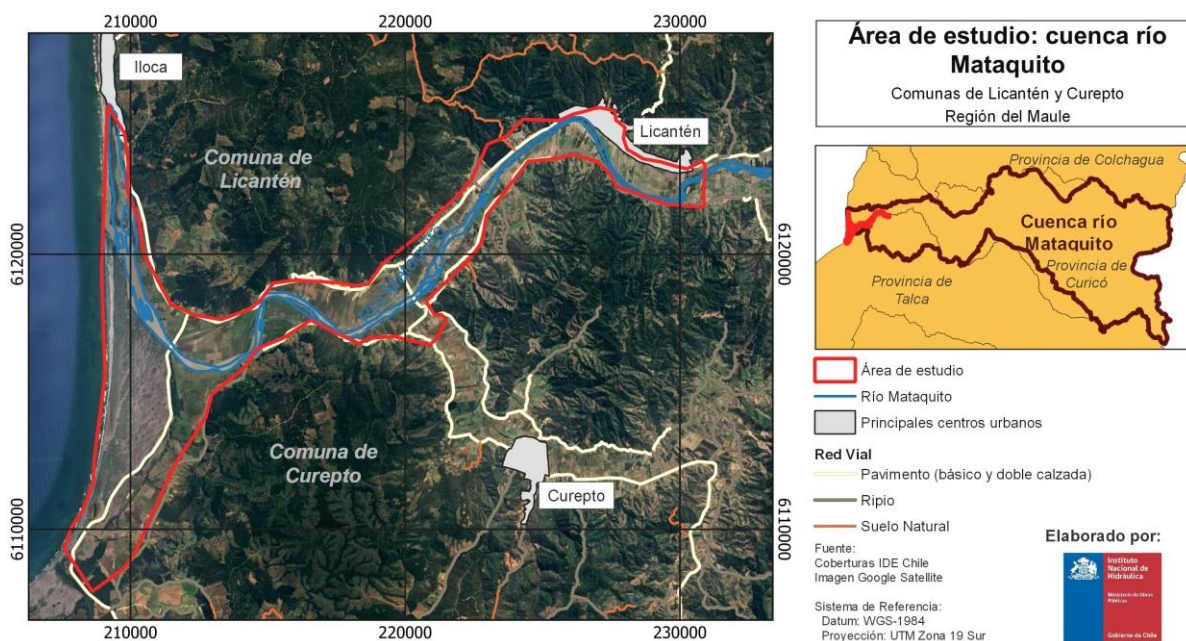


Figura 2-1 : Área de estudio
(Fuente: Elaboración propia en base a IDECHILE)

2.2 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLOGICA

La geomorfología de la Región del Maule se define por seis unidades principales (Borgel, 1983): la Planicie Marina/Fluviomarina, la Cordillera de la Costa, el Llano Central (Valle Central), la Precordillera y la Cordillera Andina de retención crionival. La Cordillera Andina se caracteriza por la presencia de volcanes que no suelen superar los 4.000 m.s.n.m. (destacando el Planchón-Peteroa y Descabezado Grande), y concentra importantes cuerpos de agua de origen volcánico y glaciar como la Laguna de Teno y el Complejo Volcánico Laguna del Maule. Entre la Precordillera y la Cordillera de la Costa se ubica el Valle Central (o Llano Central), que puede alcanzar 40 km de ancho y es crucial para las actividades agrícola y forestal, albergando cauces como los ríos Teno, Lontué y Ancoa, además del embalse Colbún. La Cordillera de la Costa es de relieve suave (300 a 700 m) y se ve interrumpida por llanos de sedimentación. Finalmente, las Planicies Litorales son zonas planas con pendiente suave hacia el oeste, aunque su desarrollo se interrumpe donde la Cordillera de la Costa llega hasta el mar (e.g., sur de Constitución). El área específica de estudio se sitúa en el valle del Río Mataquito, interrumpiendo la Planicie Marina y parte de la Cordillera de la Costa (22 km aguas arriba de la desembocadura). Gran parte del área forma parte de la planicie de inundación, por lo que las elevaciones generalmente no superan los 80 m.s.n.m., con la excepción del Cerro San José de Las Lomas al sur de la desembocadura.

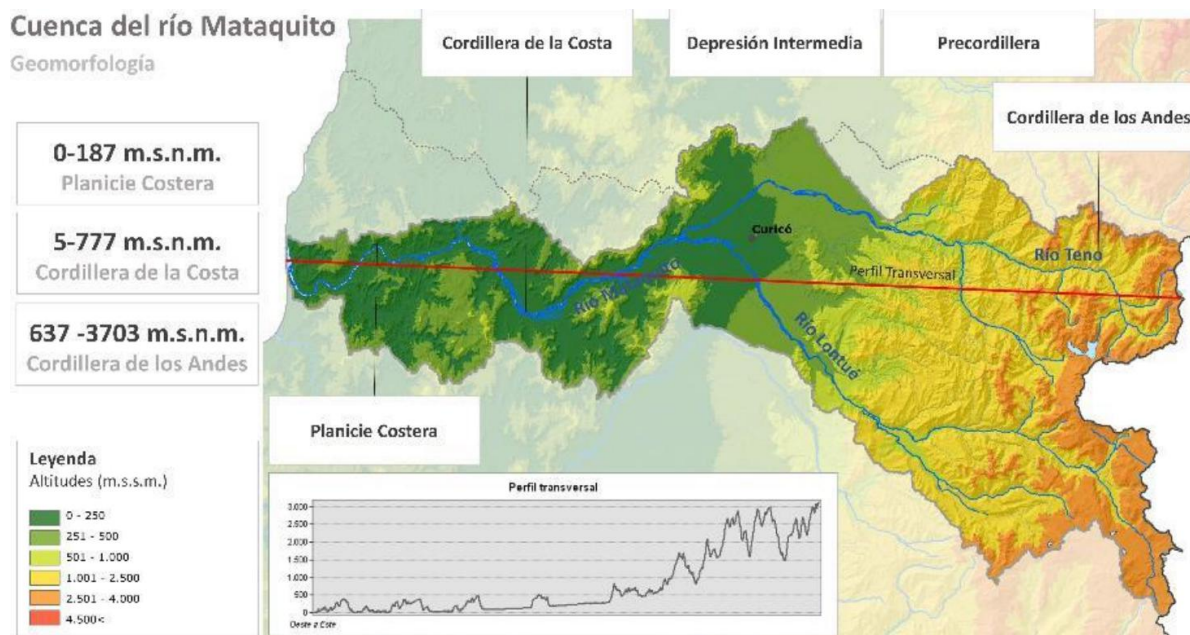


Figura 2-2 : Geomorfología cuenca río Mataquito
(Fuente: (UTP HIDROGESTIÓN S.A.- NTT DATA CHILE S.A., 2022))

En el “Plan maestro de manejo de cauces Cuenca río Mataquito” (DOH – Prisma Ingeniería, 2003) se desarrolla las formas fluviales asociadas a lechos móviles en río Mataquito. En este estudio se definen 11 tipos de geoformas básicas asociadas a procesos fluviales, las cuales se detallan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Tipos de geoformas en cuenca del río Mataquito

Tipo de Geoforma	Simbología Unidad	Descripción
Terraza Marina	TM	Esta unidad conforma el nivel marino que enmarca la desembocadura del río Mataquito. Los depósitos de trasgresión marina sobreyacen discordantes con rocas fundamentales del zócalo.
Cordón Litoral	CL	El caso del Mataquito es distinto a los demás ríos de Chile Central, debido a que la zona deltaica está desviada por un cordón litoral paralelo a la costa formado por acreción de cordones litorales. Esta unidad representa la acumulación lineal de grava y arena en la playa, formando una cresta levantada paralela a la marca de las mareas altas.
Laguna Estuarial	LE	La forma que integra esta unidad es uno de los elementos que contiene la ría colmatada del Mataquito. Es una zona lagunar con laguna distal semi- bloqueada por barrera litoral o flecha, donde se identifican canales de marea y otras formas bajas.
Superficie Ría Colmatada	SR	La desembocadura del río Mataquito, al igual que la mayoría de los ríos de Chile Central, forma una ría. Esto es, un valle fluvial invadido en parte o en su totalidad por el mar. La penetración media del nivel de marea a partir del nivel de bajamar (m) es de 3.125 m, pero la marea de salinidad penetra fácilmente hasta unos 10 km desde la desembocadura. La Ría del Mataquito está colmatada por sedimentos fluviomarinos y ejerce influencia efectiva en el comportamiento de los meandros estuariales y por ende hacia aguas arriba.
Campo de Dunas	D	Los montículos de arena que se encuentran por encima de la señal de marea alta en esta costa baja y que cubren la unidad anterior, corresponden a depósitos de arenas que constituyen las partes más finas transportadas por la corriente fluvial y luego trabajadas por las corrientes

Tipo de Geoforma	Simbología	Unidad	Descripción
			de viento costeras. Tiene un rol importante el campo de dunas al desviar hacia el norte permanentemente al curso del río Mataquito.
Terraza Fluvial	T		Constituye una plataforma de terraplanamiento notoria en el fondo de valle. Aquí se eleva unos pocos metros sobre el lecho mayor de inundación. En la desembocadura y hasta unos 10 km hacia aguas arriba, este nivel está terraplenado sobre los sedimentos modernos de una ría colmatada y alcanza una altura de 7 a 9 m. A partir de este punto, y hasta el Km. 35 está desarrollada en sedimentos fluviales propiamente tales y su altura sobre el lecho mayor aumenta gradualmente. Desde el Km. 35 hasta el Km. 85, predominan los aportes longitudinales en su cuerpo y su anchura está adaptada a las sinuosidades del valle. Este nivel muestra en su constitución lentes de selección mixtos fluviales y aluviales de aportes laterales a partir del Km. 85 hasta la confluencia de los ríos Teno y Lontué.
Fondo Valle Aluvial	FA		En esta unidad se incluyen todos los materiales fluviales que rellenan el fondo de una serie de valles secundarios afluentes, ubicados en ambos flancos del valle del río Mataquito. El material constituyente corresponde a arenas y gravas arenosas, con esporádicos niveles lenticulares finos, tales como limos y arcillas, que provienen de la erosión de los relieves adyacentes.
Depósitos de Cineritas	DC		Gruesa secuencia alternada de capas de cenizas y tobas de lapilli de carácter ácido, con incorporación de fracciones granulares del tipo arenas y gravas, en forma de lentes, inter-estratificadas de tonalidades grises a oscuras. Conforman una superficie de terraplanamiento aterrazada, enmarcando el lecho menor del río Mataquito.
Conos de Deyección Afluentes	Cd		En esta unidad se agrupan los aportes laterales de quebradas y esteros afluentes cuyos cuerpos sedimentarios constituyen estructuras en forma de abanico, formadas por depósitos de corriente ultra densa, tipo corrientes de detritos, en las cuales es posible distinguir una cabecera, el cuerpo y el pie, con un perfil longitudinal cóncavo y un perfil transversal convexo. Constituyen fuentes de sedimentos para el escurrimiento del río Mataquito.
Depósitos Coluviales	C		Esta unidad corresponde a la zona de concavidad basal de los flancos del valle, localizada al pie de los relieves montañosos. Está formada por una cubierta discontinua de material fragmental resultante de procesos de intenso fracturamiento y alteración superficial de la roca fundamental, que deriva en un tipo de formación superficial. Estos depósitos engranan con los materiales fluviales y/o cineríticos del río Mataquito y tienen una amplia distribución. Se han mapeado sólo donde la escala lo ha permitido.
Lecho Mayor	LM		Este tipo de lecho corresponde a la zona del fondo del valle, que muestra claros rasgos de microformas de inundación y depósitos de aluviones recientes. Es más ancho que el lecho menor, ocupado ordinariamente por el escurrimiento de las aguas. En el río Mataquito sólo es posible distinguir esta unidad en algunos sectores entre el Km. 65 y el Km. 83.

(Fuente: (DOH - Prisma Ingeniería, 2003))

2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

2.3.1 CLIMA

El área de estudio se caracteriza a nivel regional por un clima templado de tipo mediterráneo, el cual presenta un periodo de estación seca de cuatro a cinco meses y concentra precipitaciones intensas en la época invernal. La temperatura media regional se sitúa en 19°C, con valores extremos que alcanzan los 30°C en verano y mínimas de 7°C durante el invierno. De acuerdo con la clasificación de Köppen, la zona específica de estudio

se inserta en un clima mediterráneo de lluvia invernal. Este patrón climático se mantiene hasta la precordillera, evolucionando a un tipo de altura al ingresar en la Cordillera de los Andes, lo que conlleva un aumento de las precipitaciones y un descenso de la temperatura media. En el sector costero, la influencia marítima se traduce en la ausencia de nieve y casi nula presencia de heladas (CIREN, 2011). Por otra parte, la Cordillera de la Costa presenta un clima templado con verano seco y estación húmeda, donde la precipitación puede llegar a los 1.000 mm en áreas de mayor humedad. Los datos de la estación Río Mataquito en Licantén reflejan este régimen, mostrando un claro aumento de lluvias en invierno y una oscilación de la temperatura media entre 5°C en invierno y 17.5°C en verano.

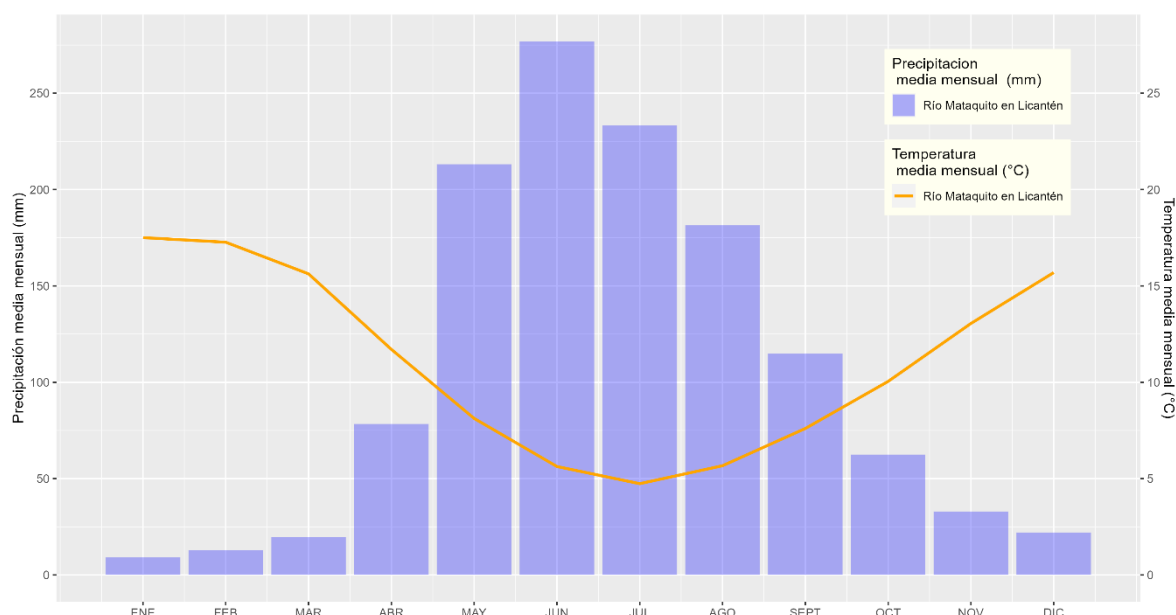


Figura 2-3 : Climograma estación río Mataquito en Licantén

(Fuente: (DGA, Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, 2024))

2.3.2 VEGETACIÓN

De acuerdo con el Catastro de Bosque Nativo 2016 de CONAF (2018), el uso de suelo en el área de estudio se caracteriza por el predominio de terrenos agrícolas (37.6%), seguidos por praderas y matorrales (21.7%) y playas-dunas (17%). El uso urbano, correspondiente al área de Licantén, es marginal, abarcando solo el 2.8% de la superficie total. La cobertura de bosques representa apenas un 8% del área de estudio; sin embargo, el 88% de esta superficie boscosa corresponde a plantaciones forestales, y solo un 9% a bosque nativo. Respecto a la vegetación, el área se inserta en el piso vegetacional de bosque esclerófilo mediterráneo costero (Lüebert y Pliscoff, 2004), con especies características como el litre y el corcolén. No obstante, informes recientes (UTP HIDROGESTIÓN S.A.- NTT DATA CHILE S.A., 2022) señalan que grandes extensiones de esta vegetación nativa han sido reemplazadas por plantaciones de pino. Dentro de las praderas, destacan las anuales (47%) y perennes (32%), localizadas próximas a la desembocadura del río Mataquito.

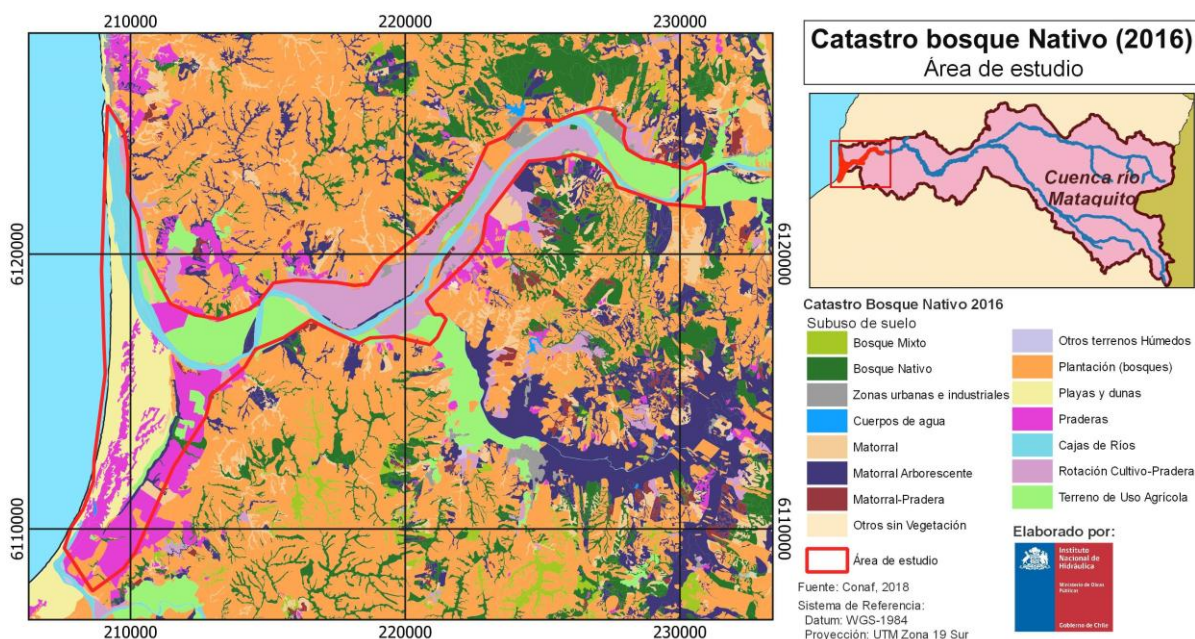


Figura 2-4 : Catastro bosque nativo en el área de estudio (2016)

2.3.3 ÁREAS PROTEGIDAS

En el ámbito de la conservación, la cuenca del Río Mataquito no cuenta con áreas bajo el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE¹). Sin embargo, la desembocadura sí alberga dos Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad, identificados en la Estrategia Regional del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2024). Estos sitios son cruciales por su alta importancia ecosistémica, sus particularidades ecológicas o por ser hábitat de especies amenazadas, siendo, por ende, consideradas en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Adicionalmente, los cauces de los ríos Mataquito, Lontué, Teno y sus tributarios forman parte del Inventario de Humedales del MMA desde 2008, un instrumento clave para el seguimiento ambiental, la planificación, conservación y manejo sostenible de estos cuerpos de agua.

Respecto a los instrumentos de planificación territorial, la comuna de Licantén no cuenta actualmente con un Plan Regulador Comunal aprobado ni es parte de un Plan Regulador Intercomunal. Desde 2004, los intentos por aprobarlo han sido afectados por eventos naturales significativos (terremoto y tsunami de 2010, e inundación de 2008), lo que ha obligado a diversas actualizaciones para definir áreas de riesgo. Un informe de 2012 identificó riesgos específicos por inundación por desbordes de cauces, riesgo de tsunami, flujos de detritos, remoción en masa y anegamiento en el área urbana. Actualmente, no existe evidencia de una nueva propuesta de Plan Regulador Comunal por parte del municipio. En contraste, la comuna de Curepto sí posee un Plan Regulador Comunal aprobado, aunque su zonificación se restringe a las áreas urbanas de Curepto y Gualleco, omitiendo la ladera sur del Río Mataquito de las áreas de riesgo.

De acuerdo con la Estrategia Regional de Conservación de la Biodiversidad (ERB), existen dos Sitios Prioritarios en la desembocadura del Río Mataquito. El primero es el Área Marina Huenchullami - Mataquito, con una superficie de \$2406.661 ha, que destaca como un sitio

¹ Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) considera los Parques Nacionales, Reservas Nacionales y Monumentos Naturales

de encuentro de ecosistemas marinos y terrestres, albergando avifauna variada, cisnes de cuello negro y siendo una zona de desove vital para especies como el lenguado, la corvina y el róbalo. El segundo sitio prioritario es la Desembocadura río Mataquito propiamente dicha, con \$1569.271 ha Este sitio es relevante debido a su interacción marino-terrestre, la cual permite una gran variedad de flora y fauna, y es una zona importante de nidificación para diversas aves como garzas, cisnes, flamencos y aves migratorias (MMA, 2013).

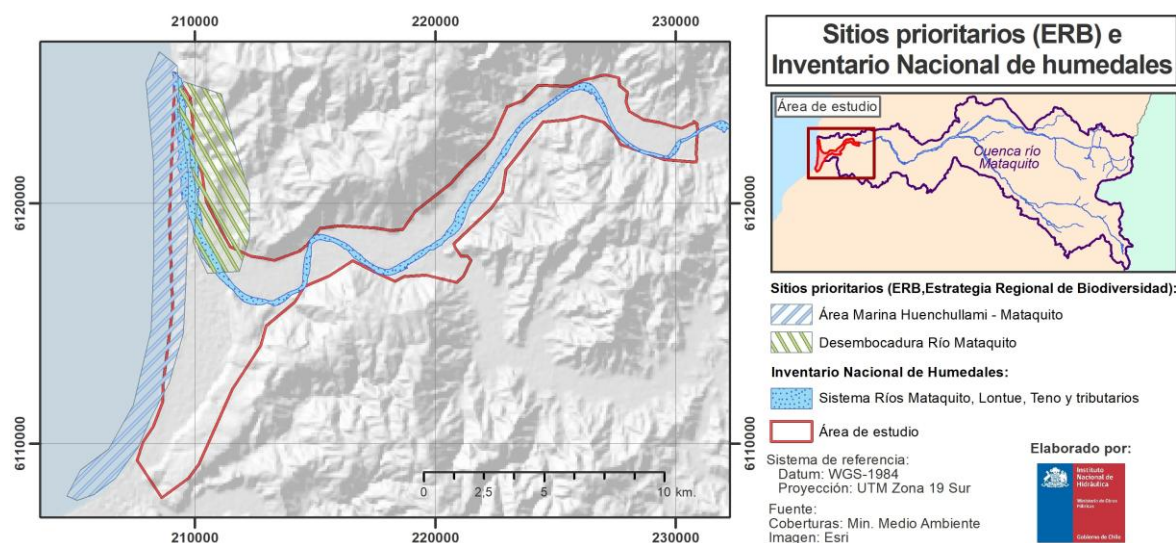


Figura 2-5 : Sitios prioritarios (ERB) e inventario de humedales en área de estudio.

(Fuente: (Ministerio del Medio Ambiente, 2024))

2.4 CARATERIZACIÓN EVENTOS ANTERIORES

La revisión del “Plan maestro de manejo de cauces Cuenca río Mataquito” (MOP-DOH VII Región, 2003) y otros estudios posteriores confirman que la comuna de Licantén ha sido históricamente afectada por numerosos eventos hidrometeorológicos extremos que han provocado desbordes e inundaciones recurrentes del río Mataquito. El análisis de prensa de 2003 documentó eventos históricos, los cuales han persistido hasta la fecha, destacándose el Tsunami de 2010 y la severa inundación de 2008. Estudios más recientes (Centro de Información de Recursos Naturales, 2021) señalan las inundaciones de 1986 y 2008 como las más graves, alcanzando el agua las cotas de 14 y 12 metros, respectivamente, sumándose otros eventos menos intensos pero dañinos en 1987, 2000, 2001, 2002 y 2006.

Los desbordes del Mataquito en Licantén se explican principalmente por un efecto de embudo, causado por el angostamiento de la caja del río aguas abajo de la localidad. Las inundaciones se gatillan cuando el caudal instantáneo supera los 3200 m³/s, lo que típicamente inunda dos puntos críticos: el puente del estero El Bolsón (oriente) y Villa Angosta (poniente), aislando la ciudad.

Según (Deuman, 2018) el evento de crecida del 23 de mayo de 2008 es considerado particularmente inusual y severo, inutilizando la estación fluviométrica. Si bien la estación DGA en Pasarela los escalones dejó de reportar con un caudal instantáneo de 4154.6 m³/s, estima que el caudal máximo instantáneo total del evento se estima entre 7000 – 8000 m³/s, superando con seguridad un periodo de retorno de 200 años. La comparación con un evento de menor caudal en 2002, esto sugiere que las temperaturas más altas y la consecuente elevación de la isoterma cero (1700 m en 2002 vs. 2200 m en 2008) explican, al menos parcialmente, la mayor magnitud de la crecida de 2008. Las consecuencias de

estos aumentos de caudal son el incremento de la erosión en terrenos agrícolas, el riesgo de inundación a viviendas y la vulneración de infraestructura pública esencial, como el pozo de captación del Sistema de Agua Potable Rural (APR) Majadilla de Rauco, riesgo que se incrementa con los deshielos estivales. Por último, el Plan maestro de 2003 ya había realizado una priorización de los sectores críticos basados en los daños a la población, infraestructura y sector agrícola.

A modo de resumen, "Plan maestro de manejo de cauces Cuenca río Mataquito" (MOP-DOH VII región, 2003) realiza una priorización de sectores críticos por daños a la población e infraestructura y al sector agrícola, el cual se presenta en la Tabla 2-2

En respuesta a los eventos hidrometeorológicos de junio y agosto de 2023, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) ejecutó labores de conservación de riberas y encauzamiento del Río Mataquito en sectores críticos, cuyos detalles se especifican en las minutas técnicas que se adjuntan en el ANEXO H. ANTECEDENTES. Particularmente, la minuta técnica de la DOH sobre las "Emergencias por Precipitaciones 18 al 22 agosto 2023" menciona el sector de Idahue, donde se reportaron alrededor de 20 viviendas afectadas. Adicionalmente, se registraron daños en la zona de Docamavida, ubicada 1.5 km aguas arriba del área de estudio, la cual es altamente vulnerable al daño por encontrarse en la zona externa de una curva del río; sin embargo, no se precisa la cantidad de viviendas o predios agrícolas afectados en esa localidad.

Tabla 2-2: Priorización sectores críticos por daños a la población e infraestructura y agricultura

PRIORIZACIÓN SECTORES CRITICOS POR DAÑOS A LA POBLACIÓN E INFRAESTRUCTURA		
Comuna (Sector)	Ribera	Descripción y Justificación
Licantén (La Pesca)	Derecha	En La Pesca el río ha estado socavando la ribera, acercándose cada vez más a las viviendas, ubicadas en la ruta J-60. En el sector existen espigones de defensa antiguos y recientemente se construyó un revestimiento de ribera. Posiblemente, se requeriría reforzar y peraltar el espigón N°1.
Licantén (Idahue-Placilla)	Derecha	El río se desborda en el sector de Idahue e inunda el sector de Placilla. En las crecidas de los años 2000 y 2002, resultaron 7 viviendas anegadas y 4 familias albergadas en Placilla. En el sector de Idahue se inundó la Ruta J-60 en una extensión de 150 m y resultó anegada una vivienda de 140 m ² , quedando con sedimentos del río. En el sector existen defensas fluviales (espigones) algunas de las cuales quedaron colgadas al cambiar de curso el río hacia la ribera opuesta; actualmente el río volvió a su curso, afectando las defensas que son insuficientes.
PRIORIZACION SECTORES CRITICOS POR DAÑOS A LA AGRICULTURA		
Comuna (Sector)	Ribera	Descripción y Justificación
Curepto (La Orilla)	Izquierda	En este sector desemboca al río Mataquito el Estero Curepto (La Laguna), produciendo grandes inundaciones, que afectan a las propiedades agrícolas, dañando las siembras de otoño y retrasando las de primavera, lo cual causa grandes pérdidas a los agricultores, que se dedican a rubros tradicionales, tales como garbanzo, lentejas, trigo de invierno, etc. Además quedan aislados los sectores de la ribera norte de la comuna: Calpún, Paraguay, Docamávida, Constantué, Limávida, y Huaquén, como resultado de la inundación de las rutas K-80 y K-278.
Curepto (Docamávida, Calpún y Paraguay)	Izquierda	Sectores afectados por grandes inundaciones. Se dedican a la producción de maíz y alfalfa.
Licantén (Naicura, Los Cuervos, Médano y Badillo)	Derecha	Sectores afectados por inundaciones y erosión de ribera leve.
Licantén (Quelmén, Lora y Huapi)	Derecha	Sectores afectados por inundaciones. Se dedican a la producción de rubros tradicionales y ganadería.
Licantén (Idahue, Placilla e Idahue Chico)	Derecha	Sectores afectados por inundaciones y erosión de ribera. Se dedican a la producción de rubros tradicionales.

(Fuente: (DOH - Prisma Ingeniería, 2003))

2.4.1 Evento 2002

De acuerdo con un informe elaborado por la Oficina Nacional de Emergencia, este sistema frontal frío afectó con intensas precipitaciones y fuertes vientos desde la Región de Atacama hasta la Región de los Lagos, entre los días 24 y 27 de mayo de 2002. La estación "Río Mataquito en Licantén" registró 140 mm de precipitación acumulada en estos 4 días, donde además la línea de nieve se mantuvo sobre los 2500 m.s.n.m. al inicio del sistema frontal y bajó el mismo día que se observó el caudal peak, lo que implica que el 86% de la cuenca se encontraba precipitando en forma líquida. En relación con el caudal máximo instantáneo, este alcanzó su mayor valor el día 26 de mayo, con 1,255 m³/s en la estación "Río Mataquito en Licantén".

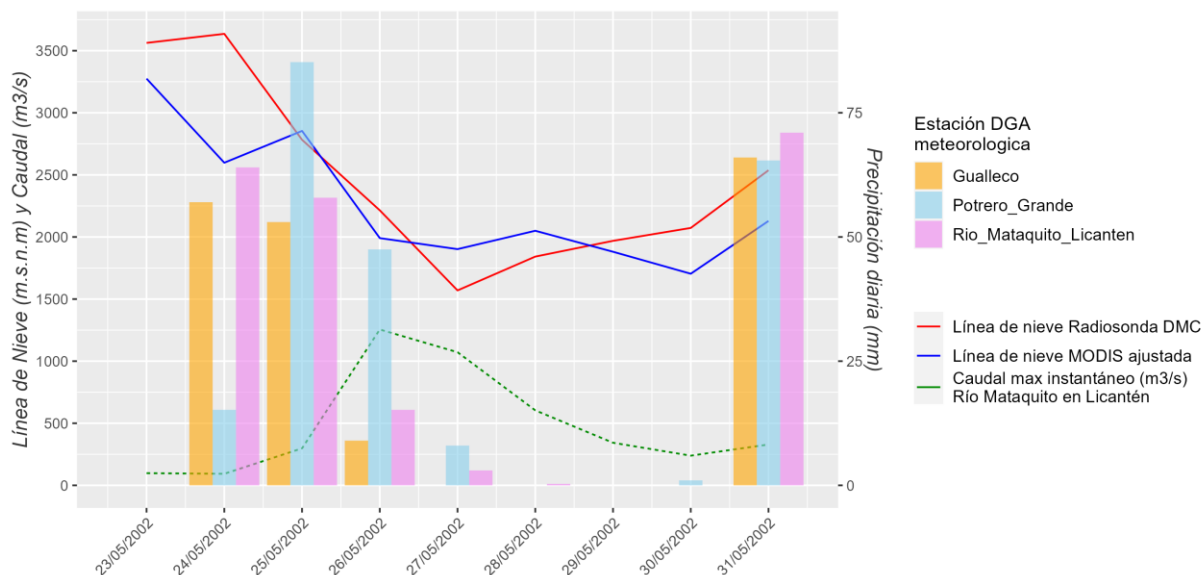


Figura 2-6 : Resumen de línea de nieve, precipitación y caudal máximo instantáneo días previos y posteriores al evento de mayo de 2002.

(Fuente: Elaboración propia)

2.4.2 Evento 2006

De acuerdo con un informe elaborado por la Oficina Nacional de Emergencia, el evento de inundación ocasionado el día 12 de julio de 2006 fue alertado por esta misma institución a las respectivas direcciones de Protección Civil y Emergencia (desde la región de Valparaíso hasta la región de Los Lagos) a partir del día 7 de julio, donde el día 11 de julio se declaró alerta Amarilla entre las regiones del Maule y Los Ríos. Este sistema frontal alcanzó su mayor magnitud en la zona cordillerana de la Región del Biobío, con precipitaciones que superaron los 400 mm en 48 horas. A su vez, este evento se registró en un ambiente cálido, vale decir, con un alta isoterma cero. Esta misma entidad lo categorizó como un sistema frontal el cual provocó 13 personas damnificadas, una vivienda con daño menor y una con daño mayor.

2.4.3 Evento 2008

De acuerdo con un informe elaborado por la Oficina Nacional de Emergencia, un sistema frontal de gran intensidad afectó a la zona centro sur entre el 17 y el 24 de mayo de 2008, donde los mayores efectos se sintieron en la comuna de Licantén la que recibió el mayor impacto, generando un centenar de damnificados, con destrucción y daños severos en sus viviendas, interrupción de rutas y anegamiento del hospital. A partir del día 14 de mayo de 2008 la Dirección ONEMI advierte de este evento a sus direcciones regionales, declarando cinco días después alerta Amarilla entre las Regiones de Valparaíso y Los Lagos.

De acuerdo con registros de la Dirección Meteorológica de Chile, en la zona centro sur, la isoterma 0°C se posicionó en 3,531 m.s.n.m., produciendo un mayor aporte pluvial a la cuenca y arrastre de sedimentos, y a su vez un aumento de la turbiedad de esteros y ríos, lo cual afectó a las instalaciones de captación de agua potable.

2.4.4 Eventos 2023

En el año 2023 ocurrieron dos eventos de precipitación importantes que desencadenaron importantes aumentos de caudal en el río Mataquito en la zona de proyecto. De acuerdo

con los registros de SENAPRED, las comunas de Licantén y Curepto presentaron 13.000 y 18.896 personas afectadas, respectivamente.

La estación meteorológica DGA "Río Mataquito en Licantén" registró 76.8 mm de precipitación acumulada en estos 3 días, donde además la línea de nieve se mantuvo sobre los 2200 m.s.n.m. lo que implica que al menos el 76% de la cuenca se encontraba precipitando en forma líquida (valor menor a los 2 años periodo de retorno). En relación con el caudal máximo instantáneo, este alcanzó su mayor valor el día 24 de junio, con 5,431 m³/s en la estación "Río Mataquito en Licantén", posterior a este registro, la estación dejó de funcionar.

3. ESTUDIOS BÁSICOS

Este es el capítulo se presenta un resumen de las actividades de recopilación de datos y análisis fundamentales que constituyen la base del estudio. Los detalles de las metodologías, cálculos y resultados completos se encuentran en los Anexos correspondientes: Anexo A_Topografía Memoria de Calculo: Trabajo en Terreno, Anexo C_Hidrología Memoria de Calculo: Hidrología, Anexo D_Hidráulica Memoria de Calculo Hidráulica Fluvial y Memoria de Calculo Hidráulica Marítima.

- Levantamiento Topográfico: Incluye el uso de tecnología LiDAR para generar el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y el levantamiento de Batimetría del cauce, dividida en cuatro zonas desde la desembocadura hasta Licantén, utilizando una embarcación tipo Zodiac y ecosonda.
- Caracterización Granulométrica: Se realizaron calicatas y muestras superficiales para analizar la distribución de sedimentos, observando que el diámetro medio (D50) tiende a aumentar cerca de la desembocadura debido a la limpieza de finos por las oscilaciones de la marea.
- Mediciones en Terreno: Se realizaron Aforos (mediciones de caudal) con equipos ADCP, instalación de un ADCP fijo para medir corrientes estuarinas, e instalación de Mareógrafos para registrar el nivel del agua a lo largo del cauce durante 33 días.
- Catastro Estructura Existente: Se caracterizaron 7 obras relevantes, incluyendo puentes (Mataquito, Lautaro, Pasarela los Escalones) y defensas fluviales, mediante fichas descriptivas.
- Hidrología: Se analizaron los registros de precipitaciones y caudales, seleccionando estaciones y aplicando análisis de frecuencia. Para caudales máximos, la distribución Pearson III fue la escogida como representativa. Se estimó el caudal formativo en 107 m³/s. Se analizó la evolución de la Isotherma 0°C y se revisaron los Eventos Anteriores (2002, 2006, 2008 y 2023).
- Análisis de Cambio Climático: Se evaluaron proyecciones bajo escenarios RCP, notando una alta incertidumbre. Finalmente, se adoptó un escenario conservador de aumento del caudal máximo instantáneo en un 10% para el diseño de obras, basándose en recomendaciones externas.
- Hidráulica Marítima: Incluye la caracterización del clima de oleaje (utilizando el modelo SWAN), el análisis del transporte longitudinal costero (LST), y el análisis de la dinámica del estuario (clasificando el estuario como inestable con tendencia a migrar o cerrar).
- Hidráulica Fluvial: Se utilizó el software TELEMAC 2D para simular escenarios hidrológicos. Los resultados de calibración estiman que el caudal máximo de la crecida de agosto de 2023 fue de 5974 m³/s, asociado a un periodo de retorno de aproximadamente 92 años.
- Régimen Sedimentológico: Se evaluó el potencial de erosión y se clasificó geomorfológicamente el río Mataquito según Rosgen, identificando los tramos aguas arriba como tipo B5 (riffle-pool) y los tramos estuarinos como tipo C5 (meándrico)

3.1 LEVANTAMIENTO TOPO BATIMETRICO

Para la generación del Modelo Digital de Terreno (DTM), el cual es un componente esencial de las simulaciones hidráulicas, se realiza un levantamiento LiDAR (Light Detection and Ranging) con un sensor DJI Zenmuse L1, complementada en el río se realizaron sondeos con Ecosonda Hidrográfico de simple frecuencia, marca ODOM modelo Hydrotac.

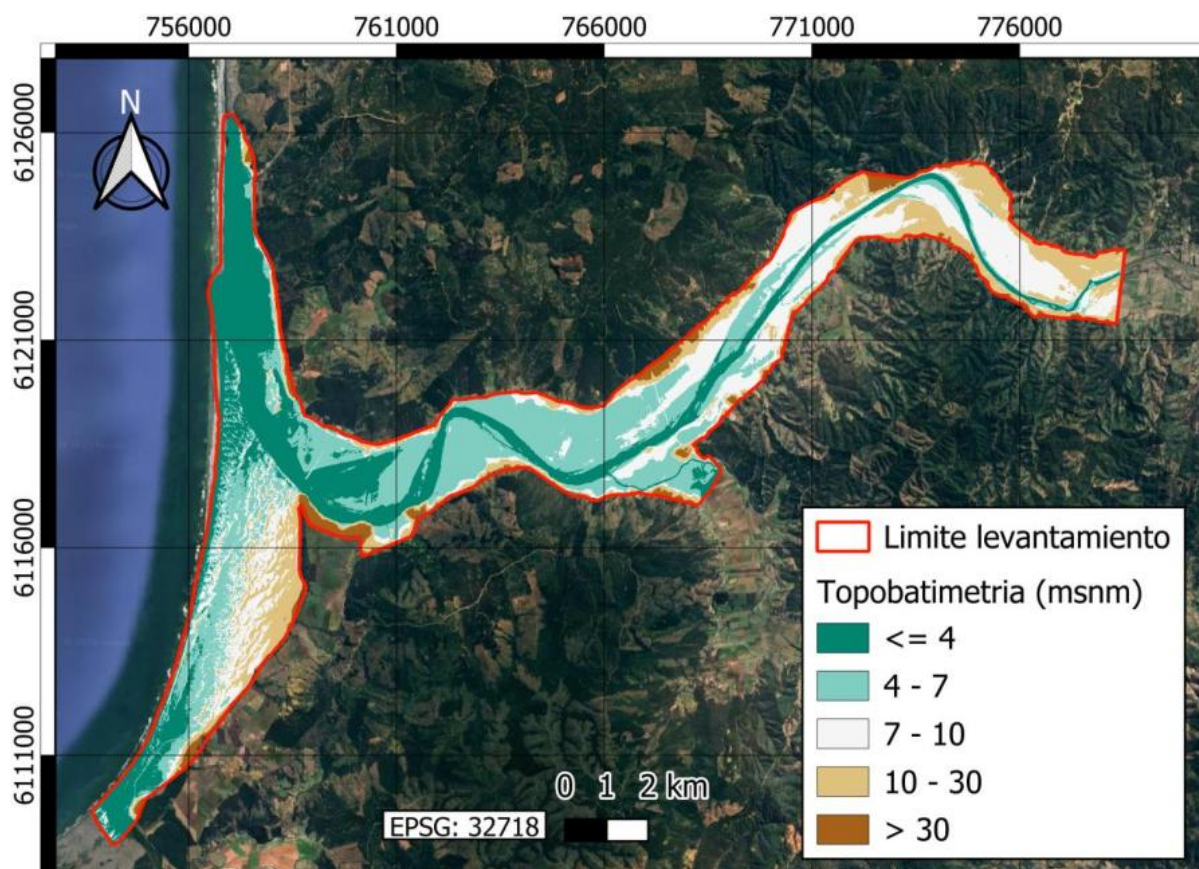


Figura 3-1: Topo-batimetria.

Fuente: Elaboración Propia

Los productos cartográficos que se entregables son:

- Nube de puntos Lidar (ANEXO A.10- NUBE DE PUNTOS)
- Modelo Digital de Terreno (batimetría del río incluida) (ANEXO A.20- DEM)
- Curvas de nivel según escala del proyecto 1:1000 (ANEXO A.21-CURVAS DE NIVEL)

3.2 CARACTERIZACIÓN GRANULIMÉTRICA

3.2.1 CALICATAS

Se realizan cuatro (4) calicatas o pozos de exploración, la profundidad alcanzada es variable debido al afloramiento de agua la profundidad máxima fue de 2,0 m, los estratos de suelo inicialmente estaban considerados de 0,5 m cada uno, en terreno se determinó en algunos casos 0,12 m y un máximo de 0,5m.

A modo de resumen se muestra la Tabla 3-1 con los resultados de los diámetros equivalentes y pesos específicos de cada calicata por estrato.

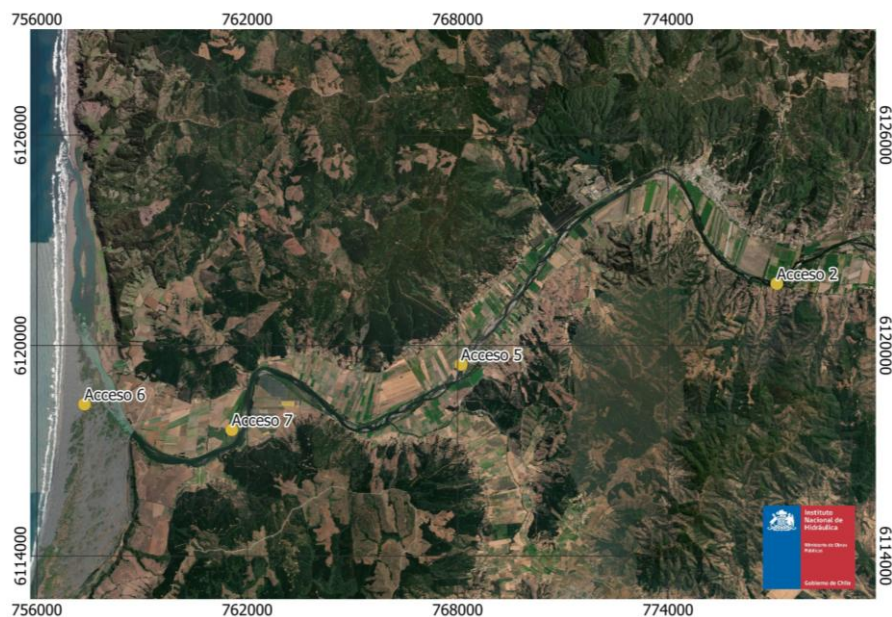


Figura 3-2: Ubicación general lugares calicatas

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-1: Resultados Diámetros Equivalentes mm y Peso Específico (WGS19S)

Calicata	ESTE	NORTE	Prof. (m)	Estrato	D95	D90	D84	D50	D16	Peso Específico (kg/m³)
Acceso 2	229568	6121967	1.60	1	0,358	0,323	0,289	0,206	0,135	2236,24
				2	0,442	0,394	0,353	0,245	0,164	2486,57
				3	54,238	44,785	38,533	9,956	0,222	2505,26
				4	58,108	50,232	42,972	15,12	0,305	2450
Acceso 7	761562	6117599	2.0	1	0,418	0,356	0,313	0,195	0,084	2524,24
				2	0,225	0,168	0,142	0,077	0,04	2414,49
				3	0,378	0,323	0,289	0,206	0,135	2505,26
				4	0,539	0,466	0,418	0,314	0,19	2563,08
Acceso 5	768101	6119463	1.10	1	0,56	0,48	0,421	0,299	0,2	2524,24
				2	0,61	0,546	0,487	0,347	0,25	2468,15
				3	0,61	0,546	0,487	0,347	0,25	2432,12
Acceso 6	757358	6118327	1.5	1	0,415	0,381	0,347	0,26	0,189	2823,73
				2	0,41	0,356	0,33	0,255	0,193	2623,62
				3	0,379	0,33	0,288	0,219	0,166	2623,62

Fuente: Elaboración Propia

En el ANEXO A.16 - CALICATAS, se encuentra la carpeta Ficha Calicatas donde se presentan el informe sedimentológico, fichas por estrato y ubicación, perfiles estratigráficos, registros de los pesos, pesos específicos y sus correspondientes certificados granulométricos.

3.2.2 MUESTRAS SUPERFICIALES

Se realiza un muestreo sedimentológico superficial en diferentes puntos de la zona de estudios, emplazados en la ribera sur y norte, fondo del río y en el sector de la desembocadura. La ubicación de cada una de estas muestras se observa en la Figura 3-3

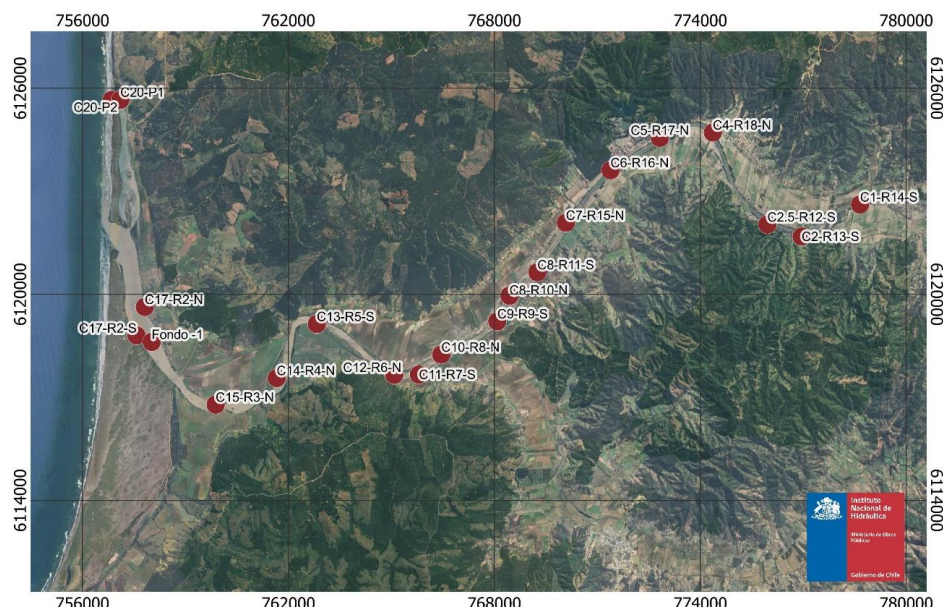


Figura 3-3: Ubicación general muestras de sedimento superficial

Fuente: Elaboración Propia

En el sector de la desembocadura se presenta un 99.9% de arena fina y el restante en limo. A medida que avanzamos aguas arriba del río Mataquito, el porcentaje de arena se reduce a un 49.28% (muestra C1-R14-S).

En la Figura 3-4 se presenta la distribución del D50 a lo largo del río, observando un incremento del D50, a medida que se acerca a la desembocadura, este efecto se puede deber al efecto de la marea que tiende a limpiar los finos en la zona de las riberas y por otra parte la acumulación de finos en la zona cercana a la ciudad donde todavía se observa fino en suspensión producto de las inundaciones.

En el ANEXO A.16 – CALICATAS se presentan descritas cada una de las muestras superficiales, junto con su certificado granulométrico.

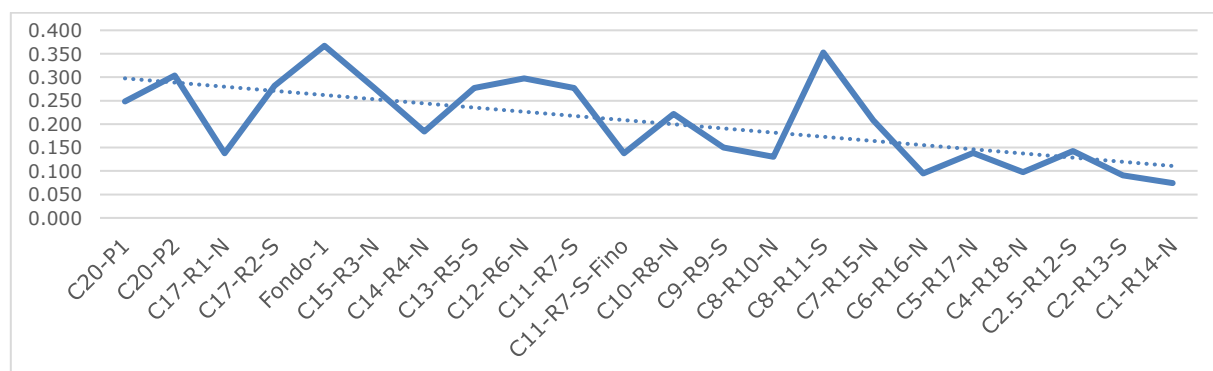


Figura 3-4: Distribución d50 a lo largo del río. Presentando desde aguas abajo hacia aguas arriba.

(Fuente: Elaboración Propia)

3.2.3 ANÁLISIS GRANULOMETRICO

El análisis granulométrico del sistema revela una clara diferenciación espacial en la distribución de sedimentos, con un D50 que varía significativamente a lo largo del tramo estudiado. Los resultados muestran un incremento progresivo del D50 desde 0.106 mm en la zona superior hasta 0.255 mm en la zona inferior, patrón que se puede explicar por la transición de un ambiente fluvial a uno estuarino.

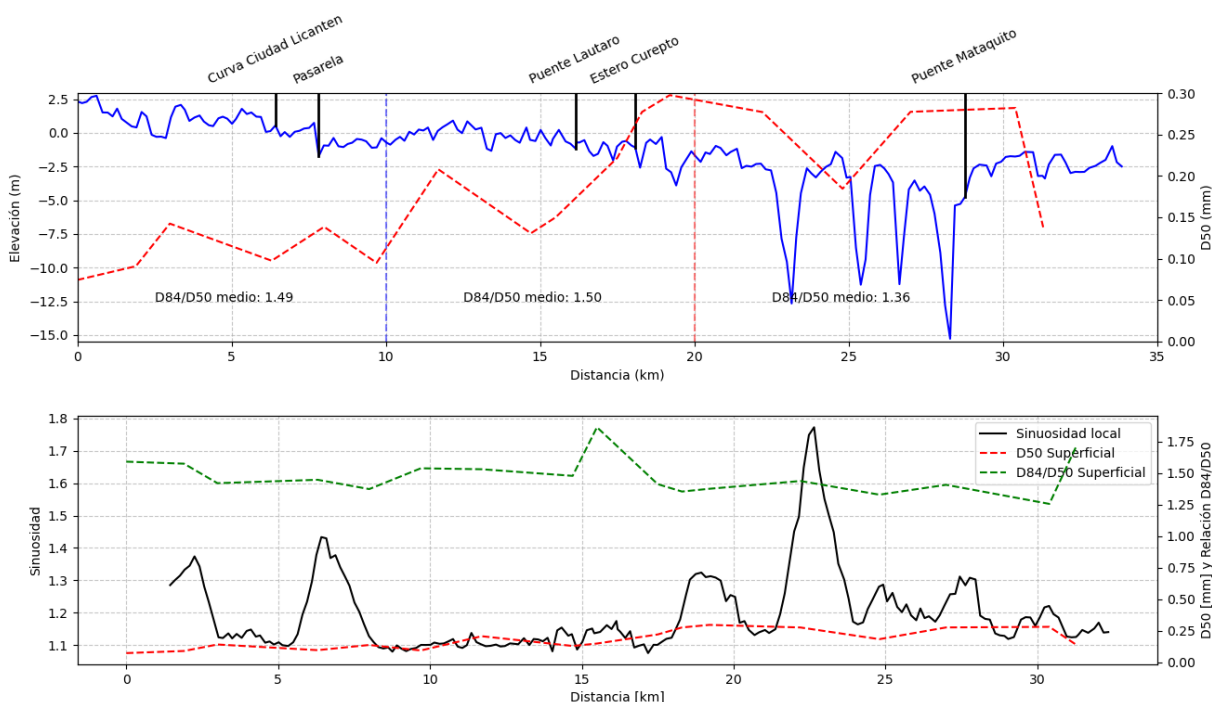


Figura 3-5: Distribución granulométrica espacial comparado con la elevación del cauce y su sinuosidad.

(Fuente: Elaboración Propia)

El análisis granulométrico del área revela tres zonas con características sedimentológicas distintivas. La Zona Fluvial Superior (km 0-10) muestra un diámetro medio de sedimento (D50) bajo (0.106 mm), con una desviación estándar de 0.028 mm, e indica un transporte uniforme y una buena clasificación del sedimento, con una relación D84/D50 estable en 1.49. La Zona de Transición (km 10-20) presenta un aumento del D50 medio a 0.214 mm y una desviación estándar de 0.067 mm, reflejando la mezcla de procesos fluviales y mareales, lo que se manifiesta en un ligero incremento y variabilidad en la relación D84/D50 (1.50 con desviación estándar de 0.19). Finalmente, la Zona Estuarina (km 20-31 km) exhibe el mayor D50 medio (0.255 mm), con una menor variabilidad (0.047 mm), y una leve disminución en la relación D84/D50 a 1.36, lo que sugiere una mejor clasificación del sedimento e identifica pozas profundas hasta -15 m características de este ambiente. En términos generales, se observa una clara tendencia al aumento del diámetro medio del sedimento al aproximarse a la desembocadura, un fenómeno atribuido a la limpieza del sedimento fino causada principalmente por las oscilaciones de la marea en la zona de la boca.

La granulometría del cauce mantiene una estrecha relación con su morfología: la sinuosidad alcanza sus valores máximos en la zona estuarina, coincidiendo con los mayores diámetros medios de sedimento (D50). En esta misma zona se identifican pozas profundas (hasta -

15 m), fenómeno que se asocia a procesos de socavación generados por flujos de alta velocidad en las curvas restringidas por cerros, sugiriendo la presencia de material rocoso. La pendiente media general del sistema (0.0002) refleja claramente la transición entre los ambientes fluvial y estuarino.

Respecto a la dinámica sedimentaria, la distribución granulométrica está fuertemente influenciada por la interacción entre los procesos fluviales y mareales. En el estuario, el flujo bidireccional provoca un lavado selectivo de los sedimentos finos, lo que contrasta con el transporte unidireccional que domina en la zona fluvial. El análisis estadístico muestra una fuerte correlación entre D50 y D84 ($r = 0.977$), lo que confirma un proceso de selección granulométrica robusto. El coeficiente de uniformidad (D84/D50) evoluciona de forma homogénea, pasando de 1.49 en la zona superior a 1.36 en la estuarina, con un valor intermedio de 1.50 en la transición. Esta pequeña variación indica que el sistema se encuentra en un equilibrio dinámico con una clasificación sedimentaria relativamente constante, donde la influencia mareal en la zona estuarina contribuye a una selección ligeramente más eficiente de los sedimentos.

3.3 MEDICIONES HIDRAULICAS EN TERRENO

3.3.1 AFORO

El 15 de abril de 2024, se realizaron aforos de caudal en una sección del río Mataquito ubicada a una distancia aproximada de 825 m aguas arriba del Puente Lautaro, (ver Figura 3-6). Los archivos de salida del River Surveyor se presentan en el ANEXO A.17-AFORO.



N	HORA	CAUDAL
1	15:49	37.31 m3/s
2	15:55	36.28 m3/s
3	16:12	35.47 m3/s
4	16:21	35.49 m3/s

Figura 3-6 : Medición de caudal con RiverSurveyor

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 ADCP

El día 4 de Julio en las coordenadas 758593.00 E y 6117591.00 S Zona 18S, se instaló un ADCP en el sector aguas debajo del puente Mataquito. Para el análisis de los datos del, se separaron en dos categorías: datos superficiales y datos profundos. Los resultados de estos análisis serán presentados en la Etapa 4 del presente estudio.

Las magnitudes máximas fueron con dirección NW, con un valor de 0.83 m/s. Con respecto a las velocidades más representativas durante el muestreo, estas fueron entre los ~0.10 y 0,40 m/s, con una frecuencia de 69,16% de los eventos. (ver Figura 3-7) A nivel del registro de fondo, las corrientes mantienen el patrón dirección al de las corrientes superficiales. Las magnitudes máximas fueron con dirección NW, con un valor de 0.74 m/s. Con respecto a las velocidades más representativas durante el muestreo, estas fueron entre los ~0.10 y 0,20 m/s, con una frecuencia acumulada entre estos intervalos de 69,72% de los eventos. Desde el día 02 de agosto en adelante, se observa un cambio en la tendencia que tienen

ambas componentes ortogonales, lo cual está relacionado a un aumento del caudal en el río.

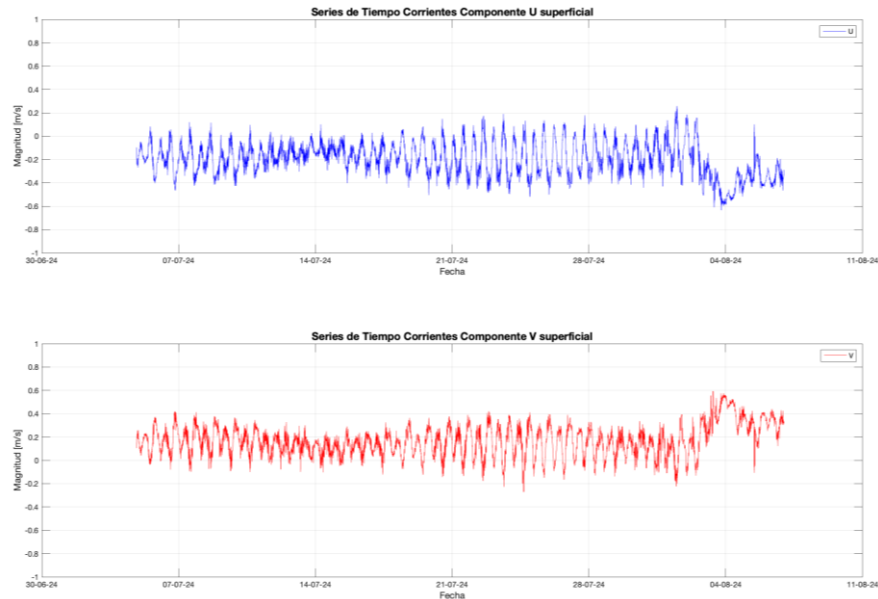


Figura 3-7: Series de tiempo de componentes ortogonales del registro más superficial de la corriente (en m/s).

Fuente: Elaboración Propia.

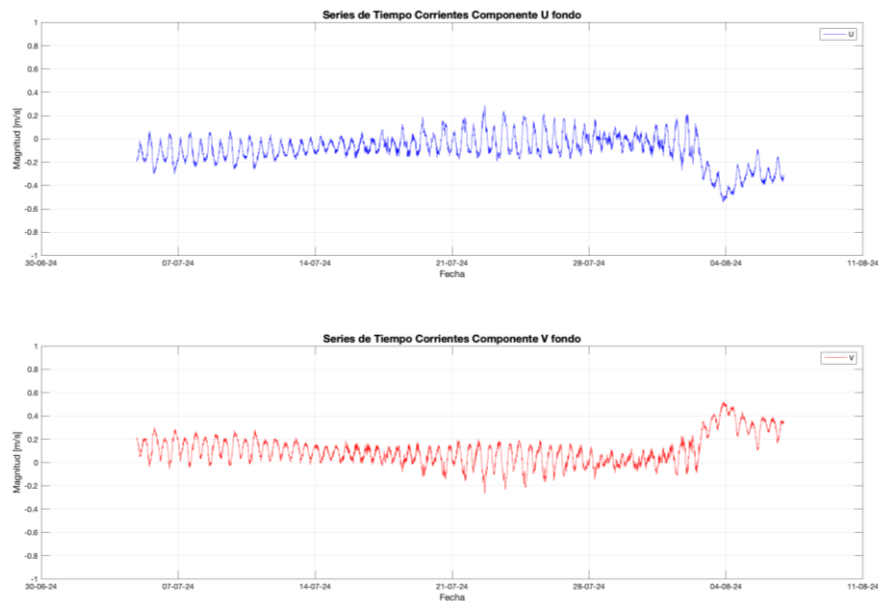


Figura 3-8: Series de tiempo de componentes ortogonales del registro de fondo de la corriente (en m/s).

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3 MAREOGRAFOS

Se realizaron mediciones de nivel con de 3 mareógrafos, estos se emplazaron a lo largo del cauce del río Mataquito En la Figura 3-9 se muestra un esquema con la ubicación de instalación a lo largo de la zona de estudio (M1 aguas abajo a M3 aguas arriba), además se muestra el registro de cada uno. La medición se prolongó por aproximadamente 33 días,

cumpliendo con los 28 días como mínimo para el análisis de armónicos. En la última parte del registro además se logró registrar el aumento del nivel del río producto de lluvias.

El análisis armónico de las señales de los tres mareógrafos indica que la onda de marea tiene el potencial de propagarse hasta el sector de la Pasarela Los Escalones. En este último punto, se detecta la presencia de las componentes armónicas principales: M2 (Lunar Semidiurna principal) y S2 (Solar Semidiurna principal), aunque con amplitudes muy reducidas, alcanzando solo 0.003 m. En el sector de puente Lautaro, es más evidente la presencia de la onda de marea donde M2 tienen una amplitud de 0.13m y S2 0.07m. En el puente Mataquito la amplitud de M2 es de 0.29m y 0.12m para S2.

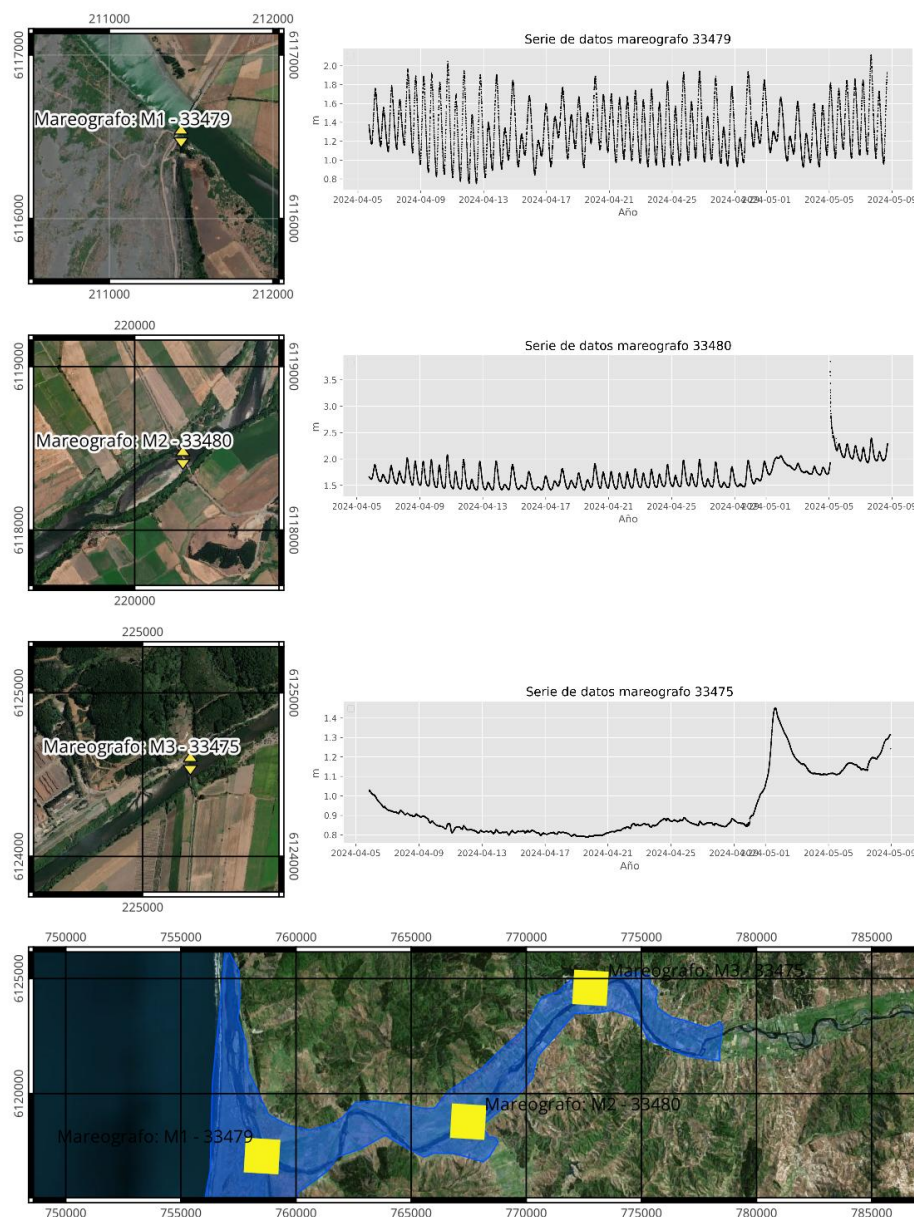


Figura 3-9: Datos obtenidos con los 3 mareógrafos a lo largo de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4 CATASTRO ESTRUCTURA EXISTENTE

Se realizaron fichas descriptivas de las obras relevantes identificadas en el cauce del río Mataquito. Según las obras observadas, se generaron 3 tipos de fichas para Defensas fluviales, Puentes y Alcantarillas, en ellas se caracterizaron 7 obras, las cuales son resumidas en la Tabla 3-2 y en la Figura 3-10, en ellas se indica tipo de obra, nombre (si corresponde) y una coordenada representativa (en el caso de las defensas fluviales se indica el punto de inicio de la obra). Los archivos digitales se encuentran disponible en el ANEXO A.18 -FICHAS

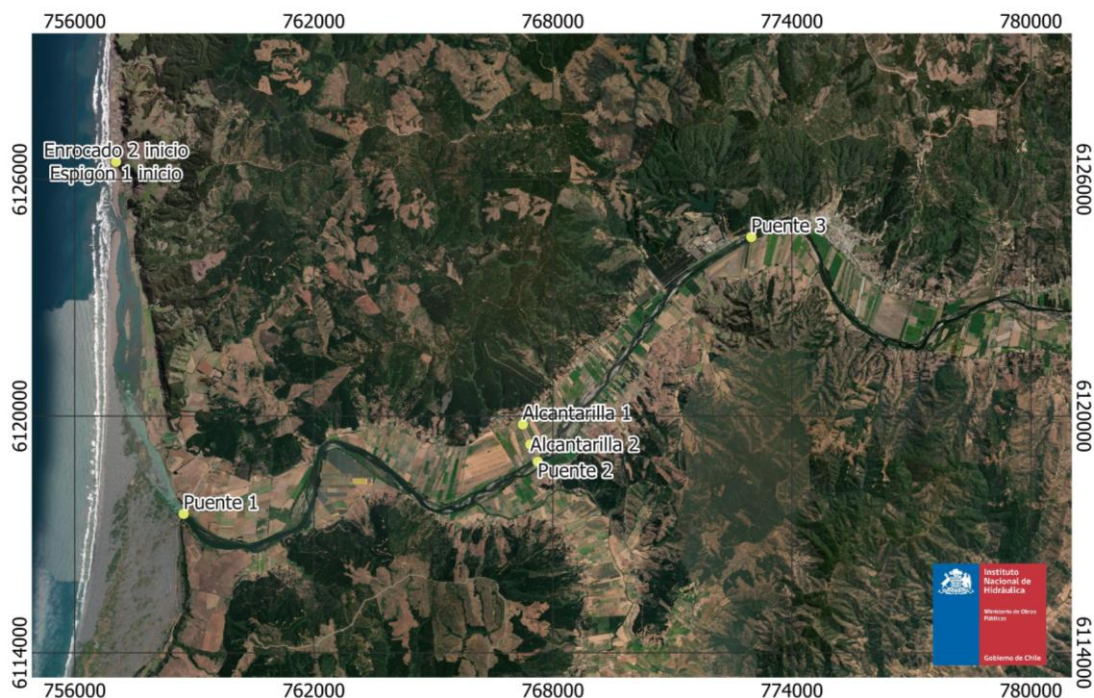


Figura 3-10 : Ubicación general catastro de obras.

Fuente: Elaboración Propia en Software Global Mapper

Tabla 3-2 : Resumen fichas catastro de obras

Identificación Ficha	Tipo de Obra	Nombre Obra	Coordenada representativa	
			Este (m)	Sur (m)
O1_Puente1	Puente	Puente Mataquito	758732.00	6117519.00
O2_Puente2	Puente	Puente Lautaro	767622.00	6118840.00
O3_Puente3	Puente	Pasarela los escalones	772983.00	6124538.00
O4_Espigon1	Defensa Fluvial	-	757026.00	6126448.00
O5_Enrocado2	Defensa Fluvial	-	757034.96	6126449.27
O6_Alcantarilla1	Alcantarilla	-	767248.48	6119785.29
O7_Alcantarilla2	Alcantarilla	-	767434.00	6119279.00

Fuente: Elaboración Propia

3.5 HIDROLOGÍA

El río Mataquito nace como resultado de la unión del río Teno y río Lontué, los que tienen su origen en la cordillera de los Andes y que cruza el valle para desembocar en la costa del océano Pacífico. La cuenca del río Mataquito abarca 6,323 km², de los cuales 1,829 km² corresponden al río Teno y 1,818 km² al río Lontué, en la Figura 3-11 se presenta un diagrama unifilar ríos principales cuenca río Mataquito.

La estación meteorológica (meteorológicas - fluviométricas - Calidad de agua) inserta en el área de estudio Río Mataquito en Licantén (07123001-5), específicamente para el parámetro de precipitación, presenta continuidad de datos desde mayo de 2001, es decir 23 años de estadística.

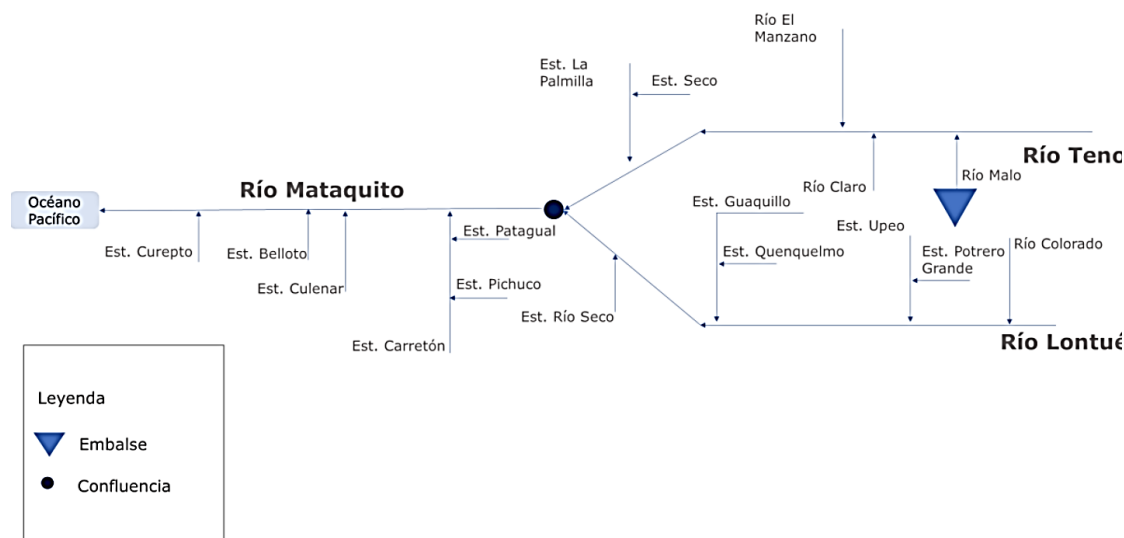


Figura 3-11 : Diagrama unifilar ríos principales cuenca río Mataquito
(Fuente: (UTP HIDROGESTIÓN S.A.- NTT DATA CHILE S.A., 2022))

3.5.1 PRECIPITACIÓN

En el caso de los caudales se encuentran registros desde 1987. Del análisis de 16 estaciones pluviométricas en la cuenca se determinó la precipitación media (ver Figura 3-12), máximas (ver Tabla 3-3) y estacionales.

Para estimar la precipitación máxima para distintos periodos de retorno se aplicó el Método de máximos anuales, donde se genera una estadística histórica para cada estación representada por el valor máximo de precipitación en 24 horas (P_{24}^T) para cada año. Se utilizó la estadística rellenada y extendida (ANEXO -C.2 - PRECIPITACION)

El análisis estacional considerando primero el periodo de precipitaciones como los meses de abril hasta septiembre, y el periodo estival como los meses entre octubre y marzo, utilizando la estadística separada como año hidrológico (abril-marzo). el orden de magnitud de la precipitación estimada para el periodo de precipitaciones y anual son altamente semejantes, lo cual indica que las precipitaciones máximas en el año se dan en el periodo de abril a septiembre y no en periodo estival.

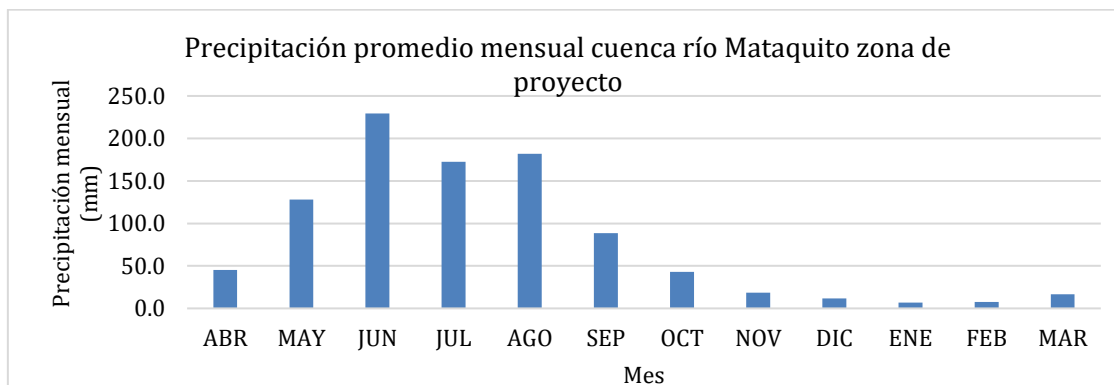


Figura 3-12 : Precipitación promedio mensual [mm] cuenca zona de proyecto
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3-3 : P_{24}^T [mm] anual cuenca zona de proyecto

ESTACIÓN	ÁREA (KM2)	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)						Distribución
		2	5	10	25	50	100	
RIO MATAQUITO EN LICANTÉN	148.3	83.6	106.8	117.2	126.5	131.4	135.1	Log Pearson III
CUENCA RÍO MATAQUITO ZONA DE PROYECTO	5688.0	95	126	146	171	189	206	

(Fuente: Elaboración propia)

3.5.2 CAUDALES

En el caso de la caracterización de caudales, en el análisis se consideraron en la estación “Río Mataquito en Licantén” esta se encuentra aproximadamente en la mitad de la zona de proyecto y cuenta con registros desde el año 1987 a la fecha. Las otras estaciones vigentes registran el caudal de los ríos tributarios Lontué y Teno, estas fueron descartadas por su régimen hidrológico nivo-pluvial, influenciadas por el deshielo. EN la zona de estudio se observa un régimen pluvial con un aumento de caudal leve en periodo nival. En el caso del estero Curepto, este no tiene estaciones fluviométricas que registren el caudal de su cuenca, que según la cota de la cuenca correspondería a régimen hidrológico de tipo pluvial.

En la Figura 3-13 se presenta la ubicación de las estaciones respecto a la cuenca del río Mataquito en la zona de proyecto y la cuenca del Estero Curepto, mostrando con puntos en color rojo la ubicación de las estaciones fluviométricas de la red y puntos verdes aquellas de mayor vigencia y de mayor interés para el estudio.

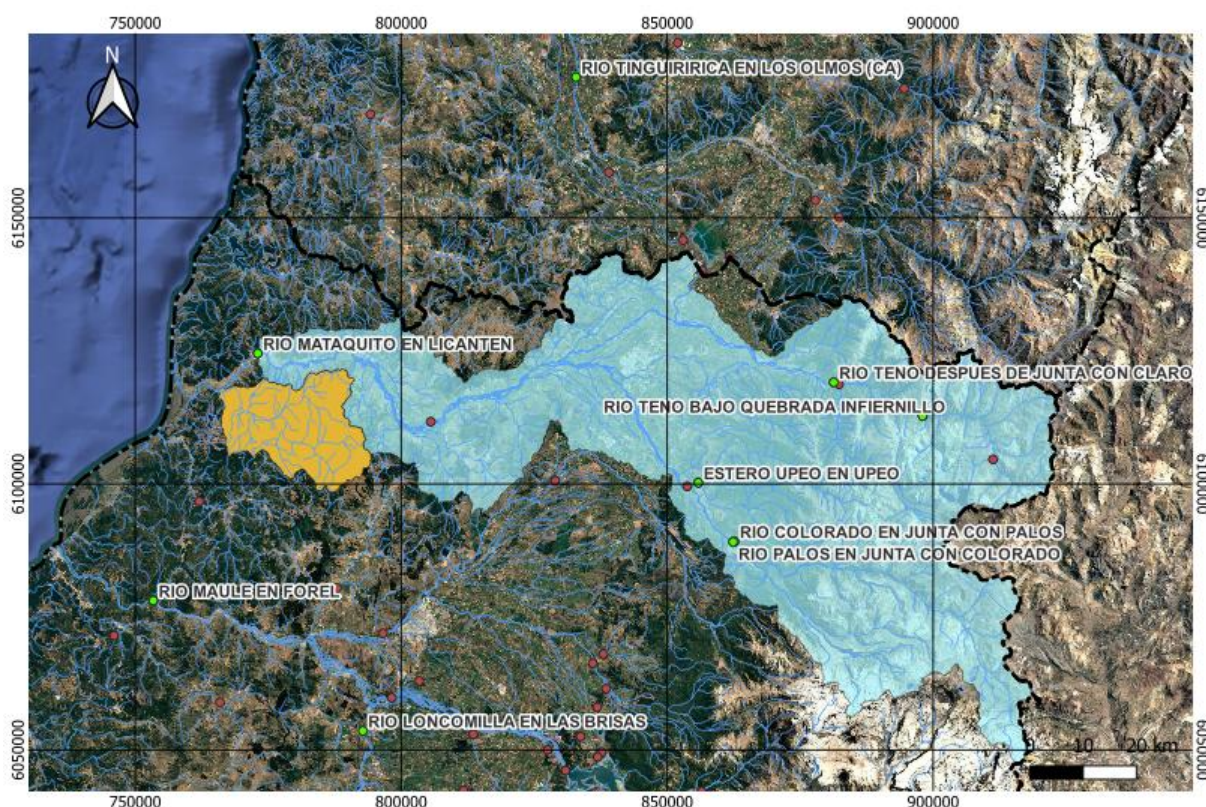


Figura 3-13 : Estaciones fluviométricas analizadas
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.2.1 Caudal medio

El caudal en la zona de proyecto se caracterizó con la estadística rellenada de la estación fluviométrica “Río Mataquito en Licantén”. Con la estadística de caudales medios mensuales se trazó la Curva de Variación Estacional, donde se estima el caudal asociado a distintas probabilidades de excedencia, y que se presenta en la Figura 3-14.

El estero Curepto no cuenta con una estación fluviométrica, por lo que el caudal se estimó aplicando el método de transposición de caudal. Para esto, se seleccionó “Estero los puercos en puente los puercos” basado en el factor de transposición, la semejanza en el área de ambas cuencas aportantes, forma, cotas, desnivel, precipitación y régimen hidrológico de las cuencas, el caudal medio mensual para el estero Curepto se presenta en la Tabla 3-5.

Tabla 3-4 : Caudal medio mensual [m³/s] cuenca zona de proyecto

AÑO	AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
PROMEDIO		42.7	92.0	193.9	195.3	195.4	129.6	102.5	112.4	95.5	47.0	25.6	25.2
MÁXIMO		146.4	347.5	654.9	920.1	804.5	376.1	283.2	245.8	222.2	179.1	96.2	70.4
MÍNIMO		7.4	25.5	33.5	25.2	35.7	23.5	19.1	10.2	2.4	0.4	1.0	1.4

(Fuente: Elaboración propia)

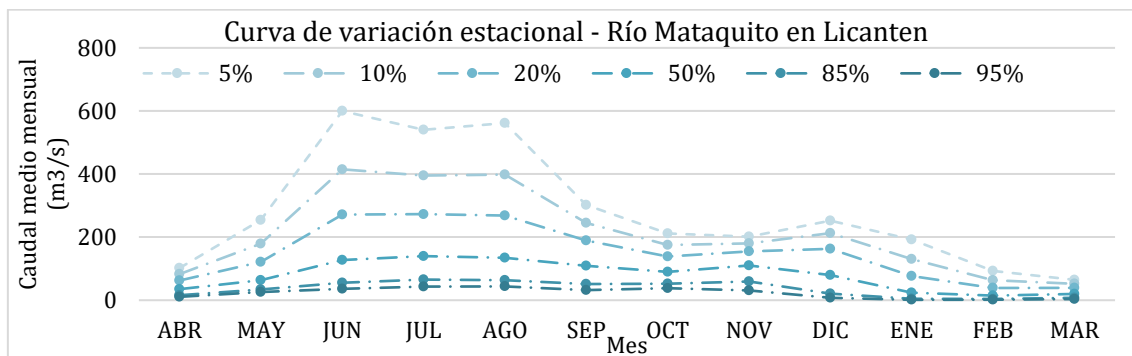


Figura 3-14 : Curva de variación estacional cuenca zona de proyecto
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3-5 : Caudal medio mensual [m³/s] cuenca estero Curepto

AÑO	AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
PROM		2.24	3.18	5.79	5.70	5.36	2.94	2.16	2.15	1.81	1.60	1.84	2.33

(Fuente: Elaboración propia)

3.5.2.2 Caudal máximo

El caudal máximo se estimó por el método directo consistente en análisis de frecuencia.

En el análisis de caudales máximos se aplicó el Método de máximos anuales, donde se identifica un único valor máximo para cada año, para lo cual se consideró año hidrológico, con un total de 37 años. Según lo observado por el ajuste visual de las distribuciones y los test de bondad de ajuste, se determina que la distribución que mejor representa los registros de la zona de proyecto corresponde a Pearson III. Los caudales estimados se presentan en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 : Caudal máximo instantáneo [m³/s] cuenca zona de proyecto

Periodo retorno (años)	2	5	10	20	25	50	75	100
Pearson III	1309.3	2527.4	3375.8	4194	4453	5247	5705.5	6028.7

(Fuente: Elaboración propia)

3.5.2.3 Análisis estacional de caudal

Se realizó un análisis estacional de los registros de caudal del río Mataquito, separando el periodo de precipitaciones (abril a septiembre) y el periodo estival (octubre a marzo), siguiendo la metodología aplicada a las precipitaciones. Los caudales máximos estimados para el periodo de precipitaciones son solo ligeramente mayores que los estimados anualmente, ya que históricamente el caudal máximo anual casi siempre ocurre durante el periodo de lluvias. La única excepción fue el año hidrológico 2018-2019, donde el máximo se registró en octubre (periodo estival).

En general, el orden de magnitud de los caudales máximos es similar entre la estadística anual y la de precipitaciones. Por otro lado, los caudales máximos esperados para el periodo estival resultaron ser consistentemente menores, lo que confirma el régimen hidrológico pluvial dominante en la zona.

3.5.3 ANÁLISIS DE ISOTERMA

Se analizaron cuatro fuentes clave de información para obtener datos de la línea de nieve e isoterma de 0°C. De ellas las plataformas Observatorio Andino (IANIGLA-CONICET y

(CR)²), Observatorio de Nieves (Universidad de Playa Ancha), procesamiento interno del INH a las imágenes MODIS (Terra, Aqua) que entregan línea de nieve y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) ofrece la isoterma de 0°C diariamente, basándose en registros de Radiosonda de la Estación Santo Domingo, cubriendo el mismo periodo histórico.

Aquí se concluyó que, de requerir analizar la altura de la línea de nieves se utilicen los resultados de imágenes satelitales, siendo estos muy semejante. Si se requiere analizar isoterma cero estos se utilicen de forma referencial, se priorice el registro de la radiosonda DMC. Así la línea de nieve para los periodos de retorno utilizando las metodologías de estimación de la línea de nieve es la siguiente.

Tabla 3-7: Periodo de retorno de la línea de nieve estimada para la cuenca del río Mataquito [m.s.n.m.]

Metodología	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)						Distribución
	2	5	10	25	50	100	
LN. Observatorio Andino (Teno)	3485	3710	3826	3948	4027	4096	Pearson III
LN. Observatorio Andino (Colorado)	3412	3618	3755	3928	4056	4183	Gumbel
LN. Metodología INH	3475	3684	3797	3920	4000	4074	Gamma
Iso. 0°C. Radiosonda DMC	5211	5368	5473	5605	5703	5800	Gumbel

(Fuente: Elaboración propia)

3.5.4 ANÁLISIS DE CAMBIO CLIMATICO

1. Criterio de Precipitación (Lluvias Máximas): Si bien los análisis históricos en la zona de estudio muestran una tendencia a la baja en la precipitación máxima anual diaria, las proyecciones futuras no son categóricas. Por ello, se recomienda un espectro flexible para la definición de las lluvias máximas de 24 horas. Este espectro abarca desde asumir estacionariedad, utilizando los registros históricos actualizados, hasta una propuesta conservadora que consiste en **amplificar el valor estacionario en un 10%**. Esta última condición es recomendable para el diseño de obras hidráulicas críticas, cuya falla podría significar grandes pérdidas humanas o materiales.

2. Criterio de Caudales (Incertidumbre Estadística): Para el cálculo de crecidas, el informe propone un tratamiento estadístico formal para manejar la incertidumbre. Se recomienda el uso de distribuciones de probabilidad de tres parámetros, que ofrecen mayor flexibilidad para representar asimetrías y valores extremos, específicamente las funciones Valores Extremos Generalizada (GEV) y Pearson III (o Gamma de tres parámetros). Para la estimación de parámetros, se sugieren los métodos de Máxima Verosimilitud (MML) o de Momentos Ponderados por Probabilidad (MMP).

La recomendación clave es la estimación explícita de la incertidumbre mediante el cálculo de bandas de incertidumbre (o intervalos de confianza) que incluyan el 80% o 90% central de la estimación del cuantil. Esta incertidumbre se debe incorporar en la verificación de la obra. El informe propone que la "crecida de verificación" sea el valor mayor que resulte entre la crecida de verificación estándar (p. ej., 300 años) y la crecida de *diseño* (p. ej., 200 años) estimada con su banda de incertidumbre del 80%.

3. Criterio de Isotherma 0°C (Línea de Nieves): El estudio detectó una tendencia significativa e histórica al alza en la altitud de la isoterma 0°C durante días con precipitación, de hasta 169 m/década. Dado que las proyecciones futuras indican un aumento generalizado de las temperaturas, se recomienda modificar los valores propuestos en estudios anteriores (como DGA, 1995), aumentando la elevación de la línea de nieve a valores representativos de las proyecciones futuras. El informe propone valores específicos para distintos escenarios y periodos (Tabla 10.2), considerando un intervalo de confianza

del 90%. Para diseños altamente conservadores, se menciona que los valores observados en el evento de junio de 2023 (cercanos a 3.000 m.s.n.m.) también podrían utilizarse como referencia

Como conclusión y en base a todos los antecedentes recopilados, el análisis del cambio climático evidenció una tendencia de disminución general en la precipitación anual y un aumento significativo en las temperaturas promedio proyectadas hacia fines del siglo XXI. Esta situación implica una reducción del aporte nival y mayor frecuencia de eventos extremos, aunque con alta incertidumbre asociada a los modelos globales y regionales utilizados. Se incluyeron proyecciones de escenarios RCP para evaluar el impacto futuro en la disponibilidad hídrica de la cuenca. Producto de ello y en conjunto con el mandante se estima un escenario conservador de un aumento en el caudal de un 10% en relación con el calculado en el capítulo de hidrología según las indicaciones del estudio (DICTUC, 2024). Dichos caudales (ver Tabla 3-8) serán parte de los escenarios a simular para evaluar el comportamiento fluvial del río Mataquito.

Tabla 3-8 : Caudal máximo instantáneo [m^3/s] zona de proyecto con cambio climático.

Periodo de retorno (años)	Caudal máximo instantáneo	
	Caudal (m^3/s)	Caudal con Cambio climático (m^3/s)
50	5252.6	5777
100	6037.0	6631.6

(Fuente: Elaboración propia)

3.6 HIDRÁULICA MARÍTIMA

La caracterización del oleaje incidente en la zona de estudio se realizó a través de la propagación de oleaje con el modelo numérico SWAN, permitiendo obtener parámetros espectrales de oleaje, por medio de la propagación de oleaje de la estadística del proyecto atlas de oleaje de la universidad de Valparaíso, desde enero de 1980 hasta diciembre de 2015 (35 años) y la utilización de información batimétrica de cartas náuticas e información global GEBCO "The General Bathymetric Chart of the Oceans".

El análisis de agrupamiento de los datos demuestra que el oleaje proviene principalmente de las direcciones SSW y SWW, con un 49% de los datos con períodos en el rango de 12 a 14 segundos y el 30% de ellos presentando alturas espectrales entre 2 y 2.5 metros, la dirección SSW correspondientes al 60% del tiempo. La serie de tiempo muestra que en 6 episodios son sobrepasados los 6 m de altura espectral H_{m0} .

El análisis de la propagación del oleaje reveló una clara dinámica direccional desde aguas profundas hasta la costa. Inicialmente, el oleaje en aguas profundas mostró una influencia predominante de las direcciones SSW y SWW, con periodos de 12 a 14 segundos y alturas espectrales entre 2 y 2.5 metros. Al propagarse a aguas someras, se produjo una notable transición en la dirección del oleaje, que se volvió más perpendicular a la línea de costa y se concentró principalmente en la componente SW en las posiciones del punto 2 al punto 5. En cuanto a la atenuación, los coeficientes indicaron que las direcciones alrededor de 300° y 325° experimentaron la menor reducción de altura, mientras que las direcciones SSW y S registraron la mayor atenuación, lo cual se atribuye a los procesos de refracción y difracción asociados a la configuración geográfica de la zona de estudio.

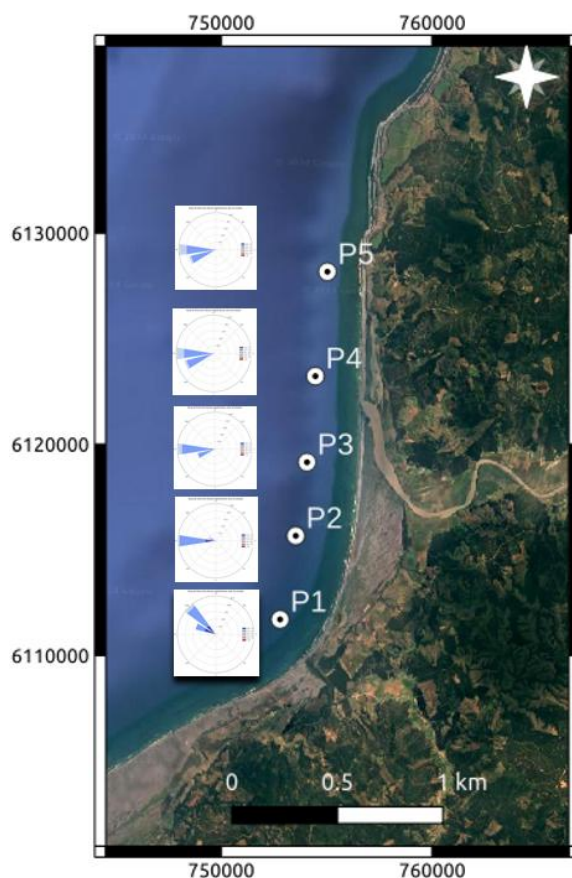


Figura 3-15: Propagación de oleaje aguas someras

3.6.1 ANÁLISIS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL COSTERO

La geomorfología del río Mataquito muestra una migración histórica de la descarga hacia el Norte desde el tsunami de 2010 alcanzando el sector La Pesca en 2023, cerca del km 114.000 de la Ruta J-60. Durante crecidas, la barra litoral puede abrirse temporalmente, habitualmente unos 4 km aguas abajo del Puente Mataquito (cercano al km 109.500 de la ruta J-60), pero el oleaje predominante hace migrar la descarga hacia el Norte. (ver Figura 3-16)

El transporte longitudinal de sedimentos es un proceso costero esencial, impulsado principalmente por la acción de las olas y las corrientes a lo largo de la costa. Este transporte mueve arena y otros materiales a lo largo de las playas, contribuyendo a la formación de barras y la modificación de perfiles costeros. Este fenómeno juega un papel crucial en la morfología y en la estabilidad de la barra de los estuarios, como también en sus desembocaduras.

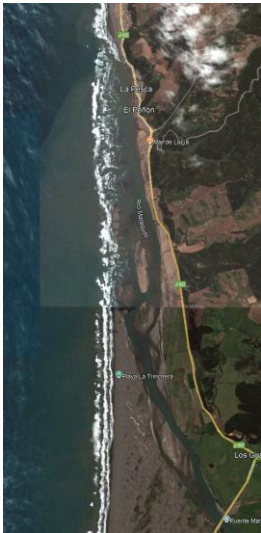
Los estuarios, que son áreas de transición entre ríos y mares, dependen del transporte de sedimentos para mantener un equilibrio entre erosión y deposición. La cantidad de sedimentos que se transporta a lo largo de la costa puede influir en la estabilidad de las entradas a los estuarios, afectando la mezcla de aguas dulces y saladas, así como la calidad del agua. Si las entradas de los estuarios se bloquean o cierran debido a un exceso de deposición de sedimentos, se pueden generar problemas como la reducción del intercambio de agua y la disminución de la salinidad, lo que afecta tanto los ecosistemas.

Se realizó una caracterización del clima de oleaje mediante el algoritmo estadístico K-means, que generó 20 familias de olas representativas con sus respectivas alturas, periodos y direcciones. Utilizando estas familias, se calcularon las tasas de transporte de sedimentos empleando las formulaciones de Kamphuis, CERC y Van Rijn. Los resultados (presentados en la Tabla 3-93) distinguen entre; transporte Neto: El valor resultante del sedimento movilizado a lo largo de la costa, reflejando la deriva litoral. Transporte Total: La suma absoluta de todo el sedimento que fue movilizado, sin considerar su dirección.

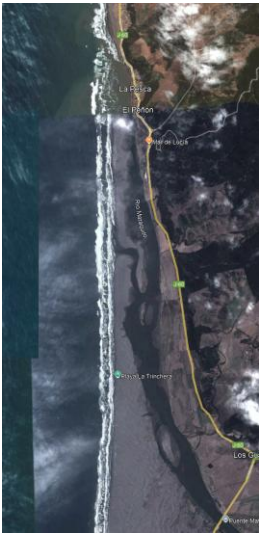
Tabla 3-9 Resultados de las fórmulas para el transporte de sedimentos litoral.

Método	Neto (m3/yr)	Total (m3/yr)
Kamphuis	-572.392,7	927.653,9
CERC	-643.068,1	1.571.996,1
VanRijn	-71.472,7	998.207,8
Promedio	-428.977,8	1.165.952,6

(Fuente: Elaboración propia)



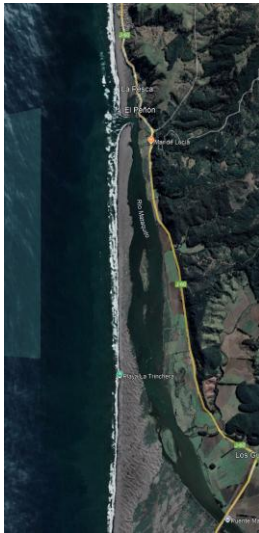
a) *diciembre 2010*



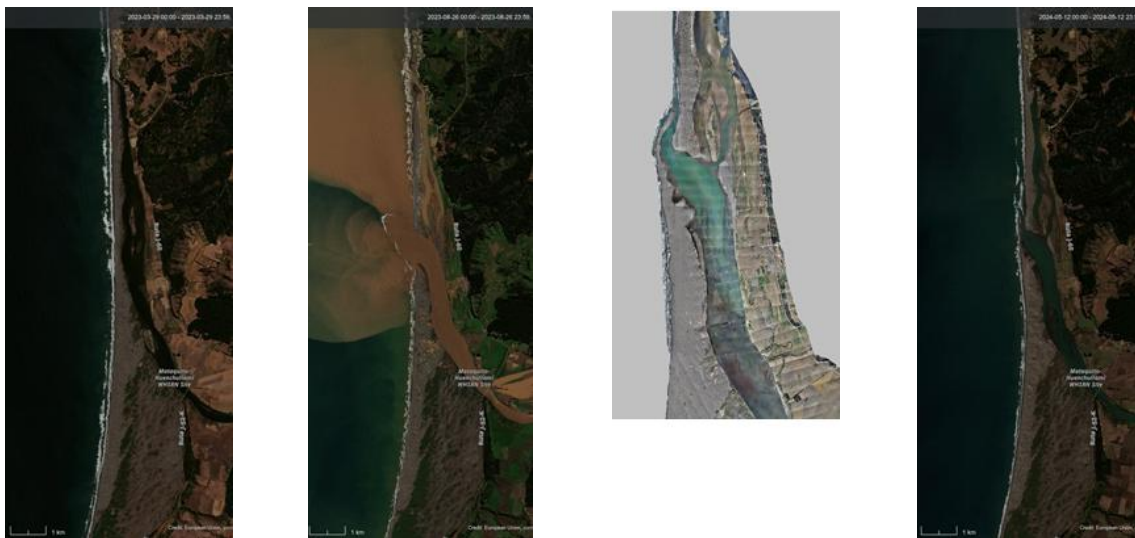
b) *febrero 2011*



c) *febrero 2016*



d) *Mayo 2021*



e) marzo 2023

f) junio 2023

g) abril 2024

h) diciembre 2024

Figura 3-16 : Fotografías aéreas del movimiento de la descarga del río en el tiempo

(fuente: Google earth -Dron INH)

3.6.2 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL ESTUARIO

El estuario del Río Mataquito es un componente dinámico y esencial de una celda litoral, funcionando como un sistema semicerrado donde las corrientes costeras, el oleaje y las mareas movilizan sedimentos. Este estuario es clave en el balance sedimentario, ya que recibe los aportes fluviales (como ocurrió durante la crecida del 26 de agosto de 2023 en Figura 3-17, que inyectó una gran cantidad de sedimentos desde el Mataquito y el Maule) y redistribuye este material, modificando la morfología costera. Eventos extremos como esta crecida alteran temporalmente el equilibrio. En síntesis, la dinámica sedimentaria del estuario está influenciada tanto por los procesos naturales fluviales como por las corrientes marinas, y su comprensión es crucial para la gestión costera, especialmente ante eventos extremos y posibles intervenciones humanas.

Dentro del río, el prisma de marea es el volumen de agua que entra y sale de un estuario o laguna durante un ciclo de marea, es decir, entre la marea alta y la marea baja. El prisma de marea es una variable clave en los modelos de estabilidad de las entradas, ya que define la capacidad del flujo mareal para erosionar o depositar sedimentos en la entrada. Según imágenes satelitales, señales de los mareógrafos instalados y simulaciones numéricas se determina el punto aproximado del límite del estuario. Este está situado aproximadamente a 20 km de la boca del estuario, comprendiendo un Área (A_b) aproximada de 5.500.000 m² aproximados. De los registros, el rango de marea fluctúa entre 0,72 m y -0,6 metros, obteniendo un valor de $\Delta h = 1,32$ m



a)



b)

Figura 3-17: a) Esquema del transporte litoral en la zona de Estudio. b) Imagen satelital evento de Agosto 2023

3.6.3 AREA DESEMBOLCADURA DEL ESTUARIO

Debido a las fuertes corrientes que impidieron la medición batimétrica directa en la desembocadura del estuario del Río Mataquito, se recurrió a las relaciones empíricas de O'Brien y Escoffier para estimar indirectamente su área de equilibrio óptima. Este valor se utilizará como parámetro inicial para la calibración del modelo del estuario bajo condiciones de caudal pequeño.

Método de O'Brien: Basado en la relación empírica entre el prisma de marea (volumen de agua intercambiado) y el área de la sección transversal, se estimó que el área de equilibrio del estuario es de aproximadamente 470 m^2

Método de Escoffier: Este enfoque hidrodinámico relaciona el área de la entrada con la velocidad máxima de la corriente. Se centra en la existencia de una velocidad crítica necesaria para mantener la estabilidad de la boca. Mediante esta metodología, se estimó un área de equilibrio de aproximadamente 600 m^2

Ambos valores representan un área de equilibrio para situaciones hidrológicas y marítimas normales en el cauce, siendo el valor de 600 m² el que se utilizara para iniciar la calibración del modelo con caudal regulares.

3.6.4 DETERMINACION DE NIVEL DE MAREA

Para la determinación del nivel de marea, se generó una serie sintética de marea mediante modelación numérica específica. Para esto se genera un modelo que cubrió un dominio aproximado de 150 x 150 km, se utiliza información batimétrica del estudio y datos satelitales gratuitos del modelo global de mareas TPXO7.2 (desarrollado por la Universidad Estatal de Oregon). Dicha base de datos global se impuso como condición de borde durante 74 días, suministrando las series temporales de elevación de la superficie y las componentes de velocidad de las corrientes. La serie temporal de marea obtenida del modelo fue ajustada altimétricamente, utilizando el mareógrafo 1 como punto de control para asegurar la coherencia con el sistema de referencia del proyecto. Posteriormente esta serie sintética se empleó en los modelos de calibración para la crecida de junio de 2023, caudal medio y caudal formativo, mientras que para las modelaciones de caudales asociados a los periodos de retorno se optó por un nivel del mar fijo.

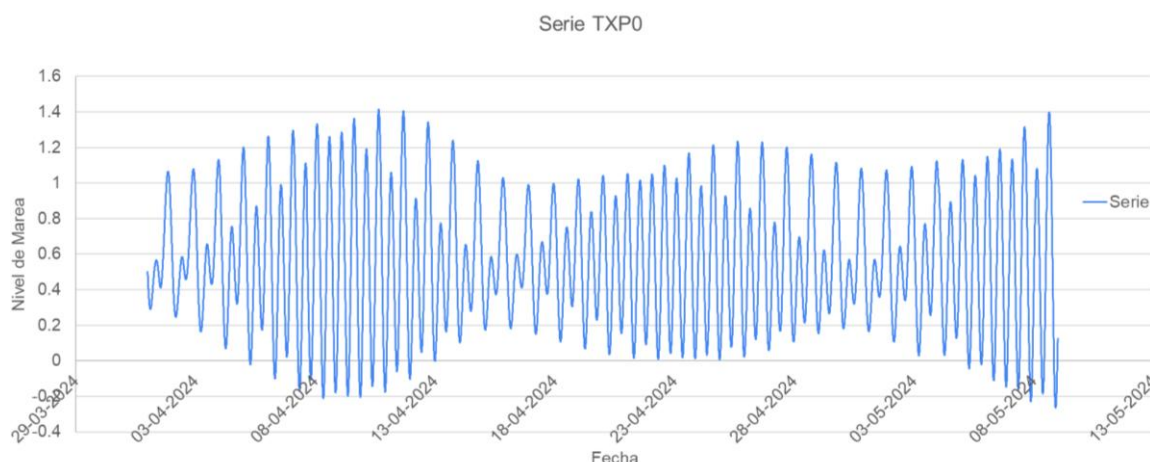


Figura 3-18 : Serie determinada con modelo TPX0 para Licantén.

3.6.4.1 Nivel máximo costa

Para establecer la condición de borde para las modelaciones de crecidas asociadas a periodos de retorno, se impuso un nivel del mar constante de 1.57 m, calculado a partir de la suma de dos componentes principales. Primero, se utilizó la cota máxima de marea astronómica de 1.41 m, extraída de la serie temporal sintética generada por el modelo TPXO, la cual aseguró la representación de los ciclos mensuales de marea. Segundo, se añadió la componente de marea meteorológica 0.16 m generada por la disminución de la presión atmosférica (16hPa), aplicando el concepto de barometric set-up. Otros efectos complejos como meteotsunamis o el set-up de oleaje no se consideraron, bajo el supuesto de que no ocurrirían simultáneamente con los eventos de crecida del Río Mataquito.

3.7 HIDRÁULICA FLUVIAL

El estudio de Hidráulica fuvial utiliza el software TELEMAC-2D (módulos hidrodinámicos y de transporte de sedimento GAIA) para evaluar escenarios de hidrología tradicional, cambio climático y eventos pasados.

La base topográfica y batimétrica, utilizada en los modelos, proviene de las mediciones de la etapa 3, complementada con el análisis de fotografías aéreas en la desembocadura y zona de rompiente (Figura 3-16), áreas de alto riesgo para mediciones físicas. Para las simulaciones, se definieron diferentes estados de descarga al mar. La geometría del canal principal de descarga al mar (barra litoral abierta) se estimó mediante formulación empírica en función de lo determinado con la metodología de Escoffier, pendiente del río, registros de caudal DGA y ubicada mediante el análisis de fotos históricas. En el caso de la descarga por el norte, (barra litoral formada), se implementó una barra litoral artificial con una cota de cresta constante de 2.6 m.

En cuanto a los parámetros morfodinámicos, se activó el módulo GAIA para el transporte de sedimento de fondo (transporte en suspensión desactivado), caracterizando el sedimento como arena fina no cohesiva con un $D_{50} = 0.25$ mm y utilizando la fórmula de Meyer-Peter y Müller. La ley de resistencia de Manning se aplicó con coeficientes de rugosidad zonificados (ejemplos: Río 0.03-0.02, Mar 0.015, Edificación 0.2), siendo la rugosidad un parámetro clave de calibración. El sector morfodinámico corresponde al tramo comprendido entre la desembocadura y el puente Mataquito, incluyendo la barra litoral. Por otro lado, el tramo entre el inicio del modelo y el puente Mataquito se adoptó la condición de fondo fijo.

Respecto a las condiciones de contorno: se asignó caudal variable en el tiempo para las entradas de Licantén y se impuso un nivel del mar variable (para calibración) o constante (para periodos de retorno). Además, se modelaron 31 estructuras tipo alcantarilla (*culvert*) en el cruce del Puente Lautaro, usando la formulación de Bodhaine (1968).

En general los modelos cuentan con celdas de tamaño variable que va desde los 5m para las zonas pobladas, hasta celdas de 10 m para el centro del cauce. En la zona marítima se simuló con celdas de tamaño 100 m.

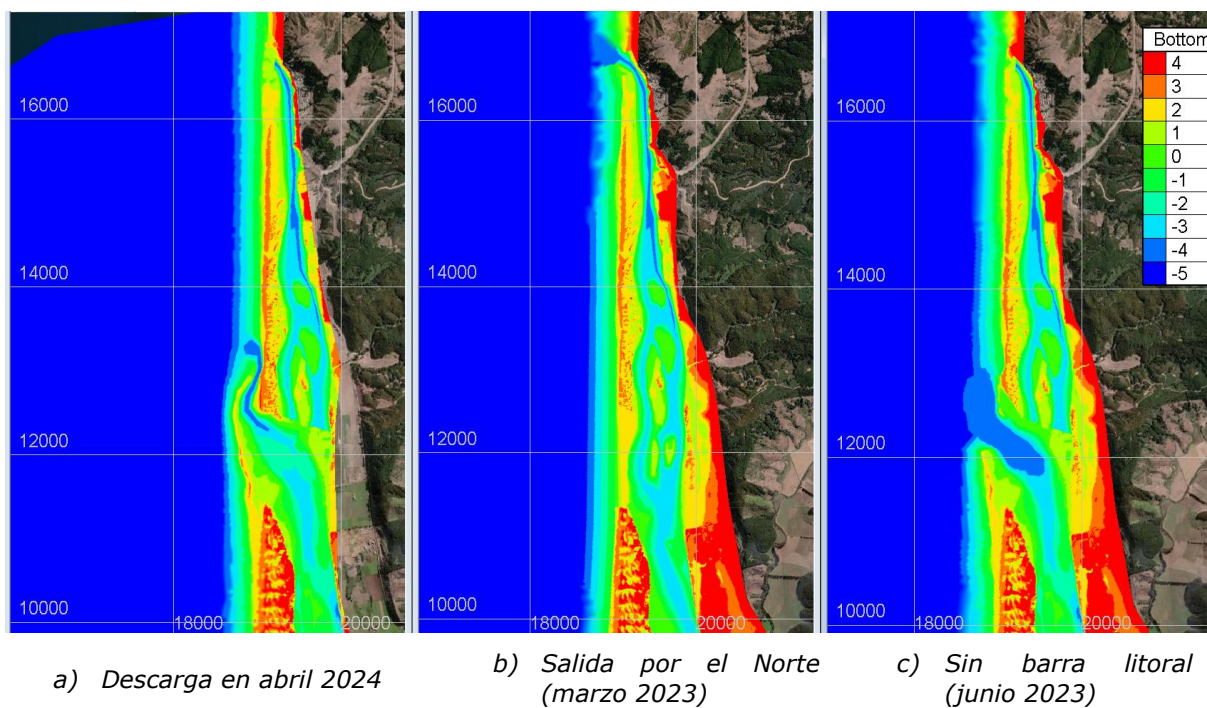


Figura 3-19 : Batimetria utilizada en los casos de modelacion.
(fuente: Elaboración Propia)

3.7.1 ESCENARIOS

Se definieron 16 escenarios de caudales para las simulaciones, cubriendo condiciones habituales hasta eventos extremos:

Tabla 3-10 : Escenario de modelación

#	Escenario	Desembocadura	Morfodinámico	Referencia Figura 3-19	Caudal m ³ /s
1	Evento agosto-23	Barra litoral abierta	NO	b)	Escalonado creciente
2	Mediciones de terreno abril-24	Sector Playa Trinchera con morfología de terreno abril 2024	NO	a)	Variable
3	Hidrología asociada a 2 años periodo de retorno	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	SI	b)	1309.3
4	Hidrología asociada a 5 años periodo de retorno	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	SI	b)	2427.4
5	Hidrología asociada a 10 años periodo de retorno	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	SI	b)	3375.8
6	Hidrología asociada a 25 años periodo de retorno	Barra litoral abierta	NO	c)	4453
7	Hidrología asociada a 50 años periodo de retorno	Barra litoral abierta	NO	c)	5247
8	Hidrología asociada a 100 años periodo de retorno	Barra litoral abierta	NO	c)	6027.7
9	Hidrología asociada a 50 años periodo de retorno (Cambio Climático) ²	Barra litoral abierta	NO	-	5777
10	Hidrología asociada a 100 años periodo de retorno (Cambio Climático)	Barra litoral abierta	NO	-	6631.6
11	Evento junio 23	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	SI	b)	Hidrograma con peak de 5431.1
12	Hidrología asociada a 25 años periodo de retorno	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	NO	c)	4453
13	Hidrología asociada a 50 años periodo de retorno	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	NO	c)	5247
14	Hidrología asociada a 100 años periodo de retorno	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	NO	c)	6027.7
15	Caudal medio	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	SI	b)	920
16	Caudal formativo	Barra litoral cerrada - Apertura Norte	SI	b)	107

(Fuente: Elaboración propia)

² Escenario 9 y 10 se realizarán en la Etapa V.

3.7.2 RÉGIMEN SEDIMENTOLÓGICO

3.7.2.1 GASTO SÓLIDO

A continuación, se muestra el mapa de gasto sólido en la localidad de Licantén asociados al escenario de caudal con un periodo de retorno de 2 años. La metodología y ecuaciones se detallan en la Memoria de Cálculo de Régimen Sedimentológico ubicado en el ANEXO_B_GEOMORFOLOGIA.

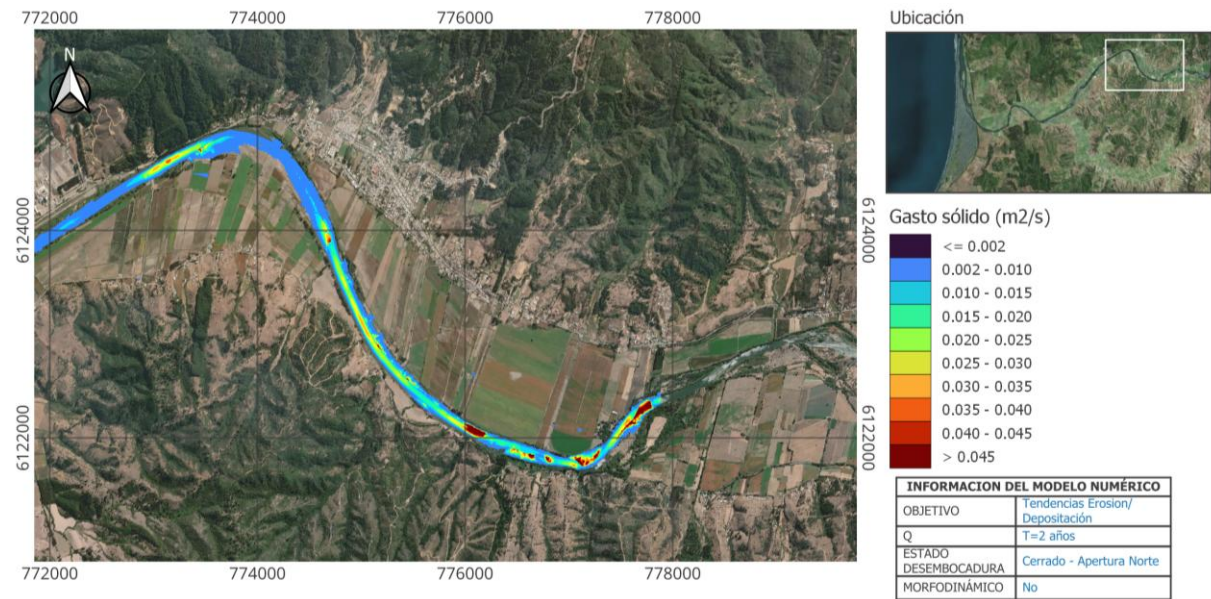


Figura 3-20 Caudal solido zona Licantén Van Rijn – T = 2 años.

La distribución mostrada del transporte sedimentario permite identificar zonas activas para el transporte. Los sectores de tonos azules que cambian a tonos amarillos y/o rojos sugiere un potencial erosivo significativo.

Las principales características en los resultados son:

- Distribución del transporte: Se observa una gradación cromática desde azul oscuro ($<0.002 \text{ m}^2/\text{s}$) hasta rojo intenso ($>0.045 \text{ m}^2/\text{s}$), representando la variabilidad espacial del transporte de sedimentos a lo largo del sistema fluvial.
- Zonas de alto transporte: Los sectores con mayor capacidad de transporte (tonos amarillos a rojos) se concentran principalmente en:
 - Secciones exteriores de meandros
 - Estrechamientos del cauce
 - Zonas de transición morfológica
- Zonas de bajo transporte: Las áreas con menor movilización de sedimentos (tonos azules) predominan en tramos más rectos y secciones interiores de curvas.

Finalmente se identifican zonas de equilibrio dinámico donde el tono de colores permanece constante a lo largo de los tramos y eso se puede apreciar en zonas rectas como por ejemplo en la Figura 3-21. Para el caso del caudal formativo y caudal medio se puede ver una homogeneidad continua, lo que muestra un transporte constante en el cauce, hasta llegar a la zona de pendiente baja del estuario (km 22 aprox).

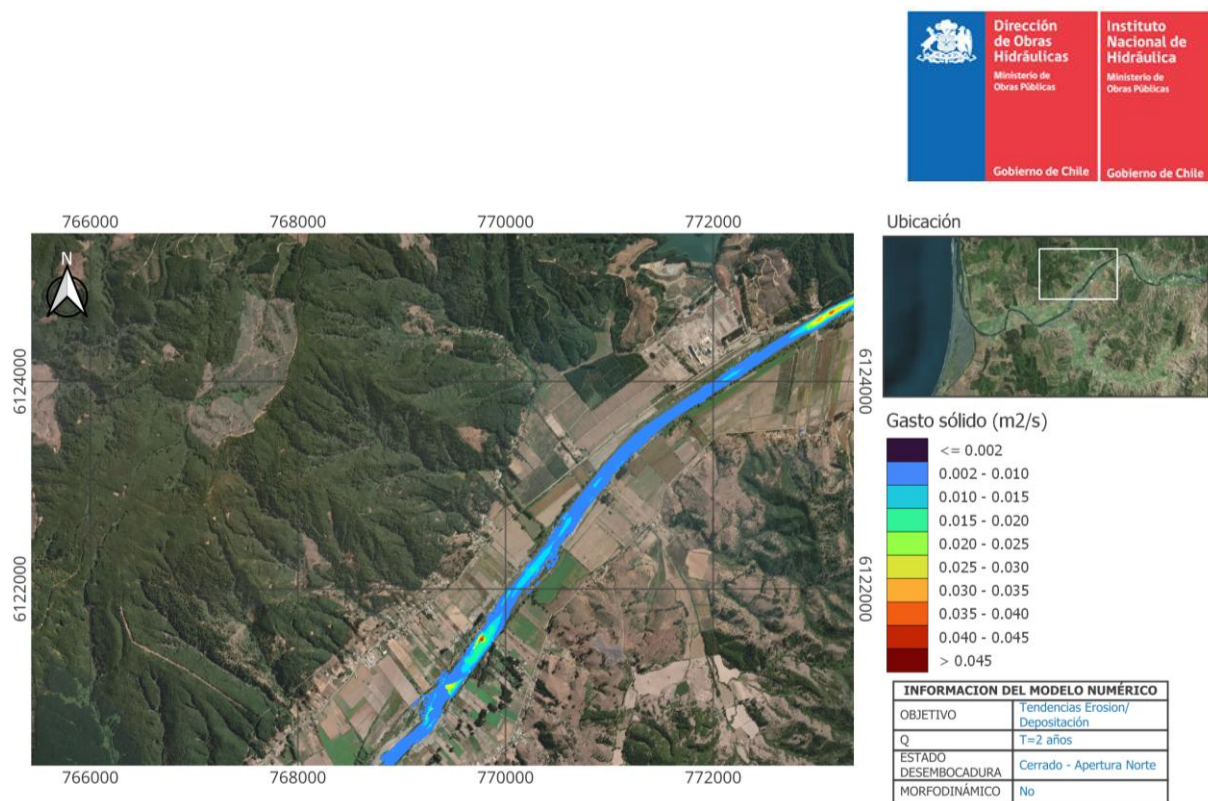


Figura 3-21 Caudal solido zona pasarela los escalones Van Rijn – T = 2 años.

3.7.2.2 EROSIÓN DE FONDO

El potencial de erosión del cauce se evaluó en función de los resultados del esfuerzo de corte de fondo de la modelación numérica. Para ello se calculó la razón entre el esfuerzo de corte de fondo y el esfuerzo de corte crítico (τ^*/τ_c^*), con el objetivo de determinar zonas que pudiesen tener alto potencial erosivo en las planicies de inundación de 2 y 5 años de periodo de retorno.

En las Figura 3-22 y Figura 3-23 se presentan los resultados del cálculo de la razón entre el esfuerzo de corte de fondo y el esfuerzo de corte crítico para las crecidas con periodos de retorno de 2 y 5 años, correspondientes al sector de Licantén y, más aguas abajo, al sector del Puente Lautaro, respectivamente. Los resultados indican que, en ciertas zonas, el esfuerzo de fondo puede superar hasta en 200 veces el esfuerzo crítico. En general, los valores más elevados se localizan dentro del cauce principal, mientras que en las planicies de inundación esta relación es considerablemente menor.

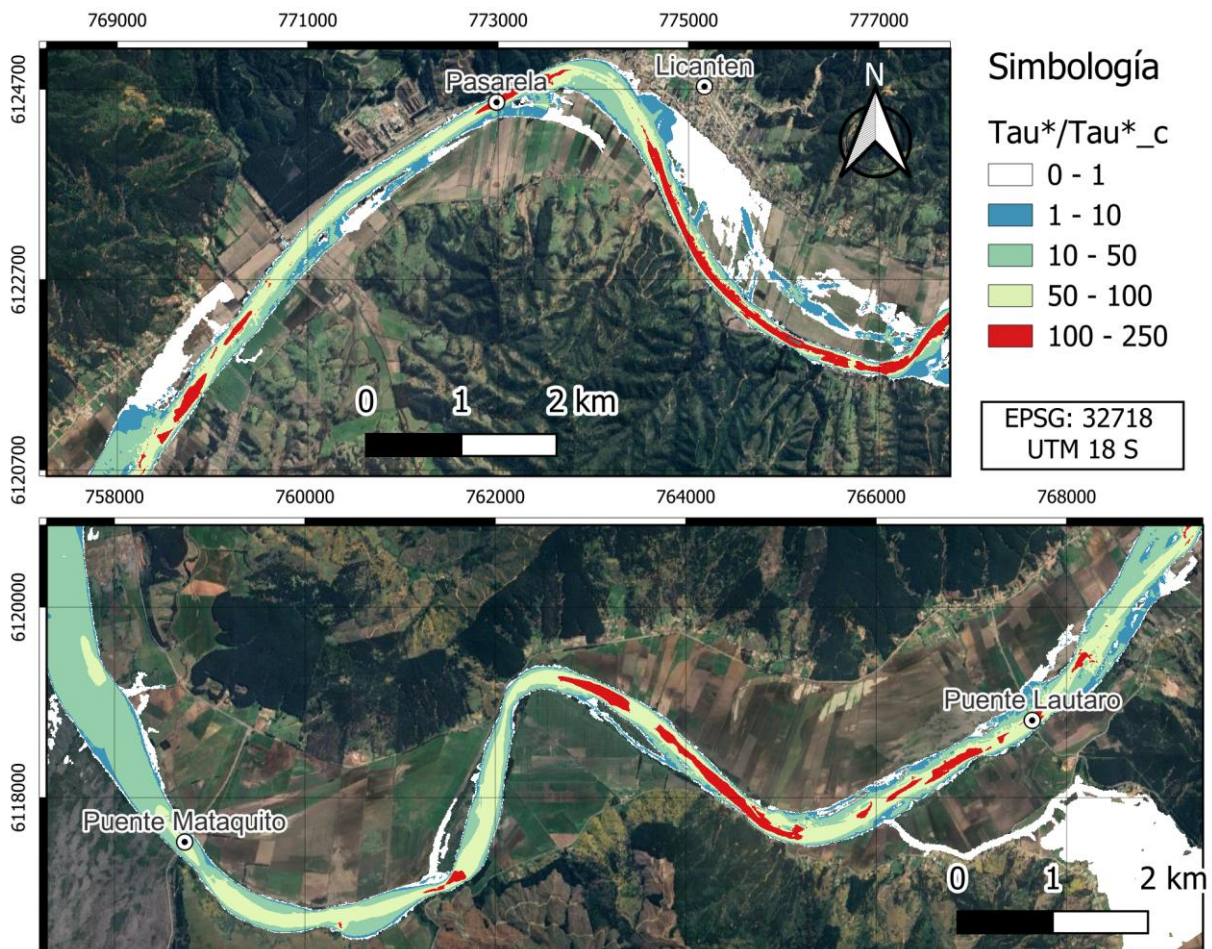


Figura 3-22: Razón entre esfuerzo de fondo y esfuerzo crítico de arrastre para la crecida de periodo de retorno de 2 años.

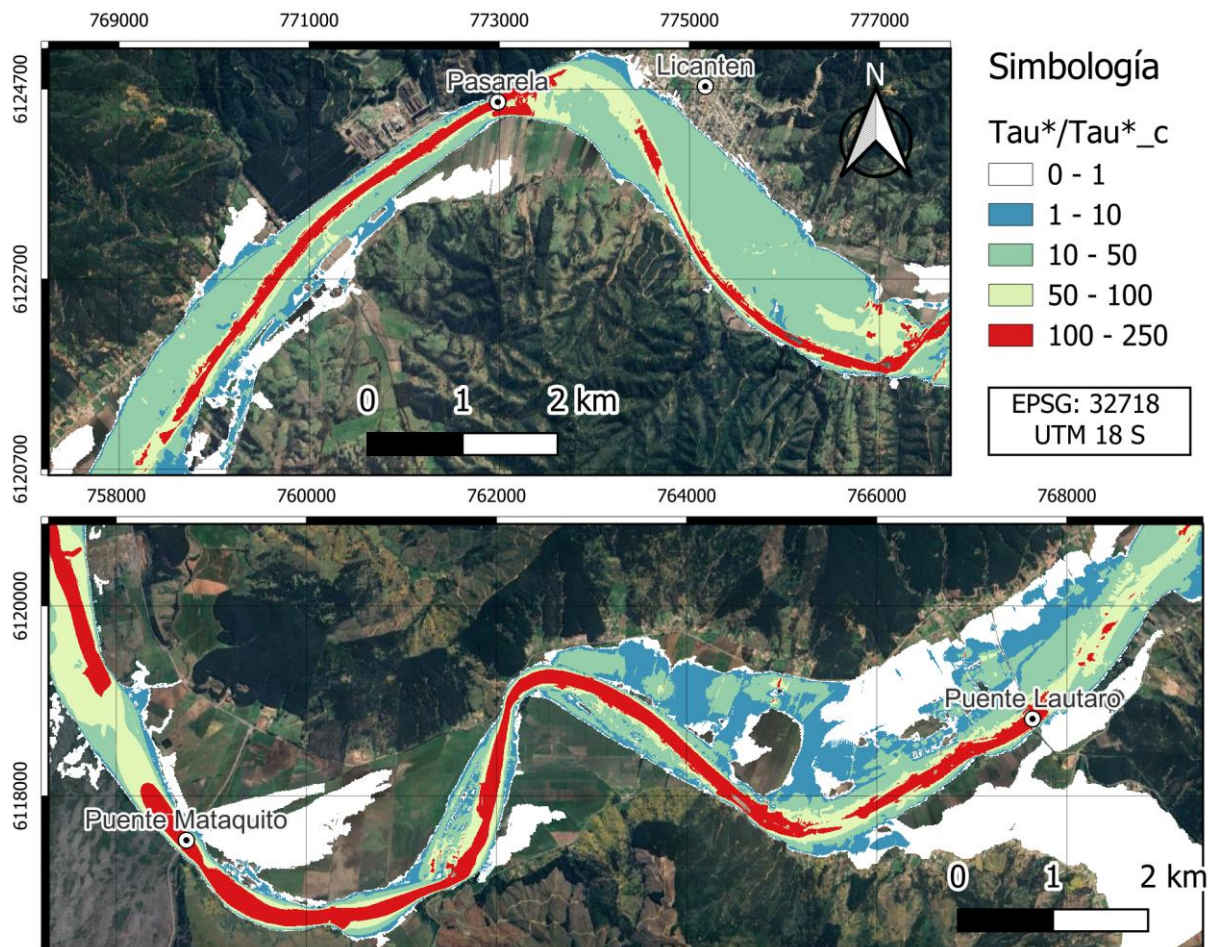


Figura 3-23: Razón entre esfuerzo de fondo y esfuerzo crítico de arrastre para la crecida de periodo de retorno de 5 años.

3.7.2.3 CLASIFICACIÓN MORFODINÁMICA

El análisis geomorfológico longitudinal divide el río en dos secciones. La sección aguas arriba (km 0-15), con control fluvial y lecho de arena fina-media (D50 de 0.1 a 0.2 mm), se clasifica como tipo B5 de Rosgen (moderadamente encajonado, con secuencias riffle-pool). Este tramo tiene baja sinuosidad ($P \sim 1.10-1.2$) y encajonamiento moderado ($ER \sim 1.6-2.0$). La sección aguas abajo (km 16-desembocadura), con influencia estuarina, presenta una transición a un patrón C5 (meándrico en planicie arenosa), con mayor sinuosidad ($P > 1.20$) y alta conectividad lateral ($ER > 2.2$). En este tramo, el D50 se incrementa hasta 0.2-0.3 mm, un fenómeno atribuido a la limpieza de finos por la oscilación de la marea. A pesar de la clasificación C5, que sugiere alta erosión de riberas, la dinámica lateral ha sido contenida por la dominancia mareal, la cual reduce la pendiente hidráulica y la energía necesaria para la migración lateral. En general, el río funciona como un continuo fluvial-estuarino en equilibrio, con alto potencial de recuperación. Como resumen se muestra la Tabla 3-11

Tabla 3-11 : Resumen clasificación Rosgen por tramo.

	Tramo	
	0–16 km (Fluvial)	16–Desembocadura
Tipo Rosgen	B5	C5 (orientativo)
Pendiente S (%)	0.15–0.20	Reducida por marea
Sinuosidad P	1.10–1.2 (baja), un pico en de 1.4 en km 8	1.20–1.30; pico >1.6 (22–24 km)
Encajonamiento ER	1.6–2.0 (moderado)	> 2.2 (alta conectividad lateral)
W/D a bankfull	20–45 (PT-01, PT-07, PT-05, PT-12)	> 80–100 (perfiles río abajo)
D50 (mm)	0.1–0.2 (arena fina–media)	0.2–0.3 (arena media)
D84/D50	≈ 1.5	≈ 1.36–1.5
Patrón morfológico	Riffle–pool; barras puntuales	Meandros desarrollados; barras de punto/centrales; barras mareales hacia la boca
Observaciones	Valle confinado ~1.5 km; canal ~200 m; tramo 8–14 km recto en río.	Clasificación referencial por control mareal; baja migración lateral.

Finalmente, la barra litoral en la desembocadura, compuesta por arenas, es altamente dinámica y migratoria. En condiciones normales, el río es desviado hacia el Norte (cerca del km 114.000). Sin embargo, durante eventos de crecida, el caudal rompe y sobrepasa la barra, creando una nueva descarga temporal más al Sur (cerca del km 109.500). Posteriormente, el oleaje dominante con dirección noreste y la depositación de sedimentos cierran gradualmente esta nueva boca, forzando a la descarga a migrar de nuevo hacia el Norte. El detalle de la metodología se puede ver en la Memoria de Cálculo de Régimen Sedimentológico ubicado en el ANEXO_B_GEOMORFOLOGIA

3.7.2.4 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

En la zona de estudio, el río Mataquito presenta un carácter meandroso, desarrollado sobre depósitos aluviales, con meandros limitados por cordones de cerros rocosos al norte y sur. En esta sección se identificaron las barras fluviales, las planicies de inundación y la barra litoral ubicada en la desembocadura al mar.

La barra litoral en la desembocadura del río es una estructura dinámica de arena cuya formación está controlada por la interacción entre el transporte longitudinal costero (dirección noreste) y los aportes fluviales. Normalmente, cuando no hay crecidas, esta barra desvía la descarga del río hacia el Norte (cerca del km 114.000 de la Ruta J-60). Sin embargo, durante eventos de crecida, el alto caudal sobrepasa la barra, creando temporalmente una nueva boca de descarga más al Sur (cerca del km 109.500). Posteriormente, el sistema inicia un proceso de recuperación, donde el oleaje dominante y el transporte litoral cierran gradualmente esta nueva apertura, forzando la descarga a migrar nuevamente hacia el Norte debido a la depositación continua de sedimentos.

El análisis geomorfológico del Río Mataquito, basado en la topobatimetría de marzo de 2024 e imágenes satelitales, identificó barras fluviales —principalmente puntuales, longitudinales

y alternadas— que reflejan el alto dinamismo morfológico del cauce. Se observaron barras alternadas aguas arriba de Licantén, una gran barra fija frente al poblado y barras múltiples y alternadas cerca del Puente Lautaro. Es crucial notar la intervención antrópica en varias barras, que están siendo utilizadas para agricultura. El análisis multitemporal de imágenes confirmó que estas zonas cultivadas forman parte activa del cauce, ya que son inundadas por el Caudal Máximo Medio Mensual (QMM), demostrando su movilidad histórica.

En cuanto a las planicies de inundación delimitadas por la modelación numérica, se observó que, para caudales con periodo de retorno igual o superior a 25 años, el río tiende a utilizar prácticamente toda la extensión del valle. A la altura de Licantén, las áreas colindantes, incluyendo terrenos agrícolas, son inundables a partir de un periodo de retorno de 2 años. Más aguas abajo, en el sector del Aeródromo, el cauce está encajonado, pero cerca del Puente Lautaro se desarrolla una extensa llanura de inundación hacia la ribera norte, que es utilizada en su totalidad por caudales de $T=5$ años en adelante, lo que subraya la vulnerabilidad de las márgenes y la alta conectividad lateral del río con su valle en eventos extremos. Esto se logra observa en el siguiente perfil transversal ubicado en el sector del aeródromo.

Cabe destacar que la metodología, análisis de imágenes y resultados generales se puede encontrar en la Memoria de Cálculo de Régimen Sedimentológico ubicado en el ANEXO_B_GEOMORFOLOGIA

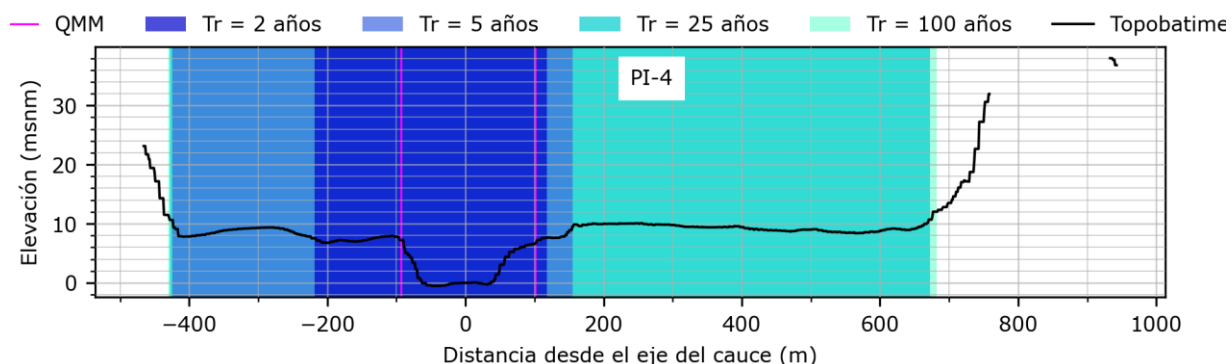


Figura 3-24: Perfil transversal PI-4 (ver Figura 3-25), sector Aeródromo. Desde aguas arriba hacia aguas abajo.

(Fuente: Elaboración propia)

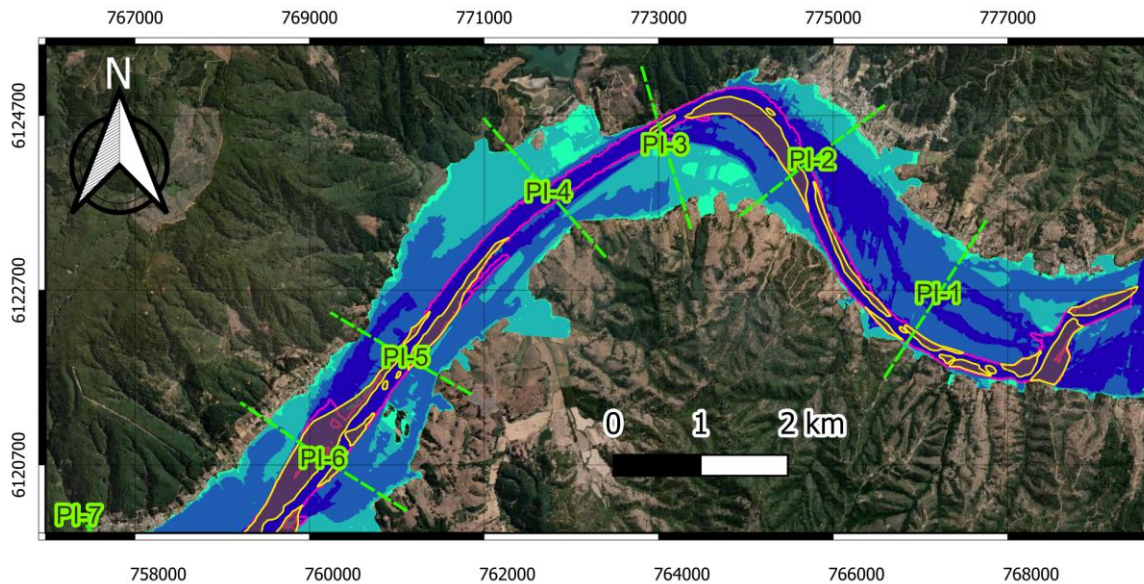


Figura 3-25: Mapa de barras fluviales, litoral y planicies de inundación en el área de estudio. Sector de Licantén.
(Fuente: Elaboración propia)

3.7.3 RESULTADOS

En la Memoria Calculo hidráulica Fluvial se encuentran el detalle de todos los resultados de los escenarios nombrados en la Tabla 3-10. A continuación, se observan los aspectos más relevantes de todos los escenarios.

- Es estima que el caudal de la crecida ocurrida en agosto del 2023 fue de [5974](#) m³/s, por lo que estaría asociada a una crecida de ~92 años de periodo de retorno según la hidrología calculada.



Figura 3-26 : Resultado de area de inundacion evento agosto 2023 – Sector Licanten Urbano, puntos de control

(Fuente: Elaboración propia)

- Tomando en cuenta que la cota superior de la barra es cota 2.6 m.s.n.m., esta seria sobrepasada para caudales mayores a [1876 m³/s](#). el cual es superior al caudal asociado a 2 años periodo de retorno. Por lo anterior y considerando el alto dinamismo sedimentológico del sector de la desembocadura, para el análisis del comportamiento de la inundación y posterior diagnostico se utilizan los resultados de la condición de “descarga norte” para periodos de retorno (tr) 2, 5 y 10 años, y la condición de “descarga sur” con barra litoral abierta para tr 25 50 y 100 años.
- En relación con las vías de acceso a los puentes:
 - Acceso al puente Mataquito: No se identifican sobrepasos de las rutas de acceso para ningunos de los periodos de retorno de estudio.
 - Acceso al puente Lautaro: Al acceso al puente es sobrepasado caudales mayores a ~2858m³/s, el cual superior al caudal asociado a 5 años periodo de retorno.
- Para un periodo de retorno de 2 años (1309m³/s), el cauce del río ocupa una mayor área mojada en comparación al caudal medio (920m³/s). En sector de Licantén Urbano se registra una cota de superficie libre de ~8.3m (como referencia la cota de la ruta J-60 frente a ese kilometraje es de ~10.2m). El desborde del margen derecho se produce aprox. km 6+100 (frente a la estación Copec), desde ese punto la inundación se propaga desde aguas abajo hacia aguas arriba Esta área abarca las planicies en el sector del puente Lautaro se repite el patrón de desborde, generando una propagación hacia aguas arriba una vez sobrepasado el margen habitual.

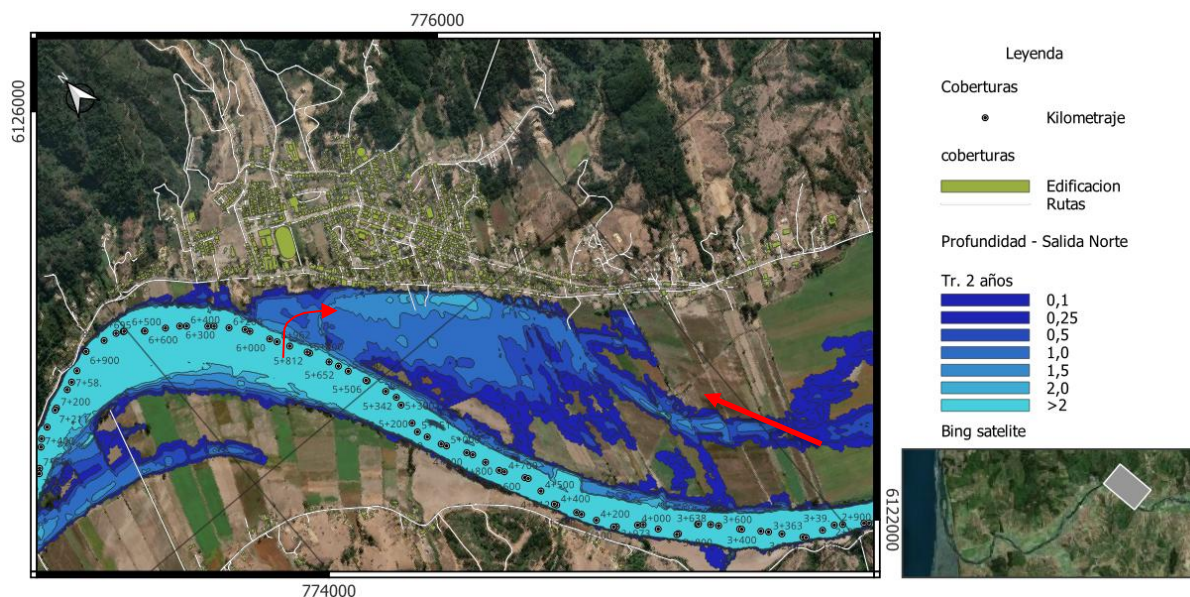


Figura 3-27 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Licanten

(Fuente: Elaboración propia)

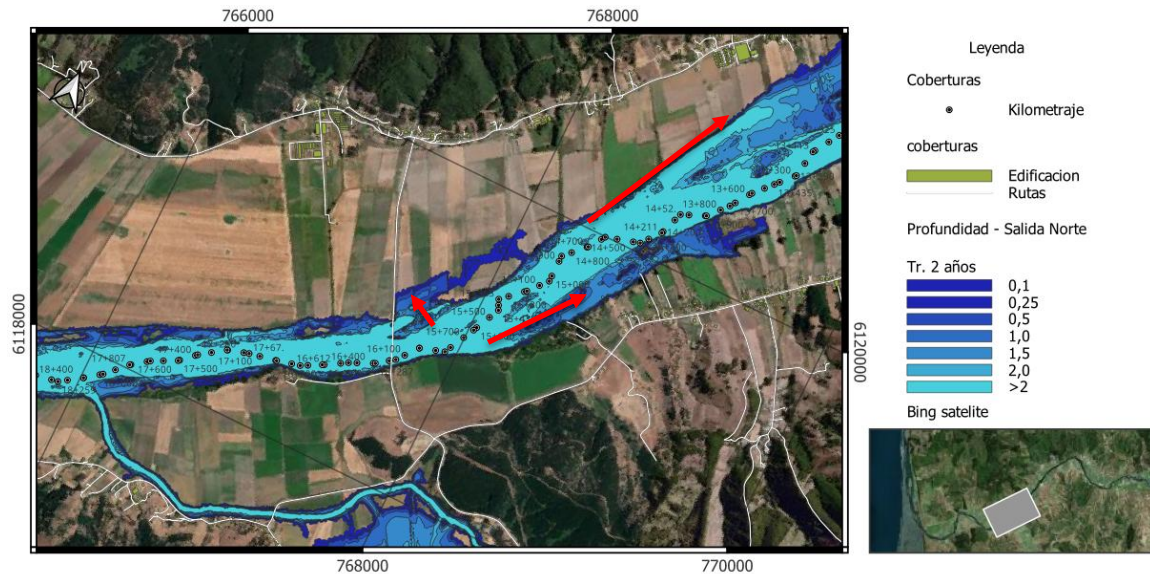


Figura 3-28 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Puente Lautaro

- En general para el periodo de retorno de 5 años, el río ocupa gran parte de las planicies laterales, existen desbordes en el río Curepto producidas por el aumento del nivel del río Mataquito. La ruta que conecta el puente Lautaro con la ruta J-60 no se ve sobrepasada. El terraplén de acceso al puente Lautaro, en el rango de caudales entre 2 y 5 años de periodo de retorno, genera un control.

La curva del cauce en el km 6+500 (aguas abajo del Licantén Urbano) genera un cambio de dirección brusco y está en la cercanía al primer punto de desborde (considerando el margen del caudal medio), Se propone evaluar la rectificación de la curva, modificando los márgenes del río entre km 4+800y km7+400, siguiendo los patrones del área afectada calculados para los casos 5 y 10 años de periodo de retorno, con el fin de disminuir la cota de agua, frente a Licantén.

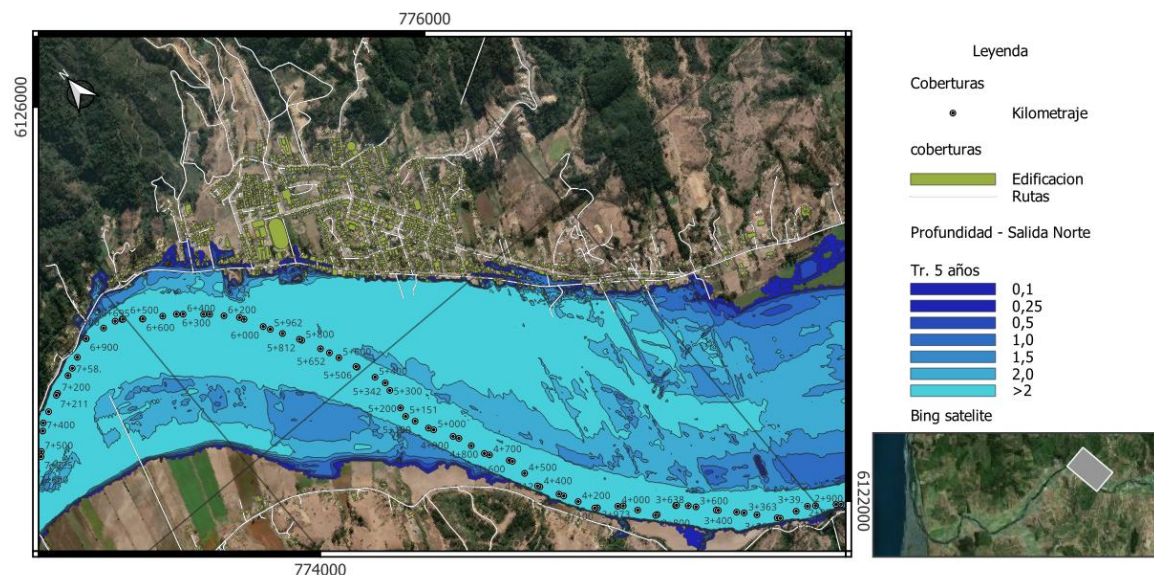


Figura 3-29 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Licantén

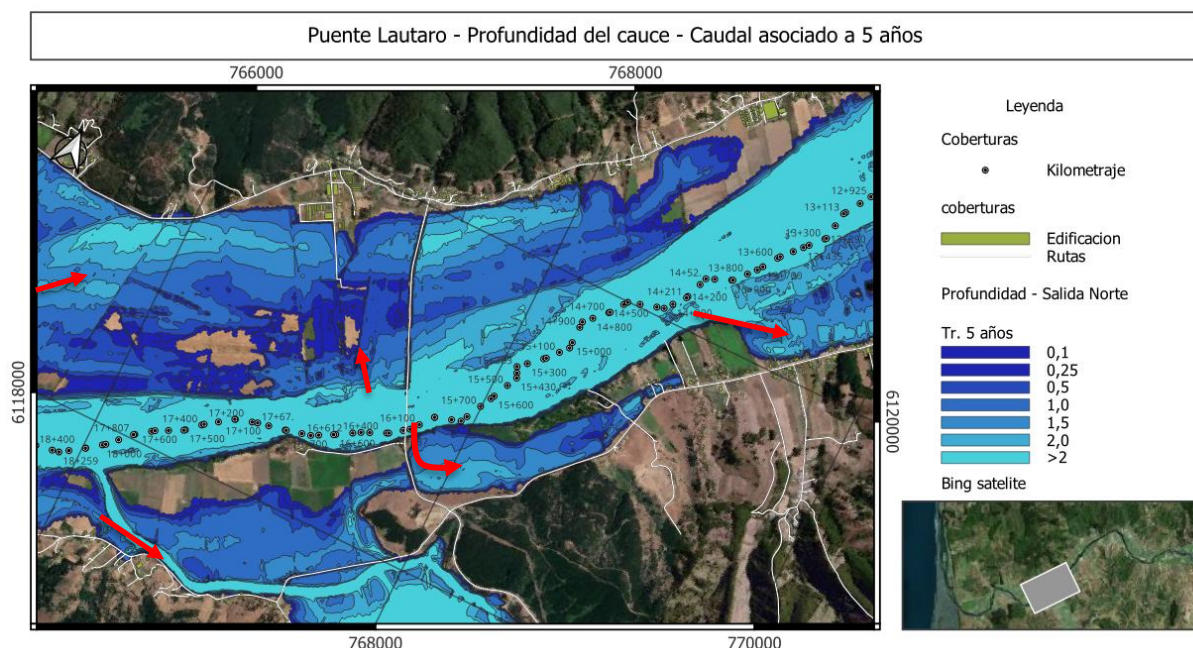


Figura 3-30 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Puente Lautaro

- En el sector del puente Mataquito, el desborde por la ribera derecha, que comienza inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del terraplén del acceso al puente, en la ribera izquierda se identifican algunos sobrepasos hacia las dunas y en la ribera
- En general, se identifican que los desborden se generan en zonas puntuales hacia ambos costados de río, por efectos de las cotas de las planicies, la inundación se va propagando hacia aguas arriba. Se propone evaluar la rectificación de estos (todos o algunos) márgenes con el fin mitigar las inundaciones en la infraestructura crítica y/o esencial.
- Para crecidas de 100 años de periodo de retorno la inundacion ocupa gran parte del valle.

Licanten Urbano - Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años

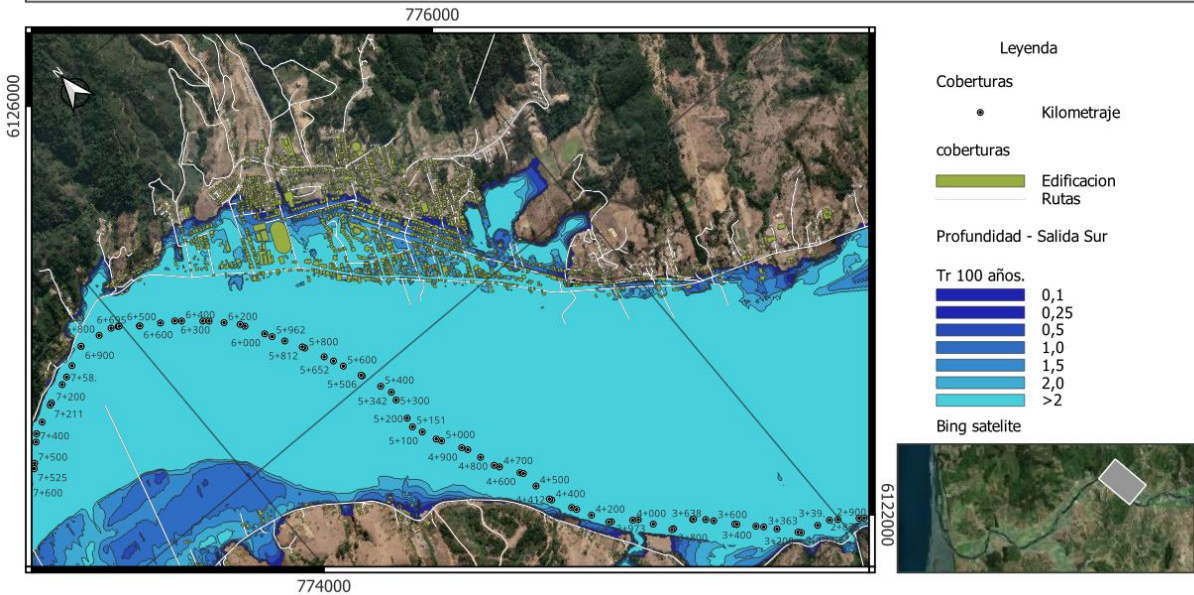


Figura 3-31 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Licanten
(Fuente: Elaboración propia)

Sector Pasarela - Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años

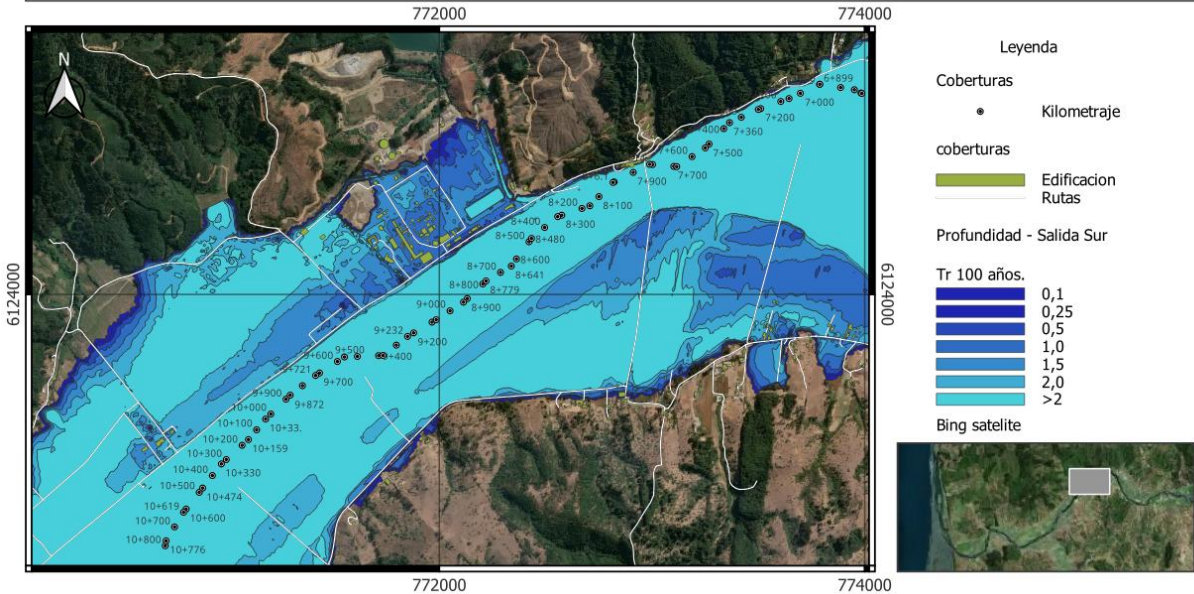


Figura 3-32 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Pasarella
(Fuente: Elaboración propia)

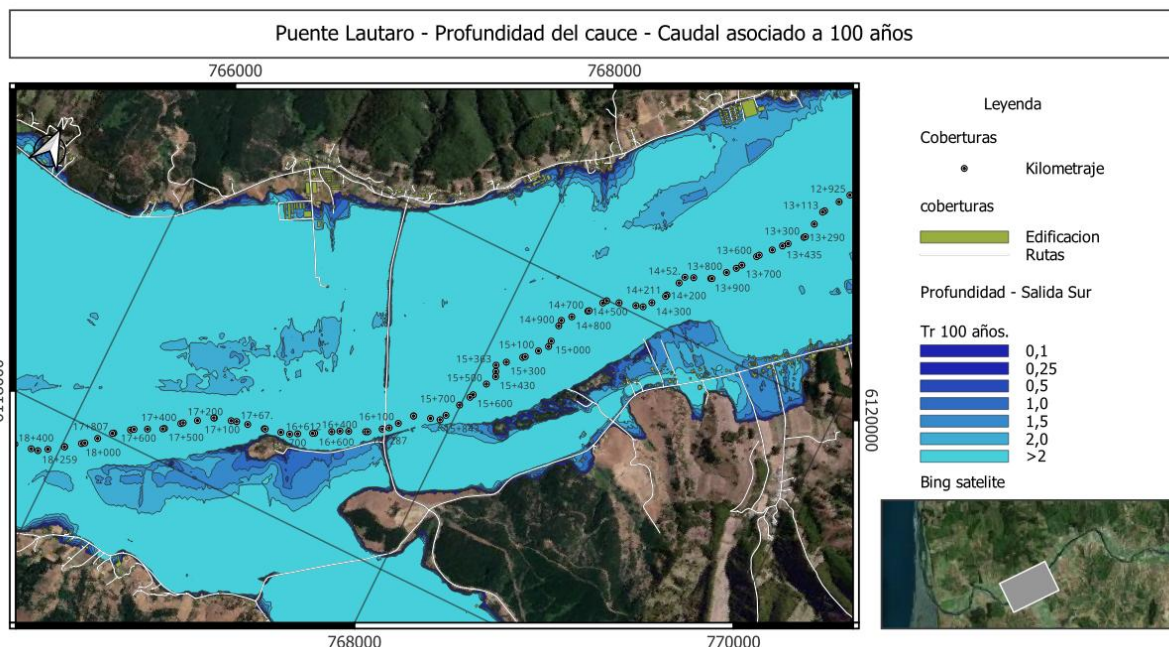


Figura 3-33 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Puente Lautaro

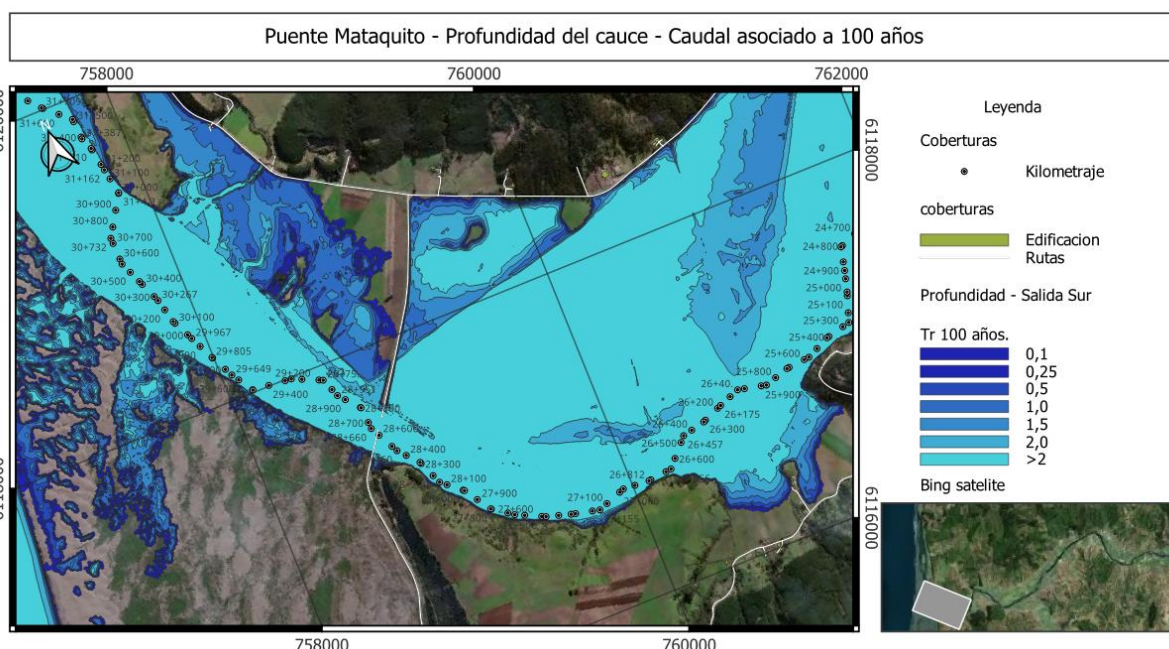


Figura 3-34 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 1000 años -Sector Puente Mataquito

Sector costero - Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años

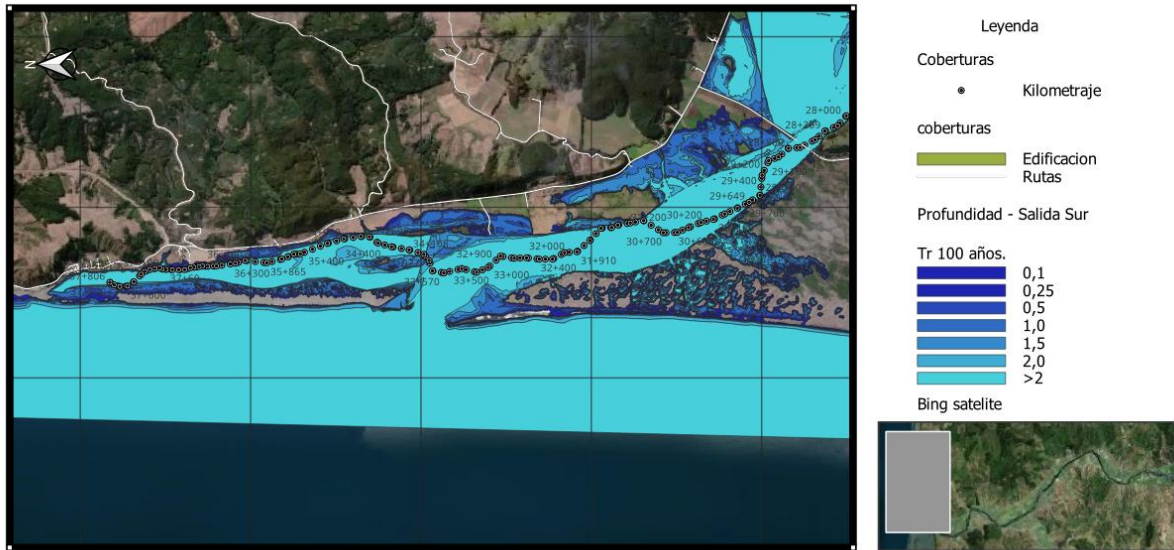


Figura 3-35 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Zona Costera

4. DIAGNOSTICO

Este capítulo presenta la evaluación de las amenazas de inundación y las condicionantes claves del río.

- Inundación: Se mapearon y analizaron las áreas afectadas para periodos de retorno de 2, 5 y 100 años.
- Marea y Barra Litoral: Se concluye que la influencia de la onda de marea en Licantén Urbano es insignificante durante crecidas. La presencia de la barra litoral tiene un efecto local, aumentando la cota de inundación hasta 30 cm en el Puente Mataquito para eventos de 25 años, pero se espera que esta sea sobrepasada y erosionada en grandes crecidas.
- Terraplén de Cruce a Puentes: Se identificó que los terraplenes de acceso a los puentes actúan como controles hidráulicos, aumentando localmente la cota de inundación inmediatamente aguas arriba. Retirarlos podría disminuir el nivel hasta en 27 cm en el Puente Lautaro para un evento de 100 años.
- Diagnóstico de Amenazas: El diagnóstico concluye que el Puente Lautaro es la estructura crítica del estudio. Se cuantificaron las edificaciones (1605 unidades para 100 años, 57% en Licantén Urbano) e infraestructura esencial (19 de 33 afectadas para 100 años) expuestas a inundación.

4.1 CONDICIONANTES DE AMENAZAS

4.1.1 INUNDACIÓN

Para el diagnostico se muestran los resultados de 2 5 y 100 años para crecidas de eventos extremos.

La selección de los eventos para el diagnóstico se justifica en base a que el evento de 2 años muestra los lugares donde comienzan los desbordes desde el margen del río, el evento de 5 años muestra los lugares donde comienza la inundación en sectores poblados y por último el evento de 100 años muestra la magnitud de la inundación para un evento de diseño de obras. Los demás periodos de retorno se encuentran en el ANEXO_F_MEDIDAS Memoria de Calculo: Diagnostico.

En la Figura 4-1, se muestra las áreas de inundación asociadas a crecidas hidrológicas en distintos sectores a lo largo de la zona de estudio.

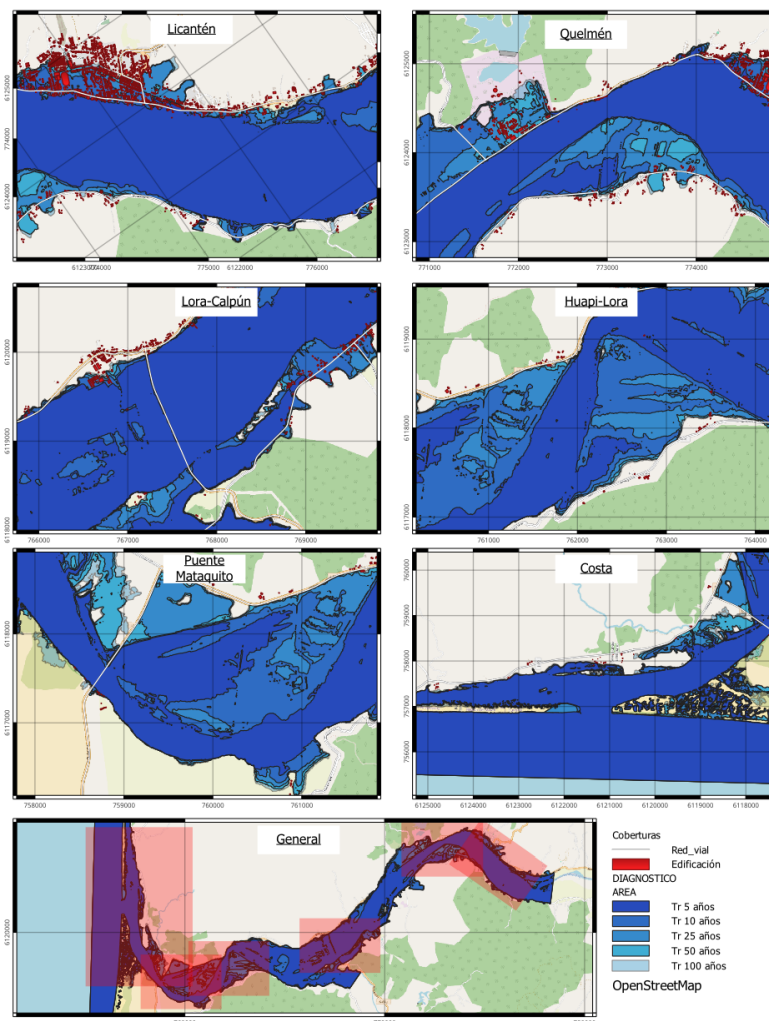


Figura 4-1 : Mapa General con las áreas de inundación para 2, 5 , 10 , 25, 50, y 100 años.

(Fuente: Elaboración propia)

4.1.1.1 Caudal asociado a 2 años periodo de retorno, Q : $1309.3m^3/s$

Para un periodo de retorno de 2 años ($1309m^3/s$), el cauce del río ocupa un área más grande que la vista el caso de caudal medio y caudal formativo. En sector de Licantén Urbano se registra una cota de superficie libre de $\sim 8.3m$ (km 5+300), como referencia la cota de la ruta j-60 frente a ese kilometraje de $\sim 10.2m$.

El desborde del margen derecho se produce aprox. km 6+100 (frente a la estación Copec), desde ese punto la inundación se propaga desde aguas abajo hacia aguas arriba. En la Figura 4-2 se muestra el área afectada y se marca la dirección donde inicial la inundación.

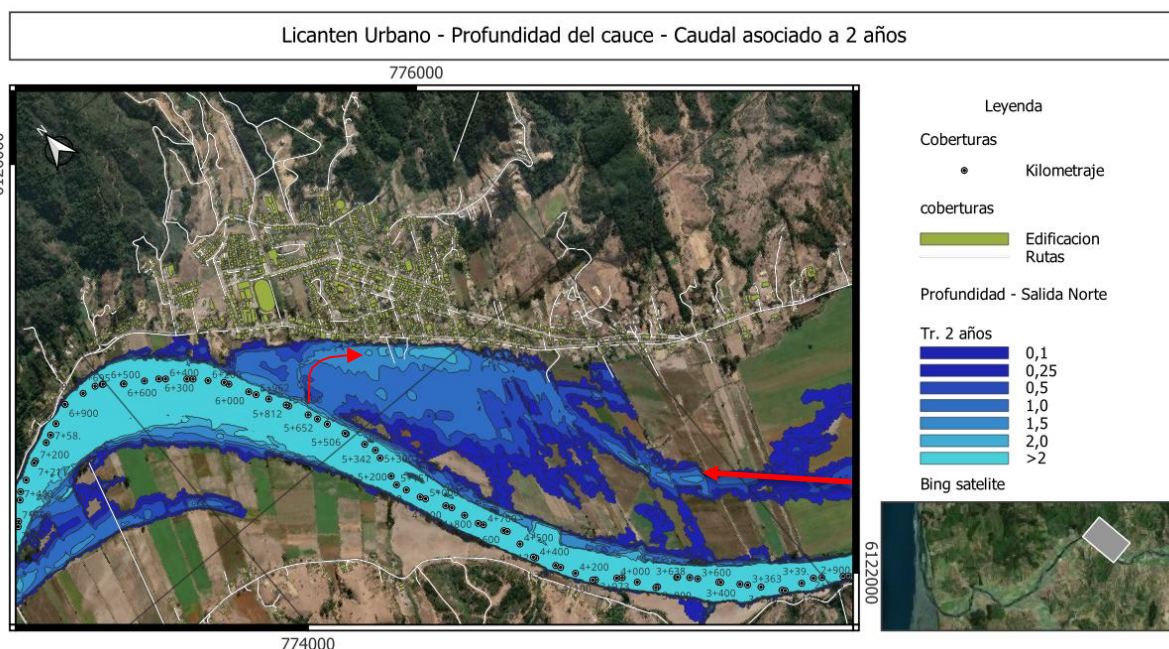


Figura 4-2 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Licanten
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4-3 se muestra el área afectada y se marca la dirección donde inician los desbordes. En el sector de la Pasarela, el desborde comienza por la ribera izquierda (mirando hacia aguas abajo) y se propaga hacia aguas arriba.

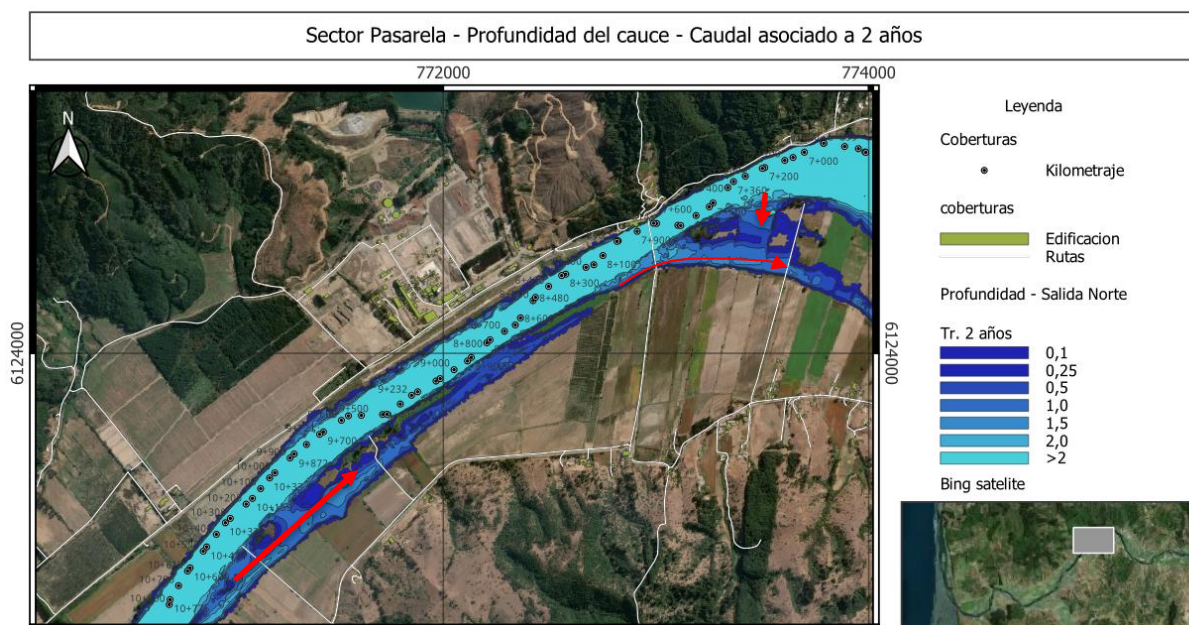


Figura 4-3 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Pasarella
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4-4, se muestra el área afectada y se marca la dirección donde inician los desbordes. En el del puente Lautaro, el desborde comienza aguas arriba de este y por la ribera derecha e izquierda (mirando hacia aguas abajo) y se propaga hacia aguas arriba.

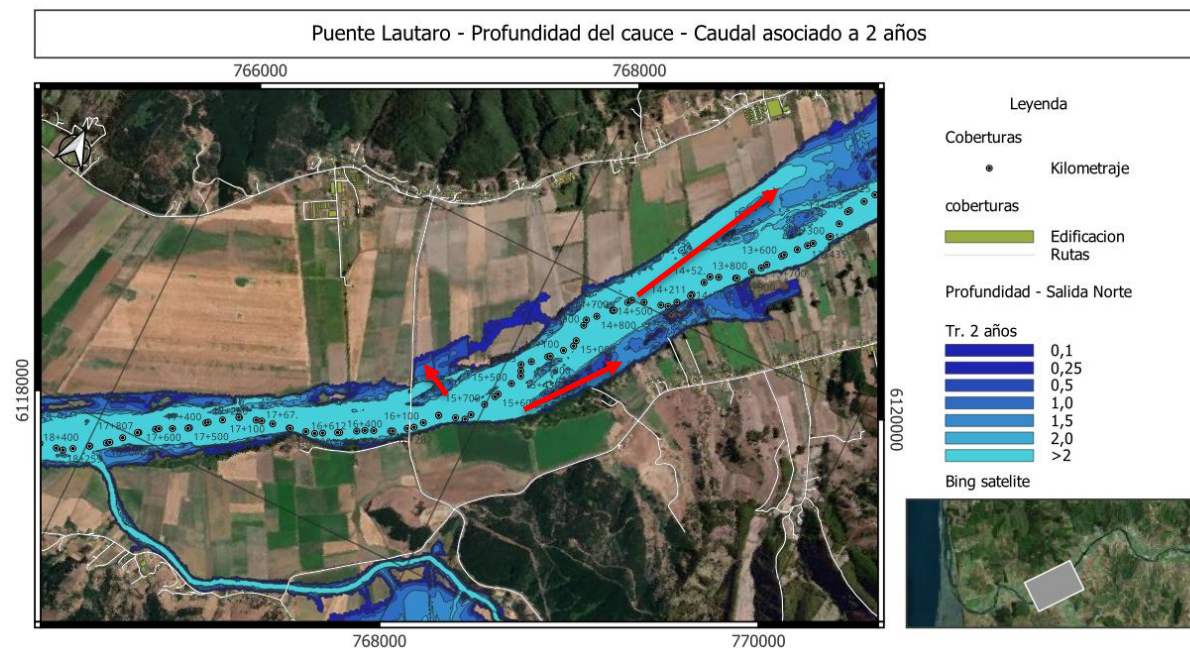


Figura 4-4 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Puente Lautaro

En la Figura 4-5, se muestra el área afectada y se marca la dirección donde inician los desbordes. En el del puente Mataquito, el desborde comienza aguas arriba de este (~km 25+500)y por la ribera derecha (mirando hacia aguas abajo) y se propaga hacia aguas arriba.

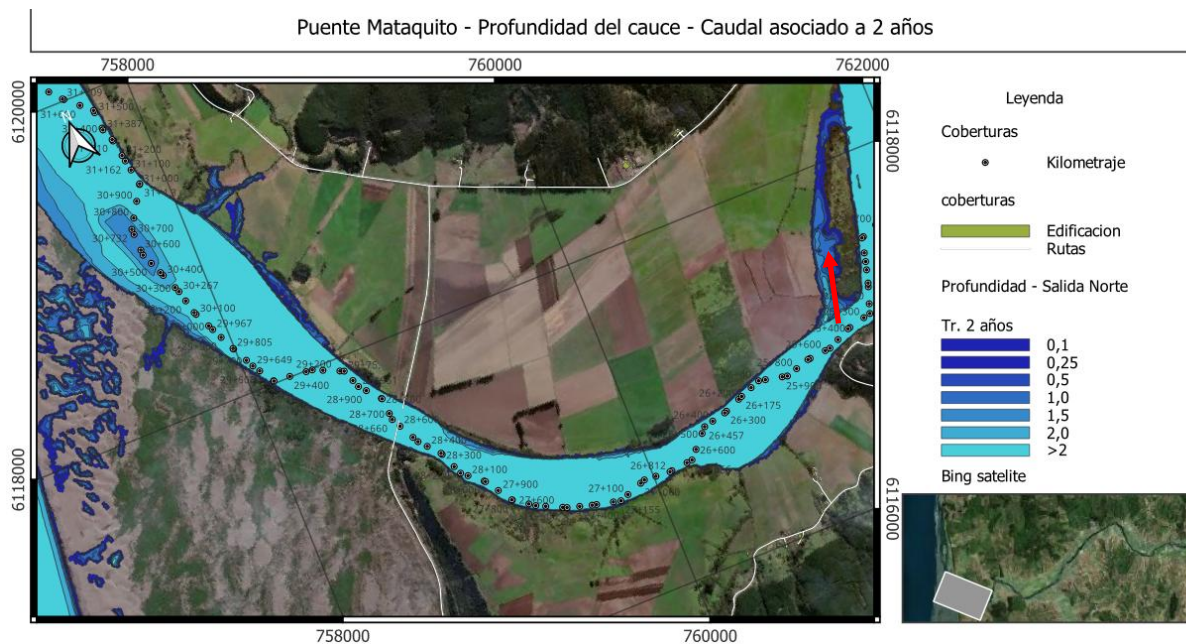


Figura 4-5 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Sector Puente Mataquito

En la Figura 4-6, se muestra el área afectada y se marca la dirección donde inician los desbordes. En el del puente Mataquito, el desborde por sobre la barra se produce aproximadamente en el km 33+500 en dirección al mar, por la ribera derecha aproximadamente en el km 34+900 se identifica un desborde que se propaga hacia aguas arriba.

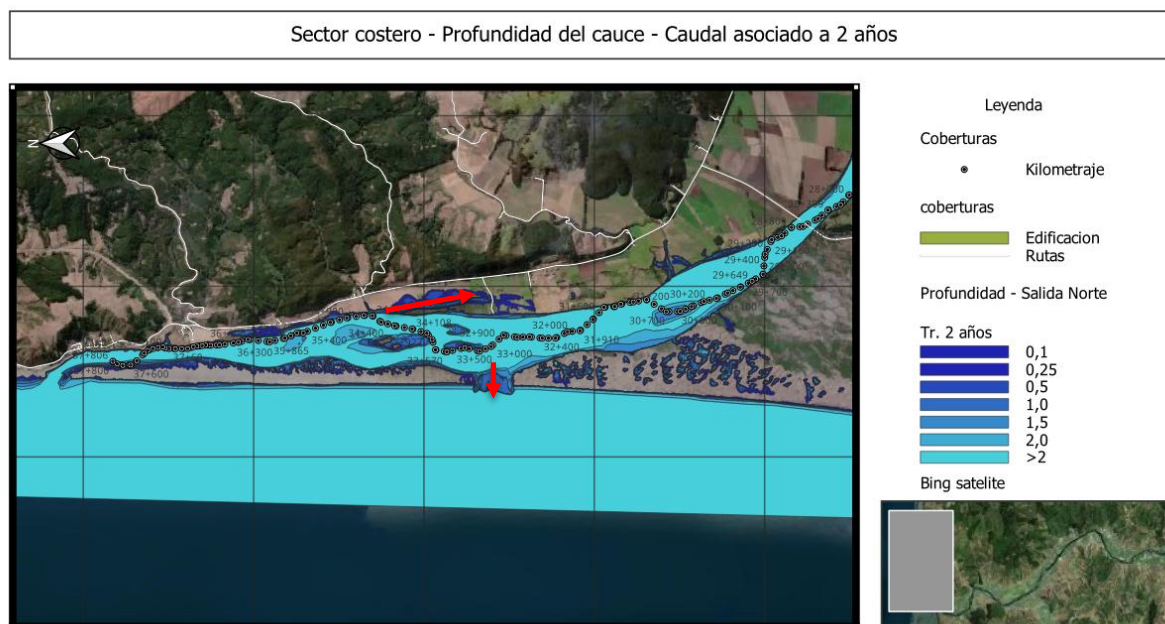


Figura 4-6 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 2 años -Zona Costera.
(Fuente: Elaboración propia)

4.1.1.2 Caudal asociado a 5 años periodo de retorno, Q : 2527.4m³/s

Para caudales asociados a 5 años de periodo de retorno, por la ribera derecha se identifican 3 puntos donde la inundación alcanza la calzada de la ruta J-60, por la ribera izquierda alcanza un margen bien definido por una terraza existente (línea de color amarillo, Figura 4-7).

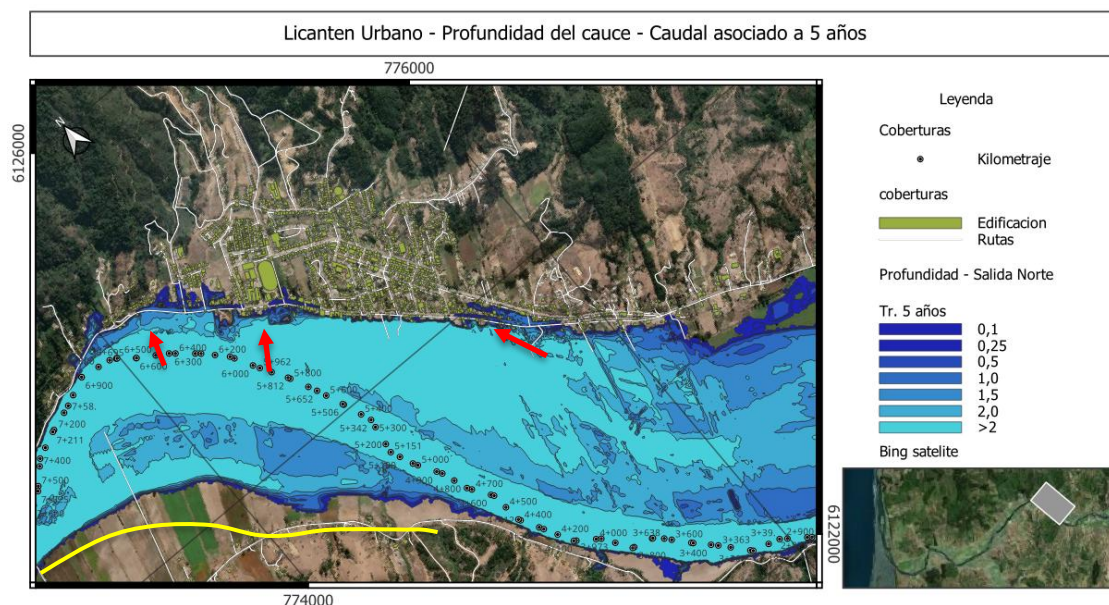


Figura 4-7 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Licanten
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4-8, se forma un brazo por la ribera izquierda que comienza a inundar la terraza antes mencionada, por la ribera derecha bordea la ruta J-60 y se genera un brazo en el km 11+100.

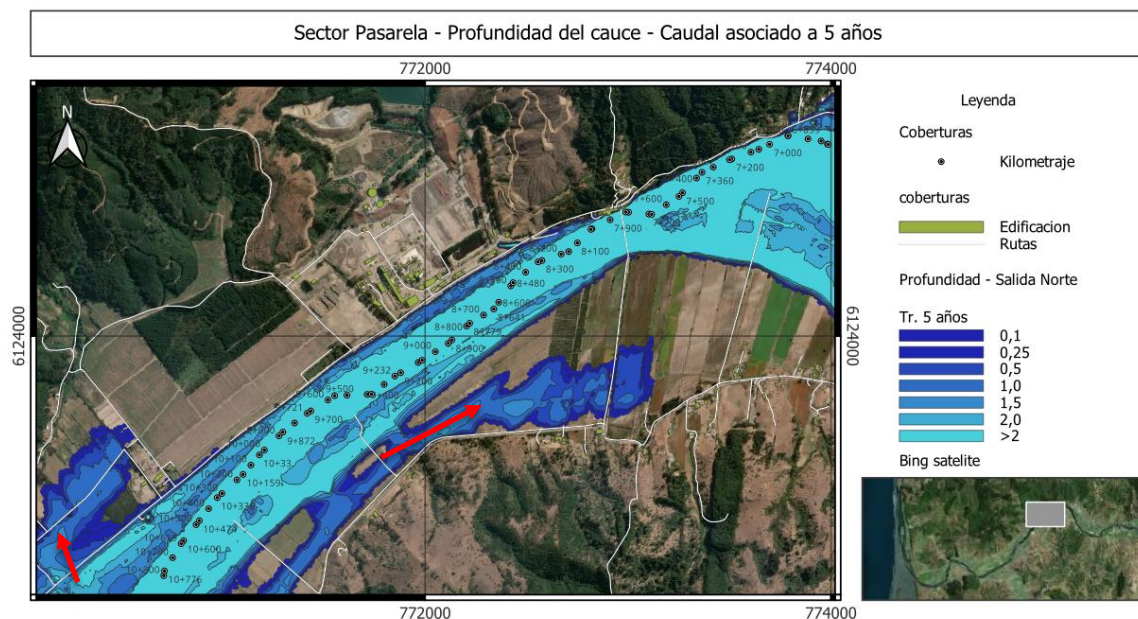


Figura 4-8 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Pasarella
(Fuente: Elaboración propia)

Figura 4-9 en el sector del puente Lautaro el río ocupa gran parte de la planicie de inundación, existen desbordes en el río Curepto producidas por el aumento del nivel del río Mataquito. La ruta que conecta el puente Lautaro con la ruta J-60 no se ve sobrepasada.

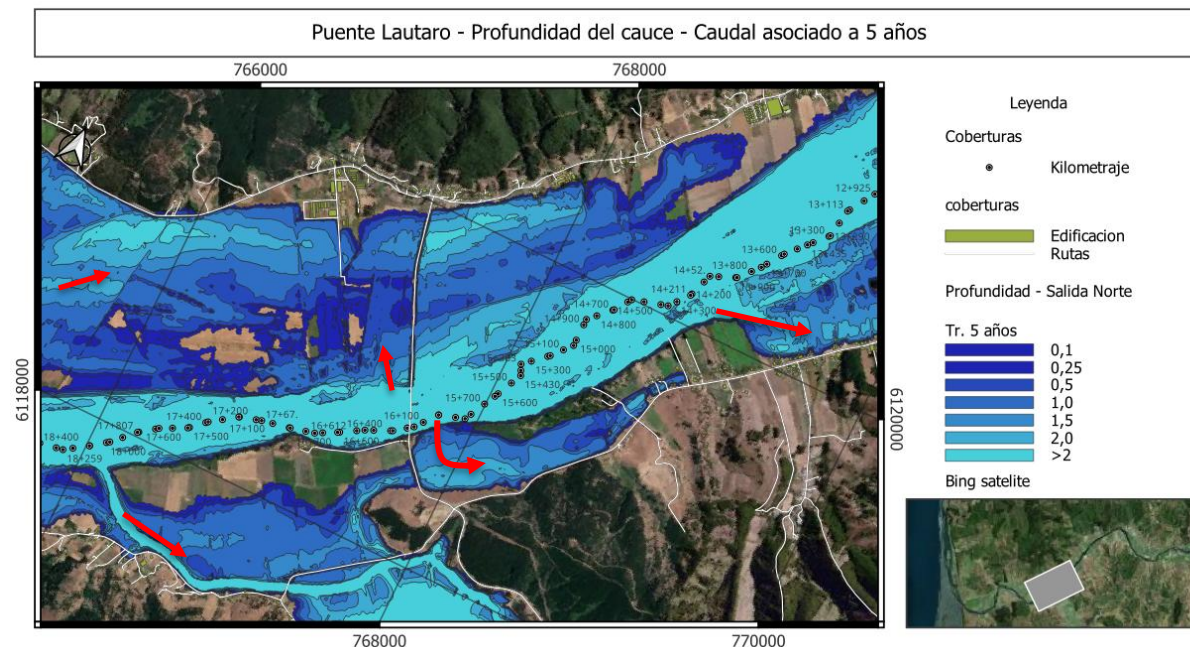


Figura 4-9 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Puente Lautaro

(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4-10, se forma un desborde por la ribera derecha, que comienza inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del terraplén de llegada al puente, en la ribera izquierda se identifican algunos sobrepasos hacia las dunas y en la ribera

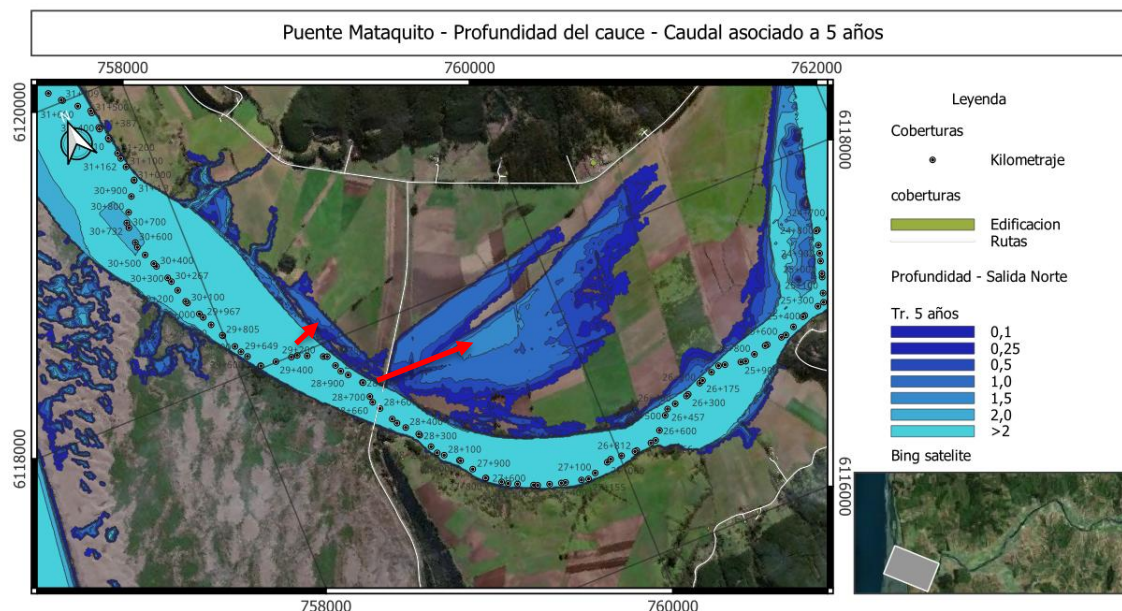


Figura 4-10 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Sector Puente Mataquito

En la Figura 4-11 se ve como la descarga por sobre la barra litoral es más ancha, por la ribera derecha (km 36+600) el margen de inundación colinda con la ruta J-60.

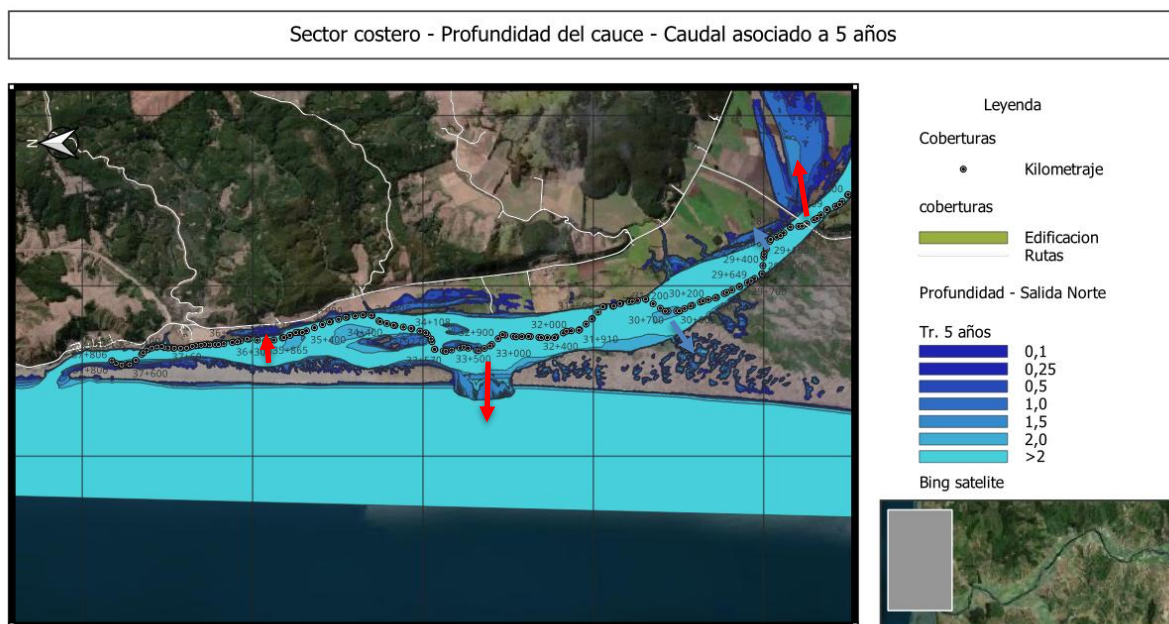


Figura 4-11 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 5 años -Zona Costera
(Fuente: Elaboración propia)

4.1.1.3 Caudal asociado a 100 años periodo de retorno, $Q:6028.7m^3/s$

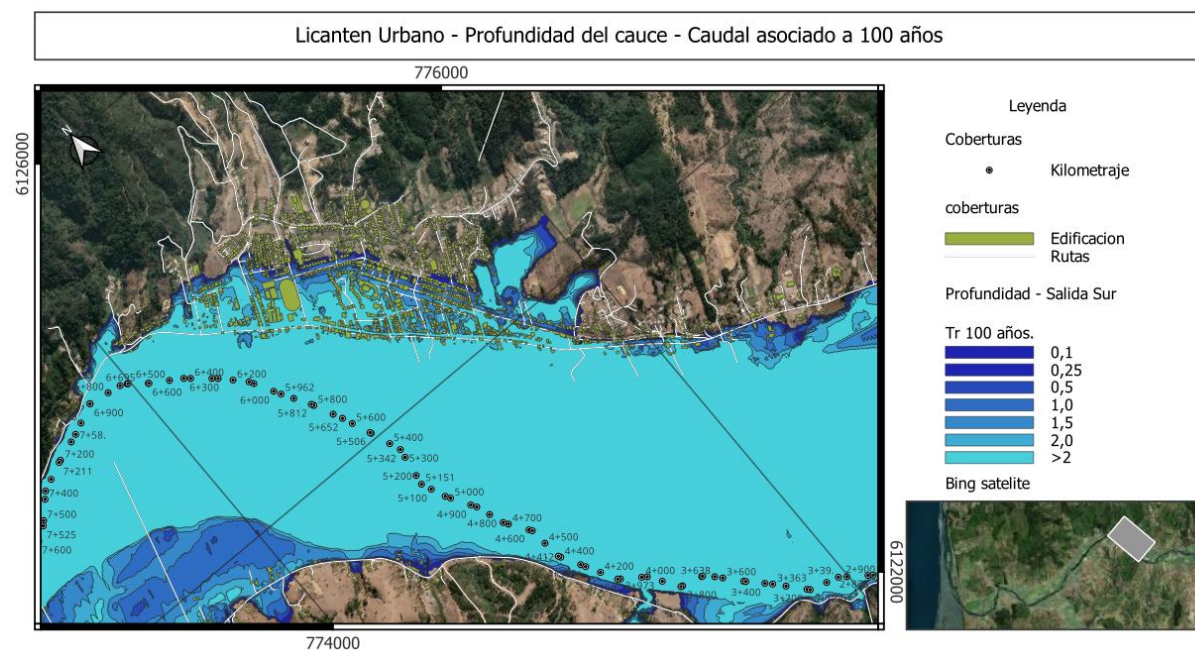


Figura 4-12 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Licanten
(Fuente: Elaboración propia)

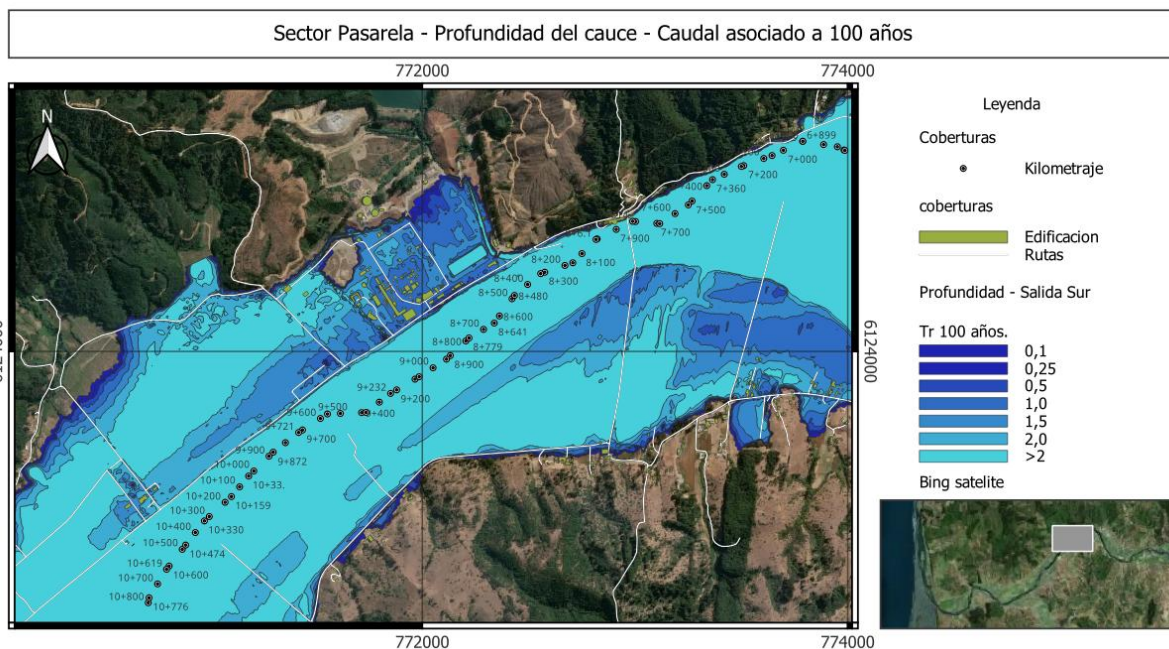


Figura 4-13 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Pasarella
(Fuente: Elaboración propia)

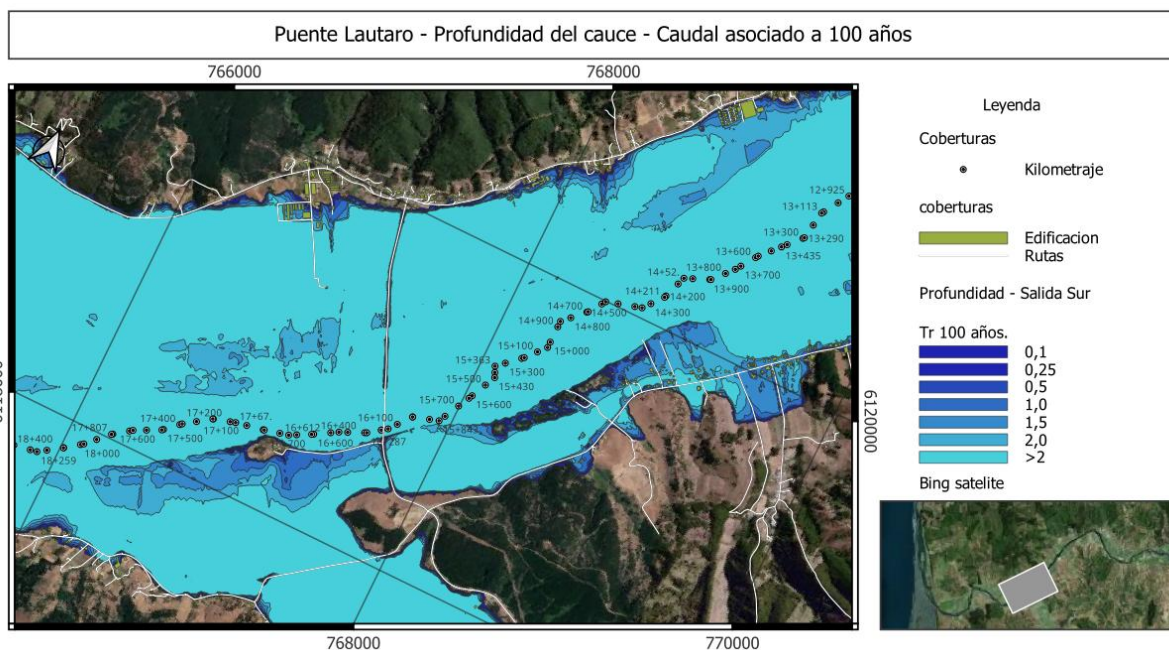
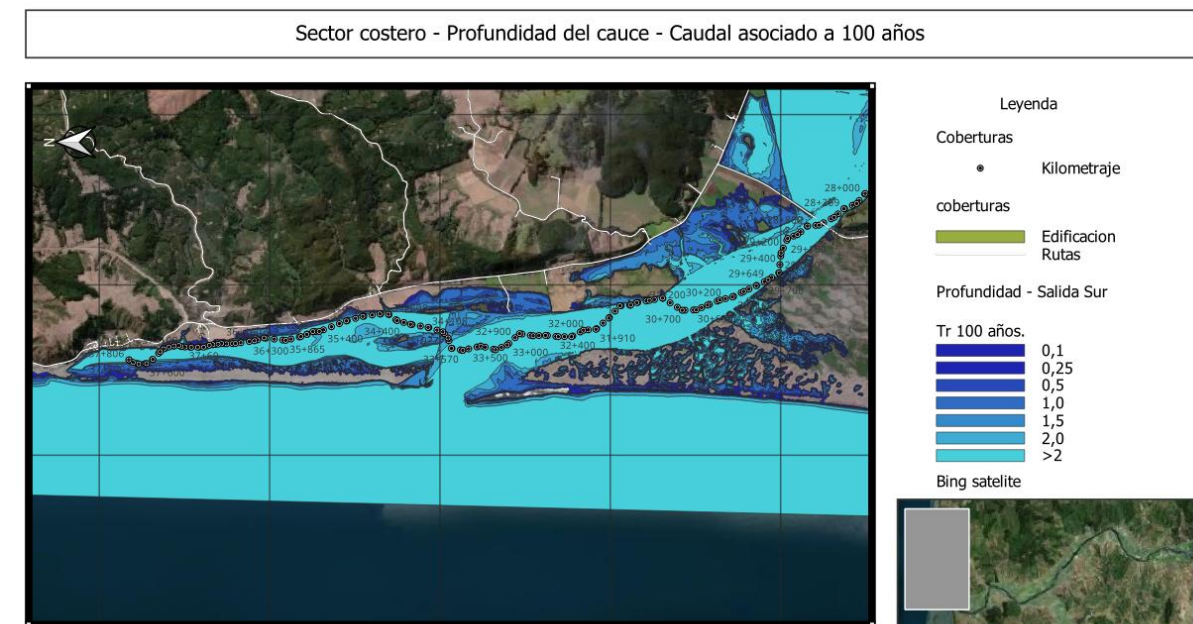
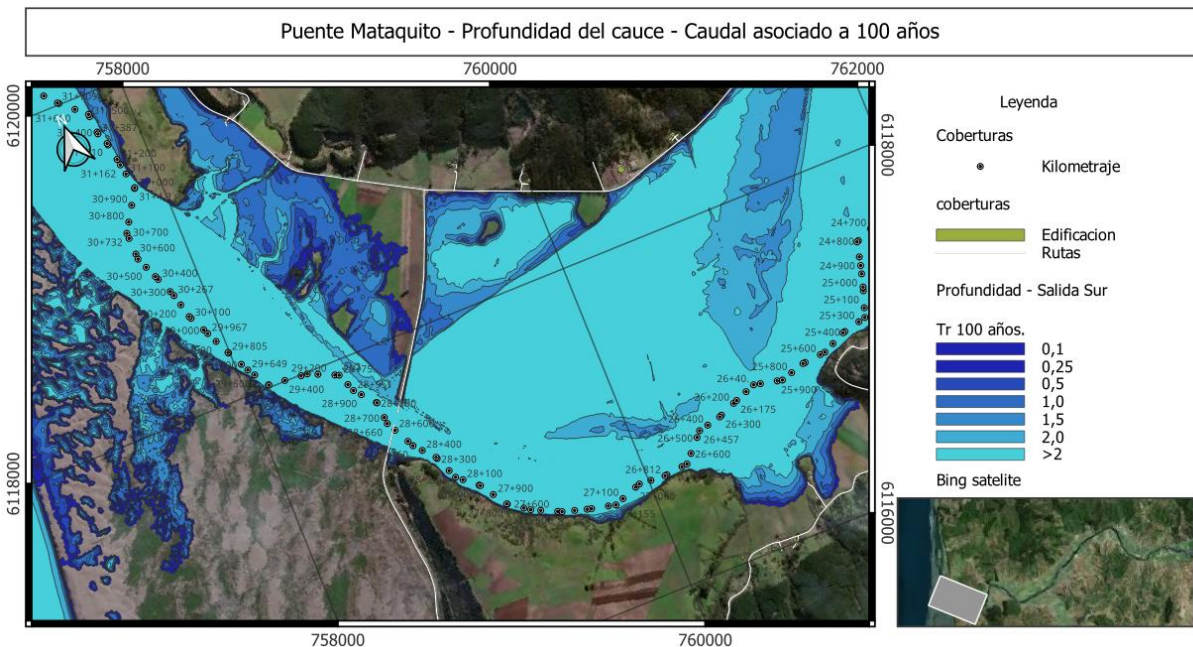


Figura 4-14 : Profundidad del cauce - Caudal asociado a 100 años -Sector Puente Lautaro
(Fuente: Elaboración propia)



4.1.2 MAREA

Para determinar la influencia de la onda de marea en el río, se analizan de los resultados de las mediciones de niveles de escurrimiento registrados con mareógrafos en los sectores de los puentes Mataquito, Lautaro y Pasarela los Escalones. Se observo que la onda tiene el potencial de alcanzar el sector de Pasarela los Escalones con amplitudes menores a 3cm.

Aguas abajo del Puente Lautaro, esta amplitud aumenta, en registrando 0.3m en el sector de Puente Mataquito, se debe tener en cuenta que en la ventana de medición se registró un caudal de $\sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$, muy por debajo del caudal asociado a una crecida de 2 años de periodo de retorno ($1309 \text{ m}^3/\text{s}$), donde se espera que la forzante del río tome mayor importancia desplazando hacia aguas debajo la influencia de la marea.

Por lo tanto, para el sector de Licantén Urbano, la componente mareal no incide en el nivel de inundación. Su efecto podría ser relevante en el sector costero, pero el alcance de esta influencia es altamente dinámico, ya que depende de la interacción compleja entre el caudal del río, el nivel de la marea, la morfología y posición de la desembocadura fluvial durante la crecida.

4.1.3 BARRA LITORAL

Para determinar la influencia de la presencia de una barra litoral, se analizó el caso de una inundación en el escenario con y sin la barra litoral. Los resultados muestran que, para una crecida asociada a 25 años, la diferencia entre estos casos en el sector frente a Licantén y el puente Lautaro son menos de 3 cm. Sin embargo, desde el puente Lautaro hasta el puente Mataquito esta diferencia va incrementando gradualmente hasta llegar a ~ 30 cm en el puente Mataquito.

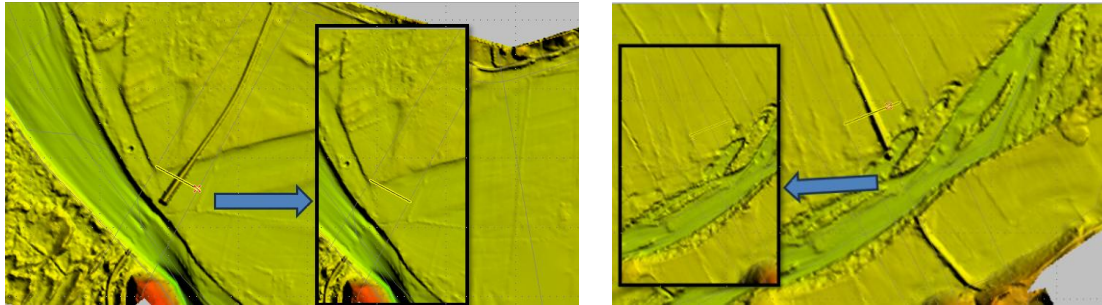
En el caso que la barra litoral este completamente formada y que río esté descargando por el sector la Pesca, esta sería sobrepasada por caudales mayores a [1876](#) m^3/s (caudal menor a crecida de 5años), donde se espera comience a erosionarse y abrirse.

4.1.4 TERRAPLEN DE CRUCE A PUENTES

Con el objeto de evaluar como interactúan los atraviesos tipo terraplén en los accesos a puentes Lautaro y Mataquito en el área de inundación y cota de inundación, para lo cual se realiza una modificación topográfica que se extiende por el norte desde la ruta J-60 y se termina en el inicio de la estructura del puente propiamente tal, en estos sectores se realizó una interpolación lineal de las cotas de terreno ubicadas, aguas abajo y arriba de ambos cruces, en un ancho aproximado de 80m como se muestra en la Figura 4-17, no se considera la continuación del camino por el costado sur del río, por estar en una cota elevada.

De las Figura 4-18, Figura 4-19 y Figura 4-20 que corresponden a secciones transversales en Licantén, Puente Lautaro y Puente Mataquito respectivamente, se observa que para 100 años de periodo de retorno las diferencia en la cota de agua en el eje (bajo el puente) entre el caso con terraplén y sin terraplén es de 0.03, -0.06 y -0.30 m en esos sectores, el aumento de la cota bajo el puente no genera un control del flujo. En la Figura 4-21, se muestra un perfil longitudinal en el sector del terraplén, ahí se observa que en el sector inmediato aguas arriba del terraplén, al retirar el terraplén, las cotas disminuyen 0.40, 0.42 y 0.27 m para los caudales asociados a 5, 10 y 100 años, esto se produce por la disminución de la velocidad del flujo en el sector aguas arriba de los atraviesos.

En la Figura 4-22, se muestra un perfil longitudinal con las cotas de inundación desde el sector de Licantén hasta el sector del puente Lautaro, allí se observa que las diferencias en las alturas de escurrimiento observas inmediatamente aguas arriba del terraplén, disminuyen gradualmente hasta el sector de la Pasarela Los escalones, desde ese punto hacia Licantén las diferencias son menores a 3cm.



Sector Puente Mataquito

Sector puente Lautaro

Figura 4-17: Modificación de terreno para Caso 1
(fuente: Elaboración propia.)

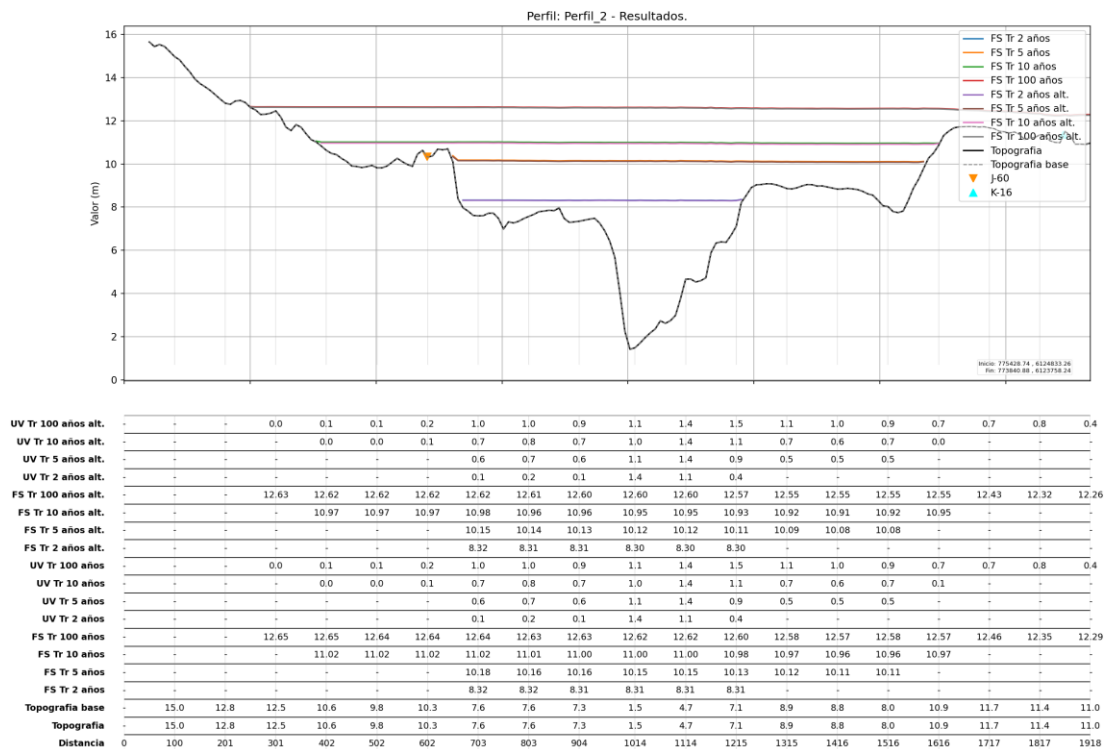


Figura 4-18: Perfil transversal en Licantén de resultados con y sin terraplén
(resultados sin terraplén se indica con "alt.")
(fuente: Elaboración propia.)

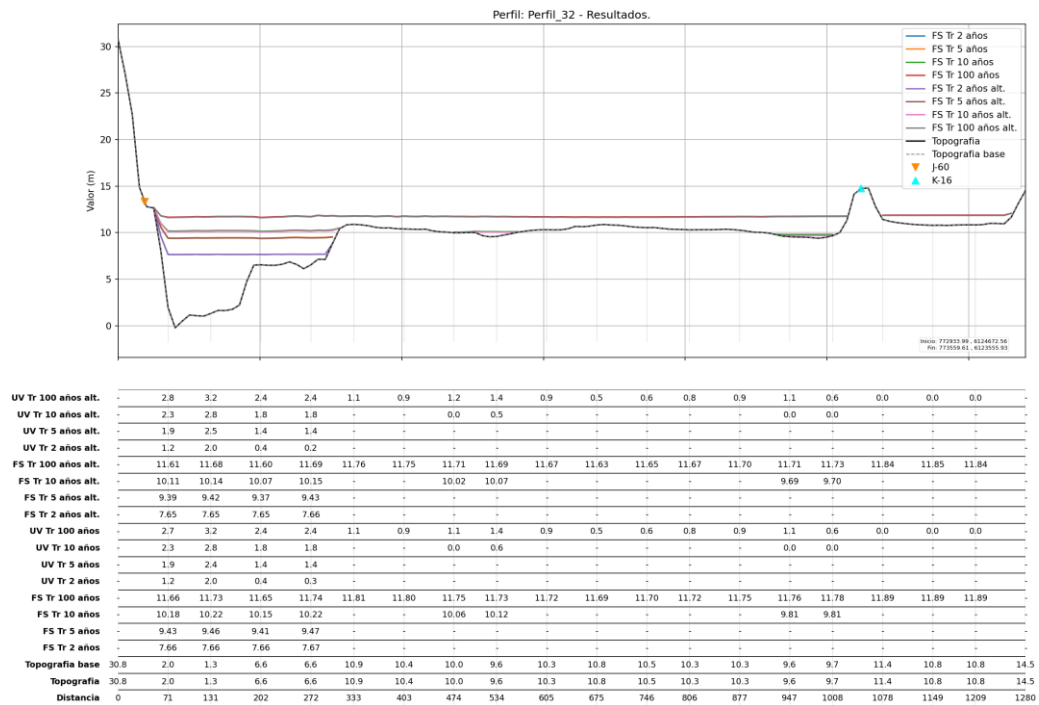


Figura 4-19: Perfil transversal en Pasarela los escalones de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.")
(fuente: Elaboración propia.)

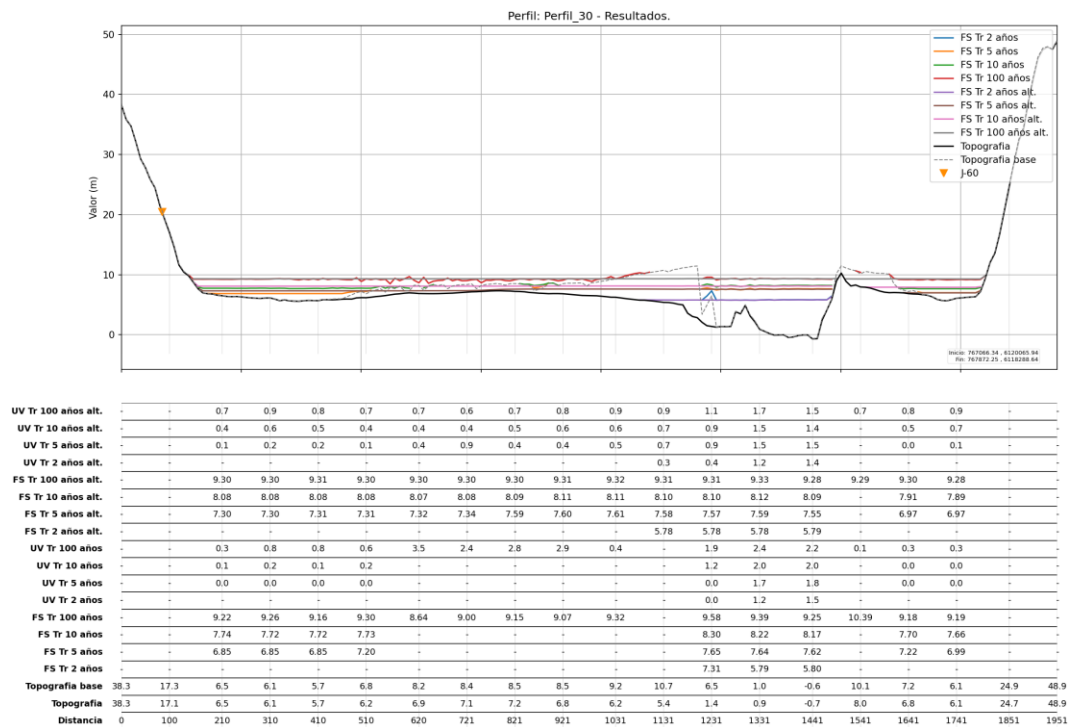


Figura 4-20: Perfil transversal en Puente Lautaro de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.")
(fuente: Elaboración propia.)

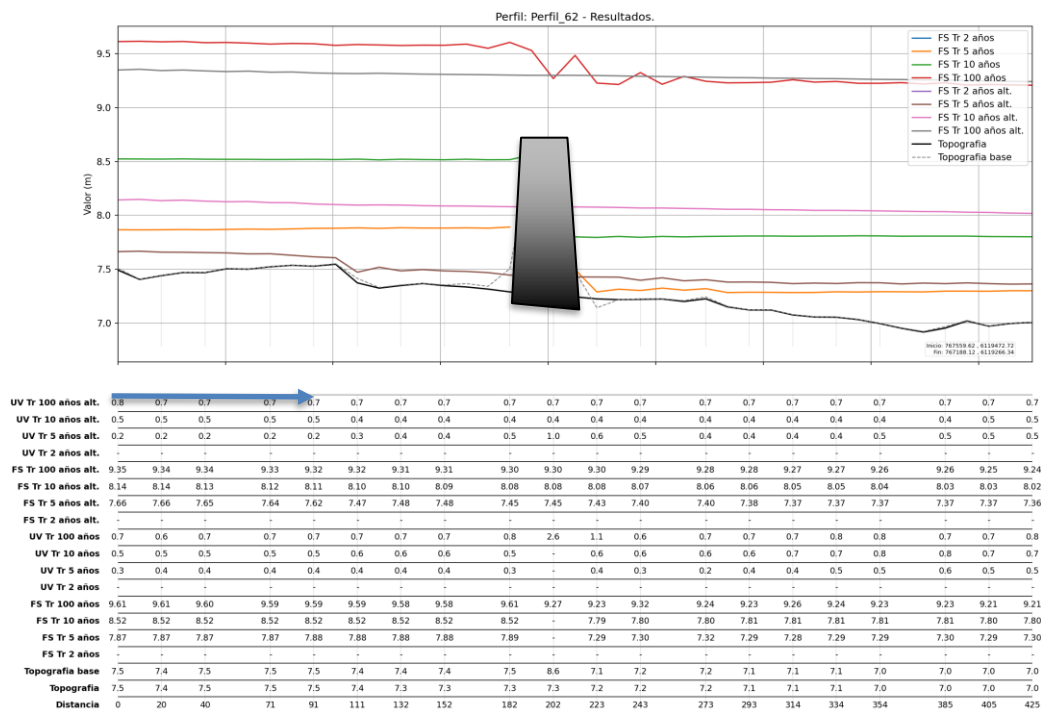


Figura 4-21: Perfil longitudinal en terraplén del Puente Lautaro de resultados con y sin terraplén (resultados sin terraplén se indica con "alt.")
(fuente: Elaboración propia.)

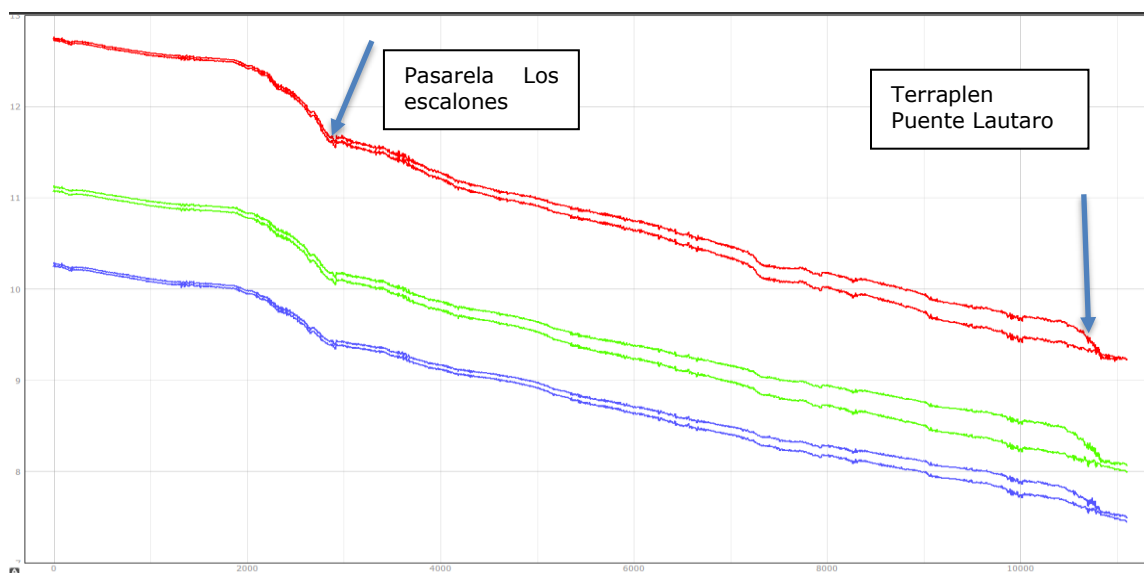


Figura 4-22: Perfil longitudinal con cota de agua, desde Licantén a Puente Lautaro, resultados con y sin terraplén (Rojo: 100 años; Verde: 10 años; Azul: 5 años).
(fuente: Elaboración propia.)

En la Tabla 4-1 se muestra el total de edificaciones afectadas con el retiro los terraplenes de acceso a los puentes Lautaro y Mataquito. En general disminuye el conteo de edificaciones afectadas.

Tabla 4-1: Edificaciones afectadas (diferencia entre con y sin terraplén)

Localidades / Periodo retorno	Sin terraplen				Diferencia con esenario base			
	2 años	5 años	10 años	100 años	2 años	5 años	10 años	100 años
CALPÚN	0	56	147	230	0	-15	-26	-4
DEPÚN	1	5	7	8	-1	-1	0	0
DOCAMÁVIDA	0	1	4	26	0	0	0	0
HUAPI	0	3	7	15	0	0	0	-1
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2	2	2	2	0	0	0	0
INDETERMINADA D2 LICANTEN	2	5	7	17	0	0	0	0
INDETERMINADA D3 LICANTEN	1	1	3	5	-1	-1	0	0
INDETERMINADA D4 CUREPTO	0	2	5	11	-4	-5	-5	-5
LA LEONERA	0	0	0	2	0	0	0	0
LA ORILLA	0	6	14	49	0	0	1	0
LORA	0	11	39	157	0	-5	-12	-16
LICANTEN URBANO	3	111	501	924	0	-8	-14	4
MONTE GRANDE	0	1	1	2	0	0	0	0
NAICURA	0	0	0	1	0	0	0	0
PARAGUAY	0	3	19	68	0	-2	-1	-1
QUELMÉN	8	38	52	64	0	-4	-3	-1
TOTAL	17	245	808	1581	-6	-41	-60	-24

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4-2: Porcentaje de áreas afectada por localidad.

Localidades / Periodo retorno	Sin terraplén (%)				Diferencia con escenario base (%)				Área total de la localidad KM²
	2 años	5 años	10 años	100 años	2 años	5 años	10 años	100 años	
CALPÚN	12.6	27.0	33.5	38.9	0.0	-2.5	-1.9	-0.2	8.5
CHANQUIUQUE	3.1	3.1	3.1	3.2	0.0	0.0	0.0	-0.1	14.3
DEPÚN	8.9	9.7	11.0	17.1	-1.9	-1.8	-1.7	-0.3	21.7
DOCAMÁVIDA	9.6	12.2	12.8	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	28.6
HUAPI	4.7	19.6	23.6	24.8	0.0	0.2	0.0	0.0	14.6
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2.6	2.6	2.7	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
INDETERMINADA D2 LICANTEN	0.6	1.0	1.1	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	26.8
INDETERMINADA D3 LICANTEN	1.3	1.4	2.0	3.0	-0.3	-0.2	-0.2	0.0	43.4
INDETERMINADA D4 CUREPTO	3.9	5.9	9.3	11.6	-0.7	-0.8	-0.9	-0.8	25.4
LA LEONERA	14.3	28.4	29.8	30.7	-0.2	0.0	0.0	0.0	12.8
LA ORILLA	12.7	15.8	16.3	16.8	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3
LICANTÉN	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2
LORA	9.1	29.2	32.7	34.2	-0.2	-0.5	-0.2	-0.1	16.1
Licantén Urbano	7.5	18.1	28.4	42.1	0.0	-0.1	-0.4	0.0	3.4
MONTE GRANDE	6.6	16.7	20.4	22.4	0.0	-0.1	0.2	0.0	8.3
NAICURA	3.7	19.9	35.0	54.4	-0.1	-1.1	-0.7	3.3	9.1
PARAGUAY	13.4	24.0	31.7	40.1	-0.1	-0.9	-0.4	-0.1	9.8
QUELMÉN	4.9	12.6	19.8	26.6	0.0	-0.2	-1.0	-0.1	9.9
TOTAL	119.3	247.2	313.4	385.1	-3.8	-8.2	-7.3	1.6	

(Fuente: Elaboración propia)

4.1.5 EMBANQUES E ISLAS

Para determinar la influencia de la presencia de embanque e islas a lo largo de la zona de estudio se analizaron dos casos, el primero corresponde a la generación de una sección uniforme a lo largo de 21 km del río, es caso permite cuantificar su magnitud en cuanto a volumen de movimiento de tierra para su implementación y la variación de la cota de escurrimiento para una crecida de 100 años. El segundo caso analizado es mejoramiento de la sección en la curva inmediatamente aguas debajo de Licantén Urbano.

El análisis se hace desde el punto de vista hidráulico ya que el comportamiento sedimentológico en el tiempo de una obra de esta magnitud debido al transporte de sedimentos queda fuera del alcance del estudio.

4.1.5.1 Canal pendiente única

La generación de un canal de 200 metro de ancho en la base (ancho promedio en con caudal medio), pendientes laterales 25% (4:1) y pendiente longitudinal única del 0.02%. La pendiente longitudinal está dada por la longitud de la obra y las cotas de entrada y salidas de terreno. La obra se extiende por aproximadamente 21km.

Del resultado de este caso se logra para 100 años disminuir 0.92m lo que se traducen en una disminución de 5.88% del área de inundación en Licantén Urbano, 0.70m en el sector de Quelmén, 0.25 en el sector de Lora aguas debajo del Puente Lautaro.

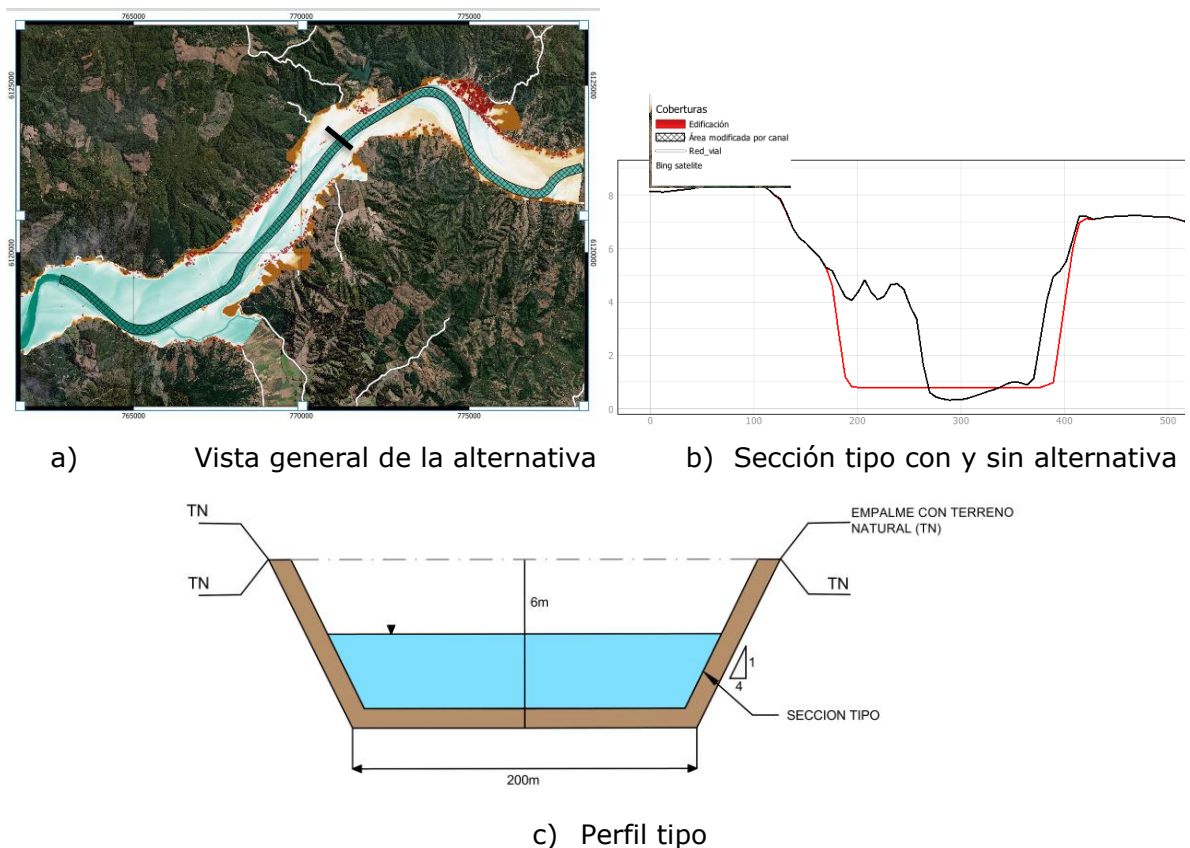


Figura 4-23: Planta general, con la implementación del canal.
(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4-3: Porcentaje de áreas afectadas con canal pendiente única implementado.

Localidades / Periodo retorno	CANAL PENDIENTE UNICA (%)				Diferencia con escenario base (%)				Área total de la localidad KM²
	2 años	5 años	10 años	100 años	2 años	5 años	10 años	100 años	
CALPÚN	11.7	19.9	30.0	38.2	-1.0	-9.6	-5.4	-1.01	8.5
CHANQUIUQUE	3.1	3.1	3.1	3.2	0.0	0.0	0.0	-0.06	14.3
DEPÚN	8.9	9.7	10.9	17.1	-1.9	-1.8	-1.8	-0.25	21.7
DOCAMÁVIDA	5.2	11.9	12.6	13.4	-4.4	-0.3	-0.2	-0.05	28.6
HUAPI	5.1	17.2	22.7	24.8	0.4	-2.3	-0.9	-0.04	14.6
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2.5	2.6	2.7	2.8	-0.1	-0.1	0.0	-0.04	1.0
INDETERMINADA D2 LICANTEN	0.5	0.9	1.1	2.2	-0.1	-0.1	0.0	-0.09	26.8
INDETERMINADA D3 LICANTEN	1.2	1.4	2.0	3.0	-0.3	-0.2	-0.2	0.00	43.4
INDETERMINADA D4 CUREPTO	3.9	5.8	8.9	11.7	-0.6	-0.9	-1.3	-0.77	25.4
LA LEONERA	6.4	16.4	26.6	30.5	-8.1	-12.0	-3.2	-0.20	12.8
LA ORILLA	11.6	15.0	16.1	16.7	-1.1	-0.8	-0.2	-0.09	15.3
LICANTÉN	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	-0.16	8.2
LORA	6.7	16.3	31.0	34.0	-2.6	-13.3	-2.0	-0.31	16.1
LICANTÉN URBANO	1.9	9.7	15.3	36.2	-5.6	-8.5	-13.5	-5.88	3.4
MONTE GRANDE	6.0	13.1	17.9	22.3	-0.7	-3.7	-2.3	-0.10	8.3
NAICURA	3.7	20.1	35.0	51.3	-0.1	-0.9	-0.7	0.14	9.1
PARAGUAY	11.3	18.8	24.5	37.7	-2.1	-6.1	-7.7	-2.49	9.8
QUELMÉN	3.8	9.8	12.7	25.2	-1.1	-3.0	-8.1	-1.51	9.9
TOTAL	93.7	191.8	273.1	370.5	-29.4	-63.5	-47.6	-12.89	

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4-4: Edificaciones afectadas con implementacion de canal pendiente única

Localidades / Periodo retorno	CANAL PENDIENTE UNICA				Diferencia con escenario base			
	2 años	5 años	10 años	100 años	2 años	5 años	10 años	100 años
CALPÚN	0	13	89	221	0	-58	-84	-13
DEPÚN	2	5	7	8	0	-1	0	0
DOCAMÁVIDA	13	13	14	21	13	12	10	-5
HUAPI	0	3	7	16	0	0	0	0
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2	2	2	2	0	0	0	0
INDETERMINADA D2 LICANTEN	2	4	5	12	0	-1	-2	-5
INDETERMINADA D3 LICANTEN	1	1	3	5	-1	-1	0	0
INDETERMINADA D4 CUREPTO	2	3	6	13	-2	-4	-4	-3
LA LEONERA	1	1	1	2	1	1	1	0
LA ORILLA	0	4	10	46	0	-2	-3	-3
LORA	0	2	22	136	0	-14	-29	-37
LICANTEN URBANO	0	11	57	717	-3	-108	-458	-203
MONTE GRANDE	0	1	1	2	0	0	0	0
NAICURA	0	0	0	1	0	0	0	0
PARAGUAY	16	16	20	66	16	11	0	-3
QUELMÉN	0	12	41	63	-8	-30	-14	-2
TOTAL	39	91	285	1331	16	-195	-583	-274

(Fuente: Elaboración propia)

4.1.5.2 Mejoramiento de curva en Licantén

Aquí se modifica el cauce desde el Km5+200 al Km8+000, esta modificación consta en la generación de una pendiente única del 0.07% (diferencia de ~1.9m entre cotas de entrada y salida) con una longitud de ~2.7km en el canal principal, ancho variable con ~110m al inicio y fin y 200metros en la zona de la curva, el radio externo de la curva es de ~800m y se mantuvo la pendiente promedio de las riberas para un talud uniforme, en el sector interno de la curva se rebajó el terreno tomando en cuenta la morfología existente, lo anterior, el fin de generar una sección más definida para caudales mayores al caudal medio,

en la Figura 4-24 se muestran plantas y perfiles con la información de la modificación de terreno.

Con implementación de este caso se observa una disminución de la cota de inundación de aproximadamente 34, 38, 38 cm para los casos de 100,10 y 5 años de periodo de retorno específicamente en la zona frente a Licantén Urbano. Estas diferencias disminuyen hasta llegar al sector de la Pasarela Los Escalones, de ese punto hacia aguas abajo no existen diferencias, por lo que el efecto de esta opción es local.

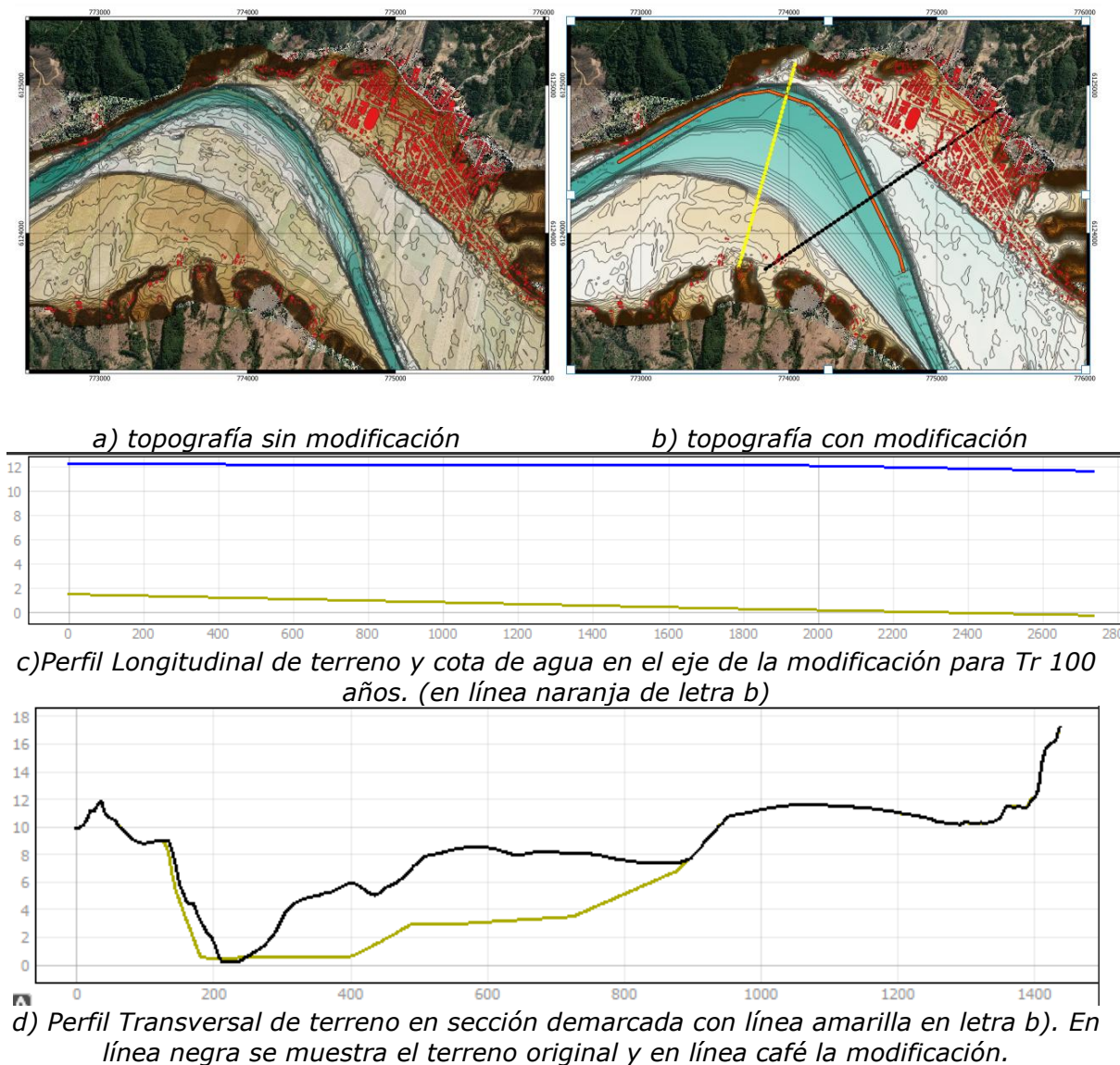


Figura 4-24: Modificación de terreno para Caso 2

(Fuente: Elaboración propia)

4.1.5.3 Cambio climático

El aumento de la magnitud de los caudales en eventos extremos de 629 y 524 m³/s para 100 y 50 años respectivamente, tienen por consecuencia un aumento en las cotas de inundación de en promedio ~0.26 y 0.25m. En la Tabla 4-5, se muestran las diferencias de alturas en 5 secciones a lo largo de la zona de estudio.

Tabla 4-5: Aumento de cotas de inundación en metros

Lugar	100 años	50 años
Licantén	0.27	0.25
Pasarela Los escalones	0.28	0.27
Puente Lautaro	0.26	0.23
Puente Mataquito	0.24	0.24
Desembocadura	0.23	0.21

(Fuente: Elaboración propia)

En relación con las edificaciones afectadas, Licantén urbano y Lora son las localidades que presentan un mayor aumento en las unidades afectadas (ver Tabla 4-6).

Tabla 4-6: Edificaciones afectadas y por crecidas considerando cambio climático.

LOCALIDAD	CC 50 100 años		Diferencia	
	50 años	100 años	50 años	100 años
CALPÚN	231	234	7	0
DEPÚN	8	8	1	0
DOCAMÁVIDA	24	29	2	3
HUAPI	14	18	1	2
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2	2	0	0
INDETERMINADA D2 LICANTEN	17	17	2	0
INDETERMINADA D3 LICANTEN	5	8	0	3
INDETERMINADA D4 CUREPTO	11	11	-5	-5
LA LEONERA	2	2	0	0
LA ORILLA	47	56	3	7
LORA	161	186	17	13
Licantén Urbano	902	977	39	57
MONTE GRANDE	2	2	0	0
NAICURA	1	3	0	2
PARAGUAY	63	75	8	6
QUELMÉN	64	66	0	1
Total	1554	1694	75	89

(Fuente: Elaboración propia)

4.2 DIAGNOSTICO DE AMENAZAS

De acuerdo con las áreas de inundación determinadas para los distintos periodos de retorno estudiados, el cruce con la información del Precenso 2023 acerca de distribución de localidades, publicado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), información sobre propiedades rurales generada por CIREN e información generada para el presente estudio en las etapas anteriores, se determina el numero edificaciones, propiedades e infraestructura esencial afectadas por inundaciones de distinta magnitud.

Para determinar el número de edificaciones, infraestructura esencial o propiedades rurales afectadas por las crecidas, se realiza un conteo basado en un criterio de superposición. Una unidad se considera afectada si el área de inundación, definida según su periodo de retorno, la alcanza de forma total o parcial.

En la Figura 4-25, se muestra la distribución espacial de las localidades en la zona de estudio.

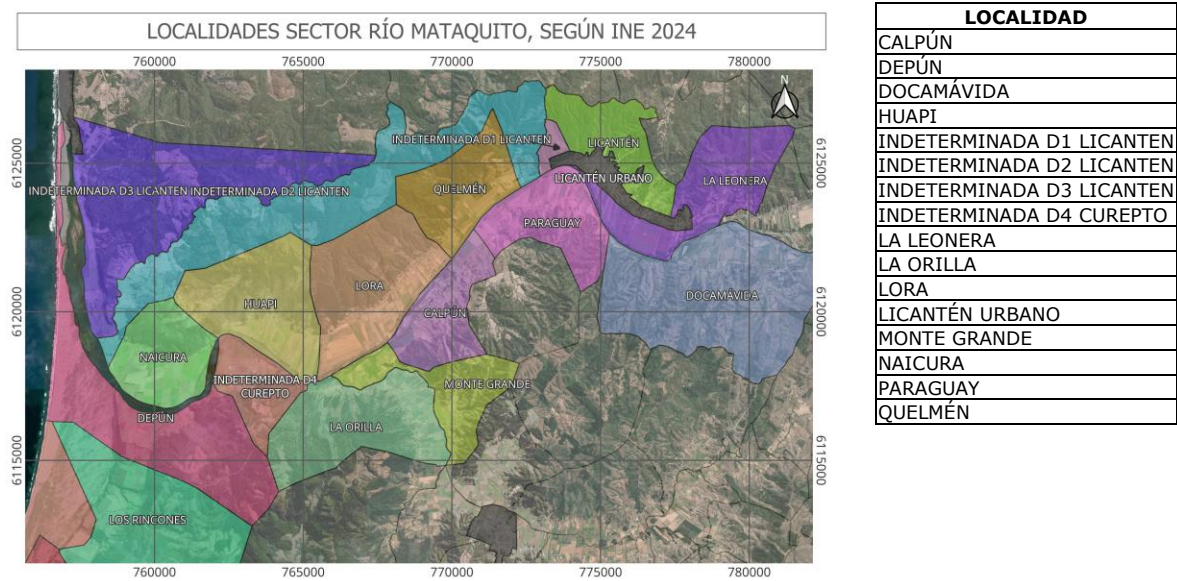


Figura 4-25: Localidades en sector de estudio.
(fuente: Elaboración propia, información INE 2023)

4.2.1 INFRAESTRUCTURA FLUVIAL

Dentro de la zona de estudio existen 3 obras dentro del cauce del río Mataquito, estas son Pasarela Los escalones, Puente Lautaro y Puente Mataquito. En la zona costera existe un tramo enrocado de protección de ribera en la zona de La Pesca.

4.2.1.1 Pasarela Los escalones

Puente colgante “Pasarela los escalones” es una superestructura de acero (tablero y cables) e infraestructura de hormigón armado con un largo total de ~228m, constituidas por dos cepas instaladas en las riberas río con una separación ~167.7m, a superestructura e infraestructura se presentan en buen estado. Además, cuenta con un tramo de 15m para la llegada a la pila norte y otro tramo de 51.3m para la llegada a la pila sur.

La superestructura de acero se apoya en las pilas en la cota 12.6m y la cota inferior de la pasarela es de 14.8m, en su punto más alto.

De la revisión de imágenes satelitales (Figura 4-27), se observa en el sector la aparición y migración de barras de arena en el fondo del río, esta zona es propensa a erosión, por lo que para crecidas estas barras migran manteniéndose márgenes (ancho de la sección) estables en el tiempo.

En relación con las crecidas para un caudal de periodo de retorno de 100 años, se alcanza una cota de inundación bajo la pasarela de 11.72m, lo que deja 0.88m de revancha en la cepa y 3.07m en la parte más alta de la pasarela. En la Figura 4-28 se muestra el perfil con los valores de velocidad y cota de agua de la sección en el sector de la Pasarela.



Figura 4-26 : Fotografías de Pasarela Los escalones.
 (fuente: Elaboración propia.)



a) 8/3/2023



b) 2/6/2022



c) 1/26/2021



d) 3/14/2013



e) 1/14/2014



f) 3/14/2013

Figura 4-27: Imágenes satelitales en la zona de Pasarela los escalones.
 (Fuente:googleearth)

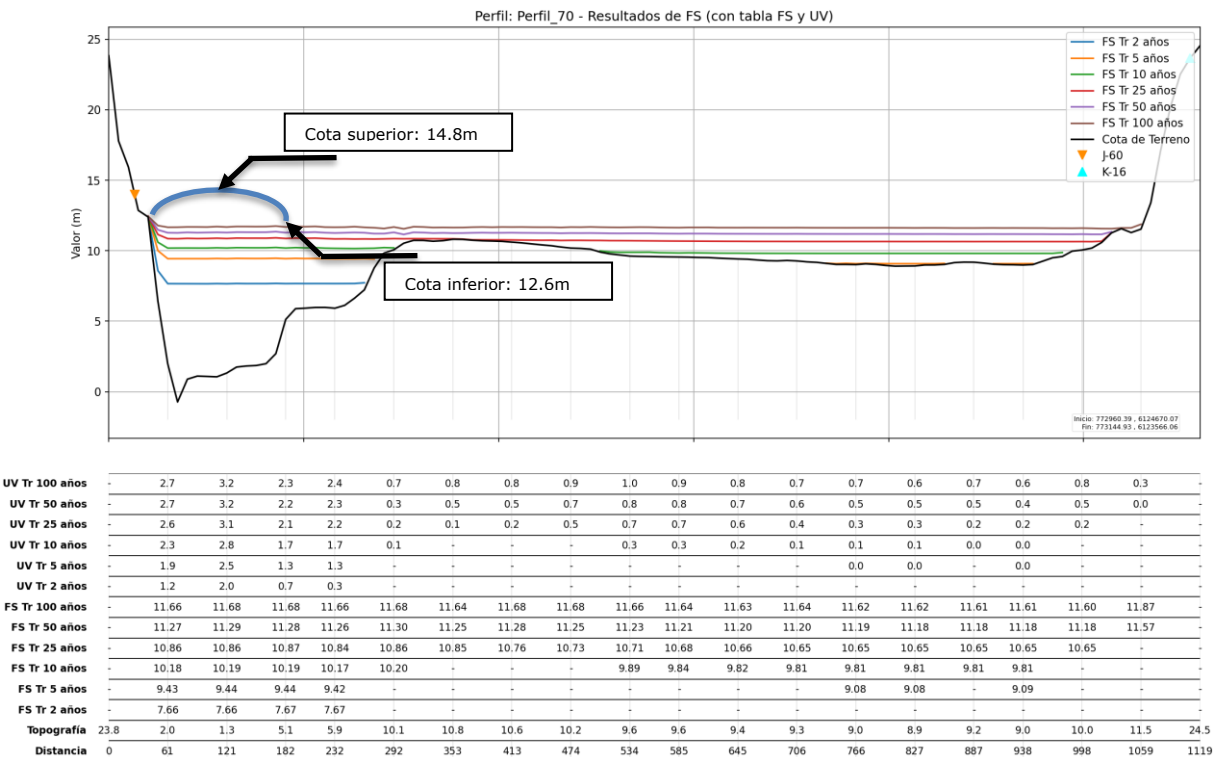


Figura 4-28: Perfil 9 Km8+454.
(fuente: Elaboración propia.)

4.2.1.2 Puente Lautaro

El puente Lautaro que conecta las rutas J-60 por el costado norte y K-60 por el costado Sur, es un Puente de hormigón armado con 7 cepas de 1 pilar, separadas cada 35m y 2 estribos, uno en cada extremo. El puente tiene una longitud de 280m y un ancho de 7.5m. La losa del puente cota superior de 11.56m, esta sobre 3 vigas de hormigón con cota inferior de 9.1m.

La superestructura e infraestructura se presentan en buen estado, no obstante, existe gran cantidad de material vegetal trasportadas por el río en crecidas las que generan obstrucciones al flujo normal del río, ver Figura 4-29.

De la revisión de imágenes satelitales (Figura 4-30), se observa un margen definido, con presencia de islas, que ante la ausencia de crecidas importantes permiten el crecimiento de vegetación. Para caudales asociados a crecidas de 5 años de periodo de retorno, aguas bajo del puente es más propensa a la erosión que la zona aguas arriba, lo que conculda con la serie de fotografías presentadas.

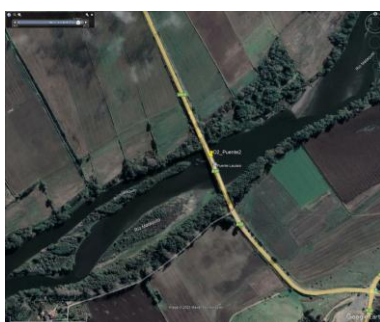
En relación con las crecidas para un caudal de periodo de retorno de 100 años, se alcanza una cota de inundación bajo la pasarela de 9.58m, 0.48m por sobre la cota mínima del puente. En la Figura 4-31, se muestra el perfil con los valores de velocidad y cota de agua de la sección en el sector del puente Lautaro.



Figura 4-29 : Fotografías del estado del puente Lautaro, abril 2024.
 (fuente: Elaboración propia.)



a) 10/30/2023



b) 5/25/2021



c) 10/08/2016



d) 12/7/2014



e) 7/24/2012



f) 2/27/2006

Figura 4-30: Imágenes satelitales en la zona de Puente Lautaro.
 (Fuente:googleearth)

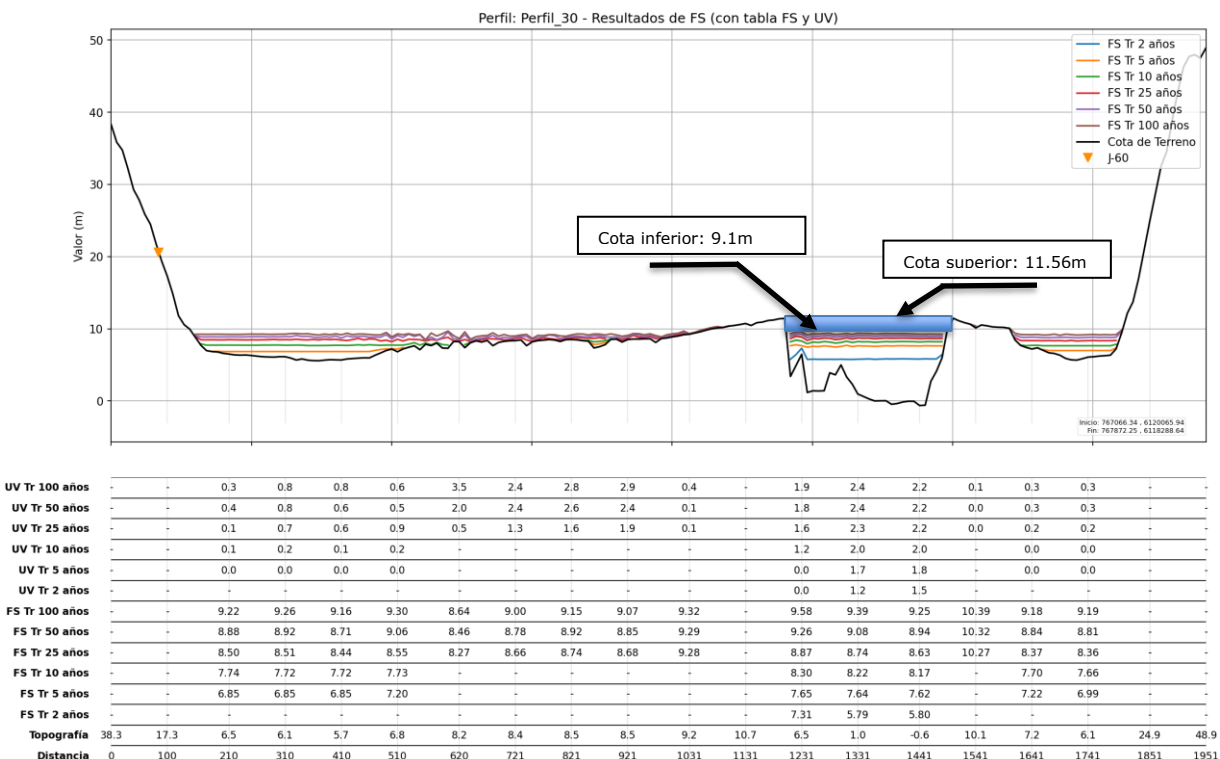




Figura 4-32: Fotografías del estado del puente Mataquito, abril 2024.
 (fuente: Elaboración propia.)

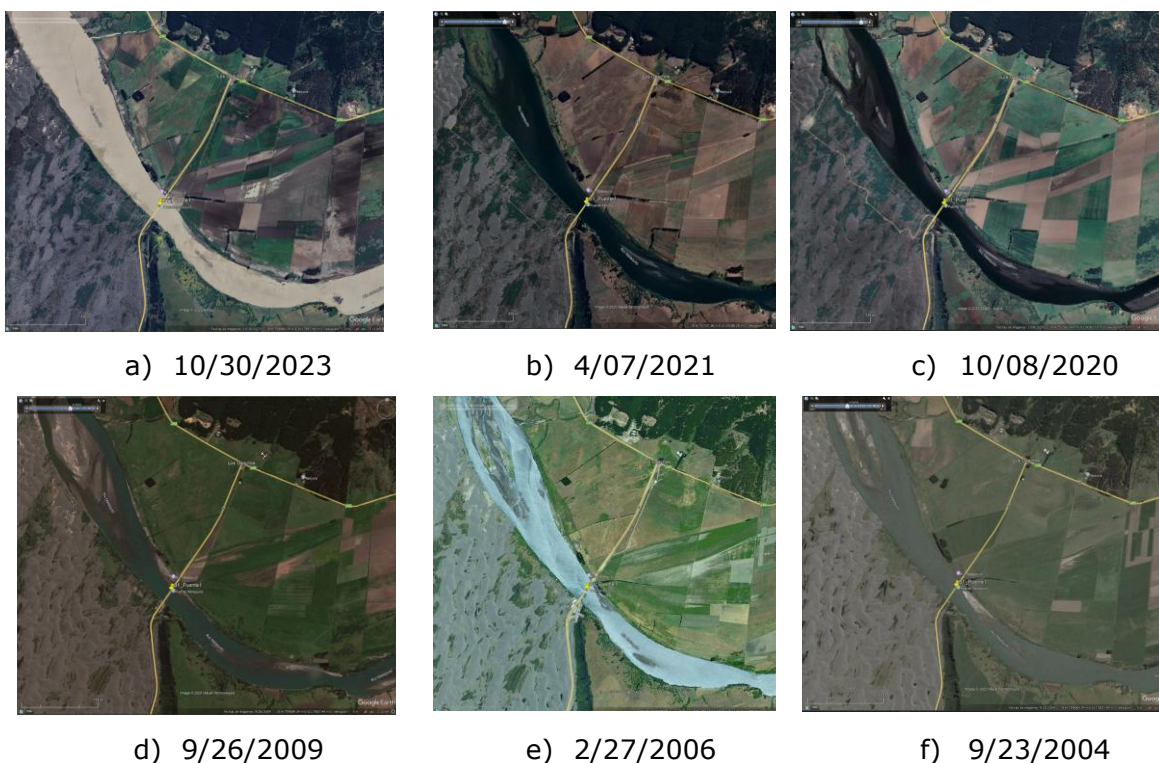


Figura 4-33: Imágenes satelitales en la zona de Puente Mataquito.
 (Fuente:googleearth)

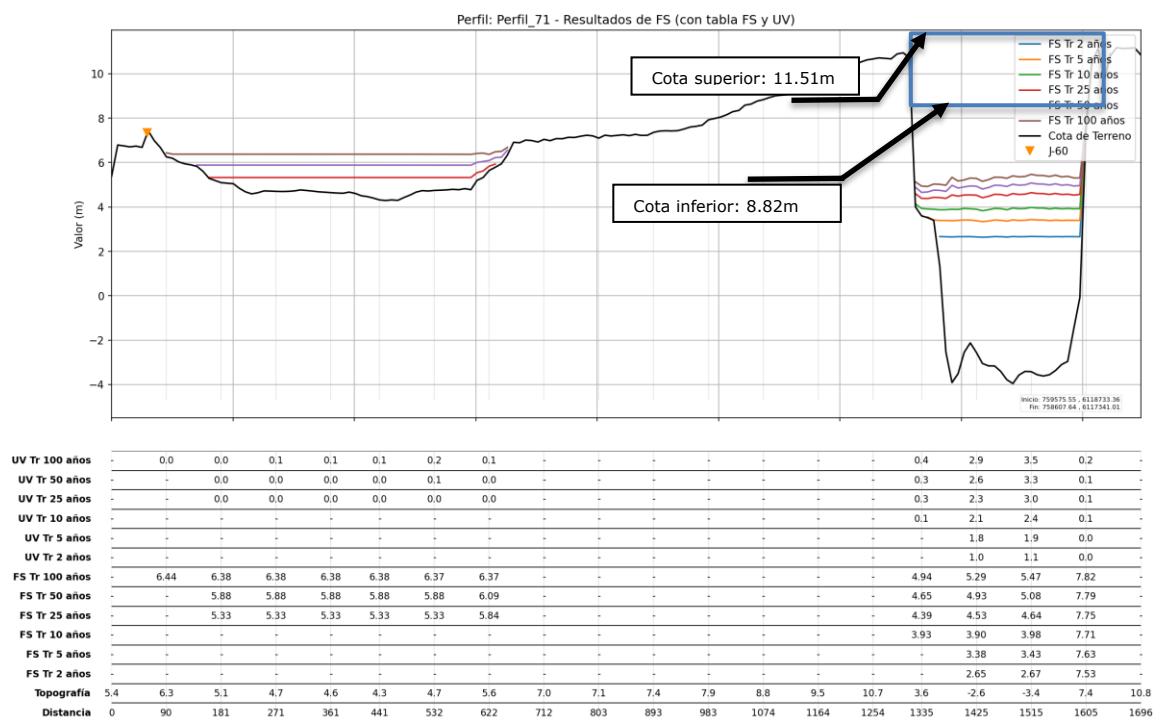


Figura 4-34: Perfil 28 Km28+656.
(fuente: Elaboración propia.)

4.2.1.4 Enrocado La Pesca

Esta obra corresponde a un enrocado de protección con cota superior a los 3 m.s.n.m. A lo largo del desarrollo del enrocado, existen sectores deteriorados y con presencia de vegetación por sobre él.

Debido a la imposibilidad de identificar la fecha exacta de ejecución del enrocado mediante la revisión de antecedentes, se procedió al análisis de imágenes satelitales. Dicha revisión reveló la existencia de sectores protegidos ya en el año 2004.

Las imágenes satelitales permitieron observar la dinámica y el cambio morfológico del sector costero a lo largo del tiempo y la interacción con la obra. Se determinó que, en el período comprendido entre 2004 y 2010, la obra de enrocado alcanzó una longitud aproximada de 760 metros.

El evento del 27 de febrero (27F) provocó la desaparición de la playa ubicada frente al sector La Pesca, quedando la descarga del río aproximadamente 3 kilómetros al sur de la obra de enrocado. Desde el año 2011 y hasta el 2021, la costa de la playa experimentó un proceso de recuperación morfológica, evidenciado por un aumento de la cota de playa. De este proceso resultó en que, en ciertos tramos, la arena sobrepasó la cota de coronamiento de la estructura de enrocado. Esta elevación del terreno facilitó el crecimiento de vegetación sobre la propia obra de protección (imagen c de la figura).

La determinación del eje de la obra se dificulta por la vegetación existente rellenos productos del aumento del nivel de la playa o efectuados artificialmente, que en ocasiones pudiesen estar por pobre el enrocado, en la imagen b) de la

Figura 4-36 se indica con una flecha un sector donde se realizó un relleno por sobre parte del enrocado.

En relación con las crecidas para un caudal de periodo de retorno de 100 años, donde se espera que la descarga este más al sur del enrocado, se alcanza una cota de inundación máxima frente al enrocado de 2.5m, 0.5m por debajo la cota del enrocado. En la Figura 4-38 se muestra el perfil con los valores de velocidad y cota de agua de la sección en el sector frente al enrocado.



Figura 4-35: Fotografías del enrocado en sector La Pesca, abril 2024.

(fuente: Elaboración propia.)

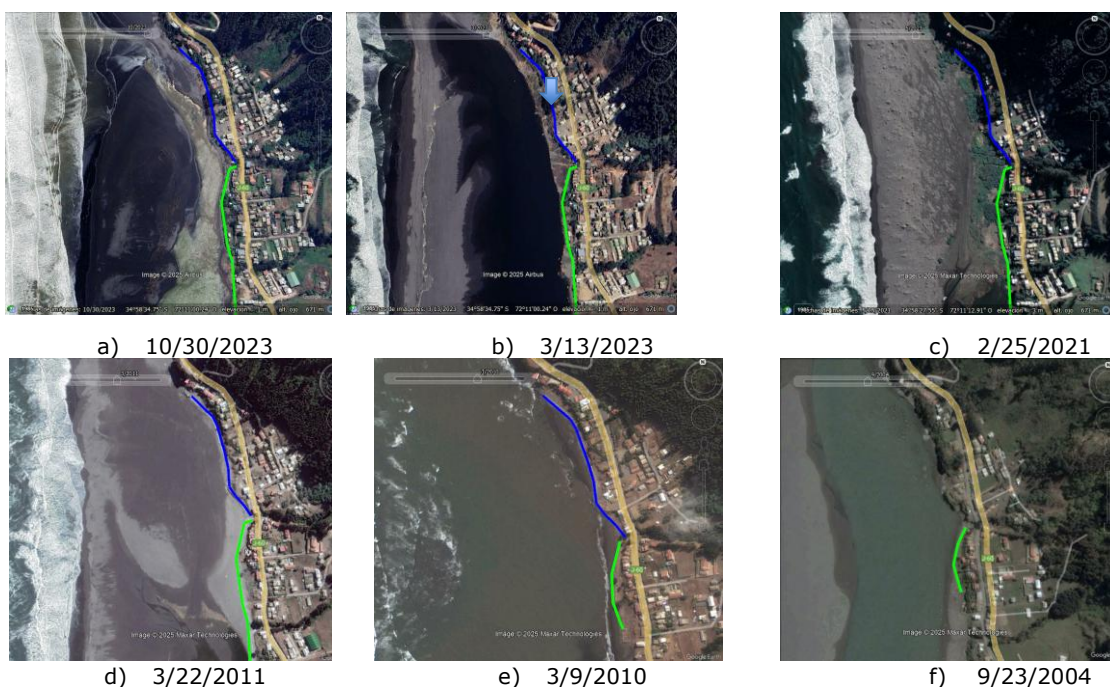


Figura 4-36: Imágenes satelitales en la zona La pesca

(Fuente:googleearth)

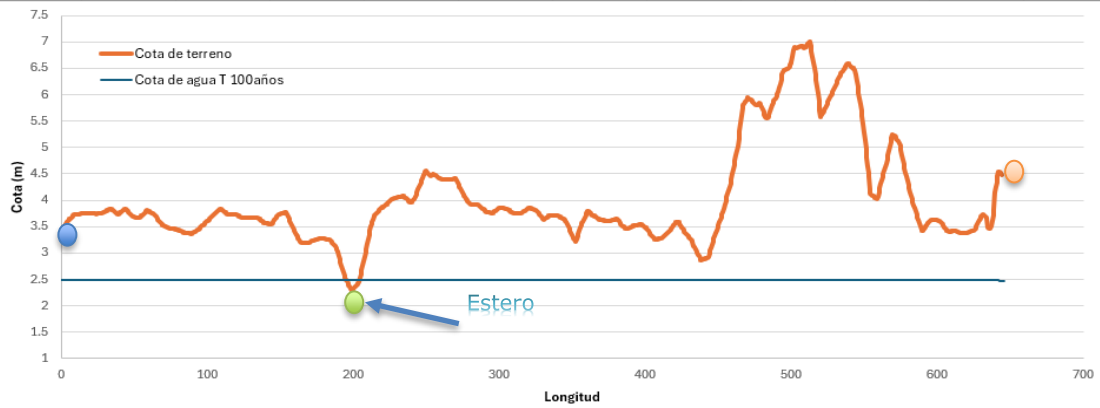


Figura 4-37: Perfil a lo largo del enrocado.
(fuente: Elaboración propia.)

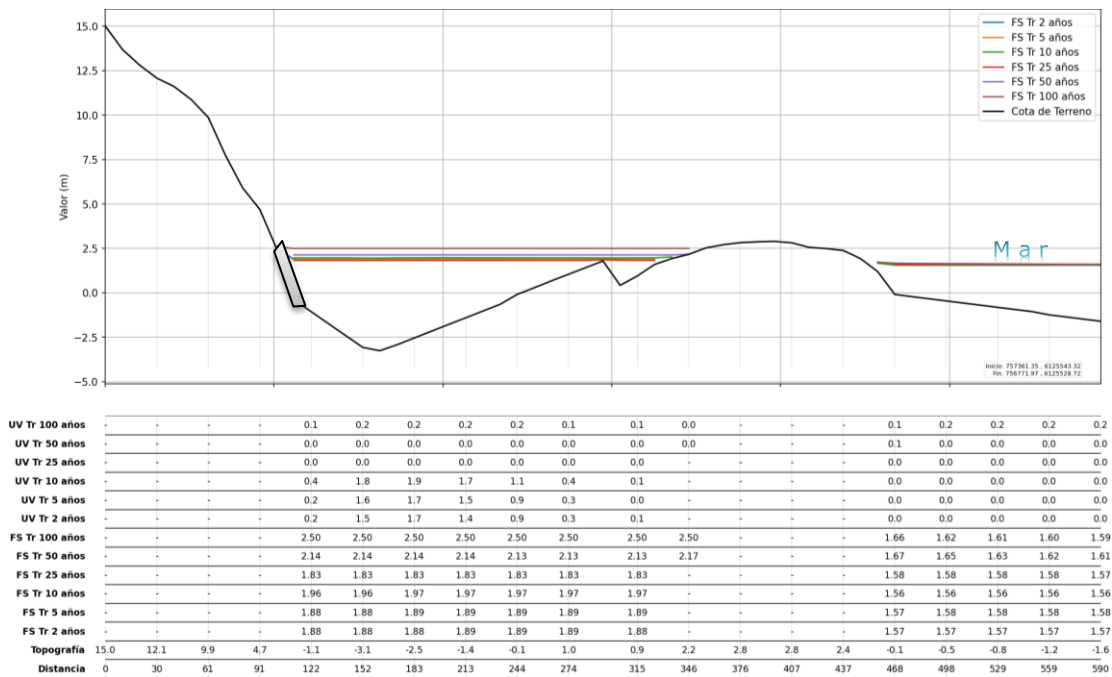


Figura 4-38: Perfil 41 Km38+157
(fuente: Elaboración propia.)

4.2.2 EDIFICACIONES

En el caso de las crecidas hidrológicas, se realiza un conteo general de las edificaciones afectadas según el periodo de retorno, disgregando el conteo por localidad. No se cuenta con información acerca del uso de las edificaciones (viviendas, galpones, etc., que no constituyen infraestructura esencial), por lo que no es posible asociarlas a en otros sub ítems. Del total de edificaciones afectadas para crecidas con periodo de retorno asociado a 100 años (1605 unidades), el 57% se encuentra en Licantén Urbano, un 15% en Calpún, un ~11% en Lora, un ~4% en Paraguay y Quelmén, las demás localidades representen un 8% de las edificaciones afectadas.

Tabla 4-7: Conteo de edificaciones afectadas por localidad y asociadas a crecidas hidrológicas.

(Se contabiliza si la edificación es alcanza de forma total o parcial)

Localidades / Periodo retorno	ESCENARIO BASE					
	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
CALPÚN	0	71	173	211	224	234
DEPÚN	2	6	7	7	7	8
DOCAMÁVIDA	0	1	4	11	22	26
HUAPI	0	3	7	9	13	16
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2	2	2	2	2	2
INDETERMINADA D2 LICANTEN	2	5	7	9	15	17
INDETERMINADA D3 LICANTEN	2	2	3	3	5	5
INDETERMINADA D4 CUREPTO	4	7	10	14	16	16
LA LEONERA	0	0	0	2	2	2
LA ORILLA	0	6	13	35	44	49
LORA	0	16	51	103	144	173
Licantén Urbano	3	119	515	748	863	920
MONTE GRANDE	0	1	1	1	2	2
NAICURA	0	0	0	0	1	1
PARAGUAY	0	5	20	51	55	69
QUELMÉN	8	42	55	62	64	65
TOTAL	23	286	868	1268	1479	1605

(Fuente: Elaboración propia)

4.2.3 INFRAESTRUCTURA ESENCIAL

La cuantificación de la infraestructura esencial afectada se realiza de forma detallada, considerando las áreas de inundación asociadas a los periodos de retorno hidrológicos. Como infraestructura esencial se consideran las edificaciones que son vitales para el funcionamiento de servicios básicos, tales como centros de salud, educación, bomberos, comisarías, transporte, sanitarios, energía y edificios estales. En este conteo se excluyen los puentes, ya que se encuentran dentro del cauce. En la Tabla 4-8, se marca con una X si la infraestructura esencial es afectada por la inundación asociada a cada periodo de retorno en estudio, se detalla el nombre, tipo, localidad. Para crecidas de 100 años, el 57% (19 de 33 de la infraestructura identificada es afectada, encontrándose esta en su mayoría en Licantén).

Tabla 4-8 : Infraestructura Esencial.

NOMBRE	TIPO	LOCALIDAD	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
Escuela Juan Jesús Gonzales Avendaño	Educacional	Calpún			X	X	X	X
Posta de Salud Rural Calpún	Salud							
Escuela La Orilla	Educacional	La Orilla				X	X	X
Sede social La Orilla	JJVV							
Servicio Sanitario Rural La Orilla	SSR					X	X	X
Escuela La Trinchera	Educacional	La Trinchera						
Posta de Salud Rural Las Lomas	Salud	Las Lomas						
Bomberos de Licantén	Bomberos	Licantén					X	X
Segunda comisaría de Licantén	Comisaría				X	X	X	X
Conservador de Bienes raíces Licantén	Edificio Estatal				X	X	X	X
Registro Civil e Identificación	Edificio Estatal					X	X	X
Centro de Desarrollo Integral infantil	Edificio Estatal					X	X	X
Gimnasio Municipal	Edificio Estatal							
Municipalidad de Licantén	Edificio Estatal				X	X	X	X
Departamento del tránsito Licantén	Edificio Estatal				X	X	X	X
Biblioteca Pública	Edificio Estatal						X	X
Juzgado de policía Local	Edificio Estatal					X	X	X
Liceo Augusto Santelices Valenzuela	Educacional				X	X	X	X
Escuela Juan Ignacio Molina de Licantén	Educacional							
Jardín Infantil Pequeños Maestros	Educacional							X
Jardín Infantil Kumelen	Educacional							
Jardín Infantil Papelucho	Educacional							X
Jardín Infantil S.C. Capullito	Educacional				X	X	X	X
Jardín Infantil Cuncunita	Educacional							
Hospital de Licantén	Salud				X	X	X	X
Hospital modular de Licantén	Salud							
Ubicación hospital nuevo de Licantén	Salud							
Hospital de Licantén	Salud							
Servicio Sanitario Rural Lora	SSR	Lora			X	X	X	X
Escuela Alejandro Rojas Sierra	Educacional							
Posta de Salud Rural Lora	Salud							
Escuela José Luis Richards Gonzalez	Educacional	Paraguay						
Subestación Licantén	Energía	Quelmen				X	X	X

4.2.4 PROPIEDADES RURALES

La determinación de propiedades rurales afectadas se realiza en base a la información geoespacial vectorial, en escala 1:10.000 generada CIREN para el Servicio de Impuestos Internos (SII) en el año 2021, según se indica en la descripción del producto la información contenida es solo referencial, cuya exactitud es relativa a su escala. Si bien, en la plataforma del SII se puede visualizar información con más detalle, no se pudo acceder a ella de forma oficial. En la Tabla 4-9, se contabiliza como propiedad afectada si el área de inundación afecta de forma parcial o total a la propiedad.

Tabla 4-9: Conteo de predios afectados por localidad y asociadas a crecidas hidrológicas.

MEDIDAS ESTRUCTURALES	ESCENARIO BASE					
Localidades / Periodo retorno	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
CALPÚN	54	113	139	142	144	145
CHANQUIUQUE	2	2	2	2	2	2
DEPÚN	15	15	16	16	16	16
DOCAMÁVIDA	9	13	16	16	17	17
HUAPI	25	26	29	38	41	42
INDETERMINADA D1 LICANTEN	2	2	2	2	2	2
INDETERMINADA D2 LICANTEN	4	6	8	8	9	9
INDETERMINADA D3 LICANTEN	32	32	32	27	32	32
INDETERMINADA D4 CUREPTO	17	17	18	18	18	18
LA LEONERA	55	60	61	62	62	62
LA ORILLA	55	61	66	70	74	77
LICANTÉN	0	8	11	14	15	16
LORA	62	75	88	92	99	103
LOS RINCONES	2	2	2	2	2	2
LOS RÁBANOS	3	3	3	3	3	3
Licantén Urbano	13	28	35	48	51	53
MONTE GRANDE	33	36	36	36	38	38
NAICURA	7	7	7	7	7	10
PARAGUAY	34	37	42	46	49	53
QUELMÉN	40	64	80	81	81	81
Total	464	607	693	730	762	781

4.3 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los resultados del diagnóstico se concluye lo siguiente:

-Del diagnóstico de las estructuras fluviales se determinó que el puente Lautaro, es la estructura crítica dentro de la zona estudio, esto significa que para periodos de retorno de 100 años este sería alcanzado por al menos 0.17m, otra condición desfavorable detectada es la gran cantidad de material vegetal presente en el tiempo de la inspección técnica, la presencia de estos elementos impacta de forma negativa a las alturas de escurrimiento y esfuerzos soportados por la estructura. Pasarela Los escalones tendría 0.88m de revancha en la cepa y 3.68m en la parte más alta de la pasarela. El puente Mataquito tendría 3.42m de revancha.

-La protección de enrocado en La Pesca se encuentra parcialmente cubierta de arena, vegetación y rellenos antrópico, por lo que se desconoce si en los lugares donde el terreno tiene mayor cota que del enrocado, este existe. En relación con la cota estimada del enrocado, esta tendría una revancha de 0.5m para una crecida de 100 años.

-En el escenario base las localidades con más edificaciones afectadas por las inundaciones son Licantén urbano, Calpún, Paraguay, Quelmén y Lora. Del total de edificaciones afectadas para crecidas con periodo de retorno asociado a 100 años (1605 unidades), el 57% se encuentra en Licantén Urbano, un 15% en Calpún, un ~11% en Lora, un ~4% en Paraguay y Quelmén, las demás localidades representen un 8% de las edificaciones afectadas.

En relación con la infraestructura esencial, en Licantén de 21 unidades identificadas que 13 son afectadas, en Calpún 1 de 2 (Escuela Juan Jesús Gonzales Avendaño), en Quelmén 1 de 1 (Subestación de energía Licantén), en Lora 1 de 3 (Servicio Sanitario Rural Lora) y 2 de 3 en La Orilla (Servicio Sanitario Rural La Orilla y Escuela La Orilla).

-El aumento de la magnitud del caudal de eventos extremos, por efecto del cambio climático provocarían un aumento de las cotas de inundación de aproximadamente 0.25m. a lo largo

de la zona de estudio y hasta el puente Mataquito. Este efecto se puede incorporar en las obras de protección ribereña, sumando el valor a la revancha.

- La componente mareal no incide en el nivel de inundación del sector de Licantén Urbano. La onda de marea logra alcanzar la Pasarela Los Escalones, pero con amplitudes insignificantes (menores a 3 cm). La amplitud aumenta hasta 0.3 m en el sector de Puente Mataquito. Sin embargo, se prevé que, durante un evento de crecida significativo (ej. asociado a un periodo de retorno 2 años), la mayor forzante del caudal del río desplazará hacia aguas abajo la influencia mareal, haciendo que su efecto sea un factor secundario en la determinación de la inundación.

- La presencia de la barra litoral tiene un efecto local y variable en la cota de inundación, concentrando su impacto en la desembocadura del río. La barra no ejerce una influencia significativa en el sector de Licantén y Puente Lautaro, donde la diferencia en la cota de inundación es menor a 3 cm para una crecida de 25 años periodo de retorno. El efecto es más notorio cerca de la costa, aumentando gradualmente hasta alcanzar una diferencia de aproximadamente 30 cm en el sector del Puente Mataquito. Durante crecidas importantes (caudales mayores a uno de 2 años periodo de retorno), se espera que la barra sea sobrepasada y comience a erosionarse y abrirse. Por lo tanto, su impacto en las crecidas de diseño es temporal y limitado.

- Los terraplenes de acceso a los puentes Lautaro y Mataquito actúan como elementos de control hidráulico que generan una restricción localizada en el flujo. El estudio demuestra que la presencia del terraplén incrementa localmente la cota de inundación inmediatamente aguas arriba. Al retirar los terraplenes, se observa una disminución del nivel de escurrimiento de hasta 27 cm (para un caudal de 100 años periodo de retorno) inmediatamente aguas arriba. La influencia de la restricción del terraplén se disipa aguas arriba y es mínima (menor a 3 cm) en el sector de Licantén.

- Para el caso del mejoramiento geomorfológico, incluso en el escenario más favorable, la eliminación de islas y embanques no demostró una capacidad significativa para reducir las cotas de inundación y no es sostenible a corto plazo debido a la alta dinámica sedimentaria (implica mover 12 millones de m³ de material). Además de la baja efectividad hidráulica, esta intervención enfrenta un desafío de sostenibilidad operativa: la alta dinámica sedimentaria del cauce sugiere que el material dragado se recuperaría en el corto plazo, invalidando la inversión y el esfuerzo realizado.

Por lo anterior, la propuesta de obras tiene como objetivo principal mitigar el riesgo de inundación en los sectores con mayor concentración de edificaciones e infraestructura esencial, en particular Licantén urbano, Calpún, Paraguay, Quelmén y Lora.

Como conclusión general del diagnóstico hidráulico, es posible señalar que, dada la gran magnitud y energía de las inundaciones del río Mataquito, no se detectó la posibilidad real de influir significativamente en el comportamiento de las crecidas con medidas de tipo morfológico. Intervenciones como la apertura controlada de la barra costera o el retiro masivo de embanques e islas del cauce demostraron ser ineficaces hidráulicamente en la mayoría del tramo o insostenibles a corto plazo debido a la alta sedimentación.

Por lo tanto, la estrategia se concentra en las medidas estructurales como obras destinadas a la contención efectiva de los desbordes, siendo la más adecuada la construcción de pretils y defensas fluviales longitudinales. Esta solución permite proteger directamente las áreas pobladas, sin depender de la modificación integral de la dinámica del río.

5. PROPUESTAS DE MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES

Dado que el diagnóstico hidráulico descartó la posibilidad de influir significativamente en el comportamiento de las crecidas con medidas de tipo morfológico (Capítulo 4.3), este capítulo se enfoca en las medidas de contención efectiva para mitigar el riesgo en las zonas con mayor concentración de edificaciones e infraestructura esencial (Licantén urbano, Calpún, Paraguay, Quelmén y Lora)

- **Medidas Estructurales:** Se evalúan soluciones de contención para Licantén, Paraguay, Quelmén, Calpún y Lora. La tipología seleccionada es la construcción de terraplenes de tierra revestidos con manta de refuerzo vegetal (TRM) + Hidrosiembra (una Solución Basada en la Naturaleza - SbN) debido a las bajas velocidades de flujo proyectadas.
 - Se estima que el terraplén propuesto para Licantén Urbano tendría una longitud de aproximadamente 5 km, con una altura variable que podría llegar hasta los 7 metros.
 - Se descartan intervenciones masivas en el cauce (como un canal de pendiente única) por su alto volumen de movimiento de tierras (11.8 millones m³), alto costo y gran impacto ambiental.
- **Pertinencia Ambiental:** Se indica que las obras de protección (terraplenes) generalmente no requieren ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), lo que acelera su tramitación, mientras que las obras de modificación de cauce sí requerirían este proceso.
- **Medidas No Estructurales:** Se propone implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT), utilizando la hidrología y los umbrales meteorológicos definidos. También se elaboran Mapas de Amenaza de Inundación basados en los criterios DOH-MOP, AIDR y DEFRA para delimitar áreas de riesgo en la planificación territorial

5.1 MEDIDAS ESTRUCTURALES

Sobre la base del diagnóstico realizado en el capítulo anterior se evalúan medidas estructurales de contención enfocadas en la ciudad de Licantén y las localidades de Paraguay Quelmén, Calpún y Lora. Las soluciones se desarrollaron a nivel de perfil.

Del diagnóstico, es posible concluir que la tipología de obras pasa básicamente por construir estructuras tipo muros, diques o terraplenes, con el fin de proteger infraestructura esencial y sectores poblados

Se selecciona la opción “Manta de refuerzo vegetal (TRM) + Hidrosiembra”, por ser apropiadas para flujos en canales con velocidades de 2-3m/s (las velocidades en promedio a la que estará sometido el talud son del orden de 1 m/s). Para dar protección al sector poblado, la obra deberá ser impermeables, esto se lograría generando un núcleo de material fino y/o instalando un tablestacado hasta la cota de coronamiento de la obra. No se cuenta con información acerca del nivel freático del cauce, por lo que el proyecto futuro se debe verificar si el nivel freático está por sobre el nivel de fondo del cauce, en tal caso se deberán colocar barbacanas para aliviar las subpresiones.

El terraplén puede ser compuesto por un conglomerado de cantera en combinación con una capa de suelos granulares cohesivos de baja plasticidad como arcillas, lo que favorece su impermeabilidad. El talud se protege con una geomanta anclada al suelo e hidrosiembra, esta última aporta estabilidad a través de las raíces de la vegetación plantada. En la Figura 5-1 se muestra un corte tipo y detalle del diseño a nivel de perfil.

En vista de los resultados y en particular las velocidades del flujo para caudales asociados a la crecida de diseño de 100 años de periodo de retorno en la vecindad de las obras y la materialidad del tipo de obra seleccionada se considera un talud de 1.5:1, según la tipología podría llegar a ser típicamente 1.5:1 hasta 1:1.

Para efectos de las obras planteada, se considera una revancha de 1m. No obstante, considerando que en el sector de la obra el cauce se comporta en régimen de río, este valor puede ser menor siempre y cuando esto se verifique con los valores de cota de inundación para crecidas mayores y con todas las obras a implementar

Para propósitos de cálculo de volumen de la obra, el texto indica que se debe considerar un ancho de 4 metros. Esto incluye el método constructivo, ya que el coronamiento debe permitir el tránsito seguro de maquinaria y vehículos durante la ejecución de la obra, inspección y el mantenimiento futuro.

Para la implementación de cualquiera de los terraplenes propuestos, es imprescindible resolver la gestión de las aguas provenientes de las cuencas en la cabecera con un estudio específico.

El grosor mínimo requerido y la capacidad de retención de área del TRM deben ser definidos por el fabricante

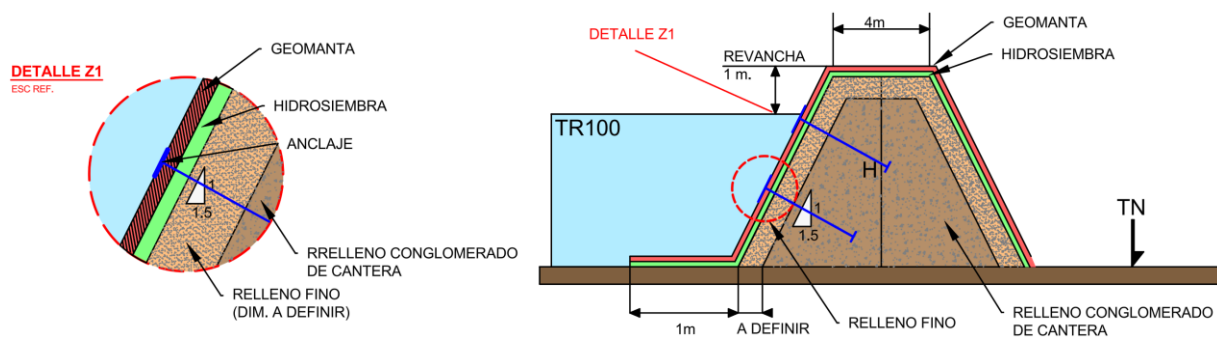


Figura 5-1: Perfil tipo de un terraplén con protección de manta de refuerzo vegetal.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1 TERRAPLENES

Se prioriza la protección de sectores de acuerdo con los sectores poblado y de la infraestructura esencial en ellos (ver Tabla 5-1), se trazaron 7 ejes para obras de protección ubicados en la ciudad de Licantén y localidades de Paraguay, Quelmén, Lora y Calpún.

El volumen de cada obra es menor a 100.000 m³ por lo que requiere SEIA.

Tabla 5-1: Descripción de sectores

Obra	Km de referencia	Localidad	Infraestructura esencial
Licantén	0+200 0 3+200	Licantén Urbano	Bomberos de Licantén Segunda comisaría de Licantén Conservador de Bienes raíces Licantén Registro Civil e Identificación Centro de Desarrollo Integral infantil Gimnasio Municipal Municipalidad de Licantén Departamento del tránsito Licantén Biblioteca Pública Juzgado de policía Local Liceo Augusto Santelices Valenzuela Escuela Juan Ignacio Molina de Licantén Jardín Infantil Pequeños Maestros Jardín Infantil Kumelen Jardín Infantil Papelucho Jardín Infantil S.C. Capullito Jardín Infantil Cuncunita Hospital de Licantén Hospital modular de Licantén Ubicación hospital nuevo de Licantén Hospital de Licantén
Paraguay	5+773	Paraguay	Sin existencia
Quelmén 1	8+858	Quelmén - Indeterminada D2 Licantén	Subestación Licantén - Energía
Quelmén 2	11+661	Quelmén	Sin existencia
Lora 1	12+929	Lora	SSR Lora – Monumento histórico
Calpún	14+651	Calpún	Posta Rural – Jardín Infantil Cuncunita
Lora 2	16+494	Lora	Escuela Alejandro Rojas Cierra
Lora 3		Lora	Posta de salud Rural lora (se encuentra en el sector, pero no es alcanzada por crecida de 100 años)

(Fuente: Elaboración propia)

5.1.1.1 Licantén Urbano

El terraplén de protección que extiende por aproximadamente 5 km. por el borde de la ciudad de Licantén, comenzando en el límite de Licantén Urbano y la Leonera. En el modelo se implementó un terraplén con cota de coronamiento de 18m, esto se realiza con el fin de que el caudal no sobrepase el terraplén y así obtener la cota necesaria según el periodo de retorno seleccionado. A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de $\sim 14.58 \text{ km}^2$. En el diseño definitivo de debe definir los puntos de arranque y fin de la obra.

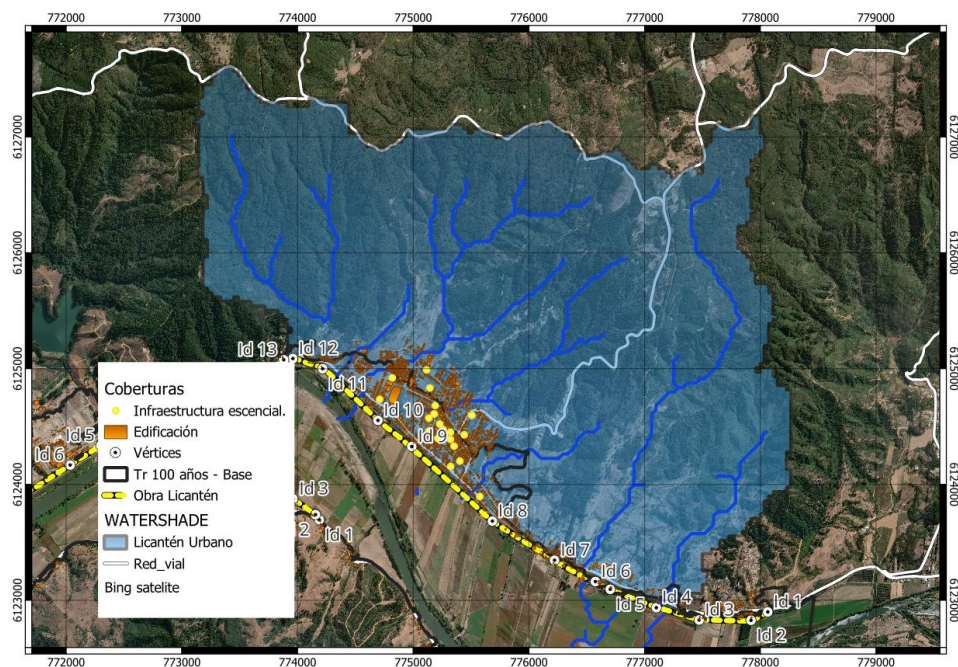


Figura 5-2 : Eje del terraplen y sistema de drenaje natural en el sector de Licantén Urbano.
(fuente: Elaboración propia.)

Tabla 5-2: Cotas de coronamiento de obra.

Idx	Longitud total (km)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Cota ruta J-60	Dif. Alt. entre coronamiento y ruta	Observación
1	---	14.86	14.17	0.69	15.03	-0.17	
2	0.16	14.79	12.53	2.27	13.89	0.90	
3	0.61	14.60	12.49	2.11	14.06	0.54	
4	1.00	14.40	11.81	2.60	12.96	1.44	
5	1.42	14.19	17.32	-3.13	18.11	-3.92	
6	1.57	14.14	16.16	-2.01	18.65	-4.50	Posible arranque en km3+200. (referencia kilometraje en eje de río)
7	1.97	14.01	12.44	1.58	12.27	1.74	
8	2.60	13.87	8.62	5.25	9.42	4.44	
9	3.55	13.68	6.97	6.71	10.43	3.25	
10	3.92	13.57	7.76	5.81	10.08	3.49	
11	4.57	13.54	8.73	4.81	9.38	4.16	
12	4.84	13.53	9.72	3.81	9.69	3.84	
13	4.92	13.52	11.04	2.48	9.12	4.41	

(Fuente: Elaboración propia)

5.1.1.2 Paraguay

A continuación, en la Tabla 5-3, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estima un volumen de 17,595m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de ~1.3km². En el diseño definitivo de debe definir los puntos de arranque y fin de la obra.

Tabla 5-3: Cotas de coronamiento de obra Paraguay.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	12.610	13.610	12.10	1.5	Empalme en cota de coronamiento
2	0.055	12.588	13.588	11.27	2.3	
3	0.292	12.398	13.398	11.58	1.8	
4	0.741	11.846	12.846	9.88	3.0	
5	0.868	13.021	14.021	13.49	0.5	
6	0.868	13.021	14.021	13.49	0.5	Empalme en cota de coronamiento

(Fuente: Elaboración propia)

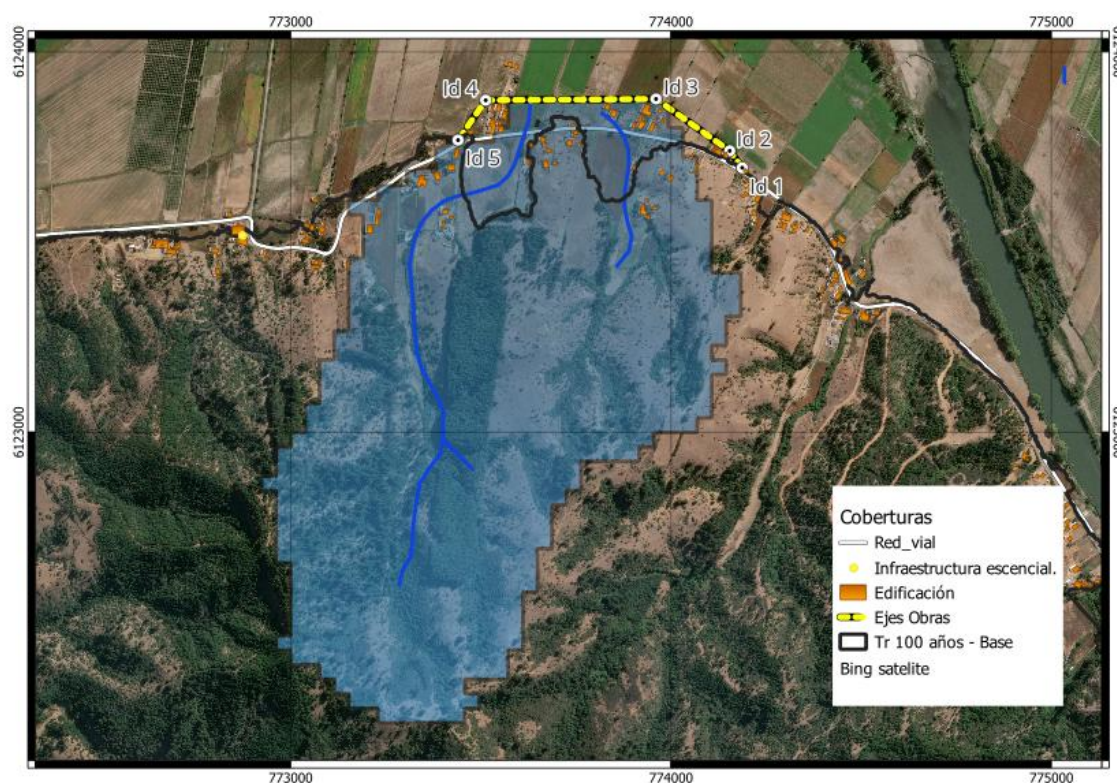


Figura 5-3: Sistema de drenaje natural en el sector Paraguay.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1.3 Lora 1

A continuación, en la Tabla 5-4, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estima un volumen de 39,555m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de ~2.9 km². En el diseño definitivo se debe definir los puntos de arranque y fin de la obra

Tabla 5-4: Cotas de coronamiento de obra Lora 1.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	-	11.310	15.08	-3.8	Empalme en cota de coronamiento con terreno
2	0.424	10.310	11.310	6.97	4.3	
3	1.316	10.078	11.078	8.34	2.7	
4	1.431	-	11.078	10.66	0.4	Empalme en cota de coronamiento con terreno

(Fuente: Elaboración propia)

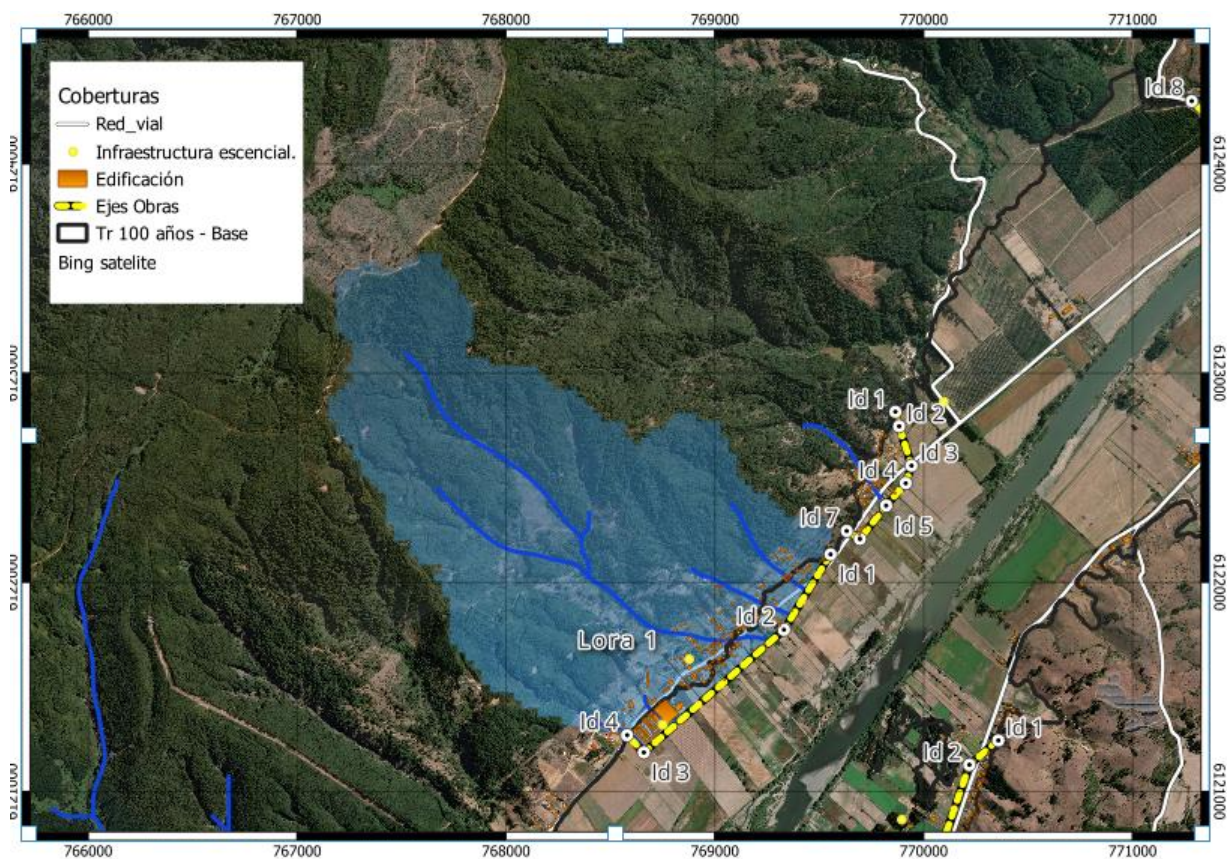


Figura 5-4: Sistema de drenaje natural en el sector Lora 1.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1.4 Lora 2

A continuación, en la Tabla 5-5, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estimó un volumen de 10,962m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de ~0.3 km². En el diseño definitivo se debe definir los puntos de arranque y fin de la obra

Tabla 5-5: Cotas de coronamiento de obra Lora 2.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	-	10.771	11.26	-0.5	Empalme en cota de coronamiento con terreno
2	0.114	9.771	10.771	7.88	2.9	
3	0.374	9.718	10.718	6.80	3.9	
4	0.460	-	10.718	10.70	0.0	Empalme en cota de coronamiento con terreno

(fuente: elaboración propia.)

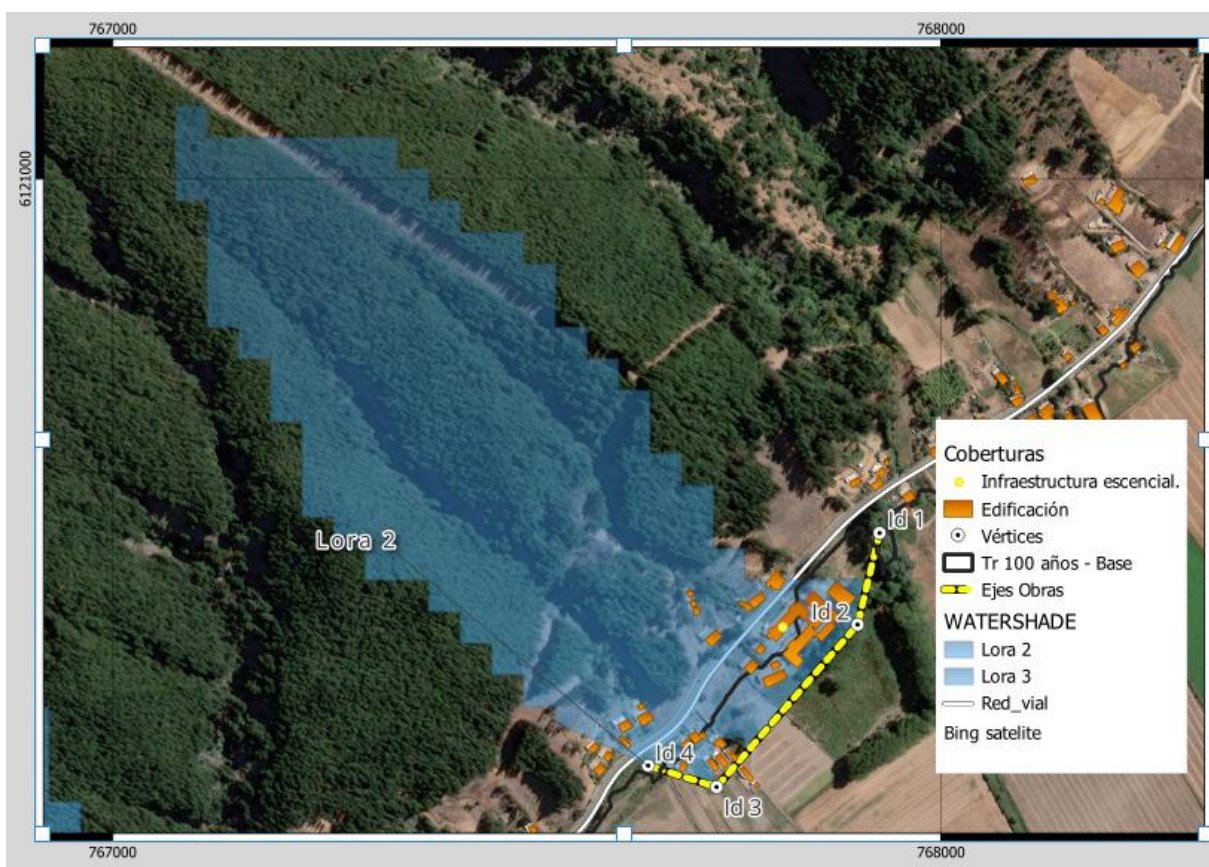


Figura 5-5: Sistema de drenaje natural en el sector Lora 2.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1.5 Lora 3

A continuación, en la Tabla 5-6, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los

valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estimó un volumen de 25,492m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de ~2.7km². En el diseño definitivo de debe definir los puntos de arranque y fin de la obra

Tabla 5-6: Cotas de coronamiento de obra Lora 3.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	-	10.114	12.51	-2.4	Empalme en cota de coronamiento con terreno
2	0.302	9.114	10.114	6.73	3.4	
3	0.579	9.069	10.069	5.47	4.6	
4	0.837	-	10.069	10.43	-0.4	Empalme en cota de coronamiento con terreno

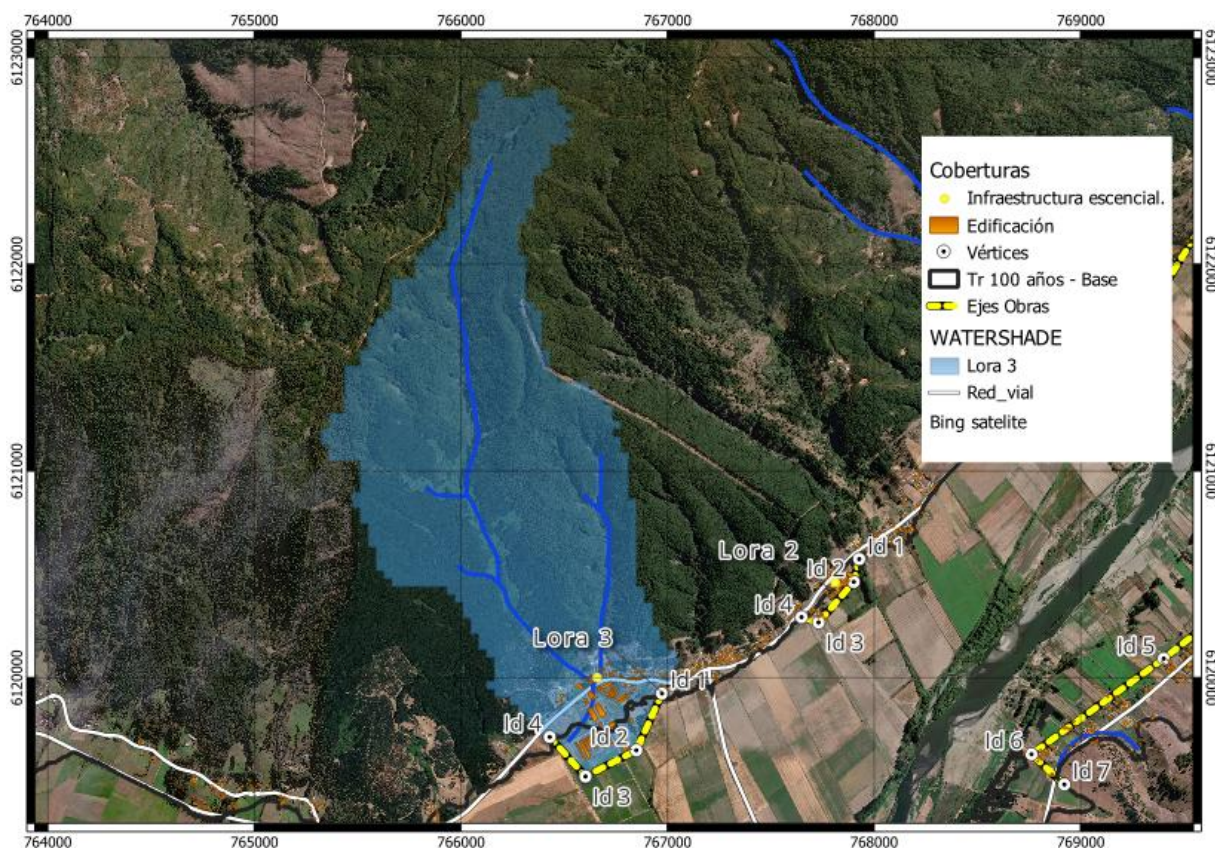


Figura 5-6: Sistema de drenaje natural en el sector Lora 3.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1.6 Quelmén 1

A continuación, en la Tabla 5-7, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estimó un volumen de 49,867m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de $\sim 8.2 \text{ km}^2$. En el diseño definitivo de debe definir los puntos de arranque y fin de la obra

Tabla 5-7: Cotas de coronamiento de obra Quelmén 1.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	-	12.643	12.82	-0.2	Empalme en cota de coronamiento
2	0.010	-	12.643	10.28	2.4	
3	0.037	11.643	12.643	8.29	4.4	
4	0.097	11.640	12.640	10.42	2.2	
5	0.515	11.467	12.467	9.51	3.0	
6	0.829	11.322	12.322	9.43	2.9	
7	1.262	11.177	12.177	9.14	3.0	
8	1.795	-	12.177	11.93	0.2	Empalme en cota de coronamiento

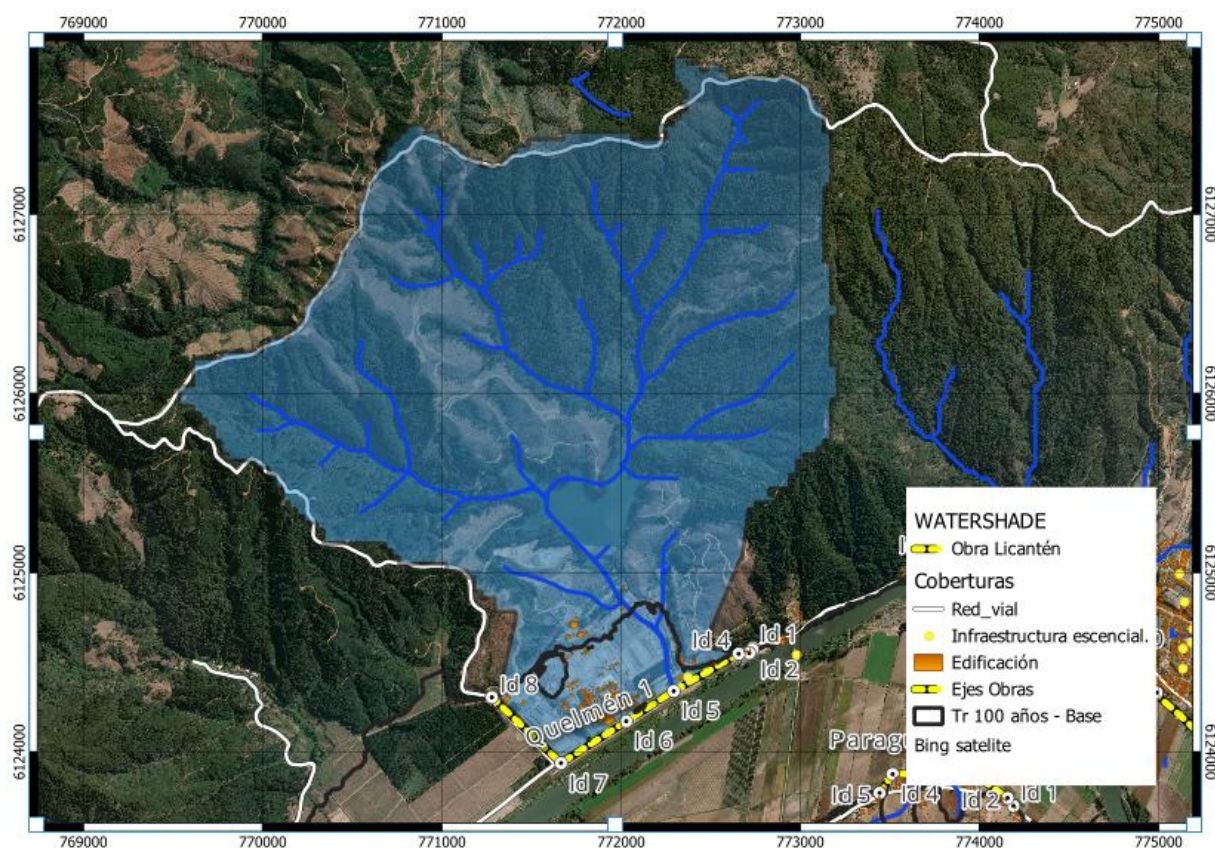


Figura 5-7: Sistema de drenaje natural en el sector Quelmén.
(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1.7 Quelmén 2

A continuación, en la Tabla 5-8, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estimó un volumen de 38,807m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de ~0.49 km². En el diseño definitivo de debe definir los puntos de arranque y fin de la obra

Tabla 5-8: Cotas de coronamiento de obra Quelmén 2.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	-	11.654	13.91	-2.3	Empalme en cota de coronamiento
2	0.072	10.654	11.654	9.07	2.6	
3	0.269	10.646	11.646	7.50	4.1	
4	0.358	10.626	11.626	5.87	5.8	
5	0.500	10.590	11.590	6.06	5.5	
6	0.703	10.482	11.482	6.02	5.5	
7	0.778	-	11.482	20.92	-9.4	Empalme en cota de coronamiento

(Fuente: Elaboración propia)

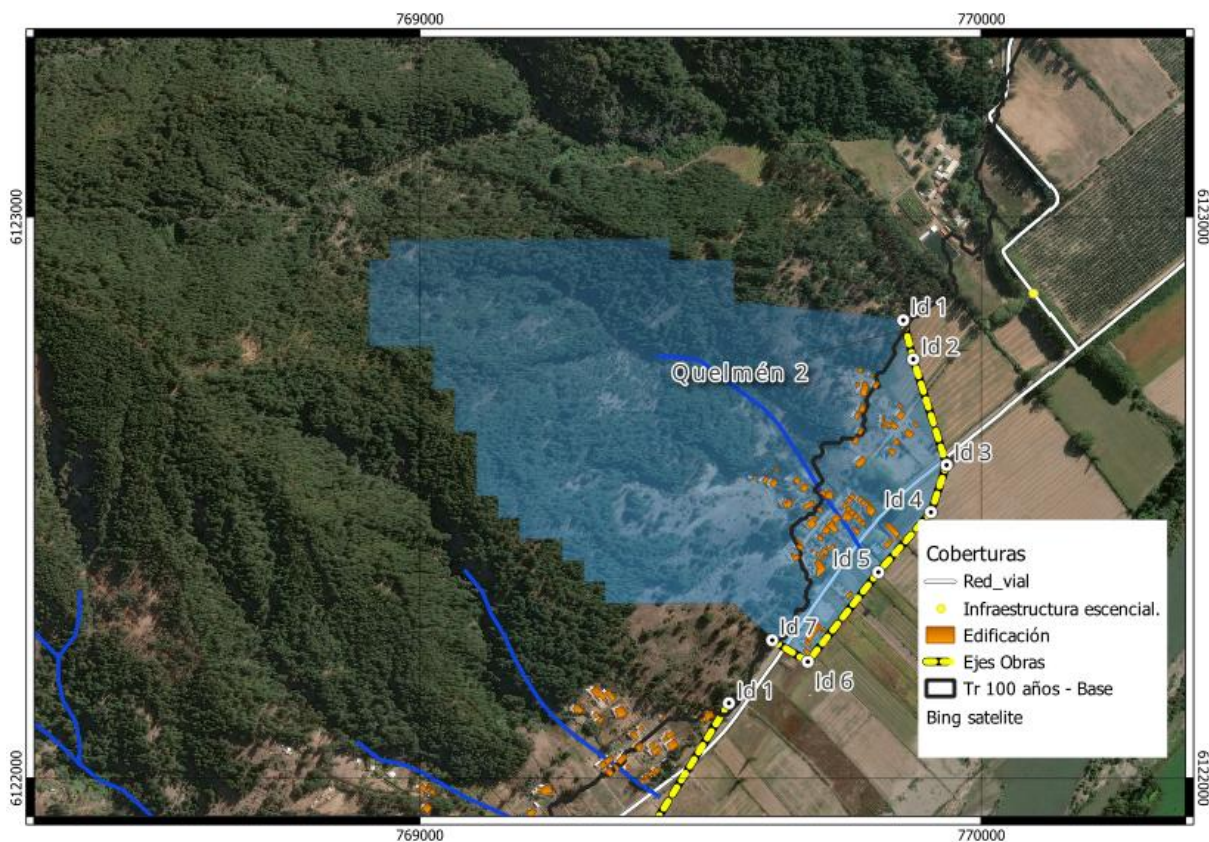


Figura 5-8: Sistema de drenaje natural en el sector Quelmén 2.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.1.8 Calpún

A continuación, en la Tabla 5-9, se muestran los valores por tramo de la cota de coronamiento, cota de terreno en eje y las diferencias de cotas entre el coronamiento y los valores de terreno. Considerando un ancho de coronamiento de 4m y talud de 1.5:1 (H:V) se estimó un volumen de 86,479m³ de relleno.

A considerar, para la gestión de aguas provenientes de la cuenca cabecera se estimó un aporte de ~3.6km². En el diseño definitivo de debe definir los puntos de arranque y fin de la obra

Tabla 5-9: Cotas de coronamiento de obra Calpún.

Idx	Longitud total (km)	Cota para Tr 100 años (caso base)	Cota coronamiento (km)	Cota terreno (m)	Dif. Alt. entre coronamiento y topografía en eje	Observación
1	-	-	11.296	12.03	-0.7	Empalme en cota de coronamiento con terreno
2	0.181	10.296	11.296	7.57	3.7	
3	0.802	10.171	11.171	6.84	4.3	
4	0.912	10.151	11.151	6.56	4.6	Empalme en cota de coronamiento con terreno

(Fuente: Elaboración propia)

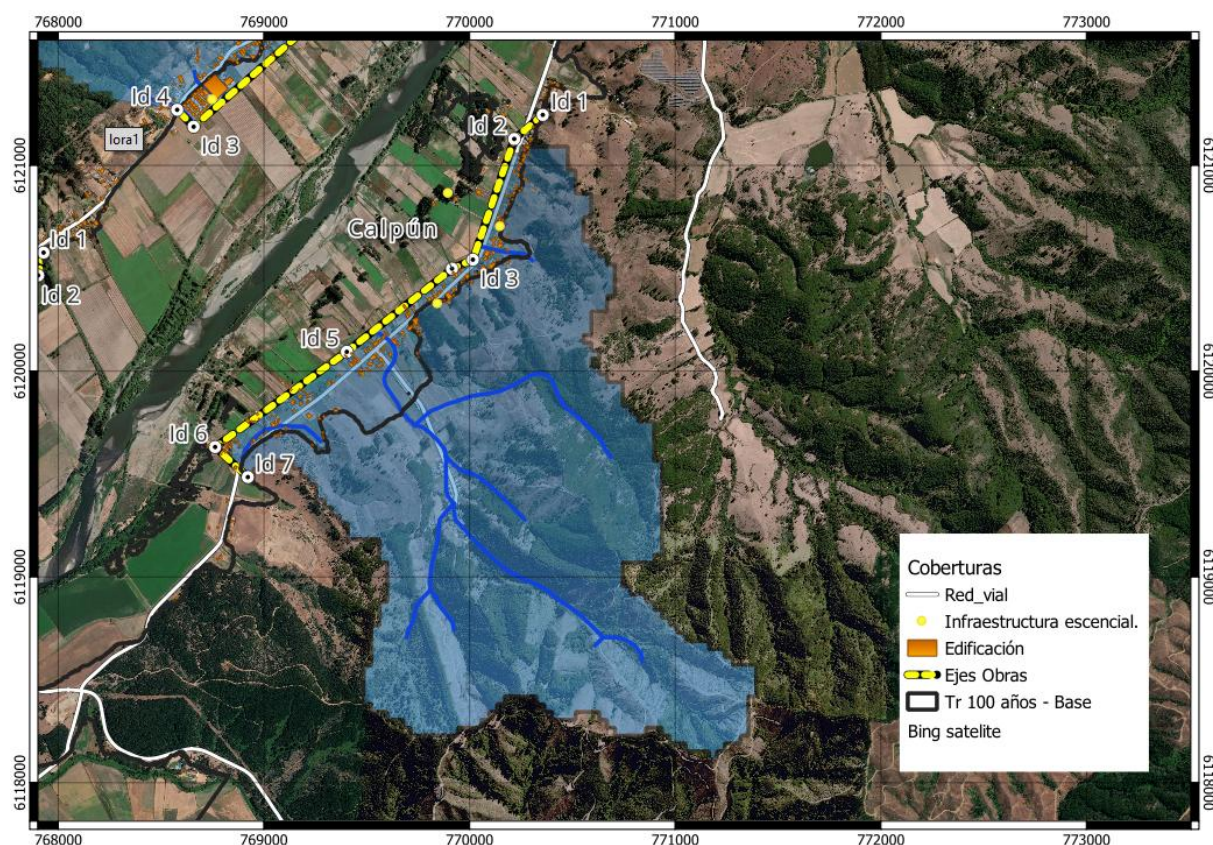


Figura 5-9: Sistema de drenaje natural en el sector Calpún.

(fuente: Elaboración propia.)

5.1.2 RESUMEN

A continuación, se presenta una tabla con los aspectos relevantes de las medidas estructurales como de las obras del análisis del diagnóstico del punto 4.1.5.

Tabla 5-10: Resumen del análisis de obras.

OBRA	LOCALIDAD	ENFORQUE	DIMENSIONES TIPO	VOLUMEN (M ³)	SEIA	TIPO DE ESTRUCTURAS EN EL ÁREA	OBSERVACIÓN
Terraplén de protección con manta de refuerzo vegetal (TRM) + Hidrosiembra	Licantén	Contención crecida – Terraplén con manta de refuerzo vegetal (TRM) + hidrosiembra	Longitud de ~5km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedio en eje del terraplén 7.12 y 3.94m respectivamente.	258,892	NO	Edificación/ infraestructura esencial.	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificación e infraestructura que quedan por detrás de la obra, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en la cabecera de Licantén urbano, se estimó un área aportante aproximada de 14.58km ² .
	Paraguay	Contención crecida – Terraplén con manta de refuerzo vegetal (TRM) + hidrosiembra	Longitud de ~0.86km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedio en eje del terraplén 2.16 y 1.42m respectivamente.	17,596	NO	Edificación	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 1.3km ² .
	Quelmén	Contención crecida –	Longitud de ~1.8km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedio en eje del terraplén 5.46 y 2.11m respectivamente.	49,867	NO	Edificación/ infraestructura esencial.	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones e infraestructura del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 8.2km ² .

OBRA	LOCALIDAD	ENFORQUE	DIMENSIONES TIPO	VOLUMEN (M³)	SEIA	TIPO DE ESTRUCTURAS EN EL ÁREA	OBSERVACIÓN
	Quelmén	Terraplén con manta de refuerzo vegetal (TRM) + hidrosiembra	Longitud de ~0.78km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedió en eje del terraplén 5.01 y 3.56m respectivamente.	38,807	NO	Edificación	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 0.49km².
	Lora	Contención crecida -	Longitud de ~1.43km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedió en eje del terraplén 2.96 y 1.97m respectivamente.	39,555	NO	Edificación/ infraestructura esencial.	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones e infraestructura del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 2.9km².
	Lora	Terraplén con manta de refuerzo vegetal (TRM) + hidrosiembra	Longitud de ~0.46km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedió en eje del terraplén -0.05 y -1.97m respectivamente.	10,962	NO	Edificación/ infraestructura esencial.	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones e infraestructura esencial del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 0.3km².
	Lora	Contención crecida -	Longitud de ~0.84km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedió en eje del terraplén 3.65 y 2.42m respectivamente.	25,492	NO	Edificación	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 2.7km².

OBRA	LOCALIDAD	ENFORQUE	DIMENSIONES TIPO	VOLUMEN (M³)	SEIA	TIPO DE ESTRUCTURAS EN EL ÁREA	OBSERVACIÓN
	Calpún	Terraplén con manta de refuerzo vegetal (TRM) + hidrosiembra	Longitud de ~0.91km, talud 1.5:1 (H:V) altura variable. Altura máxima y promedió en eje del terraplén 3.96 y 2.52m respectivamente.	86,479	NO	Edificación/ infraestructura esencial.	La implementación de esta obra tiene un impacto directo en las edificaciones del sector, evitando que sean alcanzadas por la inundación. Por otra parte, presenta una dificultad que debe ser resuelta antes de la implementación, esta es el manejo de aguas provenientes de las cuencas en su cabecera, se estimó un área aportante aproximada de 3.6km².
Canal con pendiente y sección única	Varias localidades	Mejorar escurrimiento	Canal trapezoidal de ~21km de longitud y 200m en la base, talud lateral 4:1 (H:V), altura en el canal de 6m, pendiente longitudinal de 0.02%, ancho	11,792,166 (corte) 1,453,548 (relleno)	SI	Edificación/ infraestructura esencial.	Una obra de esta envergadura no es capaz de portear por completo el caudal de 100 años de periodo de retorno, su implementación o mejora está limitada por la poca pendiente del río. Se logra reducir la cota de inundación, para Tr 100 años, en Licantén urbano en 0.92m, 0.70m en el sector de Quelmén, 0.25m en el sector de Lora aguas debajo del Puente Lautaro, lo cual no tiene gran impacto en el área de inundación, los valores antes mencionados se traducen en una disminución de 5.88km² en el área de inundación en la localidad de Licantén Urbano, 1.51 km² en Quelmén y 0.3 km² en Lora. Solo en Licantén Urbano se logra disminuir el número de infra. esencial en 6 unidades dentro de los cuales se encuentran 3 centros educacionales, bomberos y la biblioteca. El sector de estudio, situado en la parte baja de la cuenca, la poca pendiente del río, la forzante mareal, que sin esta obra puede llegar aguas arriba del puente Lautaro, genera una dinámica compleja con influencia directa en el transporte natural de sedimentos, por lo que la implementación de una obra como la de un canal, requiere de estudios especializados acerca del comportamiento

OBRA	LOCALIDAD	ENFORQUE	DIMENSIONES TIPO	VOLUMEN (M ³)	SEIA	TIPO DE ESTRUCTURAS EN EL ÁREA	OBSERVACIÓN
							ecohidráulico/sedimentológico, evaluación de impacto ambiental entre otros. Se estima que se deberían mover 11.8 millones de m³ de material, lo que modifica la morfología del río, requiere de terrenos privados y intervención en ecosistemas del río (flora y fauna local) posiblemente más allá del sector a intervenir. Por estas razones, análisis de esta obra es útil desde un punto de vista ingenieril para cuantificar los efectos de la obra en el área de inundación, pero no es recomendable de implementar por su alto costo, impacto ambiental y complejo escenario en el manejo de los sedimentos.
Modificación en curva, sector Licantén	Licantén	Mejorar escurrimiento	Pendiente única del 0.07% en una longitud de ~2.7km en el canal principal, ancho variable con ~110m al inicio y fin y 200metros en la zona de la curva, el radio externo de la curva ~800m.	3,266,000	SI	Edificación/ infraestructura esencial.	La implementación de esta obra no generaría un gran impacto en el área de inundación en la ciudad de Licantén, el impacto se cuantifica en la disminución de ~0.34m en la cota de escurrimiento en Licantén Urbano. Esto implica un importante movimiento de tierra y ocupación de sectores privados en el sector interno de la curva. Esta medida no impacta en el número de infra. esencial afectada en comparación del caso base.

(Fuente: Elaboración propia)

5.2 PROPUESTA DE MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

En la actualidad se ha incorporado a la gestión del riesgo de inundaciones fluviales un enfoque integral que contempla la implementación de medidas no estructurales, complementando las medidas de ingeniería tradicional, conocidas como medidas estructurales.

5.2.1 Delimitar áreas de acuerdo con la amenaza de inundación

De acuerdo con el artículo 97 del DFL N° 850 del Ministerio de Obras Públicas, que establece: 'Se prohíbe construir casas para viviendas y, con mayor razón, formar poblaciones en suelos periódicamente inundables, aun cuando la inundación se presente en períodos de hasta diez años', se recomienda que los instrumentos de planificación territorial incorporen la prohibición de edificar en áreas inundables por crecidas con periodo de retorno de 100 años.

Se elaboraron los mapas de amenaza para el área de estudio con la metodología DOH-MOP, se presentan los resultados correspondientes a los periodos de retorno de 10 y 100 años. En el ANEXO F.2 - MEDIDAS_NO_ESTRUCTURALES se incluyen los mapas para todos los caudales, disponibles en formatos imagen (.png), ráster (.tif) y en el ANEXO I.1 - GIS GENERAL el proyecto GIS.

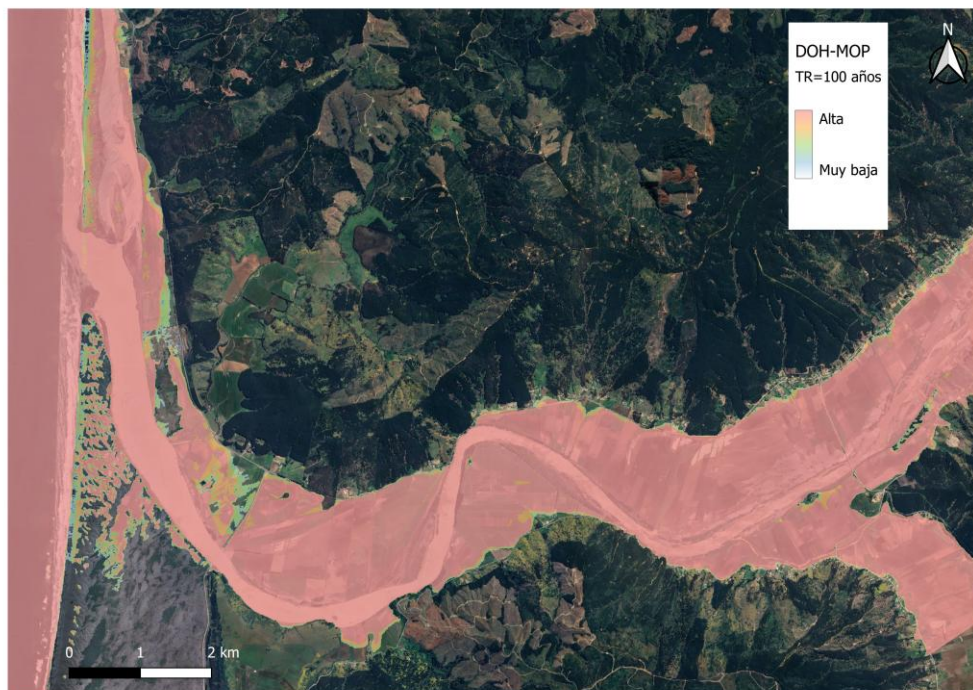


Figura 5-10: Área de amenaza de inundación para T=100 años criterio MOP-DOH, sector Puente Lautaro y Mataquito.

(Fuente: Elaboración propia)

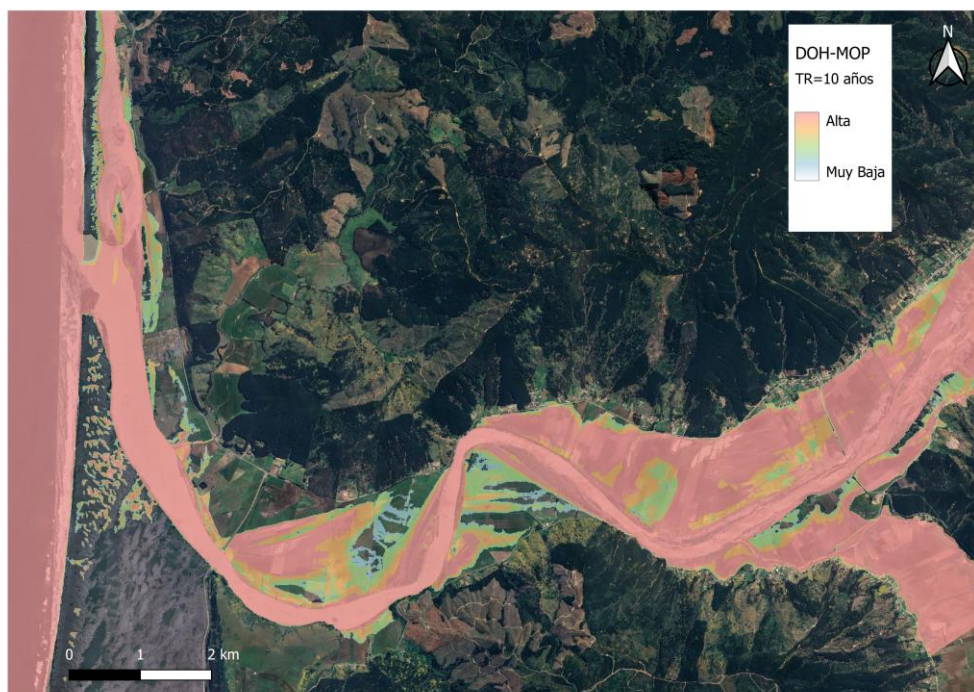


Figura 5-11: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio MOP-DOH, sector Puente Lautaro y Mataquito.
(Fuente: Elaboración propia)

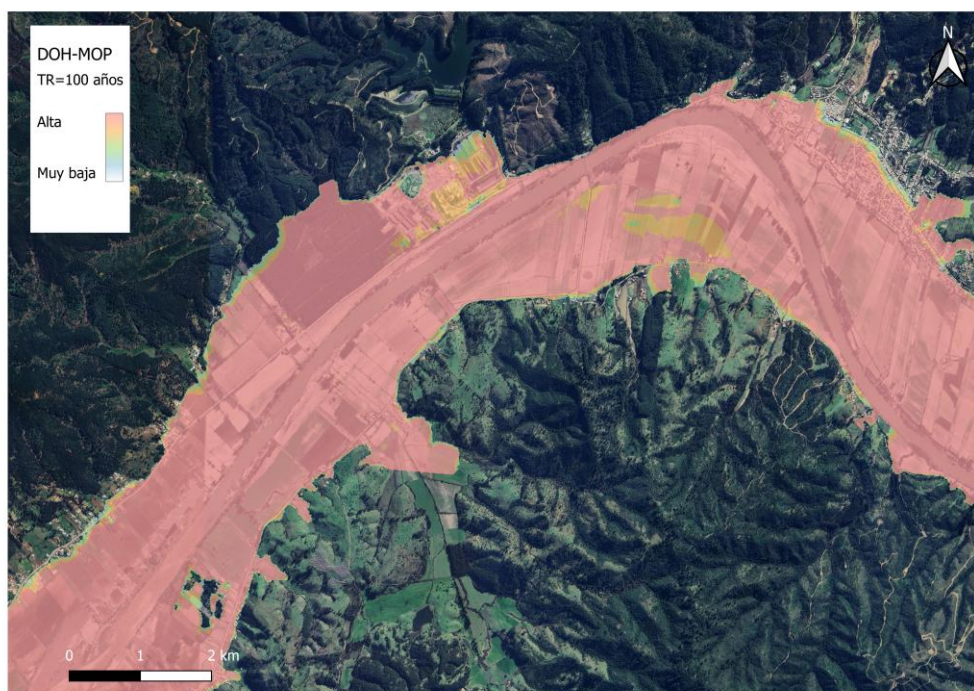


Figura 5-12: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio MOP-DOH, sector Licantén.
(Fuente: Elaboración propia)

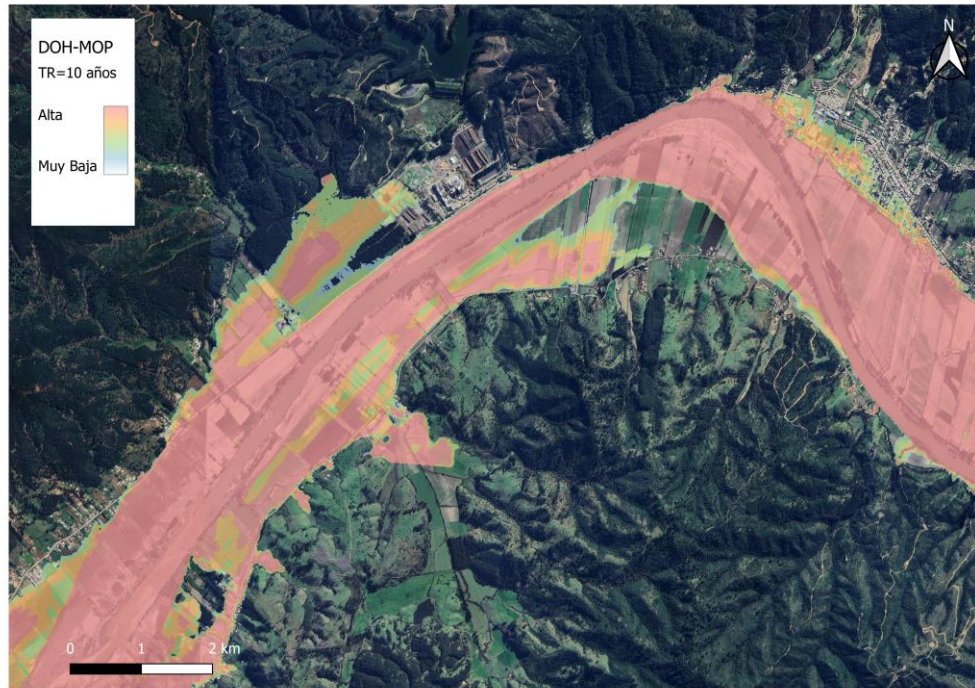


Figura 5-13: Área de amenaza de inundación para T=10 años criterio MOP-DOH, sector Licantén.

(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar en las Figura 5-10 y Figura 5-12, la mayor parte del área de estudio presenta una zona de color rojo para periodos de retorno de 10 y 100 años, lo que se cataloga como amenaza alta. Aunque para un periodo de retorno de 10 años se identifican zonas en la ciudad de Licantén con amenaza media y baja, la planicie de inundación predomina con amenaza alta. Este resultado es atribuible principalmente a la definición del criterio DOH-MOP en la Tabla 1-1, el cual indica que la condición de amenaza alta se alcanza si se cumple la altura de inundación (≥ 1 m) o el producto de la velocidad por la altura (≥ 1.5 m²/s). Para este escenario, se cumplen alturas superiores a 1 metro, incluso con velocidades menores a 0.5 m/s, lo que es suficiente para clasificar la amenaza como alta.

Con el fin de comprender el comportamiento de otros criterios y evaluar si la aplicación del DOH-MOP resulta excesivamente restrictiva en la caracterización de la amenaza debido a que solo requiere la satisfacción de una de sus condiciones, se presentarán a continuación las áreas de amenaza para los índices DEFRA & Wallingford (2006) y AIDR (2017).

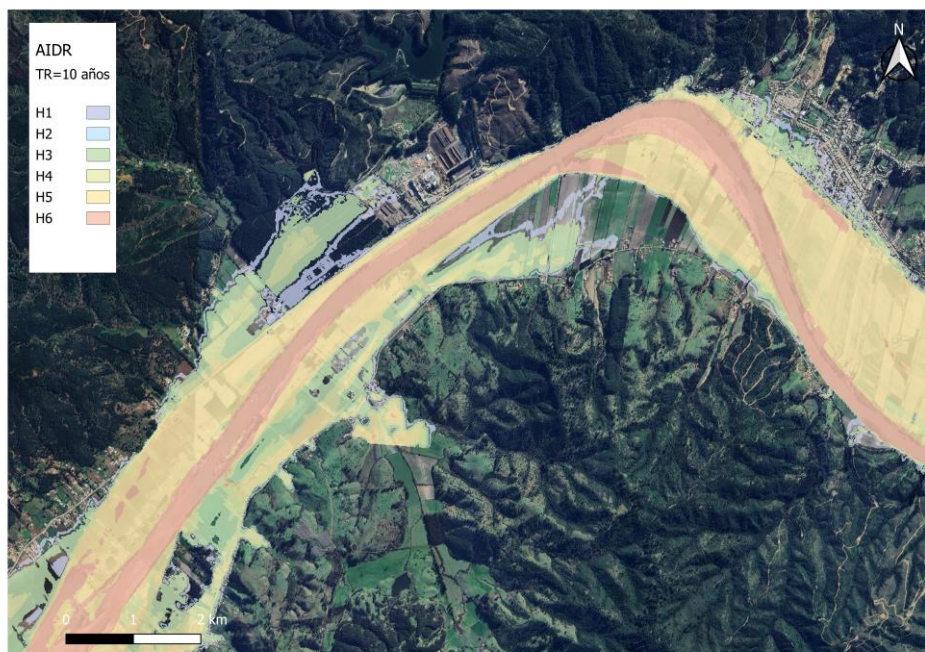


Figura 5-14: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio AIDR, sector Licantén.
 (Fuente: Elaboración propia)

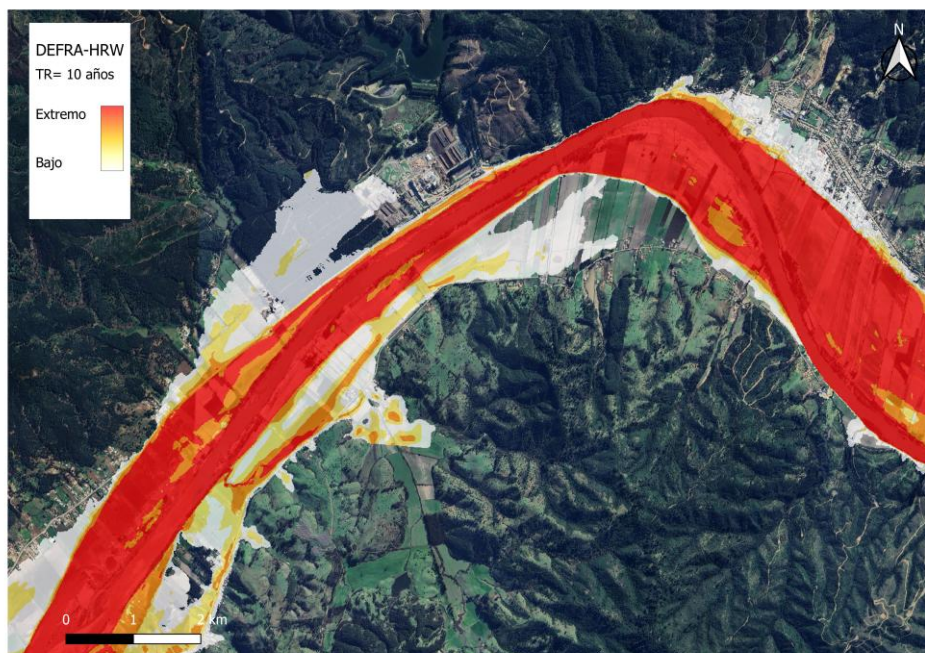


Figura 5-15: Área de amenaza de inundación pata T=10 años criterio DEFRA & Wallingford, sector Licantén.
 (Fuente: Elaboración propia)

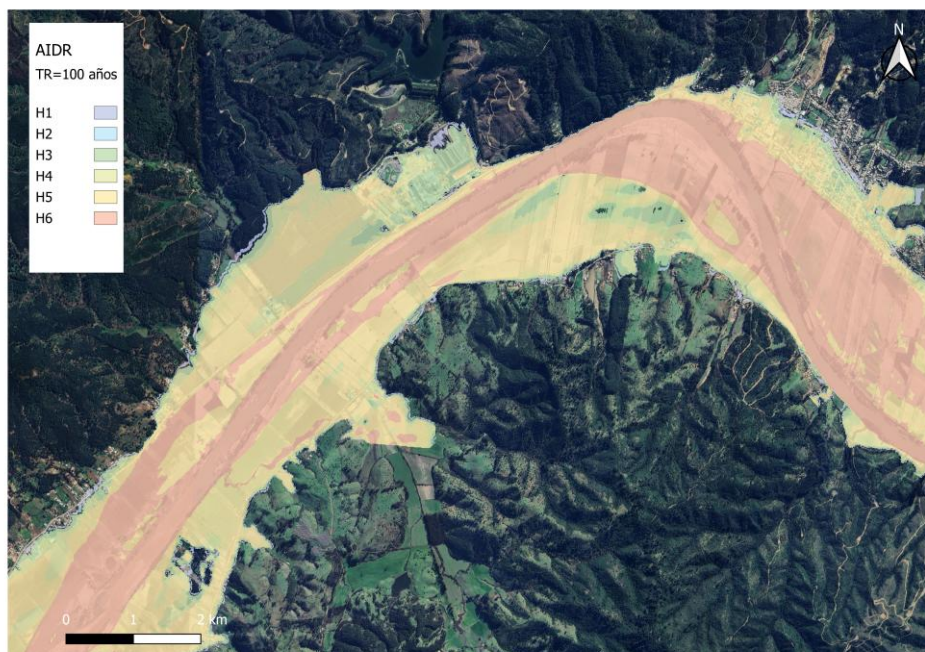


Figura 5-16: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio AIDR, sector Licantén.
 (Fuente: Elaboración propia)

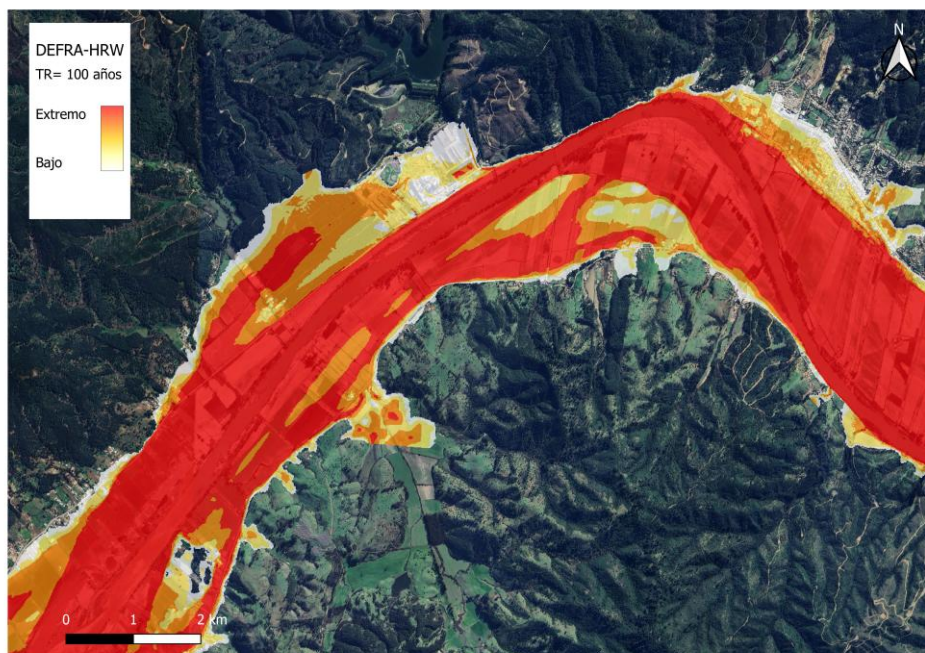


Figura 5-17: Área de amenaza de inundación pata T=100 años criterio DEFRA & Wallingford, sector Licantén.
 (Fuente: Elaboración propia)

Las visualizaciones de la amenaza de inundación en la zona de estudio para un periodo de retorno de 10 y 100 años (Figura 5-12, Figura 5-13, Figura 5-14, Figura 5-15, Figura 5-16 y Figura 5-17) revelan diferencias significativas en la extensión y la categorización de la amenaza según los criterios DOH-MOP, AIDR (2017) y DEFRA & Wallingford (2006).

Como se observa en las Figura 5-12, Figura 5-13, el criterio DOH-MOP tiende a clasificar una proporción considerablemente mayor de la planicie de inundación como "Amenaza Alta" (representada en color rojo o rosado intenso), incluso para un periodo de retorno de 10 años, donde teóricamente se esperarían niveles de amenaza más bajos en algunas zonas. Esta prevalencia de la categoría "Alta" se debe fundamentalmente a la naturaleza de su criterio de clasificación. La normativa DOH-MOP establece que la intensidad de la inundación se define si al menos una de las dos condiciones (altura de inundación (H) o el producto de la velocidad de escurrimiento (v) y la altura (H)) se cumple para cada categoría de intensidad. En este caso, se ha observado que, si bien las velocidades pueden ser moderadas, las alturas de inundación superan con frecuencia el umbral de 1 metro. Al ser una condición "o" (disyunción lógica), la satisfacción de la altura de 1 metro es suficiente para clasificar la zona como "Amenaza Alta", independientemente del valor de la velocidad, lo que genera una amplia extensión de esta categoría.

En contraste, los criterios AIDR (2017) y DEFRA & Wallingford (2006) muestran una distribución más gradual de los niveles de amenaza Figura 5-14, Figura 5-15, Figura 5-16 y Figura 5-17). Por ejemplo, el criterio AIDR (2017) utiliza curvas de severidad que combinan explícitamente la profundidad y la velocidad del flujo, así como el producto de ambas, en umbrales más específicos ($H1$ a $H6$). De manera similar, el criterio DEFRA & Wallingford (2006) evalúa la severidad a través de una fórmula que integra tanto la profundidad como la velocidad del flujo.

Estas metodologías, al considerar de forma más interdependiente o con umbrales más diferenciados los parámetros hidráulicos, permiten una categorización de la amenaza que, en las figuras mostradas, se traduce en una mayor variabilidad espacial de las intensidades (bajo, moderado, significativo, extremo para DEFRA & Wallingford y $H1$ a $H6$ para AIDR), en comparación con la predominancia de "Amenaza Alta" observada con el DOH-MOP.

Estas diferencias ponen de manifiesto la importancia de comprender las bases conceptuales y matemáticas de cada criterio al interpretar los mapas de amenaza. La aplicación del criterio DOH-MOP, debido a su condición disyuntiva, tiende a generar áreas de amenaza alta más extensas, lo cual puede interpretarse como una aproximación conservadora en la gestión del riesgo al identificar amplias zonas con potencial de impacto significativo si se cumple cualquiera de las condiciones críticas (altura o producto altura-velocidad).

5.2.2 Sistema de alerta temprana

El diseño de un SAT se estructura en torno a cuatro componentes principales: detección y pronóstico, evaluación e integración de riesgos, comunicación y divulgación, y planificación/preparación/respuesta.

El presente estudio ayuda en parte a la implementación de un SAT ya que gracias a la hidrología proporcionada se tienen los caudales máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100) para la estación Licantén en el río Mataquito. Con ello y junto a la elaboración de la topografía detallada obtenida en el estudio se elaboraron las modelaciones 2D del área de estudio, con esta información crucial se pueden pronosticar los niveles de inundación y velocidades en el área de estudio. En función de estos niveles de inundación se tienen de forma preliminar la cantidad de casa, predios e infraestructura crítica afectada a las diferentes crecidas.

Finalmente, los mapas de amenaza basados en DOH-MOP, AIDR y DEFRA & Wallingford, aunque preliminares, ya definen espacialmente las zonas de posible inundación y su intensidad para distintos periodos de retorno.

A modo de complemento el DICTUC (2024), establece umbrales meteorológicos operativos de 3 días (DMC, cuenca del Mataquito). Este input aporta en la implementación de un SAT

más robusto, producto de los umbrales por color de alerta que combinan precipitación acumulada a 3 días (PRECIP), máxima de las temperaturas mínimas (TEMP) e isoterma 0°C (ISO) para la estación DMC General Freire (340031). Estos umbrales permiten activar prealertas con hasta 3 días de anticipación y gatillar simulaciones hidrológicas (DICTUC, 2024). Los resúmenes de umbrales se detallan en la Figura 5-18, se detallan los umbrales señalados en el informe de DICTUC (2024)

Tipo de Alerta	Azul			Amarilla			Roja			Estación DMC Correspondiente
Cuenca	TEMP	ISO	PRECIP	TEMP	ISO	PRECIP	TEMP	ISO	PRECIP	
Río Rapel	1.6	1716	25	6.1	2284	40	12.2	3040	40	Rancagua (340045)
Río Mataquito	7.8	2153	30	10.1	2483	30	12.6	2842	30	General Freire (340031)
Río Maule	3.3	1463	30	6.5	1848	40	12.3	2560	60	Panguilemo (350028)
Río Itata	5.3	1613	20	5.3	1613	40	5.3	1613	50	Gral. B. O'Higgins (360011)
Río Biobío	5.8	1486	20	7.7	1744	20	9.1	1926	40	El Huertón (370036)

Figura 5-18: Umbrales de temperatura, isoterma cero y precipitaciones para la generación de la alerta de crecida.
(Fuente: DICTUC, 2024)

Con ello lo que faltaría para poder implementar un SAT funcional seria:

- **Inventario y Estado de la Red Hidrometeorológica Actual:** Completar diagnóstico de estaciones existentes en la cuenca (pluviómetros, limnímetros, temperatura/isoterma), su estado operativo y telemetría. Priorizar subcuencas con mayor aporte y menor tiempo de concentración aguas arriba de Licantén. Considerar relocalización/densificación con foco de amenaza según sugiere el informe.
- **Isoterma 0°C y línea de nieve:** Incluir en el SAT la tendencia histórica al alza de la isoterma 0°C de ~74 m por década en Mataquito, que incrementa la fracción pluvial efectiva durante eventos invernales. Para operación diaria/subdiaria, usar cuantiles elevados (IC 80–95%) de la isoterma 0°C, ya que en junio de 2023 se observaron alturas cercanas a los percentiles 90–95% en varias cuencas (DICTUC 2024)
- **Red de Monitoreo en Tiempo Real:** Es esencial contar con una red de estaciones hidrometeorológicas (pluviómetros y limnímetros) en la cuenca del río Mataquito (especialmente aguas arriba de Licantén) que transmitan datos en tiempo real. El informe menciona datos históricos, pero un SAT requiere información actualizada para la detección temprana de lluvias y niveles de río.
- **Sistemas de Adquisición y Procesamiento de Datos:** Plataformas y software que permitan la recolección automática, el almacenamiento y el procesamiento en tiempo real de los datos de la red de monitoreo.
- **Modelos de Pronóstico Hidrológico-Hidráulico en Tiempo Real:** Implementación de modelos que puedan tomar los datos en tiempo real y generar pronósticos de niveles y velocidades de inundación con un horizonte de tiempo útil (horas a días) antes de la crecida. Esto implica la calibración y validación de estos modelos para operación en tiempo real.
- **Actualizar los umbrales de Alerta:** Actualizar los umbrales ya definidos por la DGA, específicos de niveles de río o caudales en puntos clave de la cuenca que, al ser superados, desencadenen distintos niveles de alerta (pre-alerta, alerta amarilla, alerta roja, etc.). Estos umbrales deben correlacionarse con los mapas de amenaza generados.

- **Análisis de Vulnerabilidad Detallado:** Cuantificación y mapeo de la vulnerabilidad física (tipología de edificaciones, infraestructura crítica como hospitales, escuelas, vías de evacuación) y social (densidad poblacional, grupos vulnerables, capacidad de respuesta comunitaria) en las zonas de amenaza ya identificadas.
- **Mapas de Riesgo:** Combinación de los mapas de amenaza con los mapas de vulnerabilidad para generar mapas de riesgo que muestren el impacto potencial (ej., número de viviendas afectadas, población en riesgo, daños económicos estimados).
- **Criterios para la Evaluación de Impactos:** Definición de criterios y metodologías para evaluar rápidamente los posibles impactos de una inundación pronosticada, lo que permite priorizar acciones.
- **Información de Riesgos Integrada:** Desarrollo de mensajes de alerta que no solo indiquen el peligro (ej., nivel de agua) sino también el riesgo asociado (ej., "se esperan inundaciones que afectarán 50 viviendas en el sector X")
- **Protocolos de Emisión de Alerta:** Procedimientos estandarizados para la generación y validación de los mensajes de alerta una vez que se alcanzan los umbrales definidos.

A modo de diseño de perfil, se recomienda como mínimo seguir los siguientes pasos para desarrollar un SAT, para la zona Mataquito-Licanten.

1. Monitoreo continuo: Cálculo automático de indicadores (PRECIP 3 días, TEMP min máx 3 días, ISO 0°C máx 3 días, niveles/caudales, tasas de ascenso).
2. Evaluación de umbrales DMC (Figura 5-18): Asignación de color meteorológico (Azul/Amarillo/Rojo) (DICTUC 2024)
3. Si Azul/Amarillo/Rojo: activar modelación 1-3 días con asimilación; setear línea de nieve/isoterma (definir escenarios, a considerar).
4. Obtener mapas de mapa de inundación, amenaza, en función del caudal estimado del pronóstico, previa modelación 2D. Correlacionar cada escenario con umbrales hidrológicos locales (nivel/caudal) para definir el estado de alerta hidrológica (prealerta/amarilla/roja).
5. Generar mensaje con peligro y riesgo: "color DMC" + sectores afectados, viviendas estimadas, velocidades, rutas seguras; coordinar emisión y acciones con municipalidad y servicios.
6. Seguimiento y actualización en tiempo real; cierre y evaluación post-evento para recalibrar umbrales.

6. PROPOSICIÓN DE DESLINDES

Se realizó el trazado de los deslindes del río Mataquito. La zona en estudio abarcó desde la localidad de Docamavida hasta la localidad costera de Rancura ubicada en la desembocadura del río.

El deslinde de la ribera norte tiene una longitud total de 37 km, abarcando el tramo comprendido entre la localidad de Docamavida (aguas arriba) y la localidad de Rancura. Por otro lado, el trazado del deslinde de la ribera sur tiene una longitud de 29 km, y comprende el tramo desde la localidad de Docamavida hasta el puente Mataquito, aproximadamente.

Para la tramitación y la fijación definitiva de los deslindes, resulta imprescindible contar con el estudio detallado de los títulos de dominio de las propiedades colindantes. Este análisis es fundamental para contrastar la propuesta técnica de deslinde (basada en criterios hidráulicos y geomorfológicos) con los límites legales y efectivos de cada propiedad.

Con respecto al criterio técnico utilizado para el trazado de deslinde se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

- generación del mapa de pendientes topográficas es fundamental para identificar las terrazas fluviales y los márgenes del cauce, lo que resulta clave en el trazado de los deslindes.
- La identificación de barras y la clasificación sedimentológica del cauce son fundamentales para comprender e interpretar tanto los registros satelitales como la morfología fluvial.
- Con el objetivo de tener una mejor visualización de los sectores propensos a erosión de laderas, sería de utilidad un modelo tridimensional fotogramétrico ya que facilitaría la detección de estas zonas.

El detalle de todo el estudio referente a la proposición de deslindes se encuentra en el Volumen II del presente estudio.

7. CONCLUSIONES

Se establece que las presentes conclusiones se basan en un análisis conceptual a nivel de perfil. Cualquier avance hacia la ejecución de las obras propuestas (terraplenes de contención) requerirá obligatoriamente de un Estudio de Factibilidad y Diseño detallado para validar su implementación.

El diagnóstico de estructuras fluviales y la evaluación de riesgo por inundación para un periodo de retorno de 100 años revelan que la estructura crítica es el Puente Lautaro, el cual sería alcanzado por al menos 0.17m de agua en ese escenario. Esta situación se agrava por la gran cantidad de material vegetal presente en el puente, lo que aumenta los esfuerzos y las alturas de escurrimiento. En contraste, la Pasarela Los Escalones y el Puente Mataquito presentan revanchas de 0.88 y 3.68m respectivamente, lo que significa que no son estructuras críticas bajo la misma condición de crecida.

En relación con la inundación por crecidas del río se puede decir que los sectores con más edificaciones afectadas (viviendas, galpones, etc., que no constituyen infraestructura esencial) por las inundaciones son la ciudad de Licantén urbano y las localidades de Calpún, Paraguay, Quelmén y Lora. En relación con la infraestructura esencial identificada la mayor parte de ellas se encuentra en la ciudad de Licantén.

La presencia de la barra litoral en la desembocadura del río Mataquito, en crecidas del río tienen una influencia en la inundación en la zona costera, por ejemplo, para 25 años de periodo de retorno la influencia en el sector del puente Lautaro es de <5cm, aguas debajo de este punto esta diferencia aumenta gradualmente hasta 30 cm en el sector del puente Mataquito. Se determinó que para un caudal de 1876 m³/s (caudal menor a crecida de 5 años), el caudal del río comenzaría a sobrepasar la barra litoral (cota referencia de barra en ~2.6 m.s.n.m.) se espera que a causa del sobrepaso comience a erosionarse y abrirse.

Los terraplenes de acceso a los puentes Lautaro y Mataquito actúan como elementos de control hidráulico que generan una restricción localizada en el flujo. El estudio demuestra que la presencia del terraplén incrementa localmente la cota de inundación inmediatamente aguas arriba. Al retirar los terraplenes, se observa una disminución del nivel de escurrimiento de hasta 27 cm (para un caudal de 100 años periodo de retorno) inmediatamente aguas arriba del travieso del puente Lautaro. La influencia de la restricción del terraplén se disipa aguas arriba y es mínima (menor a 3 cm) en el sector de Licantén

Como solución estructural se propone la construcción de terraplenes de contención, implementando un terraplén con manta de refuerzo vegetal y Hidrosiembra (SbN) para los taludes, asegurando la estabilidad geotécnica de la estructura y promoviendo la integración paisajística y la protección contra la erosión superficial. Este diseño se debe validar mediante un estudio de diseño de factibilidad. se establece como la estrategia estructural más viable y efectiva para la mitigación del riesgo en zonas pobladas, como Licantén urbano, Calpún, Paraguay, Quelmén y Lora. Esta solución tiene un impacto directo y significativo al proteger las edificaciones e infraestructura esencial de ser alcanzadas por las crecidas, las alturas de estas construcciones son variables dependiendo de la localidad, pero sus alturas máximas varían entre 3 a 7 metros. En contraste las medidas morfológicas resultaron ser inviables o ineficaces a la escala del río Mataquito como ya se mencionó en el Capítulo 4.8.

El proyecto de terraplén propuesto para Licantén (con una longitud aproximada de 5 km) se clasifica como "NO SEIA" (no requiere ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental). Esta característica permite anticipar una mayor celeridad y menor complejidad en la fase de tramitación e implementación de la obra.

Finalmente notar que la principal dificultad y condicionante técnica para la implementación del terraplén radica en el manejo de las aguas interiores del área protegida. Específicamente en Licantén, es imprescindible resolver la gestión de las aguas provenientes de las cuencas en la cabecera (con un área aportante estimada de 14.58 km²). La viabilidad final y el éxito de la obra dependen de un estudio de factibilidad que evalúe la integración de un sistema de drenaje y manejo de escorrentía superficial que evite que el terraplén, al contener el río, genere simultáneamente inundaciones por retención de las aguas lluvias detrás de la estructura.

Se elaboraron los mapas de amenazas por inundación para distintos períodos de retorno, entre 2 y 100 años. Estos mapas constituyen un insumo fundamental para que los organismos competentes puedan desarrollar los mapas de riesgo por crecidas. Dicha información servirá de base para la construcción de instrumentos de planificación territorial, la implementación del Sistema de Alerta Temprana (SAT) y el establecimiento de sectores de evacuación. (incluidos en ANEXO F.2 - MEDIDAS_NO_ESTRUCTURALES)

Este estudio proporciona los antecedentes técnicos esenciales para la formulación del SAT. Además de los mapas de inundación y amenaza, pueden ser un buen complemento con los umbrales meteorológicos definidos en el estudio del DICTUC (DICTUC, 2024).

Recomendaciones.

- Retiro del material vegetal acumulado alrededor de las cepas del Puente Lautaro para reducir la obstrucción, disminuir las alturas de escurrimiento y aliviar los esfuerzos sobre la estructura.
- Considerar el monitoreo o evaluación detallada del Puente Lautaro, dada su clasificación como estructura crítica.
- Las obras de mitigación deben prioritariamente las zonas con la mayor concentración de riesgo, es decir, las que presentan el mayor número de edificaciones y/o infraestructura esencial afectada: Licantén Urbano, Calpún, Lora, Quelmén y Paraguay.
 - Las localidades con más edificaciones afectadas por las inundaciones son Licantén urbano, Calpún, Paraguay, Quelmén y Lora. Del total de edificaciones afectadas para crecidas con periodo de retorno asociado a 100 años (1605 unidades), el 57% se encuentra en Licantén Urbano, un 15% en Calpún, un ~11% en Lora, un ~4% en Paraguay y Quelmén, las demás localidades representan un 8% de las edificaciones afectadas.
 - En relación con la infraestructura esencial, en Licantén de 21 unidades identificadas que 13 son afectadas, en Calpún 1 de 2 (Escuela Juan Jesús Gonzales Avendaño), en Quelmén 1 de 1 (Subestación de energía Licantén), en Lora 1 de 3 (Servicio Sanitario Rural Lora) y 2 de 3 en La Orilla (Servicio Sanitario Rural La Orilla y Escuela La Orilla).
- Para la implementación de cualquiera de los terraplenes propuestos, es imprescindible resolver la gestión de las aguas provenientes de las cuencas en la cabecera con un estudio específico.
- Utilizar los mapas de amenaza como insumo para la formulación del SAT, gestión y/o Planificación territorial, desarrollo urbano, gestión del riesgo por inundación y emergencias, entre otros.

8. REFERENCIAS

- Aguilar Umaña, I. (2007). *Más vale prevenir que lamentar, Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Guatemala.
- AIDR. (2017). *Guideline 7-3: Flood hazard. In Australian Disaster Resilience Handbook 7: Managing the floodplain: A guide to best practice in flood risk management in Australia (2nd ed.)*. Melbourne.
- Aquaterra ingenieros Ltda. (2012). *Estudio hidrogeológico cuenca del río Mataquito*. Santiago: MOP Dirección General de Aguas.
- Bozkurt et al. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios.
- Brownlie, W. (1981). *Compilation of Alluvial Channel Data: Laboratory and Field. California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, CA, USA., KH-R-43*.
- Caro, R. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Informe final*. Chile: Dirección General de Aguas- CADE-IDEPE.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (FONDAP 15110009). (2018). *Guía de referencia para la plataforma de visualización de simulaciones climáticas*. Ministerio del Medio Ambiente.
- Centro de Información de Recursos Naturales. (2021). *Recursos naturales comuna de Licantén*.
- Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental Universidad de Talca. (2017). *Estudio básico diagnóstico para desarrollar plan de riego cuenca del Mataquito*. Comisión Nacional de Riego.
- CEPAL. (2009). *Economía del Cambio Climático en Chile: Síntesis*.
- CIGIDEN. (2023). *Inundaciones 21-26 junio 2023. Cuencas del río Mataquito y río Maule (Región del Maule)*.
- CONAF. (2018). *Catastro Recursos Vegetacionales por Región*. Obtenido de Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de bosque nativo en la Región del Maule. Año 2016: <https://sit.conaf.cl/>
- CONAF. (2018). *Catastro Recursos Vegetacionales por Región*. Obtenido de Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de bosque nativo en la Region del Maule: <https://sit.conaf.cl>
- D'Ambrosio, R., Balbo, A., Longobardi, A., & Rizzo, A. (2022). Re-think urban drainage following a SuDS retrofitting approach against. *Urban Forestry & Urban Greening*, 1-17.
- D'Ambrosio, R., Longobardi, A., & Schmalz, B. (2023). SuDS as a climate change adaptation strategy: Scenario-based analysis for an urban catchment in northern Italy. *Urban Climate*, 1-18.
- DEFRA, & Wallingford, H. (2006). *Fluvial design guide: Chapter 5 – Assessing fluvial geomorphology. Department for Environment, Food and Rural Affairs*.
- Demaria et al. (2013). Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story? *Journal of Hidrology*.

- Demaria et al. (2013). Using a Gridded Global Dataset to Characterize Regional Hydroclimate.
- Deuman. (2018). *Diagnóstico de la vulnerabilidad de las obras del MOP y medidas de adaptación al cambio climático*. Ministerio de Obras Públicas. Santiago.
- DGA. (1991). *Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días*. MOP.
- DGA. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica*. MOP.
- DGA. (2024). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea*. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- DGA. (2024). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea*. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>.
- DICTUC. (2024). *ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACIONES Y CRECIDAS DE RÍOS OCURRIDOS EN JUNIO Y AGOSTO DE 2023 EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE*. Santiago.
- Dirección General de Aguas. (1991). *Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días*. MOP.
- DMC. (2020). *Climatología y tendencia de la altura de la isoterma cero*.
- DOH. (2002). *Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Curico, Sarmiento y Romeral*. MOP.
- Einstein, H. A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. (No. 1026). US Department of Agriculture.
- EVERIS CHILE S.A. (2017). *Plan maestro de los recursos hídricos región del Maule*. Dirección General de Aguas. Talca.
- FAO. (2023). *El estado de la alimentación y la agricultura: Gestión integrada de los recursos hídricos*. Roma.
- García Peña, A. (2007). *Medidas Estructurales y medidas no estructurales de defensa frente a las inundaciones*.
- Gobierno regional del Maule. (2023). *Estrategia regional de desarrollo Maule 2042*. Gobierno regional del Maule.
- Hinwood, J. B., & McLean, E. J. (2018). Tidal inlets and estuaries: Comparison of Bruun, Escoffier, O'Brien and attractors. *Coastal Engineering*, 92-105.
- Hinwood, J. B., McLean, E. J., & Wilson, B. C. (2012). Non-linear dynamics and attractors for the entrance state of a tidal estuary. *Coastal Engineering*, 20-26.
- I.M.Licantén, C. B. (2012). *Informe de Evaluación Ambiental Estratégica Plan Regulador Comunal de Licantén*.
- IANIGLA-CONICET-CR2, I. A.-C. (2024). *Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile*. Obtenido de <https://observatorioandino.com/nieve/>
- IDECHILE. (2024). *Infraestructura de Datos Espaciales del Ministerio de Bienes Nacionales*. Obtenido de <https://www.ide.cl/>
- INE. (2019). *Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 2022-2035 a nivel comunal*. Documento metodológico.
- Ingeniería, D. -P. (2003). *Plan Maestro de Manejo de Cauces Cuenca del Río Mataquito, VII Región*.

- INH. (2024). *Etapa 2 - Diagnóstico Hidráulico Río Mataquito, Licantén a desembocadura, Región del Maule*. DOH.
- Instituto Nacional de Hidráulica. (1999). *Mejoramiento de las desembocaduras del estero Marga-Marga y de los ríos Mataquito, Carampangue y Queule*. Dirección de Obras Portuarias.
- Leroy, A. (2022). *TELEMAC-3D Theory guide* (Vol. telemac3d_theory_guide_v8p4). TELEMAC. Obtenido de <http://www.opentelemac.org/index.php/kunena/10-documentation>.
- Li, Z., Zhou, Z., Wang, H., Li, X., Shi, X., Xiao, J., . . . H, J. (2025). Artificial intelligence-incorporated prediction for urban flooding processes in the past 20 years: A critical review. *Environmental Modelling & Software*.
- MC V3. (2022). *Manual de Carreteras - Instrucciones y criterios de diseño* (Vol. 3). Santiago: Dirección de Vialidad.
- Mexico, G. d. (s.f.). *Marco de referencia del problema de las inundaciones en el país y las obras de protección*.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *International Association for Hydraulic Research, Int. Assoc. for Hydraul. Res., Stockholm*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2024). *Sistema de información y monitoreo de biodiversidad (SIMBIO)*. Obtenido de <https://simbio.mma.gob.cl/>
- MINVU. (2024). *PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE RIESGO DE LOS PLANES REGULADORES DEL NIVEL COMUNAL E INTERCOMUNAL*.
- MMA. (2025). *Guía para incorporar soluciones basadas en la naturaleza en los planos de adaptación al cambio climático en Chile*. Santiago.
- MOP. (2013). *Manual de drenaje urbano*.
- MOP, Ministerio de Obras Públicas. (1986). *Mapa Hidrogeológico de Chile*. Dirección General de Aguas.
- MOP-DOH VII Region. (2003). *Plan Maestro de Manejo de Cauces Cuenca río Mataquito. VII Región*.
- Niño, Y., & Garcia, M. (1998). Using Lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modelling. *Hydrological Processes*, 12(8), 1197-1218.
- NOOA. (2012). *Guía para la operación del sistema de alerta temprana frente a inundaciones Protocolo de actuación SAT municipio de El Seibo - municipio de Miches*. Republica Dominicana.
- OMM. (2024). *Ficha informativa*.
- ONEMI. (2020). *Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres- Plan Estratégico Nacional 2020-2030*.
- Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., . . . Dittborn, R. &. (2020). *Atlas de Riesgo Climático para Chile*.
- Pizarro, R., Aravena, D., Macaya, K., Abarza, A., Cornejo, M., Labra, M., Pavez, M., Arellando, L. (2007). *Curvas intensidad - duración - frecuencia para la zona centro sur de Chile*.
- Prisma Ingeniería, L. (2003). *Plan Maestro de manejo de cauces cuenca río Mataquito*. Santiago.

- Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *Catana*, 169-199.
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023). *Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico*.
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023). *Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico*. Primera Edición.
- Shields, I. (1936). Anwendung der ahnlichkeitmechanik und der turbulenzforschung auf die gescheibebewegung. *Mitt. Preuss Vers. Wasserbau Schiffbau*,, 5-24.
- Tapia, G. (2014). *Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile*. DGA. Santiago.
- UNESCO. (2011). *Introduction Booklet: Parentig Education Guidebook*.
- UNISDR. (2016). *Annual Report*.
- UTP HIDROGESTIÓN S.A.- NTT DATA CHILE S.A. (2022). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del río Mataquito*. Dirección General de Aguas. Santiago.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1456.
- Van Rijn, L. C. (2003). Longshore sand transport. In *Coastal Engineering 2002: Solving Coastal Conundrums*, 2439-2451.
- Vialidad, D. (2022). *Manual de Carreteras. Volumen N°2. Procedimientos de estudios viales*. Santiago.
- Vialidad, D. (2022). *Manual de Carreteras. Volumen N°3. Instrucciones y criterios de diseño*. Santiago.

9. ANEXOS

ANEXO A. TOPOGRAFIA

ANEXO B. GEOMORFOLOGIA

ANEXO C. HIDROLOGIA

ANEXO D. HIDRAULICA

ANEXO E. PROPOSICION DESLINDES

ANEXO F. MEDIDAS

ANEXO G. INFORME POR ETAPA

ANEXO H. ANTECEDENTES

ANEXO I. GIS

ANEXO J. PLANOS