

REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION DE OBRAS PORTUARIAS



**“ANÁLISIS HIDRÁULICO DESEMBOCADURA RÍO ITATA,
COMUNAS DE TREHUACO Y COELEMU – REGIÓN DEL
ÑUBLE”**

**ETAPA 2
MODELACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y
ANÁLISIS CONCEPTUAL DE SOLUCIÓN**

INFORME FINAL

FEBRERO 2020

GSI PU201901



INGENIERIA

LOS CASTAÑOS Nº 199
FONO (32) 2177020 - FAX (32) 2177048
Viña del Mar
e-mail: gsi@gsi.cl
web: www.gsi.cl





Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

ANÁLISIS HIDRÁULICO DESEMBOCADURA RÍO ITATA, COMUNAS DE TREHUACO Y COELEMU REGIÓN DEL ÑUBLE

ETAPA 2

DICIEMBRE 2019

CONTROL INTERNO

Rev.	Elaboró			Revisó			Aprobó			Observaciones
	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	
A	NMB									
B	NMB GRTL JGM	15.10.19		LAMM HBV	16.10.19		HVB	17.10.19		Entrega Cliente
C	NMB GRTL JGM	27.12.19		LAMM HBV	27.12.19		HVB	27.12.19		Atiende Observaciones
CLIENTE: MOP UNIDAD: DOP							CÓDIGO PROYECTO: PU201901			

CONTENIDO	ÍNDICE	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN	1	1
2. VISIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	2	2
3. HIDROLOGÍA FLUVIAL	5	5
3.1 Criterios de análisis	5	5
3.2 Estadística fluviométrica.....	7	7
3.3 Estadística pluviométrica.....	12	12
3.4 Correlación entre estaciones fluviométricas	18	18
3.5 Correlación de estaciones Pluviométricas con estaciones Fluviométricas.....	25	25
3.6 Evolución temporal de la barra	28	28
3.7 Análisis sedimentométrico.....	34	34
3.8 Hidrograma de Crecidas de Diseño	38	38
3.9 Conclusiones	40	40
4. MODELACIÓN NUMÉRICA CUERPO MARÍTIMO	41	41
4.1 Estudio de Oleaje	41	41
4.2 Mareas.....	42	42
4.3 Modelación hidrodinámica.....	42	42
4.3.1 Situación Actual.....	42	42
4.3.2 Situación con Obras	45	45
4.4 Transporte de sedimentos.....	47	47
4.4.1 Situación Actual.....	47	47
4.4.2 Situación con Obras	48	48
4.4.3 Conclusiones y Recomendaciones Estudios Marítimo	49	49
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL CUERPO FLUVIAL	51	51
5.1 Antecedentes para la modelación	51	51
5.2 Descripción del modelo	51	51
5.2.1 Área de estudio y generación de malla	51	51
5.2.2 Coeficientes de Manning.....	54	54
5.2.3 Condiciones de borde	56	56
5.3 Calibración de parámetros	56	56
5.3.1 Mayo 2019.....	56	56
5.3.2 Junio 2015.....	62	62
5.3.3 Conclusiones de calibración.....	67	67
5.4 Diagnóstico.....	68	68
5.4.1 Variable 1: Nivel inicial de la laguna	68	68
5.4.2 Variable 2: Efecto de amortiguación de la laguna	70	70
5.4.3 Variable 3: Apertura de la barra	75	75
5.4.4 Variable 4: Hidrogramas de crecida.....	76	76
5.4.5 Conclusiones del diagnóstico.....	76	76
6. DESARROLLO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN	78	78
6.1 Requerimientos Participación Ciudadana y la DOP	78	78
6.2 Alternativa 1	78	78
6.3 Alternativa 2	82	82
6.4 Alternativa 3	86	86
6.5 Presupuestos Estimativos	87	87
6.5.1 Alternativa 1	87	87
6.5.2 Alternativa 2	88	88

6.5.3 Alternativa 3	89
7. ANÁLISIS DE EFECTOS DE LA SOLUCIÓN (AMBIENTAL).....	90
8. PARTICIPACIÓN CIUDADANA DE TÉRMINO	93
9. REVISIÓN PR ENTREGADO POR LA DOP.....	97
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103

ANEXOS

ANEXO Nº 1	PARTICIPACIÓN CIUDADANA CON ENFOQUE DE GÉNERO
ANEXO Nº 2	ESTADÍSTICA DE PRECIPITACIONES Y CAUDALES
ANEXO Nº 3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO
ANEXO Nº 4	IMÁGENES SATELITALES
ANEXO Nº 5	ESTUDIOS MARÍTIMOS
ANEXO Nº 6	ANÁLISIS AMBIENTAL
ANEXO Nº 7	CUBICACIONES
ANEXO Nº 8	PRESUPUESTOS
ANEXO Nº 9	MINUTAS TÉCNICAS
ANEXO Nº 10	MINUTAS DE REUNIONES

CUADROS

CONTENIDO	PÁG.
Cuadro N° 3.1: Caudales medios mensuales río Itata en Desembocadura.....	8
Cuadro N° 3.2: Caudales máximos instantáneos estación Río Itata en Coelemu	9
Cuadro N° 3.3: Caudales máximos de crecida [m ³ /s]	12
Cuadro N° 3.4: Precipitación máxima diaria (TR=10 años), estaciones en cuenca del río Itata	17
Cuadro N° 3.5: Desfase temporal entre estaciones. Crecida 6 de Junio del 2015	19
Cuadro N° 3.6: Dimensiones apertura de barra	30
Cuadro N° 3.7: Resumen de gasto sólido anual, estación Río Itata en Coelemu.....	35
Cuadro N° 3.8: Resumen de gasto sólido mensual, estación Río Itata en Coelemu.....	36
Cuadro N° 3.9: Ejemplo de cálculo del gasto sólido en estación Río Itata en Coelemu.....	37
Cuadro N° 3.10: Caudales máximos de crecida [m ³ /s].....	38
Cuadro N° 4.1: Valores no armónicos de la marea, Coliumo.....	42
Cuadro N° 4.2: Casos a modelar con obra.....	46
Cuadro N° 5.1: Coeficientes de Manning adoptados	54
Cuadro N° 5.2: Coeficientes de Manning sensibilizados.....	60
Cuadro N° 5.3: Análisis de sensibilidad para coeficientes de Manning adoptados	62
Cuadro N° 5.4: Resumen Verificación Incidencia Nivel Inicial de la "Laguna"	69
Cuadro N° 5.5: Resumen de Corridas Capacidad de Amortiguación "Laguna".....	74
Cuadro N° 5.6: Resumen de Corridas Capacidad de Amortiguación "Laguna".....	74
Cuadro N° 5.7: Resultados de Modelación con HEC-RAS 2D – TR2 Feb-Jun – Apertura 500m.....	75
Cuadro N° 5.8: Resultados de modelación con HEC-RAS 2D – Variación Barrera-con OF-A... 76	76
Cuadro N° 6.1: Relación fluviometría varias estaciones c/r a estación Coelemu	79
Cuadro N° 6.2: Caudales de alerta para 770 m ³ /s en desembocadura	80
Cuadro N° 6.3: Resumen de Obras Propuestas Alternativa 2	82
Cuadro N° 6.4: Caudales y tiempos de alerta para 2900 m ³ /s en desembocadura.....	82
Cuadro N° 8.1: Participantes en Reunión PAC con Enfoque de Género.....	94
Cuadro N° 8.2: Requerimientos Ciudadanos	95
Cuadro N° 9.1: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.....	97
Cuadro N° 9.2: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.....	97
Cuadro N° 9.3: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.....	98
Cuadro N° 9.4: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.....	98
Cuadro N° 9.5: Diferencias de desnivel entre vértices (Etapa I)	99
Cuadro N° 9.6: Diferencias de desnivel entre vértices (Etapa II).....	101
Cuadro N° 10.1: Resumen de Obras Propuestas Alternativa 2.....	103

FIGURAS

CONTENIDO	PÁG.
Figura N° 1.1: Desembocadura del río Itata.....	1
Figura N° 2.1: Registro de Caudal máximo, junio de 2015.....	4
Figura N° 3.1: Red Hidrométrica	6
Figura N° 3.2: Caudales instantáneos en Coelemu y Trehuaco.....	7

Figura N° 3.3:	Análisis comparativo de distribuciones - Caudales máximos, periodo Febrero-Junio en estación Itata en Coelemu.....	10
Figura N° 3.4:	Ajuste distribución Gumbel, Caudales máximos periodo febrero-junio en estación Itata en Coelemu	11
Figura N° 3.5:	Ajuste distribución Gumbel, Caudales máximos anuales en estación Itata en Coelemu.....	12
Figura N° 3.6:	Precipitación anual cuenca Río Itata en Coelemu.....	13
Figura N° 3.7:	Precipitación media Chillán.....	14
Figura N° 3.8:	Curvas isoyetas PP máx. diaria TR=10 años, cuenca del río Itata	16
Figura N° 3.9:	Caudales Instantáneos en Coelemu, Paso Hondo y Balsa Nueva Aldea, 6/2015	18
Figura N° 3.10:	Caudales máximos de crecidas en Coelemu y Paso Hondo.....	19
Figura N° 3.11:	Desfase horario entre Paso Hondo y Coelemu según el caudal máximo	20
Figura N° 3.12:	Desfase temporal entre Coelemu y desembocadura según el caudal máximo.....	21
Figura N° 3.13:	Desfase horario entre Paso Hondo y desembocadura según el caudal máximo.....	21
Figura N° 3.14:	Caudales máximos de crecidas en Coelemu y General Cruz	22
Figura N° 3.15:	Desfase horario entre General Cruz y Coelemu según el caudal máximo	22
Figura N° 3.16:	Desfase temporal entre General Cruz y desembocadura según el caudal máximo.....	23
Figura N° 3.17:	Caudales máximos de crecidas en Coelemu y Balsa Nueva Aldea.....	24
Figura N° 3.18:	Desfase temporal entre Balsa Nueva Aldea y desembocadura según el caudal máximo	24
Figura N° 3.19:	Precipitación v/s Escorrentía Mangarral-Coelemu	25
Figura N° 3.20:	Precipitación v/s Escorrentía Millauquén-Coelemu	26
Figura N° 3.21:	Precipitación v/s Escorrentía Caracol-Coelemu	26
Figura N° 3.22:	Precipitación v/s Escorrentía Diguillín-Coelemu.....	27
Figura N° 3.23:	Precipitación v/s Escorrentía Nueva Aldea-Coelemu.....	27
Figura N° 3.24:	Imágenes satelitales LANDSAT en sector de estudio	29
Figura N° 3.25:	Apertura de la barra según el mes.....	31
Figura N° 3.26:	Apertura de la barra y caudal. Año 2012	32
Figura N° 3.27:	Apertura de la barra y caudal. Año 2013	32
Figura N° 3.28:	Apertura de la barra y caudal. Año 2014	32
Figura N° 3.29:	Apertura de la barra y caudal. Año 2015	33
Figura N° 3.30:	Apertura de la barra y caudal. Año 2016	33
Figura N° 3.31:	Apertura de la barra y caudal. Año 2017	33
Figura N° 3.32:	Apertura de la barra y caudal. Año 2018	34
Figura N° 3.33:	Relación gasto sólido v/s gasto líquido, estación Río Itata en Coelemu	36
Figura N° 3.34:	Correlación de gasto sólido v/s gasto líquido, estación Río Itata en Coelemu.....	37
Figura N° 3.35:	Hidrogramas de diseño.....	39
Figura N° 3.36:	Curvas de variación estacional de caudales mensuales en m ³ /s Río Itata (en Coelemu)	39
Figura N° 4.1:	Ubicación del Nodo de Olas Chile V, Río Itata	41
Figura N° 4.2:	Resultado corrientes río Itata – Situación Actual.....	43
Figura N° 4.3:	Comparación global HEC-RAS v/s MIKE 21 – evento mayo 2019	44
Figura N° 4.4:	Comparación global HEC-RAS v/s MIKE 21 – evento mayo 2019	45
Figura N° 4.5:	Resultados corrientes río Itata – Situación con Obras	47
Figura N° 4.6:	Resultados transporte de sedimentos río Itata – Situación actual	48
Figura N° 4.7:	Resultado Transporte de Sedimentos Caso 1	49
Figura N° 5.1:	Malla modelo HEC-RAS 2D desembocadura.....	52

Figura N° 5.2:	Malla irregular modelo HEC-RAS 2D. Sector Bodega.....	53
Figura N° 5.3:	Tipos de suelo identificados.....	55
Figura N° 5.4:	Condición de borde aguas arriba. Marea Mayo 2019.....	57
Figura N° 5.5:	Condición de borde aguas abajo. Marea Mayo 2019.....	57
Figura N° 5.6:	Máxima mancha de inundación Mayo 2019 en la desembocadura	59
Figura N° 5.7:	Máxima mancha de inundación Mayo 2019. Sector Bodega	60
Figura N° 5.8:	Eje hidráulico en Mayo 2019 para distintos Mannings	61
Figura N° 5.9:	Eje hidráulico desembocadura en Mayo 2019 para distintos Mannings	62
Figura N° 5.10:	Condición de borde aguas arriba. Junio 2015	63
Figura N° 5.11:	Condición de borde aguas abajo. Marea Junio 2015	63
Figura N° 5.12:	Estado de la barra antes y después crecida Junio 2015.....	64
Figura N° 5.13:	Máxima mancha de inundación Junio 2015 en la desembocadura. Apertura pequeña	65
Figura N° 5.14:	Máxima mancha de inundación Junio 2015 en la desembocadura. Apertura mayor.	66
Figura N° 5.15:	Mapa de Froude en la descarga alternativa. 5 de junio del 2015 17:00.....	67
Figura N° 5.16:	Curva de capacidad Laguna	69
Figura N° 5.17:	Modelación Simplificada Caso 1	70
Figura N° 5.18:	Modelación Simplificada Caso 2.....	71
Figura N° 5.19:	Modelación Simplificada Caso 3.....	71
Figura N° 5.20:	Modelación Simplificada Caso 4.....	72
Figura N° 5.21:	Modelación Simplificada Caso 5.....	72
Figura N° 5.22:	Modelación Simplificada Caso 6.....	73
Figura N° 5.23:	Modelación Simplificada Caso 7	73
Figura N° 6.1:	Protocolo Apertura Barra – Alternativa 1	81
Figura N° 6.2:	Obras de protección Alternativa 2.....	83
Figura N° 6.3:	Velocidades en el sector de la obra fluvial OF-A para T2 (Feb-Jun).....	84
Figura N° 6.4:	Protocolo Apertura Barra – Alternativa 2	85
Figura N° 6.5:	Layout Alternativa 3 y Corte sector Cabezo	86
Figura N° 9.1:	Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de procesamiento GPS modo Estático	98
Figura N° 9.2:	Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de la verificación GPS modo RTK (Etapa I).....	99
Figura N° 9.3:	Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de procesamiento GPS modo Estático	100
Figura N° 9.4:	Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de procesamiento GPS modo RTK (Etapa II).....	100
Figura N° 9.5:	Esquema de Reducción de Mareas.....	101
Figura N° 9.6:	Comparación Mareas medidas y Mareas SHOA.....	102

FOTOGRAFÍAS

CONTENIDO	PÁG.
Fotografía N° 2.1: Inundación sector norte - Boca de Itata.....	2
Fotografía N° 2.2: Ribera erosionada sector norte - Boca de Itata.....	3
Fotografía N° 7.1: Algunas de las actividades económicas identificadas en las riberas de la desembocadura del río Itata.	91

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas, ha contratado los servicios de GSI Ingenieros Consultores Ltda., para la ejecución del proyecto “Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comuna de Trehuaco y Coelemu, Región del Ñuble”. El objetivo de la Consultoría es realizar los estudios de condiciones naturales del sistema perteneciente a la desembocadura del río Itata, con el fin de analizar la situación existente y proponer soluciones a nivel conceptual por las inundaciones que se producen en ciertas épocas del año.

En la actualidad, algunos sectores ribereños (Boca y Vegas de Itata) se ven afectados por inundaciones en predios agrícolas generalmente en períodos de verano, producto del cierre natural de la barra arenosa (playa) ubicada en la desembocadura del río.

Para cumplir con el objetivo planteado se recurrió a una campaña de terreno consistente en el levantamiento de perfiles topobatemétricos del río Itata y de su desembocadura, junto con la toma de muestras de sedimentos, con el fin de caracterizar la granulometría del área de estudio. Junto con lo anterior, se estudió la información perteneciente al río Itata referente a su hidrología en base a la información proporcionada por la Dirección General de Aguas (en adelante DGA).

Con toda esta información se proponen escenarios para las modelaciones numéricas desarrolladas, en base al estudio hidrológico del río Itata.

Figura N° 1.1: Desembocadura del río Itata



Fuente: Elaboración propia.

2. VISION DE LA PROBLEMÁTICA

El río Itata atraviesa la región del Ñuble en una longitud aproximada de 140 km, llevando consigo un caudal medio de $180 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. El estudio en comento, busca estudiar las condiciones naturales de la desembocadura de este río, con el fin de caracterizar su hidrodinámica e hidrología y así estudiar posibles soluciones sobre las inundaciones que acontecen en la zona cercana a la desembocadura.

Actualmente los sectores de Vegas de Itata, perteneciente a la comuna de Coelemu y Boca de Itata, perteneciente a la comuna de Trehuaco, sufren de las inundaciones producto de las crecidas del río y del cierre simultáneo de la desembocadura por la barra de arena. Los predios inundados principalmente tienen un carácter agrícola (cultivo de papas) y en menor medida, viviendas de los vecinos del sector.

La información recopilada, junto con el estudio de antecedentes, da cuenta que las inundaciones se producen principalmente en épocas de verano-otoño cuando el río baja su caudal. En efecto, se produce un aumento en la altura de la barra arenosa en período de bajo caudal, provocando un cierre de ésta debido a la alta tasa de transporte de sedimentos que se da en el sector.

En visita a terreno efectuada el 11 de abril de 2019, fue posible identificar problemas de erosión en ribera norte (Boca de Itata) producto de aumentos en el caudal (mayor velocidad) y las inundaciones antes comentadas.

Fotografía N° 2.1: Inundación sector norte - Boca de Itata



Fuente: www.vigilantecostero.cl

Fotografía N° 2.2: Ribera erosionada sector norte - Boca de Itata



Fuente: Terreno GSI

Uno de los casos con mayor cantidad de antecedentes corresponde a la inundación de 06 de junio de 2015. Para ello se cuenta con información entregada por la I. Municipalidad de Coelemu y la DOP.

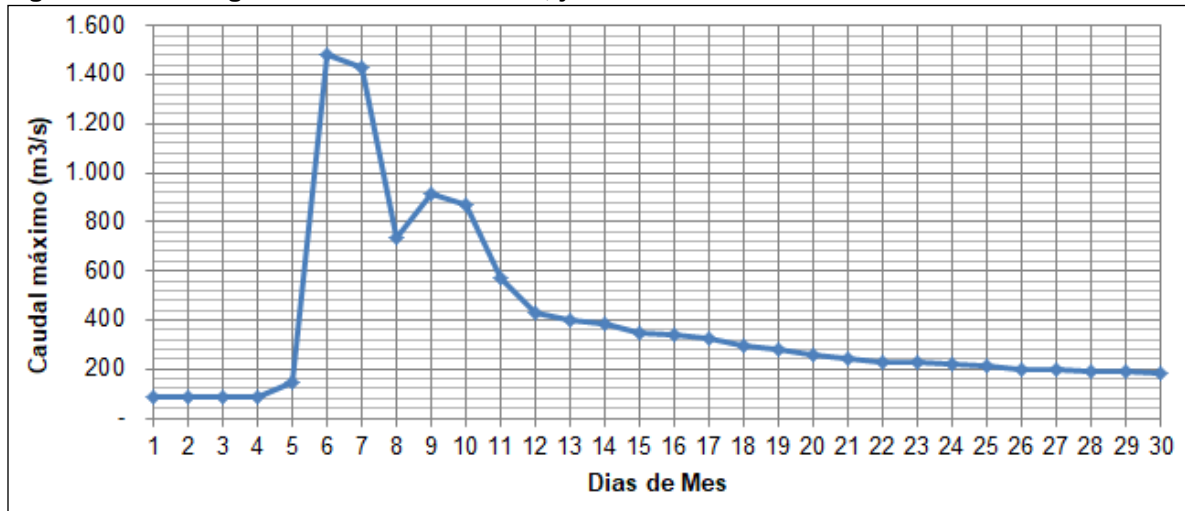
En dichos antecedentes, se señala que personal de la DOP visitó el sector de estudio el viernes 05 de junio de 2015, constatando que existía una pequeña abertura en la barra por el sector de Trehuaco. Una descripción importante a destacar es la siguiente:

“Ese día se visitó con la presencia de los dirigentes don Omar Gutiérrez y don Segundo Cisterna y de Gonzalo Suazo encargado de emergencia de la Municipalidad de Coelemu y telefónicamente con la Municipalidad de Trehuaco, y se constató que ya estaba coordinada la presencia de una excavadora para abrir la barra para el lunes 8 de Junio a las 8:30 hrs a través de la Municipalidad de Trehuaco, mediante financiamiento de la Celco. Se llegó al acuerdo con todas las personas presentes en la desembocadura, que no habría problemas de esperar hasta el lunes la disponibilidad de esta excavadora

gestionada por la Municipalidad de Trehuaco, ya que con el caudal de agua que había hasta esa hora no se preveían mayores problemas de inundación en la desembocadura”.

En la Figura N° 2.1 se muestra el registro de caudal máximo por día medido en la estación DGA en Coelemu. Esta estación se ubica a unos 20 km aguas arriba de la desembocadura.

Figura N° 2.1: Registro de Caudal máximo, junio de 2015



Fuente: Elaboración propia con información de la DGA.

La figura muestra un aumento considerable entre el día 5 y 6 de junio, que fue el factor que produjo la inundación. Según los registros se observa un aumento de aproximadamente **1.000 m³/s** en menos de 24 horas. Esta condición natural, sumada a que la barra se encontraba cerrada (salvo una pequeña abertura en Trehuaco), generó una condición de emergencia en los sectores ribereños.

Por lo tanto, existen dos efectos que se estudian en esta Consultoría, uno correspondiente al mecanismo natural del cierre de la barra (dinámica de la playa) y el otro respecto al estudio de los máximos asociados a aumentos de caudales en tramos cortos de tiempo. Lo anterior se estudia con base en información de algunas estaciones de la DGA ubicadas aguas arriba de la zona de estudio. Importante será definir el tiempo en que se produce la lluvia en la cuenca hidrográfica y cómo este aporte de caudal llega a la desembocadura. Paralelo a aquello, se estudia el comportamiento de la barra arenosa en condiciones medias y extremas de oleaje, para conocer aquellos estados de mar que provocan la acumulación de sedimentos.

3. HIDROLOGÍA FLUVIAL

3.1 Criterios de análisis

En la cuenca del río Itata existen 27 estaciones pluviométricas, 20 estaciones fluviométricas y 7 estaciones sedimentométricas. En el análisis de la etapa previa de este estudio se determinó que la estación Río Itata en Coelemu, ubicada aproximadamente a 24 Km aguas arriba de la barrera, refleja de buena forma los caudales que fluyen por la desembocadura del río.

Se realiza un análisis estadístico con los caudales de dicha estación además de estudiar correlaciones con otras estaciones ubicadas más lejanas hacia aguas arriba y que provean por lo tanto más tiempo de reacción.

Se analiza la correlación entre estaciones fluviométricas por una parte, que aportarían información del caudal pasante en el curso fluvial medido, y que por lo tanto representa una situación de hecho, con un tiempo de reacción disponible equivalente al tiempo que demora en llegar el pulso de crecida al sector de la desembocadura.

Con relación a la precipitación, sin embargo, podría disponerse de una predicción (pronóstico del tiempo) que pueda otorgar más tiempo para reaccionar (abrir la barrera).

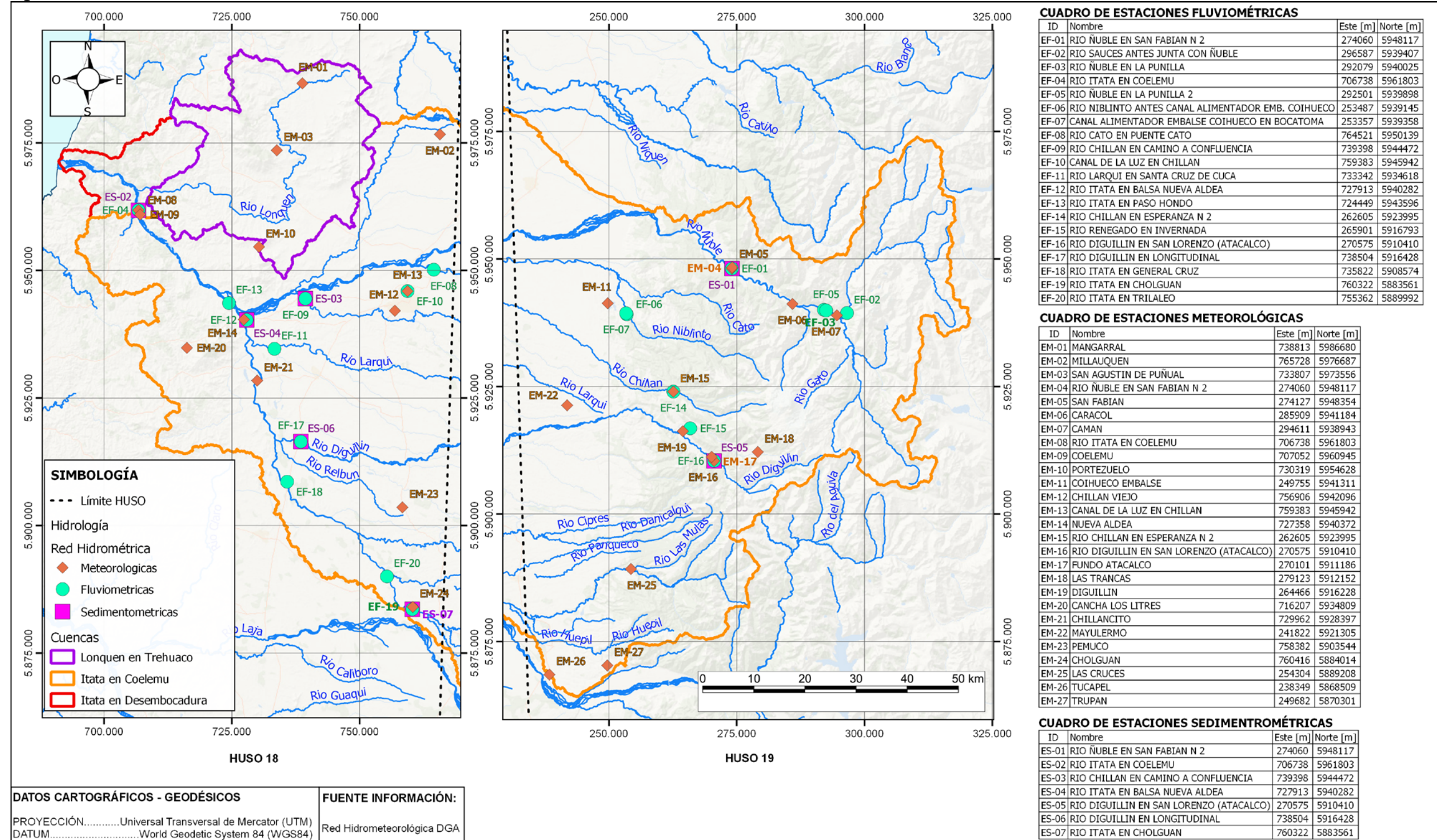
En consecuencia, con el fin de asociar los caudales máximos de crecida con un pronóstico meteorológico con mayor tiempo de previsión, fue necesario relacionarlos con los milímetros de agua caída en alguna(s) estación(es) representativa(s) de interés de la cuenca.

Además, para analizar la variabilidad y formación de la barra se analizó su evolución en el tiempo a partir de las fotos satelitales disponibles.

Finalmente, se realizó un análisis estadístico con la estaciones sedimentométricas.

Las estaciones donde existe información estadística para todas estas variables se presentan en la Figura N° 3.1.

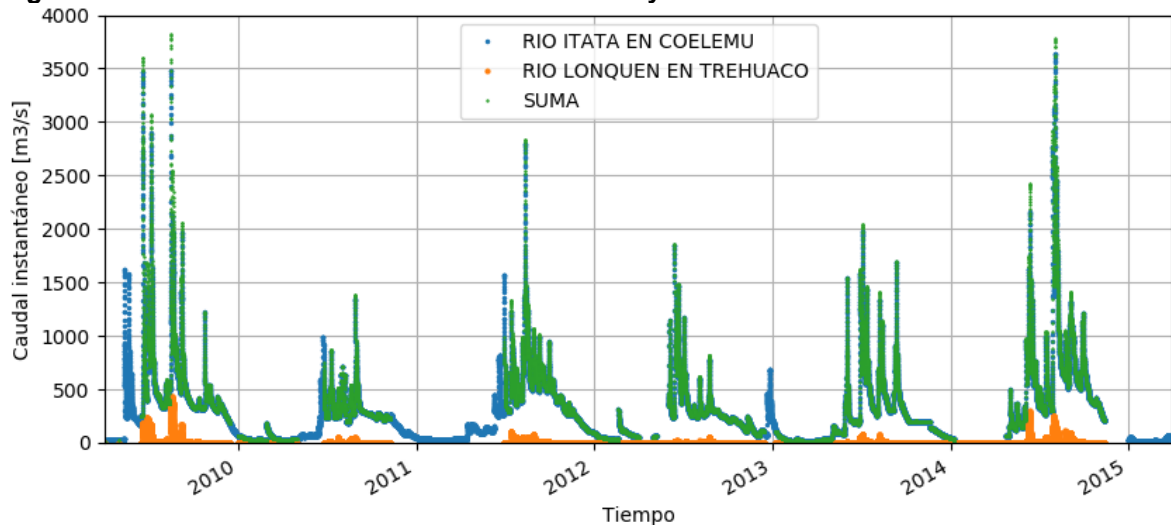
Figura N° 3.1: Red Hidrométrica



3.2 Estadística fluviométrica

En la etapa previa del estudio se destacó que la estación fluviométrica que mejor caracteriza el caudal en la zona de estudio es la estación “Río Itata en Coelemu” ubicada 24 km aguas arriba de la desembocadura. Si bien no incluye la cuenca de Trehuaco, se ha determinado que el aporte de dicha cuenca, además de estar desfasado, sólo representa en torno a un 4% de los caudales medios anuales. Si se comparan los caudales instantáneos en un año en particular se observa (Figura N° 3.2) que los aportes en el periodo de estudio son aún menores que los aportes en escala anual ya que en ciertos periodos no hay cota suficiente para registrar un valor.

Figura N° 3.2: Caudales instantáneos en Coelemu y Trehuaco



Fuente: Elaboración propia con base en estadística de caudales en estación Río Itata en Coelemu

Para estudiar la variabilidad estacional, se calcularon los caudales medios mensuales del punto de control de río Itata en Desembocadura. Los valores se presentan en el siguiente cuadro ordenados según el año hidrológico, entre los meses de marzo a febrero.

Cuadro N° 3.1: Caudales medios mensuales río Itata en Desembocadura

Año	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Prom
1986-1987	80	194	1008	1908	509	707	384	268	282		36	17	490
1987-1988	37	72	131	452	1245	1023	609	644	379	90	22	13	393
1988-1989	23	48	112	319	648	997	468	290	212	97	27	11	271
1989-1990	9	13	28	227	489	544	352	208	104	34	7	3	168
1990-1991	12	108	222	223	188	357	666	358	162	21	4	12	194
1991-1992	1	65	2295	847	928	394	539	340	192	140	58	15	484
1992-1993	24	120	1806	1976	739	436	525	421	313	192	73	12	553
1993-1994	22	125	563	1963	1059	788	520	329	244	184	57	28	490
1994-1995	21	102	236	624	1126	505	597	462	243	151	36	18	343
1995-1996	16	68	141	662	1035	758	637	423	267	141	35	11	349
1996-1997	45	112	104	408	328	378	247	113	64	17		8	166
1997-1998	4	185	471	1636	718	749	813	807	570	224	47	23	521
2000-2001	27	24	126	1270	1085	707	980	529	268	157	98	85	446
2001-2002			1047	899	2065	1030	544	329	200	90	28	45	628
2002-2003	220	133	393	748	560	1410	763	1022	537	265	90	36	515
2003-2004	44	73	119	880	592	397	392	385	223	70	16	15	267
2004-2005	22	273	140	523	740	535	516	349	329	129	52	42	304
2005-2006	48	59	384	1110	1316	1230	617	331	257	184	85	36	471
2006-2007	47	144	231	1116	679	819	665	534	308	187	81	72	407
2007-2008	58	97	114	166	527	402	362	308	171	53	25	25	192
2008-2009	26	46	1076	608	589	991	571	256	160	47	20	15	367
2009-2010	14	19	337	588	730	849	585	382	351	174	43	36	342
2010-2011	56	31	62	229	365	409	322	248	196	81	40	24	172
2011-2012	28	94	116	320	519	826	619	440	274	138	54	70	291
2012-2013	81	54	60	606	381	352	267	204	134	179	75	22	201
2013-2014	17	28	124	388	659	492	471	208	174	74	36		243
2014-2015		66	194	733	587	1130	806	458	263		22	16	427
2015-2016	33	24	46	338	694	1098	739	615	319	97	47	25	340
2016-2017	27	98	122	107	299	376	216	207	62	19	5	4	129
2017-2018	8	25	158	455	453	660	476	632	454	154	41	15	294
Min	1	13	28	107	188	352	216	113	62	17	4	3	129
Prom	37	86	399	744	728	712	542	403	257	121	43	26	349
Max	220	273	2295	1976	2065	1410	980	1022	570	265	98	85	628

Fuente: Elaboración propia en base a estadística DGA.

De la serie de caudales de la estación Río Itata en Coelemu, se determinaron los caudales máximos instantáneos, resultados que se presentan en el cuadro siguiente.

Cuadro N° 3.2: Caudales máximos instantáneos estación Río Itata en Coelemu

N°	Año	Caudal [m ³ /s]	día - mes
1	1986	5,174	16-Jun
2	1987	2,973	14-Aug
3	1988	3,563	29-Jul
4	1989	3,189	30-Jun
5	1990	1,389	11-Sep
6	1991	7,856	29-May
7	1992	6,033	05-Jun
8	1993	8,979	05-Jun
9	1994	6,525	25-Jul
10	1995	3,950	11-Jul
11	1996	1,825	13-Jun
12	1997	6,212	20-Jun
13	1998	657	05-Jul
14	1999	3,671	06-Sep
15	2000	8,070	01-Jul
16	2001	7,678	29-May
17	2002	7,322	25-Aug
18	2003	4,695	21-Jun
19	2004	2,058	09-Jun
20	2005	6,478	29-Jun
21	2006	4,582	08-Jun
22	2007	1,689	06-Jul
23	2008	6,319	22-May
24	2009	3,479	15-Aug
25	2010	1,344	29-Aug
26	2011	2,792	12-Aug
27	2012	1,851	14-Jun
28	2013	1,971	04-Jul
29	2014	3,641	03-Aug
30	2015	3,460	29-Aug
31	2016	1,227	25-Jul
32	2017	1,844	26-Jun
33	2018	1,458	28-Jun

Fuente: Elaboración propia en base a estadística DGA.

La mayor crecida registrada en dicha estación ocurrió el día 05 de Junio del año 1993 con un valor de 8.979 m³/s.

Para efectos de asociar las 33 crecidas detectadas, entre 1986 y 2018, a una cierta frecuencia (periodo de retorno), se efectuó un análisis estadístico de los valores máximos anuales de crecida.

Una vez determinado el valor máximo de crecida asociado a un periodo de retorno de diseño, se elige aquel hidrograma (serie de valores horarios de caudal medido) cuyo valor máximo corresponda con dicho valor máximo de diseño, disponiéndose así del hidrograma a aplicar en la modelación hidráulica de la desembocadura.

Por otra parte, debe considerarse que los mayores problemas de inundación, según lo indicado por los pobladores del sector, se producen en el primer semestre del año (meses de febrero a junio).

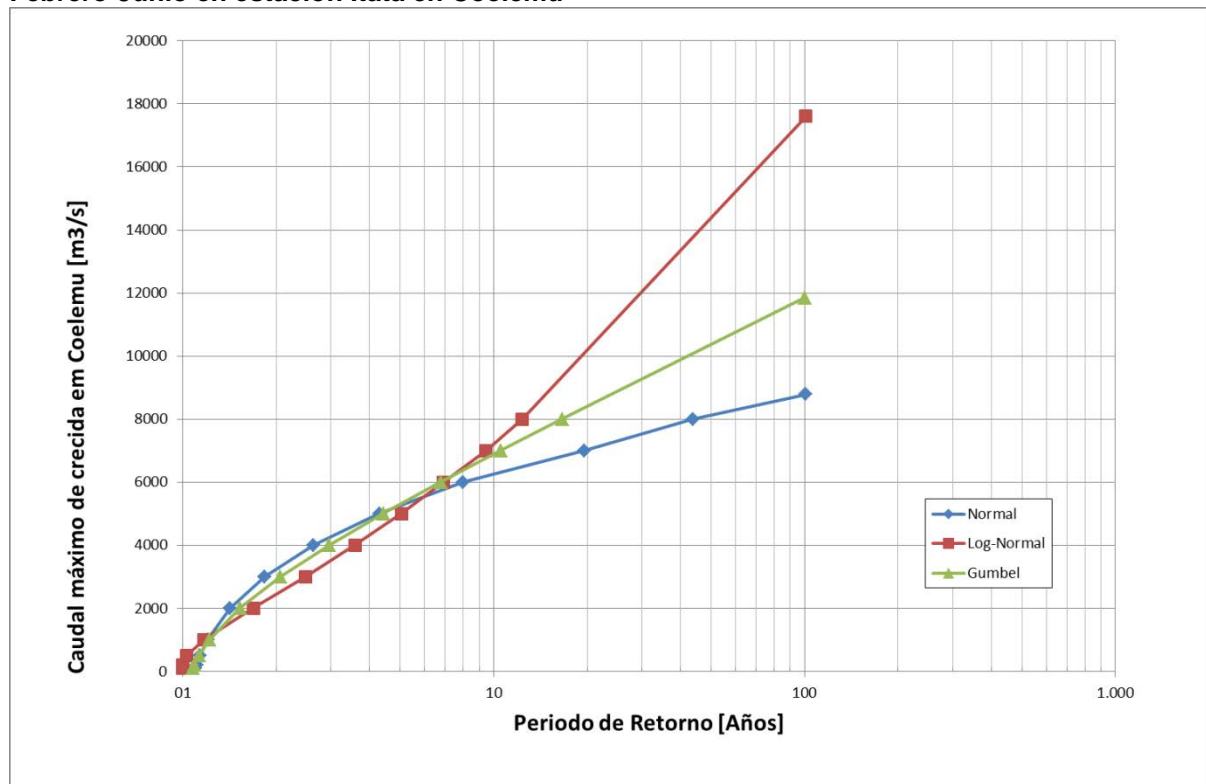
En consecuencia, el análisis estadístico se realizó para los valores máximos de crecida encontrados en dicho periodo del año (febrero-junio).

De acuerdo con las recomendaciones del Manual de Carreteras (MC) (sección 3.702.302), se ajustaron las siguientes distribuciones de probabilidad:

- Distribución Normal
- Distribución Log-Normal
- Distribución de Valores Extremo Tipo I (Gumbel)

En la figura siguiente se resumen los resultados de los ajustes señalados.

Figura N° 3.3: Análisis comparativo de distribuciones - Caudales máximos, periodo Febrero-Junio en estación Itata en Coelemu



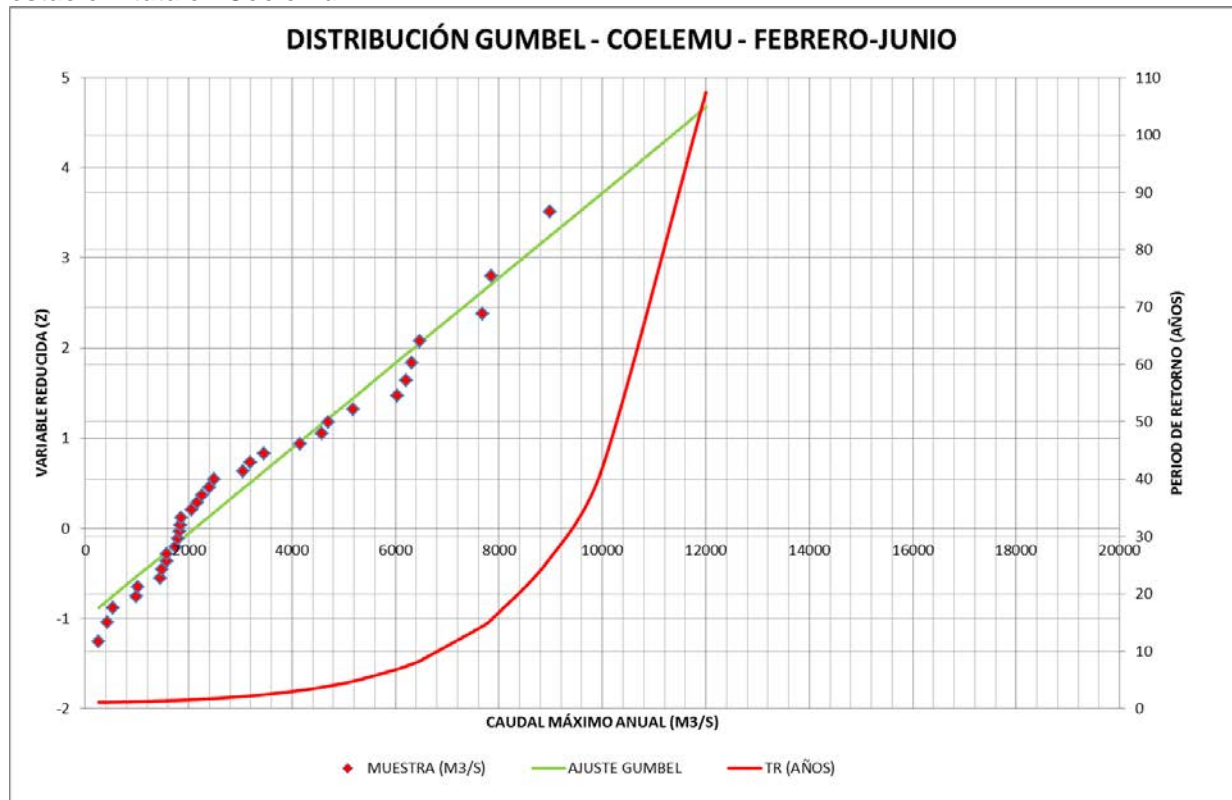
Fuente Elaboración propia.

Se puede apreciar que el mejor ajuste se obtiene para la distribución de valores extremos Tipo I – Gumbel, que en el gráfico aparece como una recta.

Por otra parte, según lo señalado en el mismo MC, se aconseja usar distribuciones de valores extremos Tipo I cuando se estudian valores máximos anuales y el estimador del coeficiente de asimetría es positivo.

Lo anterior se refleja con mayor detalle en la figura siguiente.

Figura N° 3.4: Ajuste distribución Gumbel, Caudales máximos periodo febrero-junio en estación Itata en Coelemu



Fuente: Elaboración propia.

En la figura precedente, la variable reducida Z corresponde a

$$Z = -\ln(-\ln(P))$$

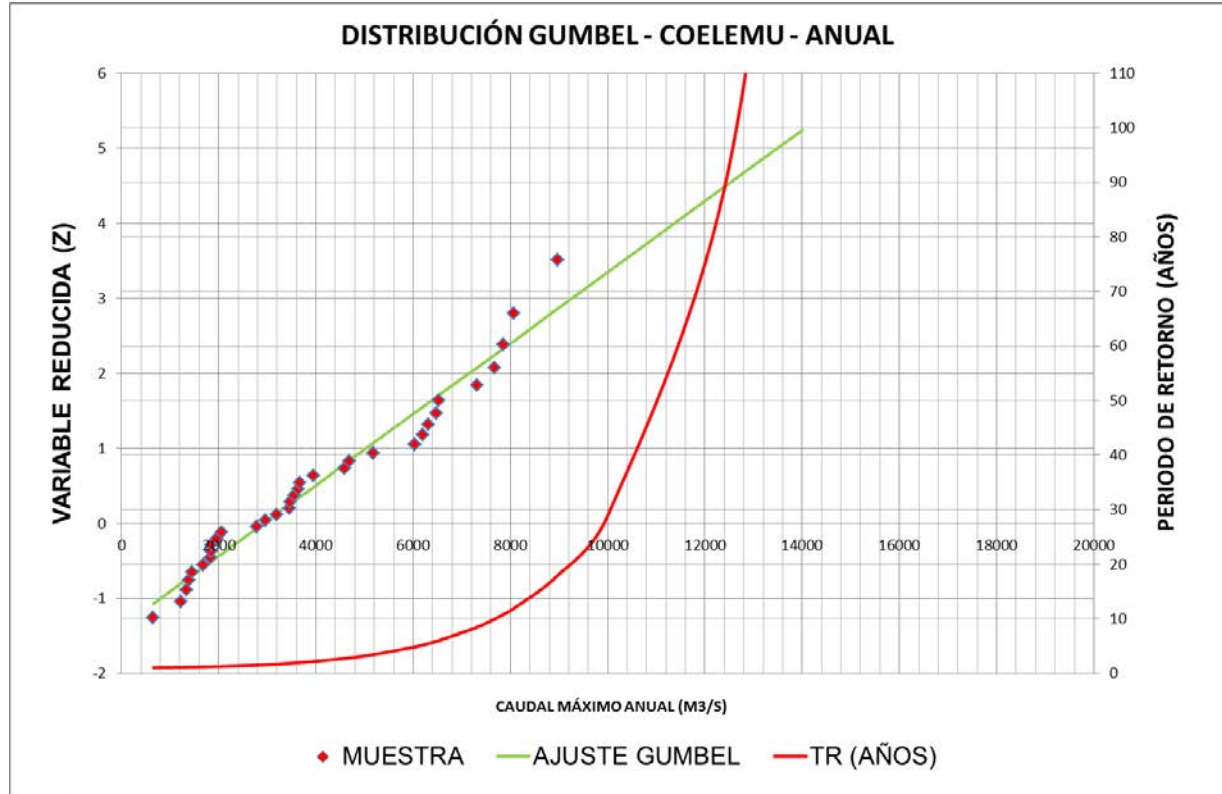
Donde

P : Probabilidad de $X \leq x$ medida (número de orden del valor medido en la muestra dividido por el número de valores medidos + 1).

Se puede observar que efectivamente la variable reducida (correspondiente a la distribución Gumbel) presenta una distribución lineal.

El mismo ejercicio se realizó considerando la estadística completa (año completo), consiguiéndose el ajuste que se muestra en la figura siguiente.

Figura N° 3.5: Ajuste distribución Gumbel, Caudales máximos anuales en estación Itata en Coelemu



Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro siguiente se resumen los valores máximos de crecida de diseño, calculados con base en una distribución de valores extremos Tipo I (Gumbel).

Cuadro N° 3.3: Caudales máximos de crecida [m³/s]

Periodo	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años
Febrero-Junio	2900	5300	6880
Anual	3700	6100	7680

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo N°2 se presentan la estadística y el detalle de los ajustes realizados.

3.3 Estadística pluviométrica

Por otra parte, como se ha señalado, se analizó la estadística pluviométrica en estaciones cercanas, con objeto de correlacionar la precipitación medida con los caudales medidos, y así disponer de una herramienta de predicción del fenómeno de crecida en la desembocadura, a partir de una predicción de la precipitación.

En la siguiente figura se muestra la precipitación anual asociada a la cuenca del río Itata, obtenida de información satelital disponible en la WEB a partir de 4 fuentes, a saber:

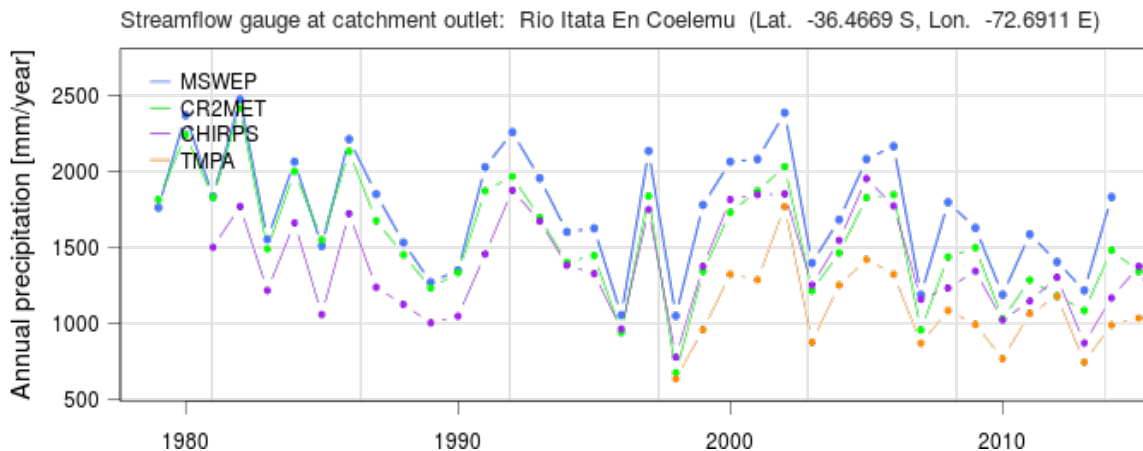
MSWEP: Multi Source Weighted-Ensemble Precipitation, que es una nueva base de datos global de precipitaciones históricas (1979-2017) con un resolución temporal de 3 horas y de 0,1° de resolución espacial.

CR2MET: Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia. Contiene información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla angular de 0,05°.

CHIRPS: Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data. Es una estación con más de 30 años de base de datos cuasi globales, con una resolución de 0,05°.

TMPA: Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). Análisis de precipitaciones en base estimaciones efectuadas por múltiples satélites (NASA).

Figura N° 3.6: Precipitación anual cuenca Río Itata en Coelemu
Catchment 8141001



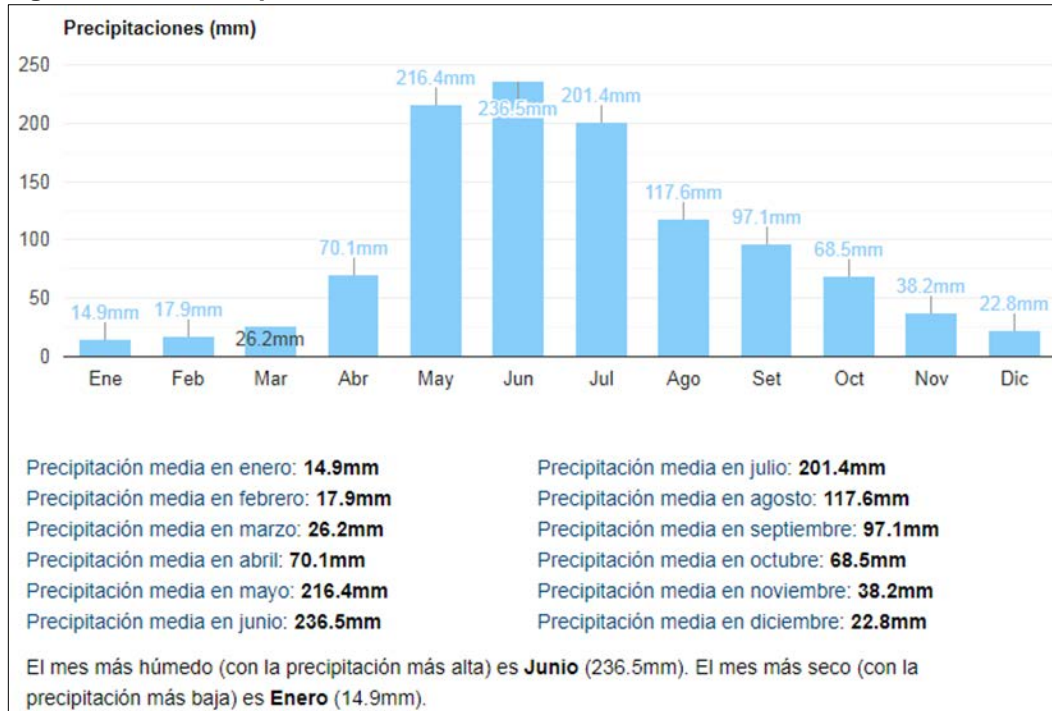
Fuente: Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A.: The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>, 2018.

Se puede apreciar que la precipitación máxima alcanza un máximo de 2.500 mm/año (según MSWEP), y un mínimo de 600 mm/año (según TMPA), para la cuenca asociada a la estación Río Itata en Coelemu.

En Chillán la precipitación media es de 872 mm/año.

Respecto de la distribución mensual, llega a un máximo de 236,5 mm en Chillán, según se observa en la siguiente figura.

Figura N° 3.7: Precipitación media Chillán



Fuente: Página WEB "Weather-atlas.com/es/chile/chillan-clima"

Por otra parte, interesa conocer la precipitación diaria, y su relación con la escorrentía que llega a la desembocadura del río Itata.

Se pudo obtener, a partir de la página de la DGA, la estadística de precipitación diaria de más de 30 años, para 27 estaciones de interés, ubicadas en la cuenca del río Itata, a saber:

1. MANGARRAL
2. MILLAUQUÉN
3. SAN AGUSTÍN DE PUÑUAL
4. RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN
5. SAN FABIAN
6. CARACOL
7. CAMAN
8. RIO ITATA EN COELEMU
9. COELEMU
10. PORTEZUELO
11. COIHUECO EMBALSE
12. CHILLÁN VIEJO
13. CANAL DE LA LUZ EN CHILLAN
14. NUEVA ALDEA

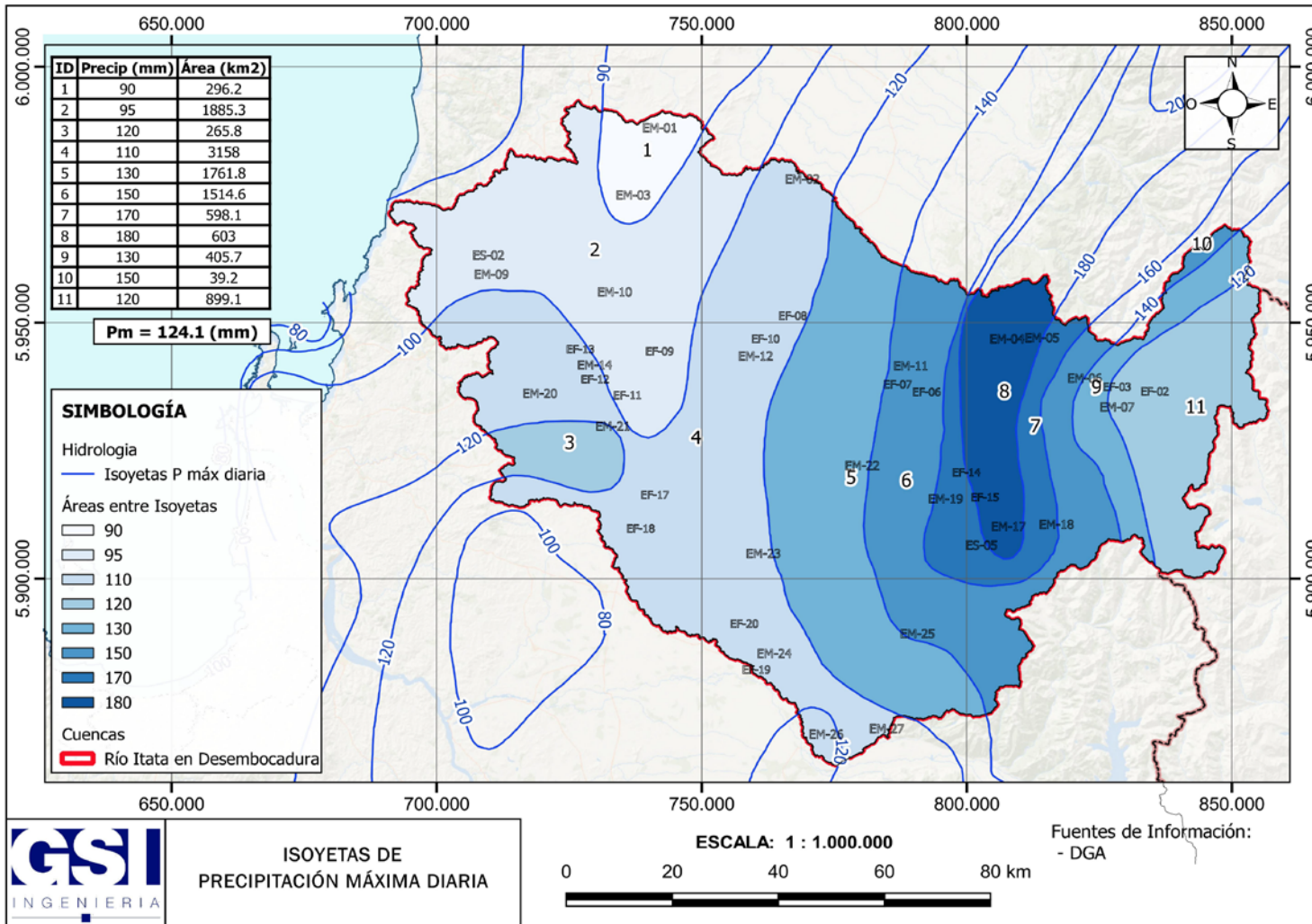
15. RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA N2
16. RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)
17. FUNDO ATACALCO
18. LAS TRANCAS
19. DIGUILLIN
20. CANCHA LOS LITRES
21. CHILLANCITO
22. MAYULERMO
23. PEMUCO
24. CHOLGUÁN
25. LAS CRUCES
26. TUCAPEL
27. TRUPAN

La información recopilada se adjunta en Anexo N°3.

Finalmente, en la figura siguiente se muestra la distribución espacial de la precipitación en la cuenca del río Itata (curvas isoyetas), correspondientes a la precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 10 años.

Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
 Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

Figura N° 3.8: Curvas isoyetas PP máx. diaria TR=10 años, cuenca del río Itata



Fuente: Elaboración propia.

Considerando que en general los pronósticos de lluvia se generan para las ciudades importantes o principales, conviene referirse en este caso a la ciudad de Chillán.

Chillán coincide con la estación EM-12 (Chillán Viejo), a la que corresponde una precipitación máxima diaria de 110 mm.

En el cuadro siguiente se presentan los valores de precipitación máxima diaria para distintas estaciones de interés, y su relación con respecto a la estación Chillan Viejo, respecto de la cual podría disponerse de un pronóstico de precipitación.

Cuadro N° 3.4: Precipitación máxima diaria (TR=10 años), estaciones en cuenca del río Itata

Estación	Isoyeta	Factor C/R Chillán Viejo
MANGARRAL	90	0.82
MILLAUQUÉN	110	1.00
SAN AGUSTÍN DE PUÑUAL	90	0.82
RIO ÑUBLE EN SAN FABIAN	180	1.64
SAN FABIAN	180	1.64
CARACOL	130	1.18
CAMAN	130	1.18
RIO ITATA EN COELEMU	95	0.86
COELEMU	95	0.86
PORTEZUELO	95	0.86
COIHUECO EMBALSE	150	1.36
CHILLÁN VIEJO	110	1.00
CANAL DE LA LUZ EN CHILLAN	110	1.00
NUEVA ALDEA	95	0.86
RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA N2	170	1.55
RIO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	180	1.64
LAS TRANCAS	170	1.55
DIGUILLIN	180	1.64
RÍO ITATA EN GENERAL CRUZ	110	1.00
RÍO ITATA EN Balsa Nueva Aldea	95	0.86

Fuente: Elaboración propia

3.4 Correlación entre estaciones fluviométricas

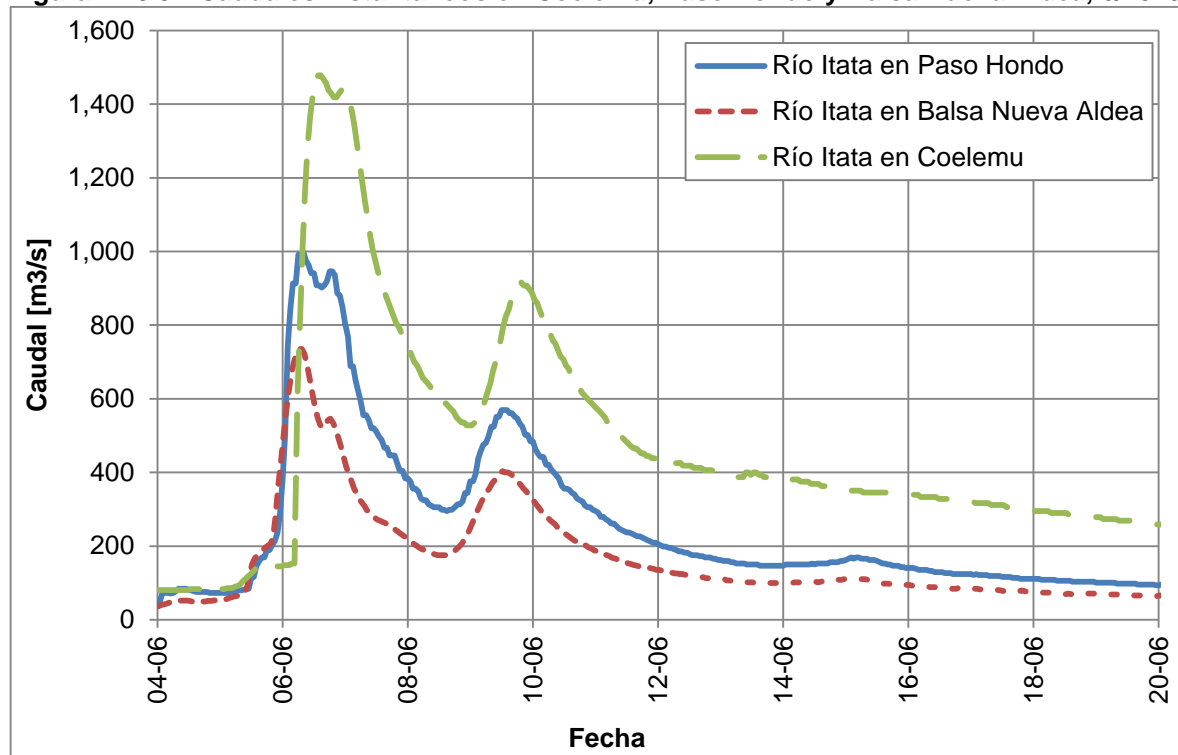
Como se mencionó previamente, se busca relacionar el caudal entre estaciones para anticiparse con un tiempo prudente a alguna crecida de interés que potencialmente pudiere causar inundaciones en las zonas afectadas indicadas con anterioridad (Boca de Itata y Vegas de Itata).

En la cuenca del río Itata existen 2 estaciones de la DGA con información “en línea” de mayor interés, ergo, no sería necesario instalar un sistema adicional, sino más bien gestionar con la información disponible.

Estas estaciones son “Río Itata en Paso Hondo” (EF-13) y “Río Itata en Balsa Nueva Aldea” (EF-12) distanciadas ente sí por 5 km de cauce aproximadamente.

Paso Hondo cuenta con el aporte del Río Ñuble por lo que en poca distancia ya representa una mayor parte de la cuenca. La relación gráfica de estas estaciones con la estación Río Itata en Coelemu para la crecida de junio de 2015 se aprecia en la Figura N° 3.9.

Figura N° 3.9: Caudales Instantáneos en Coelemu, Paso Hondo y Balsa Nueva Aldea, 6/2015



Fuente: Elaboración propia con información de la DGA.

En particular para la crecida de 06 de junio de 2015 los desfases del máximo caudal se presentan en el Cuadro N° 3.5.

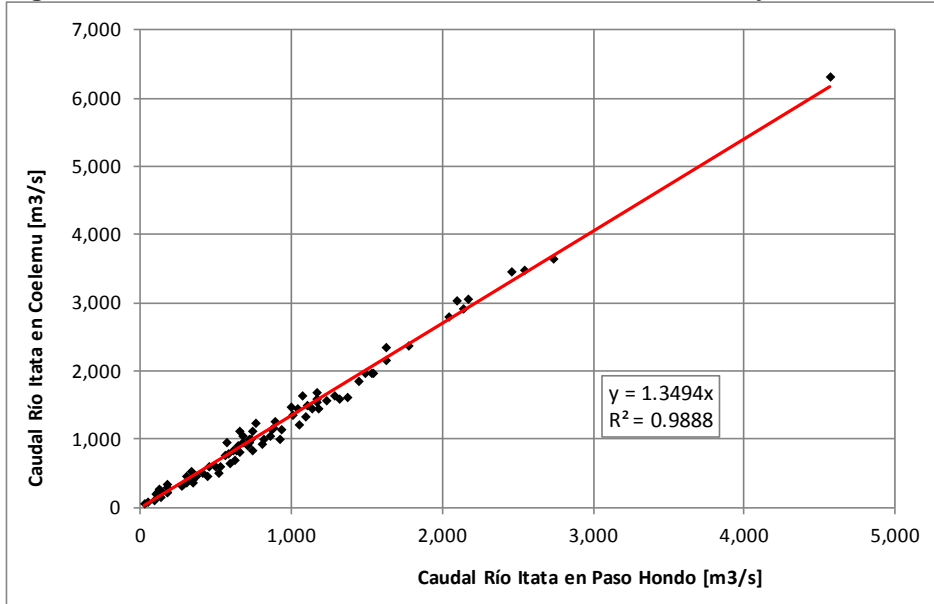
Cuadro N° 3.5: Desfase temporal entre estaciones. Crecida 6 de Junio del 2015

Estación	Ocurrencia máximo	Desfase con Coelemu [hr]
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	2015-06-06 06:21	7.3
Río Itata en Paso Hondo	2015-06-06 08:00	6.6
Río Itata en Coelemu	2015-06-06 13:37	-

Fuente: Elaboración propia con información de la DGA

Por otra parte, cabe consignar que existe una estrecha relación entre los caudales medidos en la estación Paso Hondo y la estación Coelemu, tal como se aprecia en la siguiente figura.

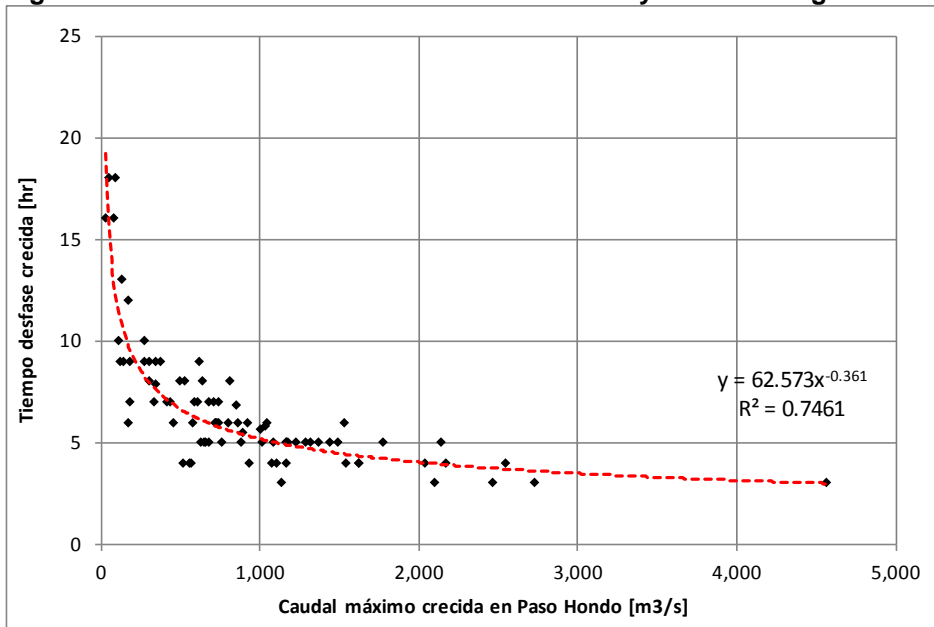
Figura N° 3.10: Caudales máximos de crecidas en Coelemu y Paso Hondo



Fuente: Elaboración propia en base a estadística de la DGA

Ahora bien, con el fin de aportar información al protocolo de apertura de la barra es necesario conocer el desfase entre las estaciones. En la Figura N° 3.15 se presenta el desfase entre estas estaciones en función del caudal, puesto que los valores arrojan un promedio de 6,6 horas, un máximo de 18 horas y un mínimo de 3 horas. Mientras mayor sea el caudal, menor será el desfase debido a las mayores velocidades medias de los flujos.

Figura N° 3.11: Desfase horario entre Paso Hondo y Coelemu según el caudal máximo



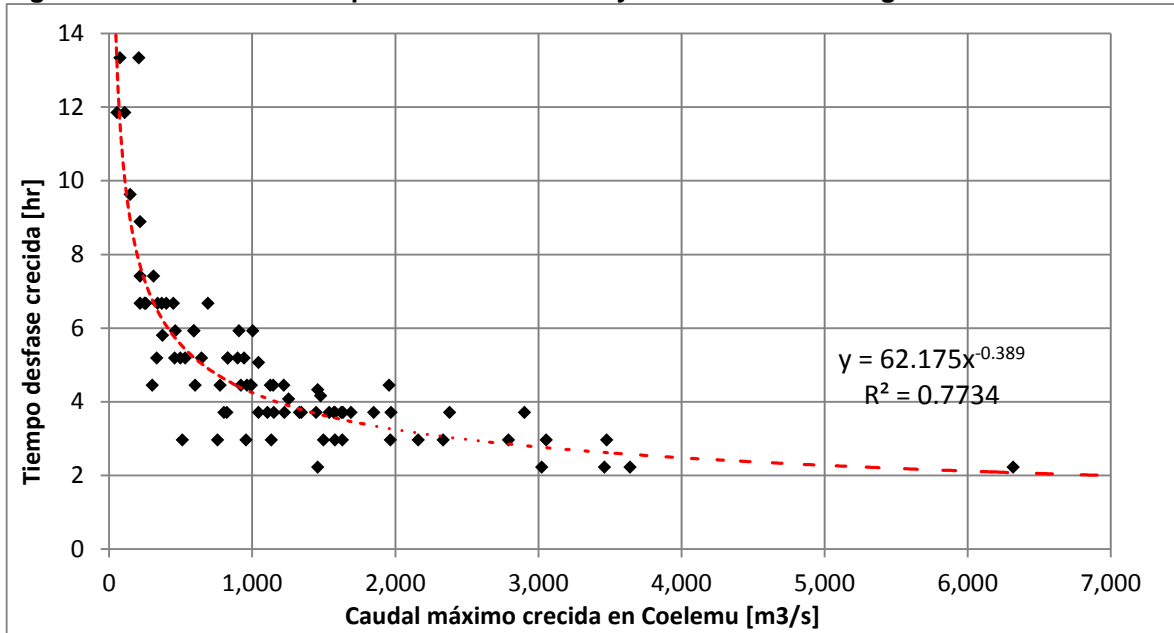
Fuente: Elaboración propia en base a estadística de la DGA

Luego, para el cálculo del tiempo de desfase hasta la desembocadura se supone que viaja a la misma velocidad entre Coelemu y la desembocadura como lo hizo entre Paso Hondo y Coelemu, al no haber ya grandes aportes en el flujo. Es decir, velocidad en función del caudal.

La distancia entre Paso Hondo y Coelemu es de 24 Km, mientras que entre Coelemu y la desembocadura es de 20 Km, así, el tiempo de viaje será una proporción del tiempo entre Paso Hondo y Coelemu.

El resultado son valores entre 2 y 13 horas con un valor promedio de 4,9 horas. La variación con el caudal se grafica en la Figura N° 3.12 donde además se ajusta una tendencia potencial.

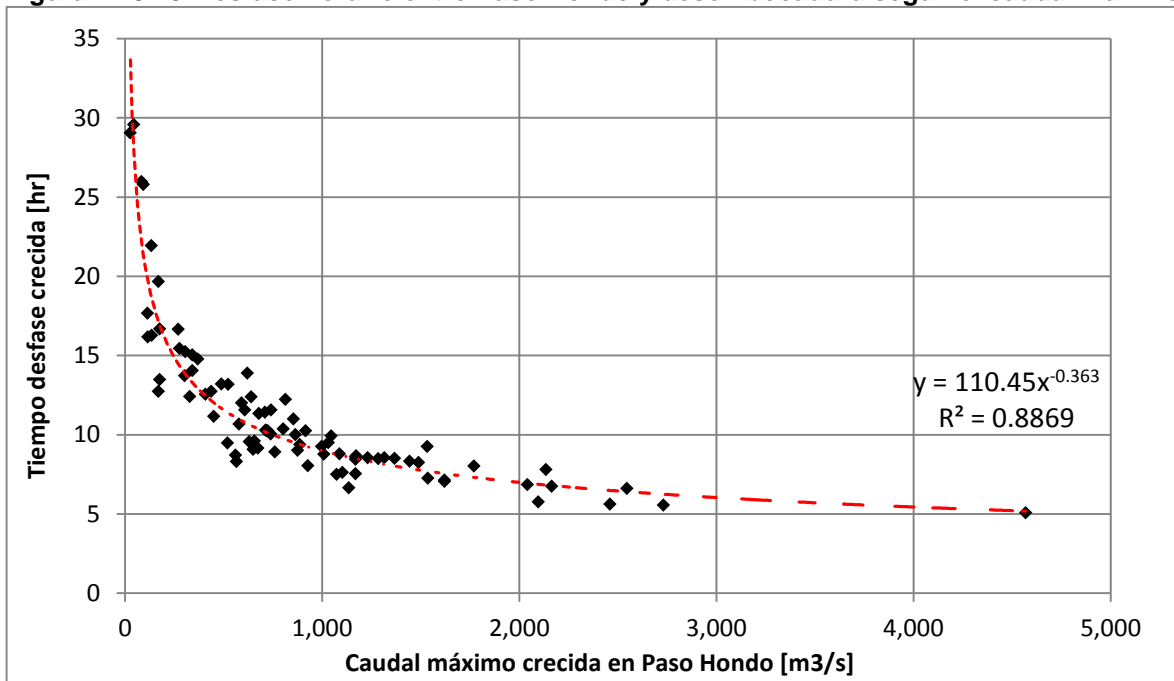
Figura N° 3.12: Desfase temporal entre Coelemu y desembocadura según el caudal máximo



Fuente: Elaboración propia en base a estadística de la DGA

Adicionando este tiempo al desfase anterior entre Paso Hondo y Coelemu se construye el desfase entre Paso Hondo y la desembocadura misma Figura N° 3.13. Con valores que van entre 5 a 30 horas con un desfase promedio de 11 horas.

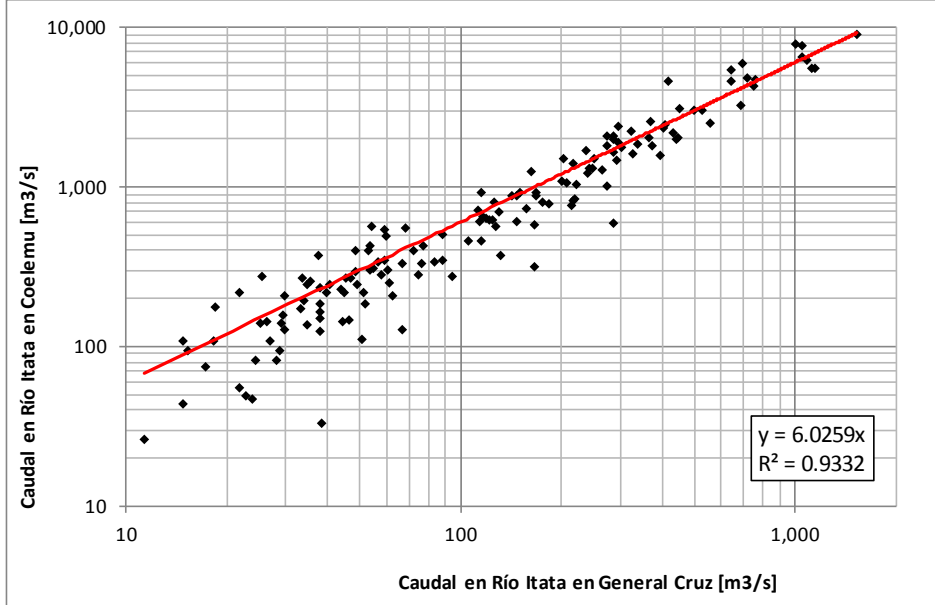
Figura N° 3.13: Desfase horario entre Paso Hondo y desembocadura según el caudal máximo



Fuente: Elaboración propia

Un mayor tiempo de desfase se obtiene aguas arriba de la cuenca pero con una menor precisión. Una estación con buena correlación es Río Itata en General Cruz. La relación entre máximos de crecidas se presenta en la siguiente Figura N° 3.14.

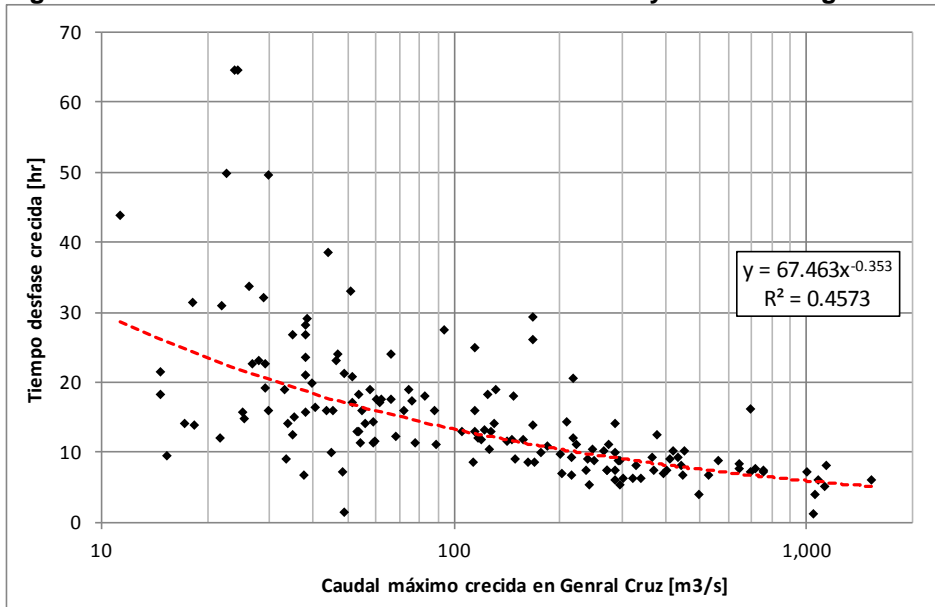
Figura N° 3.14: Caudales máximos de crecidas en Coelemu y General Cruz



Fuente: Elaboración propia en base a estadística de la DGA

Se observa una mayor dispersión en comparación con la relación entre Paso Hondo y Coelemu. Lo mismo sucede con el tiempo de desfase entre máximos (Figura N° 3.15).

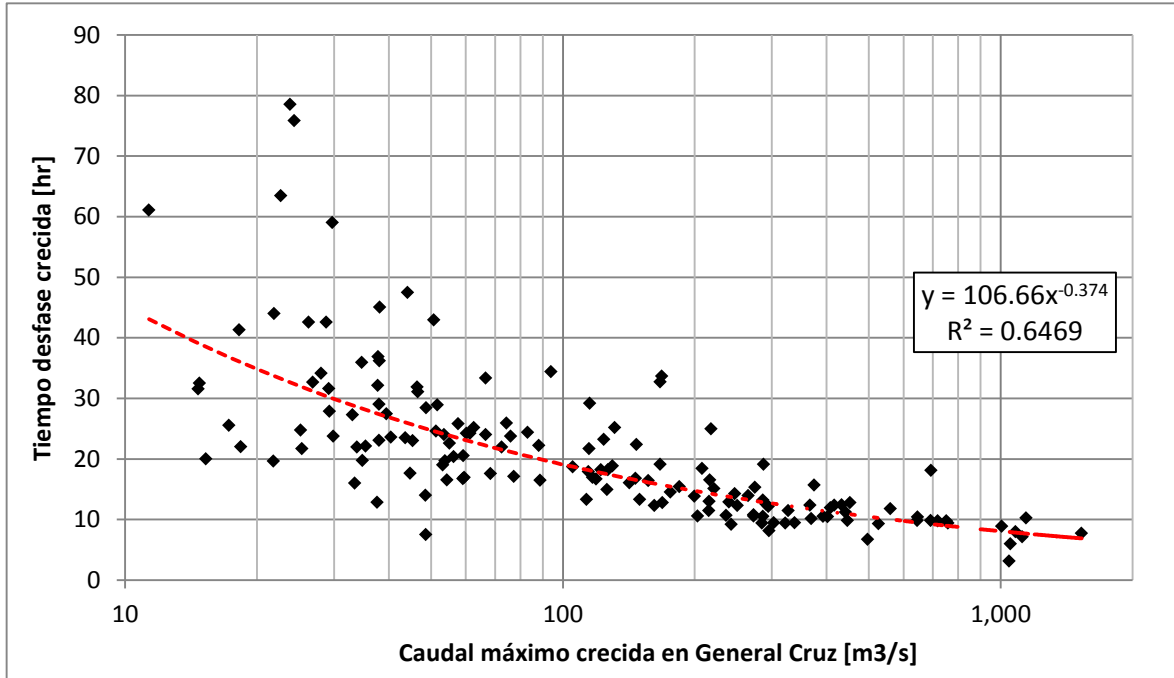
Figura N° 3.15: Desfase horario entre General Cruz y Coelemu según el caudal máximo



Fuente: Elaboración propia en base a estadística de la DGA

En este caso el tiempo promedio de desfase es de 15 horas dentro de un rango de 1 a 65 horas desde General Cruz hasta Coelemu. Luego, agregando el desfase en función del caudal de Coelemu el desfase es de 21 horas promedio con una desviación estándar de 13 horas.

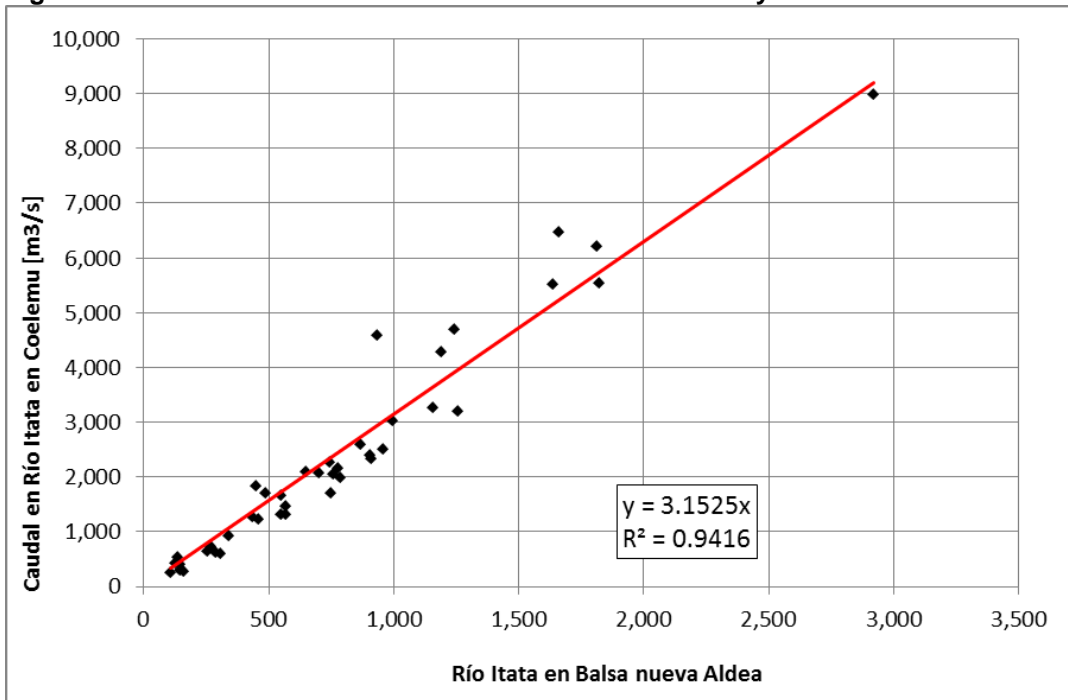
Figura N° 3.16: Desfase temporal entre General Cruz y desembocadura según el caudal máximo



Fuente: Elaboración propia

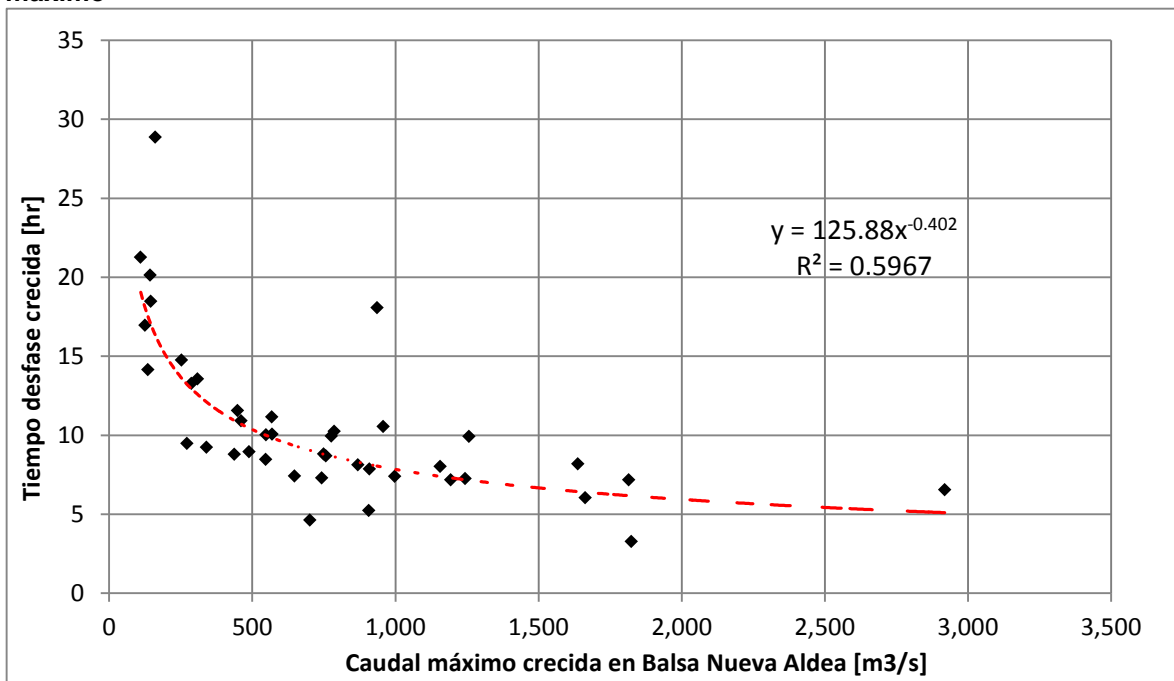
Finalmente, para el caso de la estación Balsa en Nueva Aldea c/r a Coelemu, la relación entre máximos de crecidas se presenta en la siguiente Figura N° 1.1.

Figura N° 3.17: Caudales máximos de crecidas en Coelemu y Balsa Nueva Aldea



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.18: Desfase temporal entre Balsa Nueva Aldea y desembocadura según el caudal máximo



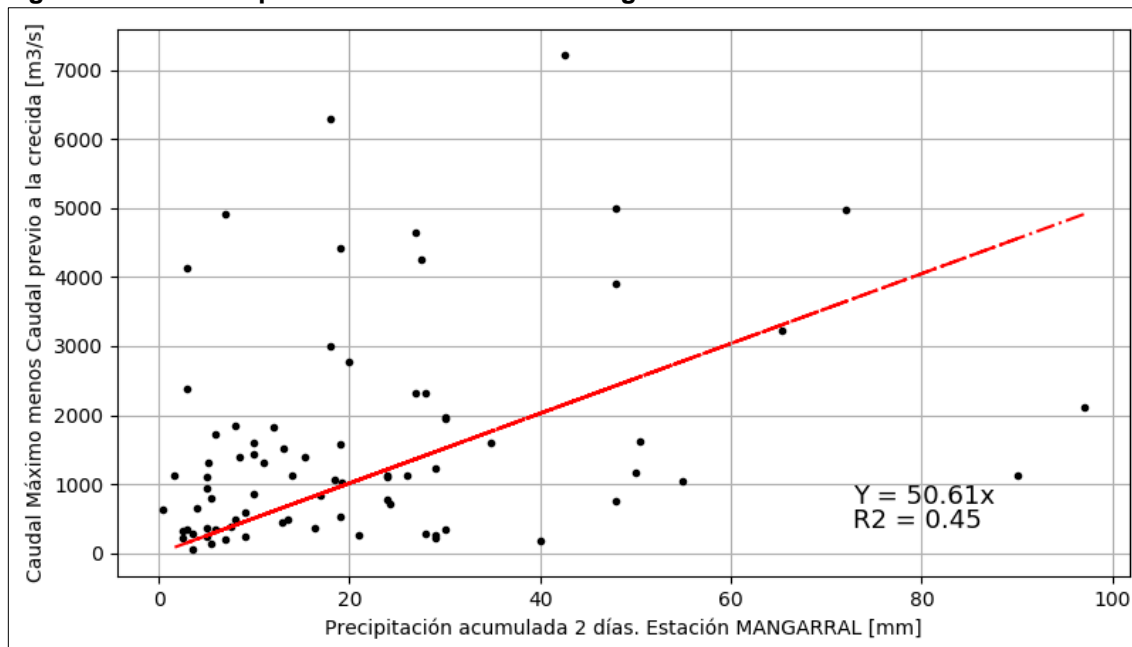
Fuente: Elaboración propia

3.5 Correlación de estaciones Pluviométricas con estaciones Fluviométricas

Respecto de la pluviometría y su relación con la escorrentía esperable en la desembocadura, se procedió a comparar el caudal medido en la estación Río Itata en Coelemu con la precipitación medida en las estaciones señaladas en el acápite 0 de este informe.

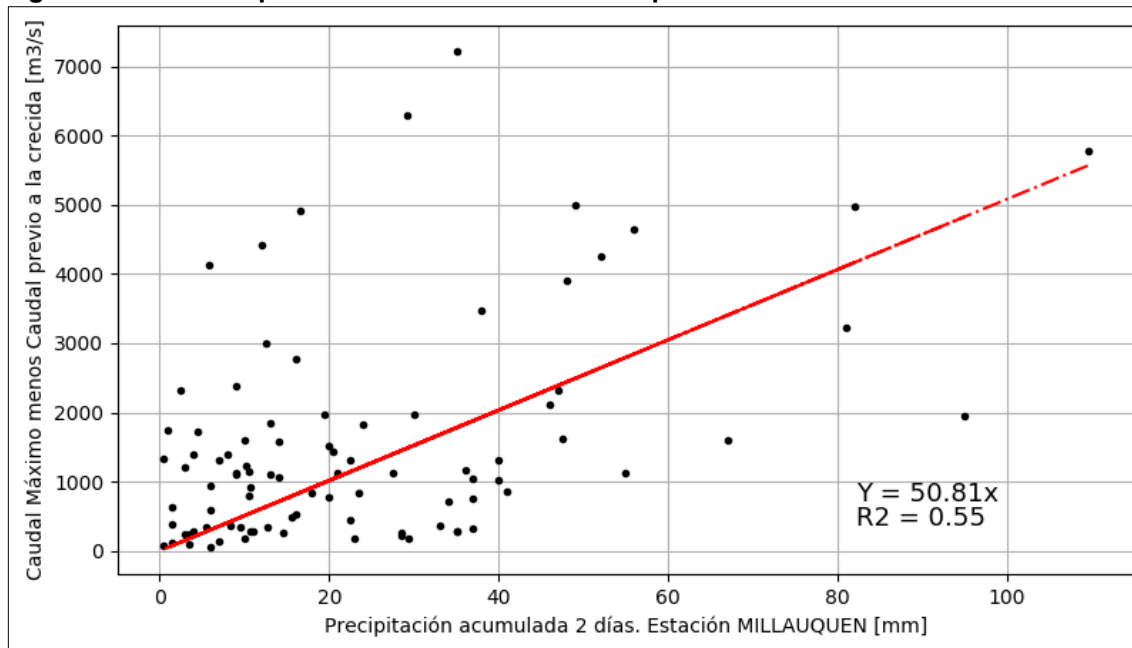
Lo resultados de este ejercicio demuestran que la correlación no es tan buena como la correlación entre caudales, situación que se presenta por ejemplo en las siguientes figuras.

Figura N° 3.19: Precipitación v/s Escorrentía Mangarral-Coelemu



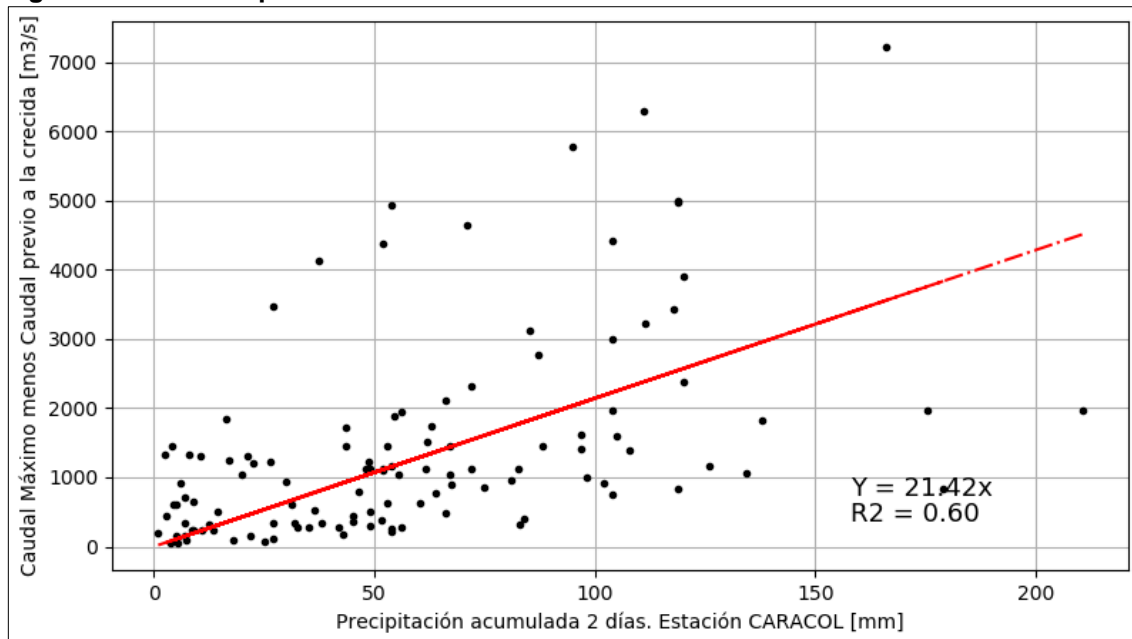
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.20: Precipitación v/s Escorrentía Millauquén-Coelemu



Fuente: Elaboración propia

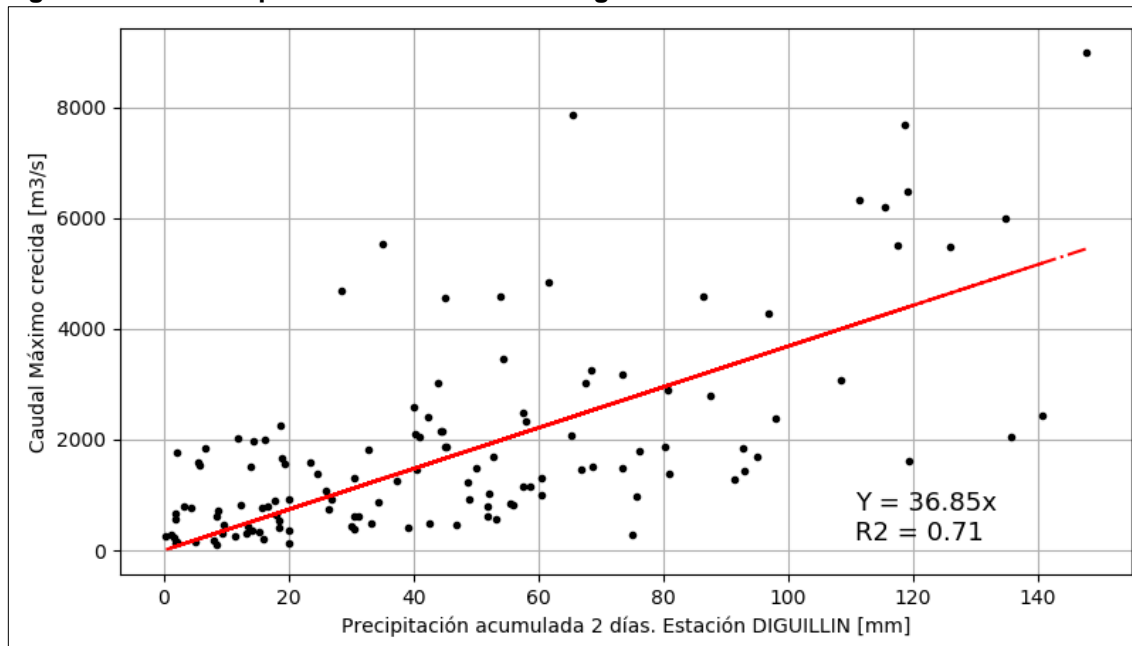
Figura N° 3.21: Precipitación v/s Escorrentía Caracol-Coelemu



Fuente: Elaboración propia

La estación que presenta mejor correlación es la estación Diguillín, con $R^2=0,7$ ($r=0,84$), lo que estadísticamente representa un relación moderada.

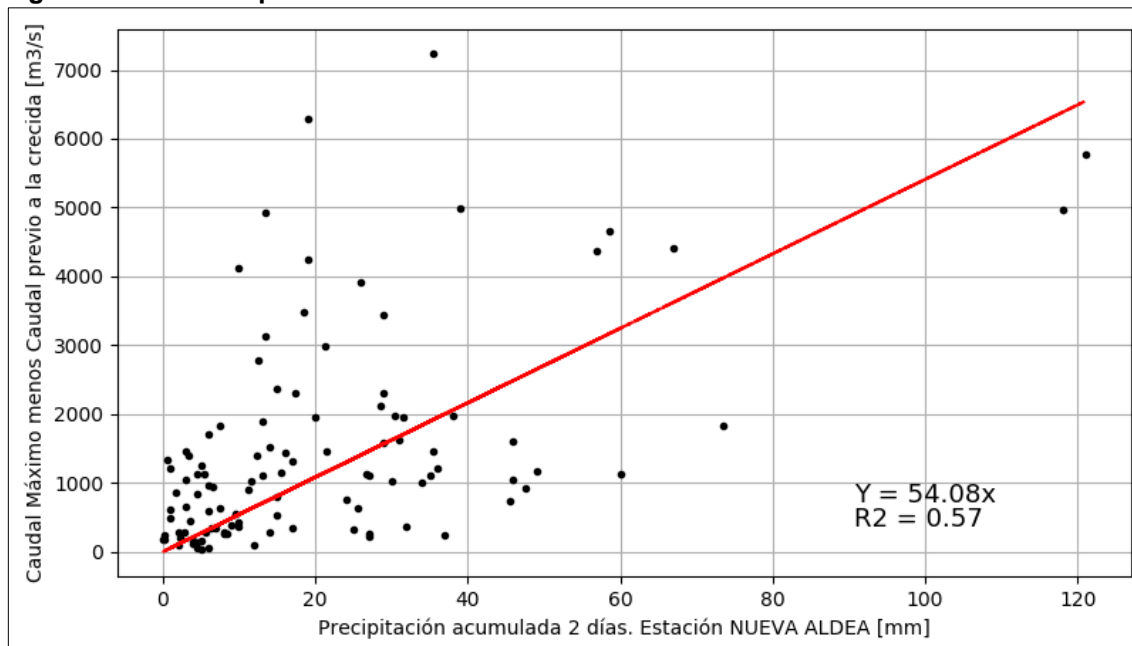
Figura N° 3.22: Precipitación v/s Escorrentía Diguillín-Coelemu



Fuente: Elaboración propia

Otra estación de interés es Balsa Nueva Aldea, con la siguiente correlación.

Figura N° 3.23: Precipitación v/s Escorrentía Nueva Aldea-Coelemu



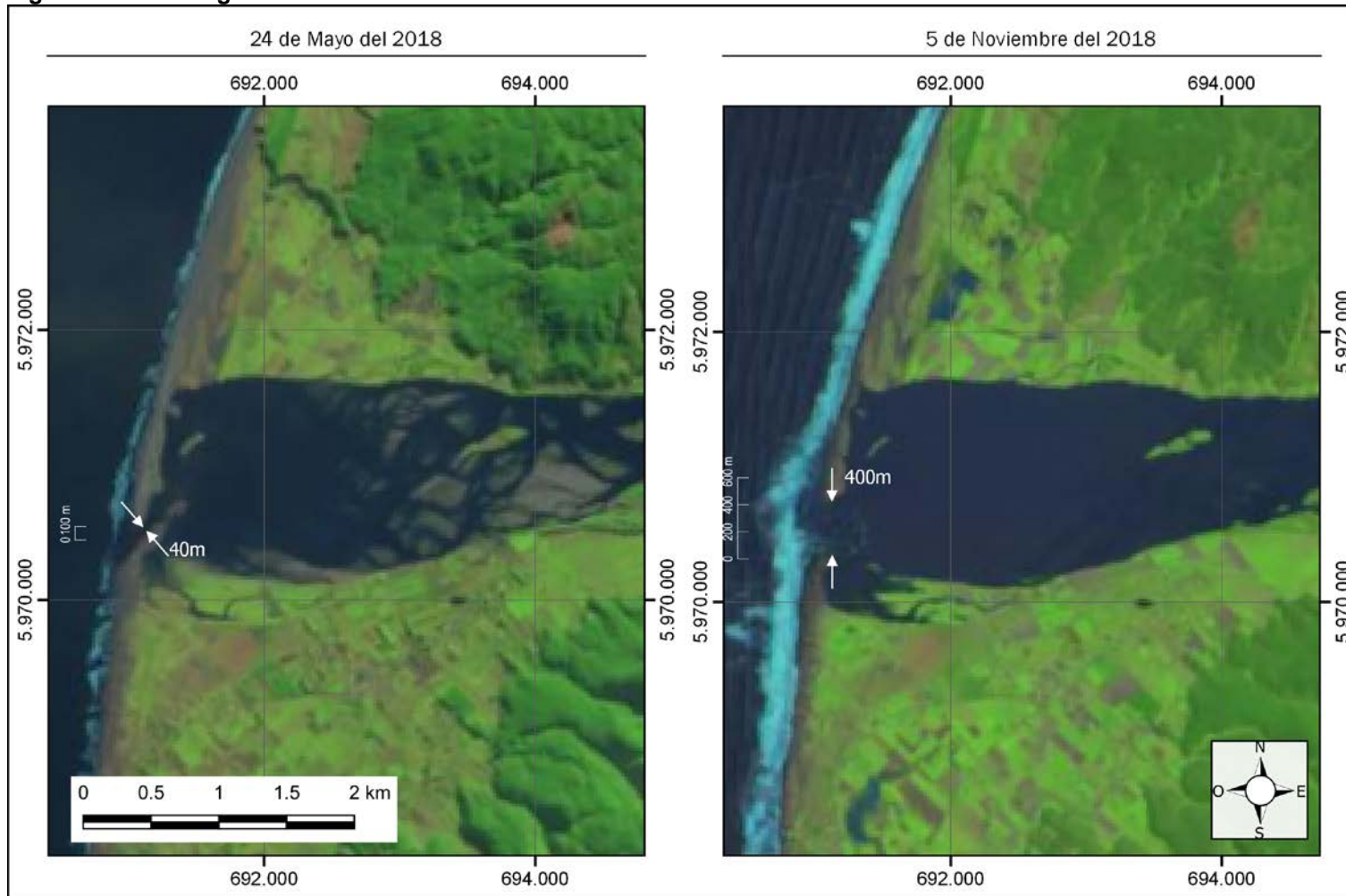
Fuente: Elaboración propia

3.6 Evolución temporal de la barra

Se han recolectado imágenes satelitales gratuitas disponibles de Google Satélite y de los satélites LANDSAT de la USGS, información contenida en el Anexo N° 4. La información LANDSAT es la más abundante en el tiempo, aunque la precisión es menor puesto que cada pixel mide 30 metros aproximadamente. Cabe destacar que si bien se recolecta información de una gran cantidad de años en variados meses, es una muestra alterada pues los días de mayores lluvias no aparecen al estar cubierta de nubes la superficie de la Tierra.

Mediante inspección visual se han determinado las dimensiones de la apertura de la barra de las imágenes. En la Figura N° 3.24 se ejemplifica la determinación de la apertura de la barra en dos momentos del año 2018 para la apertura mínima y máxima.

Figura N° 3.24: Imágenes satelitales LANDSAT en sector de estudio



Fuente: Elaboración propia

En el Anexo N° 4 además de adjuntarse las imágenes en formato referenciado para su utilización en SIG, se adiciona el resumen de las imágenes junto a variables de interés del día de la foto como son el caudal o la información de marea. Se resume la información extraída de las imágenes en el Cuadro N° 3.6 en términos de apertura.

Cuadro N° 3.6: Dimensiones apertura de barra

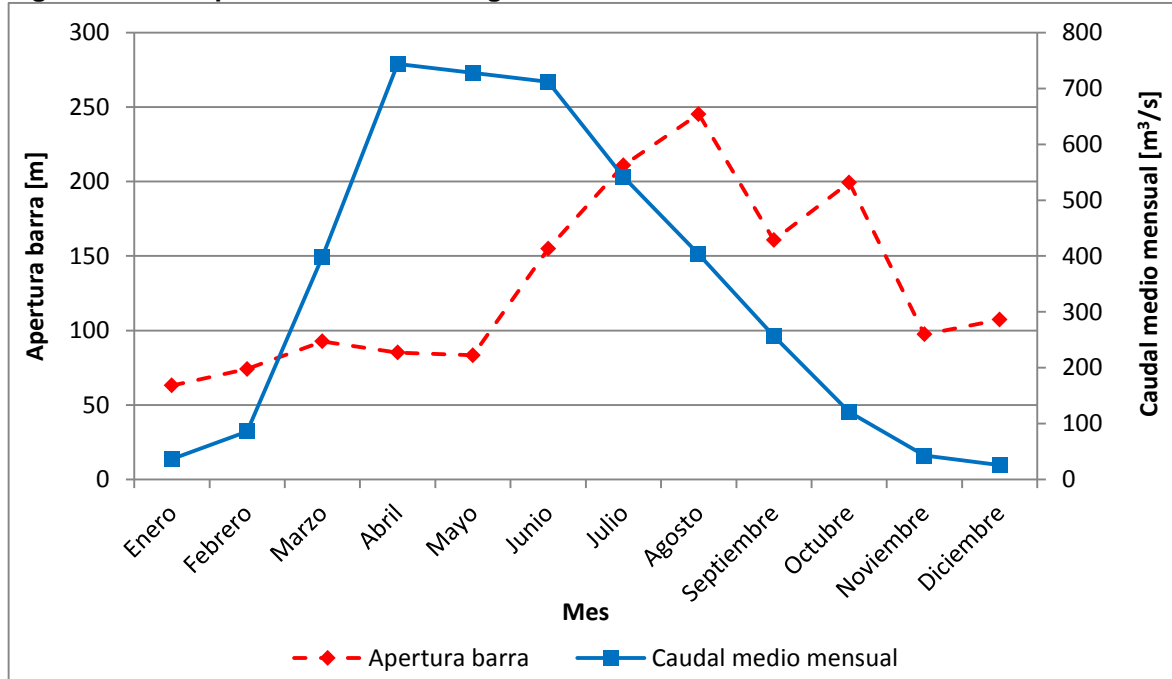
Año \ Mes	Mes											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1986		60						385				366
1987		20										
1990		70										
1998			70						70			70
1999		80							380	300		55
2000		40		65			545		210			80
2001		60		65		540		520				55
2002		65								330		
2003		45			70		250			75	105	
2004	50		60			130		80		160		
2005	76						380		215			
2006								375				65
2007				254	120		85, 135					
2008	33								250		66	
2009	40			75					195			
2010	112		160					85			50	
2011						100		240				
2012							200				75	105
2013				40	75, 105, 115	180	79	145	85		50	
2014				55		170		306,302	105	50		62
2015				42,53		67	460	450		503		
2016		95		65		60		60	145, 55	70	44	
2017	68	25		51	59		103	180	135	345, 118	95	
2018		76		82, 100	40	81, 117, 104	105, 87, 101	60	83	127, 115	400, 79, 57, 51	
2019			81									

Fuente: Elaboración propia a partir de mediciones de imágenes satelitales LANDSAT y Google Satélite.

Aunque las mayores dimensiones se observan en los meses de invierno, la variabilidad de las dimensiones en cada mes es alta.

Con la información del Cuadro N° 3.1 de caudales medios mensuales y el Cuadro N° 3.6 de dimensiones de apertura de la barra en el tiempo se presenta la evolución en el año de ambas variables en términos promedio en la Figura N° 3.25.

Figura N° 3.25: Apertura de la barra según el mes



Fuente: Elaboración propia

Del gráfico se observa que el año comienza con la barra de pequeñas dimensiones puesto que los caudales de crecida son muy bajos desde octubre. De este modo, la barra comienza a cerrarse con aporte de sedimentos provenientes del río.

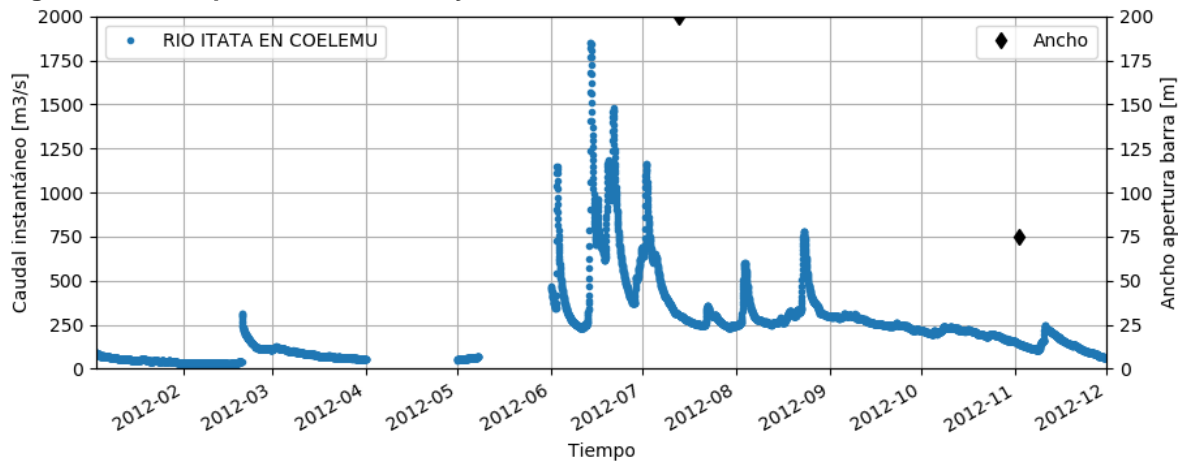
En febrero y marzo las dimensiones de la barra son las menores registradas pero comienzan a aparecer pequeñas crecidas de verano que sólo estarían elevando el nivel de fondo del río, posiblemente por depósito de sedimentos no evacuados.

En los meses de abril y mayo las crecidas aumentan de intensidad, no así la apertura de la barra, siendo estos meses los de mayor problema.

En los siguientes meses, tanto la barra como las crecidas son de mayor tamaño llegando a la primavera con dimensiones de apertura considerablemente mayores en comparación al verano, siendo la estación del año donde menos eventos de desborde debieran ocurrir.

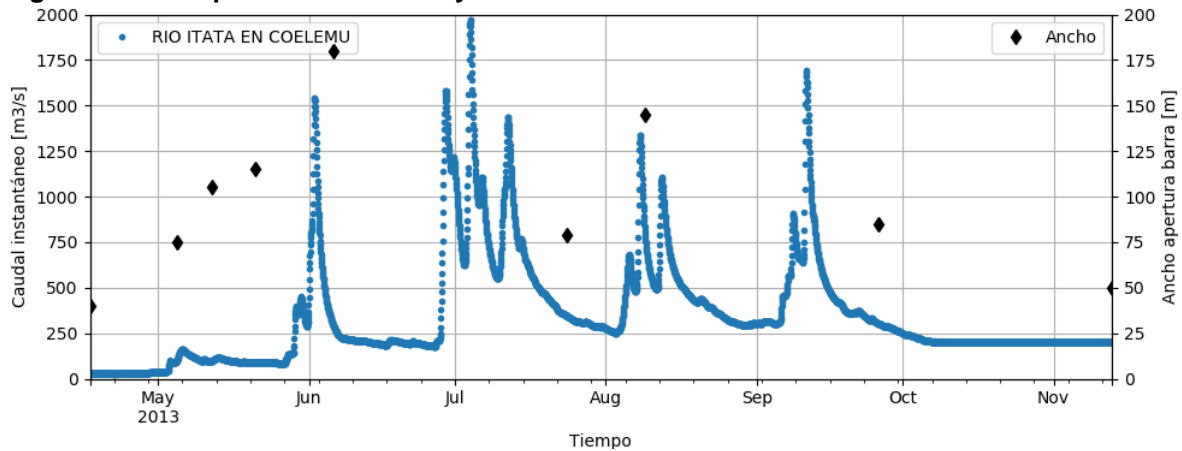
En las figuras siguientes se muestra el caudal pasante del río, en estación río Itata en Coelemu, en sobreposición con el ancho de apertura de barra, entre los años 2012 y 2018.

Figura N° 3.26: Apertura de la barra y caudal. Año 2012



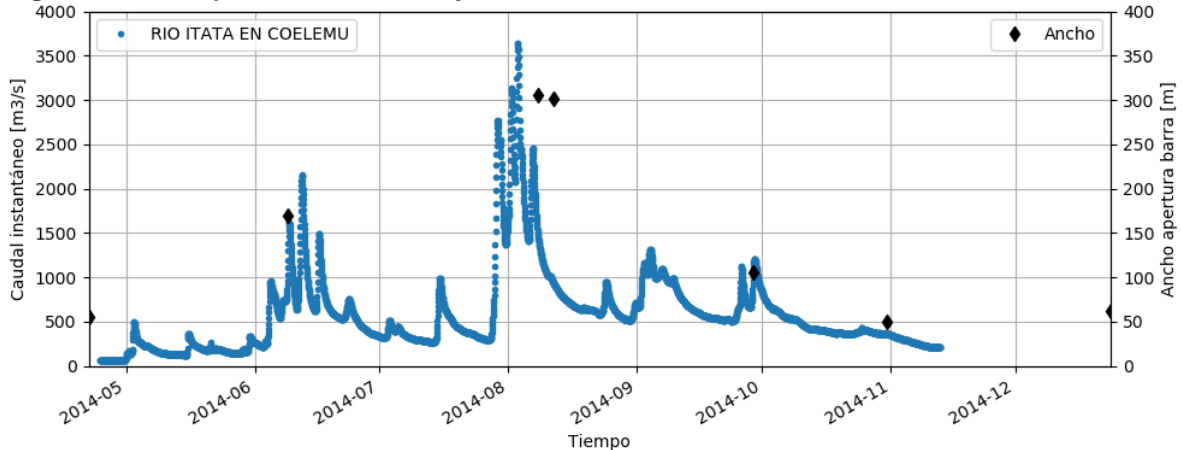
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.27: Apertura de la barra y caudal. Año 2013



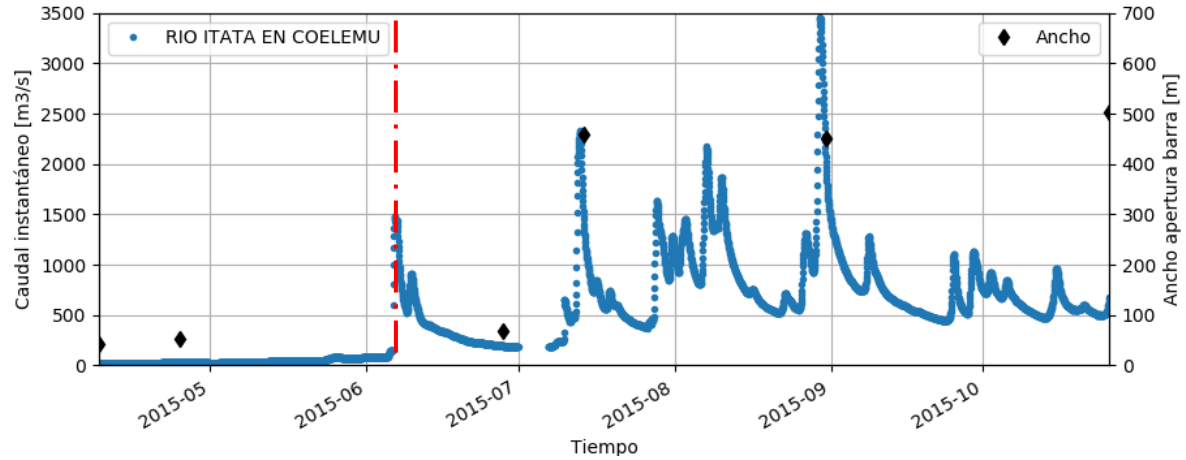
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.28: Apertura de la barra y caudal. Año 2014



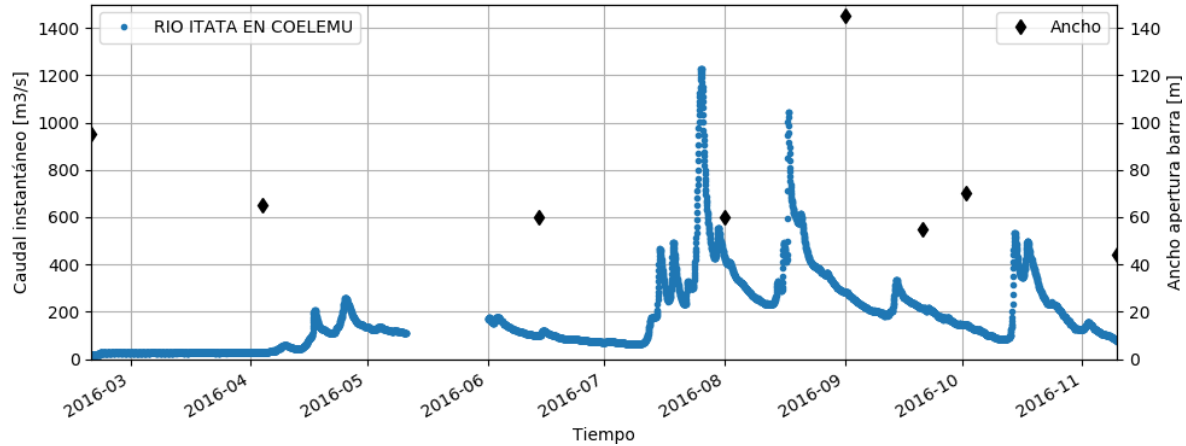
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.29: Apertura de la barra y caudal. Año 2015



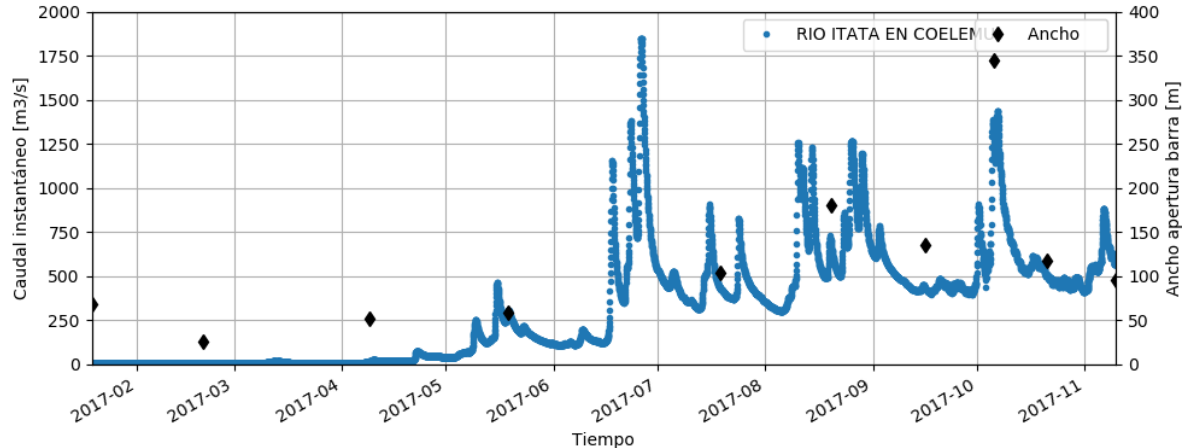
Fuente: Elaboración propia
 Nota: En rojo un evento que generó inundaciones.

Figura N° 3.30: Apertura de la barra y caudal. Año 2016



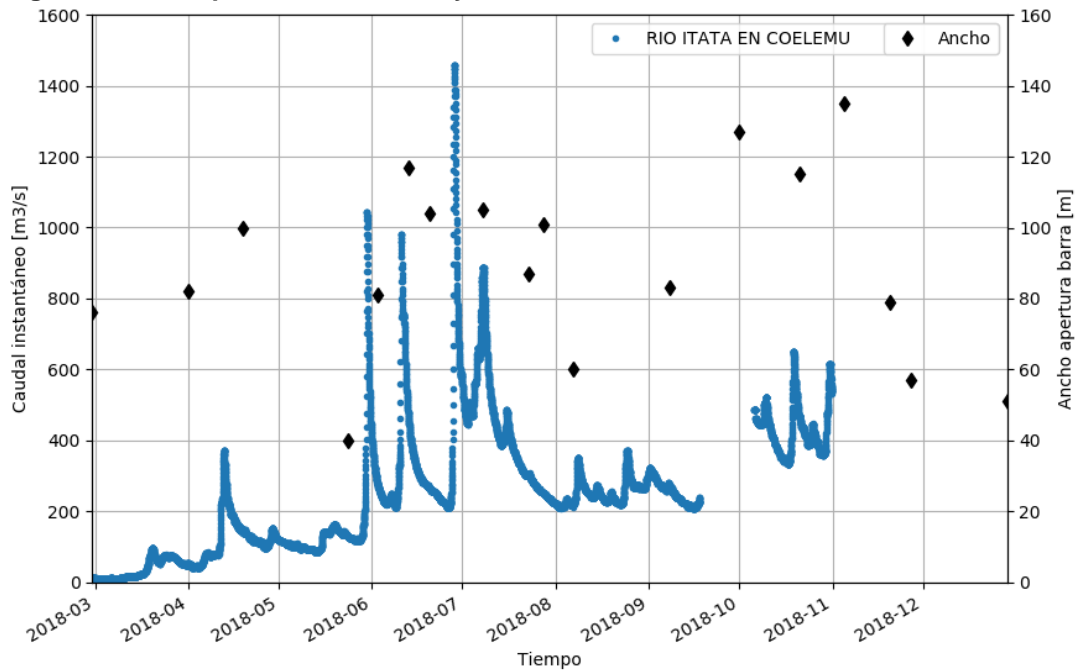
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.31: Apertura de la barra y caudal. Año 2017



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.32: Apertura de la barra y caudal. Año 2018



Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el ancho máximo de la apertura fue del orden de 500 m (año 2015), y que los mayores valores ocurren durante las crecidas.

3.7 Análisis sedimentométrico

Con base en información disponible en la WEB (página de la DGA), se obtuvo la estadística de caudal sólido en la estación Río Itata en Coelemu, con información desde agosto de 1985 hasta septiembre de 2018.

En el cuadro siguiente se resume los valores medios anuales consignados en la estación Coelemu.

Cuadro N° 3.7: Resumen de gasto sólido anual, estación Río Itata en Coelemu

Variable	q (m ³ /s)				g (kg/s)				
	Estadígrafo	min	mean	max	idxmax	min	mean	max	idxmax
Año									
1985	80.00	288	1,567	28-Oct	0.16	6	323	28-Oct	
1986	0.00	434	4,712	17-Jun	0.00	49	2,624	17-Jun	
1987	0.00	371	2,490	14-Aug	0.00	55	3,976	15-Aug	
1988	0.00	267	3,163	29-Jul	0.00	4	159	19-Aug	
1989	0.00	177	2,477	30-Jun	0.00	4	173	28-Jul	
1990	1.83	185	1,228	11-Sep	0.01	19	1,866	08-Aug	
1991	0.00	395	7,152	29-May	0.00	44	2,305	27-May	
1992	10.90	561	5,736	05-May	0.03	66	1,345	25-May	
1993	7.50	136	434	05-Dec	0.04	1	17	04-Dec	
1994	19.00	346	4,746	25-Jul	0.06	13	434	21-Jul	
1995	13.30	379	3,060	11-Jul	0.09	18	701	11-Jul	
1996	6.04	142	1,460	13-Jun	0.03	7	653	13-Jun	
1997	0.00	497	5,047	20-Jun	0.00	96	3,622	20-Jun	
1998	0.00	84	578	05-Jul	0.00	3	150	05-Jul	
1999	0.00	272	3,049	06-Sep	0.00	14	658	11-Sep	
2000	6.41	424	5,780	01-Jul	0.02	31	668	14-Jun	
2001	0.00	359	6,043	29-May	0.00	20	913	14-Jun	
2002	12.50	204	690	03-Nov	0.02	4	63	17-Mar	
2003	11.30	273	3,515	22-Jun	0.06	15	502	20-Jun	
2004	14.70	296	1,627	13-Apr	0.05	14	553	20-Jun	
2005	38.70	459	5,541	02-Jul	0.09	40	1,760	29-Jun	
2006	0.00	345	4,242	08-Jun	0.00	24	1,290	07-Jun	
2007	16.40	199	1,377	06-Jul	0.08	5	242	06-Jul	
2008	20.70	354	5,067	22-May	0.05	58	4,169	23-May	
2009	13.10	328	3,038	19-Jun	0.01	20	1,193	19-Aug	
2010	21.00	169	1,171	29-Aug	0.03	3	104	24-Jun	
2011	20.50	283	2,198	12-Aug	0.07	3	45	16-Jul	
2012	28.00	215	2,115	29-May	0.02	4	361	29-May	
2013	15.30	226	1,666	04-Jul	0.01	2	63	08-Jul	
2014	0.00	344	3,085	03-Aug	0.00	13	729	01-Aug	
2015	0.00	330	2,753	29-Aug	0.00	20	1,020	30-Aug	
2016	8.83	136	1,076	25-Jul	0.04	2	62	02-Oct	
2017	3.58	292	1,719	26-Jun	0.01	7	158	14-Jul	
2018	0.00	174	1,309	28-Jun	0.00	7	552	10-Jun	

Fuente: Elaboración propia con base en estadística de la DGA en estación Río Itata en Coelemu.

Por otra parte, si se analiza el aporte mensual de sedimentos, se llega a los valores señalados en el cuadro siguiente.

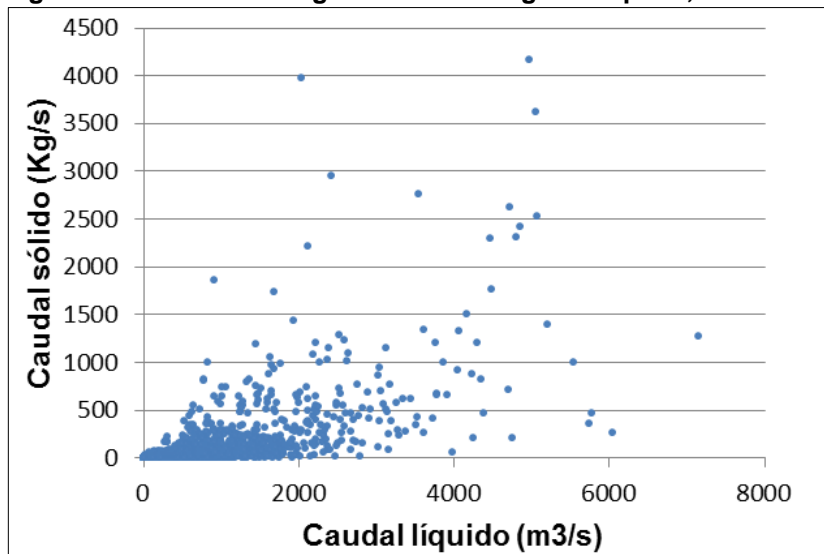
Cuadro N° 3.8: Resumen de gasto sólido mensual, estación Río Itata en Coelemu

Mes	q (m3/s)			g (kg/s)		
	min	mean	max	min	mean	max
Ene	0	40.7	232	0	0.4	45.8
Feb	0	24.6	524	0	0.5	52.5
Mar	0	33.4	658	0	0.6	63.4
Abr	0	70.5	1627	0	2.8	302.2
May	0	355.3	7152	0	59.2	4168.8
Jun	47.4	668.3	5047	0.074	75.5	3622.4
Jul	0	612.1	5780	0	40.5	2296.3
Ago	0	615.8	3284	0	41.2	3976.3
Sep	0	541.7	3049	0	36.2	975.3
Oct	5.1	371.1	1876	0.018	9.3	701.5
Nov	0	248.8	1970	0	4.6	661.8
Dic	0	104.6	582	0	1.3	104.9

Fuente: Elaboración propia con base en estadística de la DGA en estación Río Itata en Coelemu.

Para efectos de estimar el gasto sólido en función del caudal líquido, se buscó la mejor correlación entre estas dos variables. Sin embargo, como se podrá apreciar en el siguiente gráfico, no presentan una buena correlación (fuerte dispersión).

Figura N° 3.33: Relación gasto sólido v/s gasto líquido, estación Río Itata en Coelemu



Fuente: Elaboración propia.

Se concluye que la mejor correlación se obtiene para los caudales máximos mensuales, descartándose los datos de junio y de agosto.

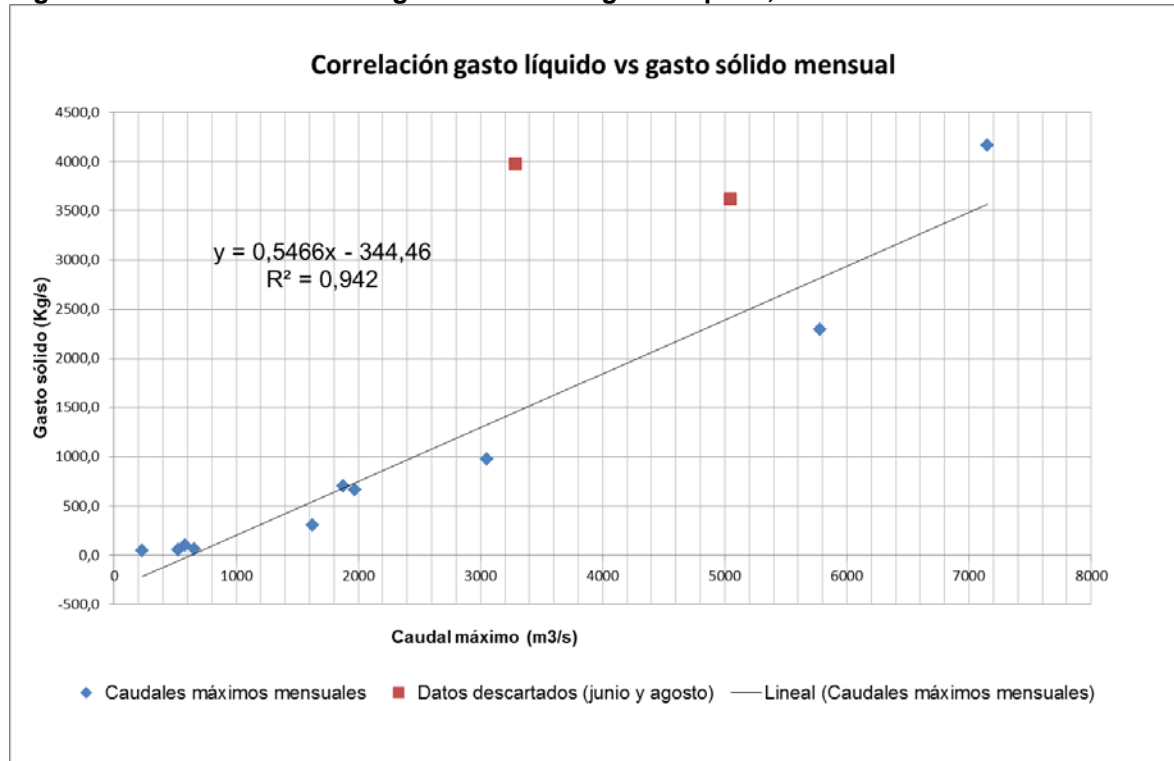
Se llega a la siguiente expresión:

$$GS_{\text{máx}} = 0,5466 Q_{\text{máx}} - 344,5$$

con $R^2 = 0,942$ ($r=0,97$)

Lo señalado se resume en el siguiente gráfico.

Figura N° 3.34: Correlación de gasto sólido v/s gasto líquido, estación Río Itata en Coelemu



Fuente: Elaboración propia con base en estadística de la DGA en estación Río Itata en Coelemu.

Así por ejemplo, si el caudal líquido es de 1.000 m³/s, entonces el gasto sólido asociado será de 202 Kg/s, y para 5.000 m³/s será de 2.389 kg/s (ver cuadro siguiente).

Cuadro N° 3.9: Ejemplo de cálculo del gasto sólido en estación Río Itata en Coelemu

Q máx (líquido)	m ³ /s	1,000	5,000
Gasto sólido = 0,5466 Q_{máx} - 344,5	kg/s	202	2389

Fuente: Elaboración propia

3.8 Hidrograma de Crecidas de Diseño

De acuerdo con los análisis efectuados, se determinaron las crecidas de diseño, las que se ocupan en la modelación hidráulica de la desembocadura.

Cabe recordar que, considerando que los problemas de inundación ocurren preferentemente en los meses de febrero a junio, el análisis estadístico se efectuó con los datos correspondientes a dicho periodo, cuestión que fue acordada con la inspección fiscal.

Entonces, para el análisis estadístico se ha considerado la serie de caudales instantáneos en el periodo de registros (1986-2018), eliminándose los meses entre julio y enero, para luego determinar el nuevo máximo con el año abreviado.

En consecuencia, considerando una distribución de probabilidad de valores extremo tipo I (Gumbel), que es la que presenta el mejor ajuste, los caudales máximos de crecida adoptados por periodo de retorno son los siguientes.

Cuadro N° 3.10: Caudales máximos de crecida [m³/s]

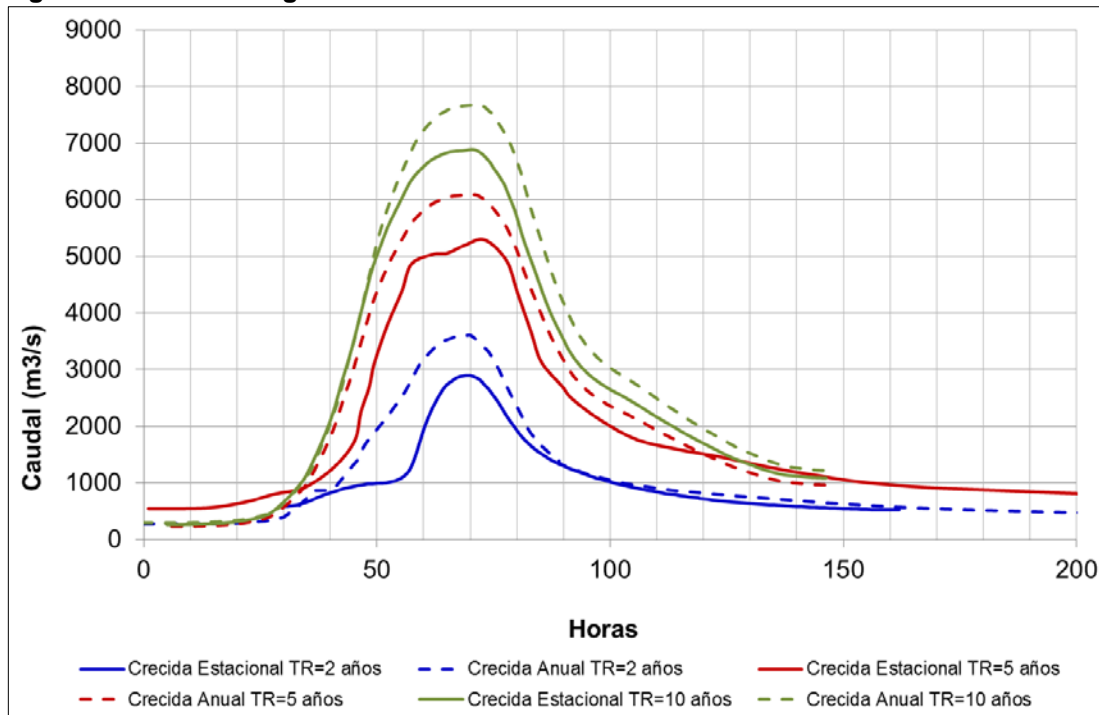
Periodo	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años
Febrero-Junio	2.900	5.300	6.880
Anual	3.700	6.100	7.680

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con estos caudales máximos, se seleccionaron crecidas de diseño representativas a partir de la estadística disponible ocupada para el análisis, las que se ajustaron mediante un factor de proporcionalidad para llegar al caudal máximo (peak) de diseño requerido.

En la figura siguiente se presentan los hidrogramas de diseño utilizados en la modelación hidráulica, para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

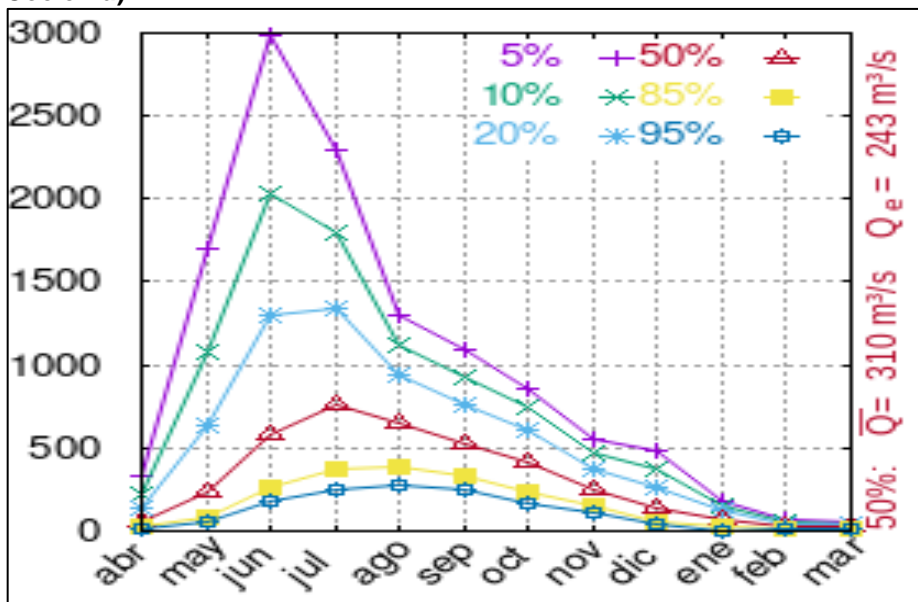
Figura N° 3.35: Hidrogramas de diseño



Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que el caudal medio anual del río Itata asciende a 310 m³/s, según se aprecia en el siguiente gráfico.

Figura N° 3.36: Curvas de variación estacional de caudales mensuales en m³/s Río Itata (en Coelemu)



Fuente: DGA.

3.9 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- i) La mejor distribución probabilística del caudal de crecida del río Itata en estación Coelemu se obtiene para una distribución de Valores Extremos Tipo I (Gumbel)
- ii) Existe buena correlación entre los caudales medidos en las estaciones Río Itata en Paso Hondo y los correspondientes en la estación Río Itata en Coelemu, con un factor de proporcionalidad 1,35 aproximadamente.
- iii) No existe buena correlación entre las precipitaciones medidas en distintas estaciones con los caudales simultáneos o correspondientes medidos en la estación Río Itata en Coelemu. La mejor correlación se obtiene para la estación Diguillín ($R^2=0,84$).
- iv) El ancho máximo de la apertura de la barra fue del orden de 500 m (año 2015), y los mayores valores ocurren durante las crecidas.
- v) Respecto del caudal de sedimentos, la mejor correlación con el caudal líquido se obtiene para los caudales medios mensuales, con la siguiente correlación

$$GSmáx = 0,6255 Qmáx - 242,2$$

con $R^2 = 0,7551$ ($r=0,87$)

- vi) Los hidrogramas de diseño a aplicar en el modelo se obtienen a partir del análisis estadístico mediante la selección de crecidas reales, con valores máximos correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años calculados a partir del análisis de valores extremos tipo I (Gumbel).

4. MODELACIÓN NUMÉRICA CUERPO MARÍTIMO

Se ha estudiado la hidrodinámica y la morfodinámica costera en la desembocadura del río Itata, para la situación actual (base) y la situación con proyecto (apertura permanente en base a dos espigones).

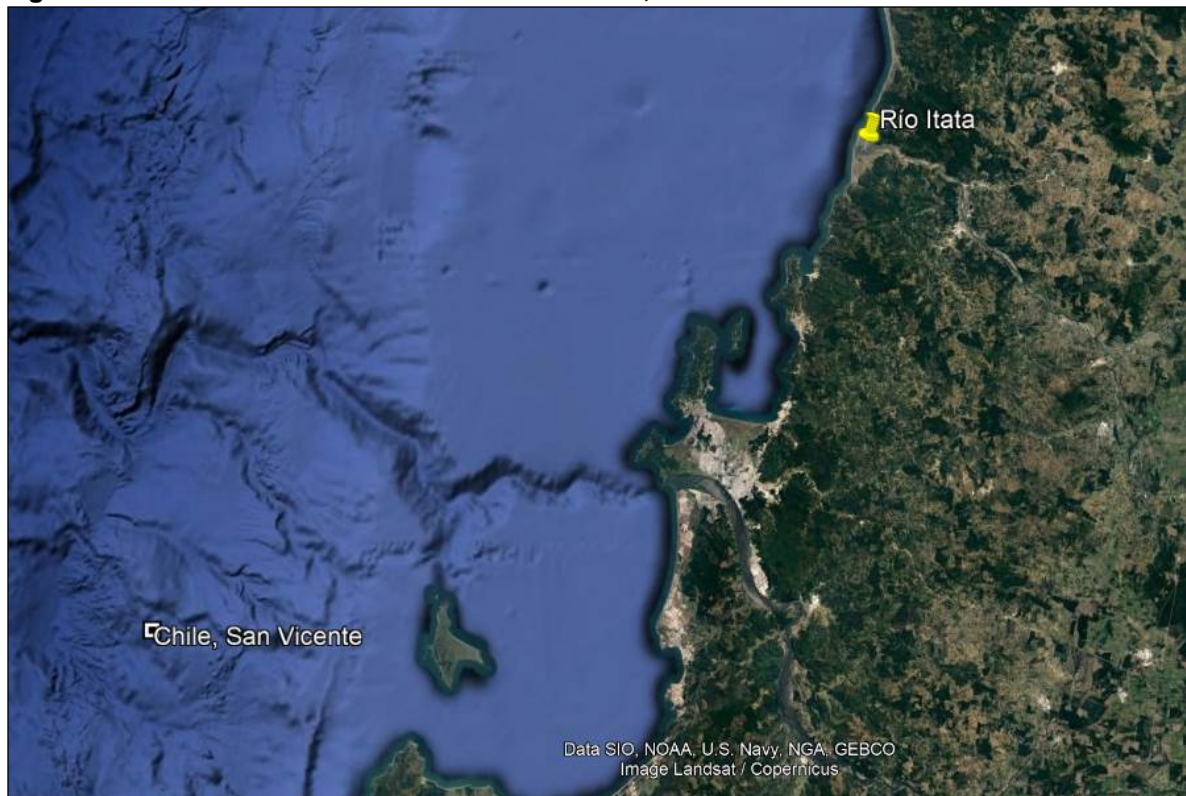
El estudio desde el punto de vista marítimo considera el análisis a corto y largo plazo, se evalúa la factibilidad técnica de disponer espigones para asegurar la apertura permanente del río y finalmente se diseñan dichas obras a nivel conceptual, todo ello, se desarrolla en extenso en el **Anexo 5 “Estudio Marítimos”**.

4.1 Estudio de Oleaje

El estudio de oleaje tiene por objetivo caracterizar el clima de olas tanto para el diseño de las obras marítimas como para alimentar los modelos numéricos.

Se ha caracterizado el clima de olas en aguas profundas a partir de la información espectral de oleaje (Olas Chile V) proporcionada por la DOP en el nodo frente a las costas de San Vicente.

Figura N° 4.1: Ubicación del Nodo de Olas Chile V, Río Itata



Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth.

Para caracterizar el clima de oleaje en el área de estudio, se procede inicialmente al análisis y caracterización del clima de olas en aguas profundas a partir de los 34 años de oleaje. Posteriormente, se realiza la transferencia de oleaje, mediante la propagación de oleaje espectral (espectros bidimensionales) hacia la zona de interés. Esta transferencia se realiza mediante modelación numérica hacia el sitio de estudio, utilizando el software de tercera generación **MIKE 21 módulo SW**.

Para mayor detalle de los resultados y análisis ver Anexo 5.

4.2 Mareas

Para la información de mareas en la zona de estudio, se utiliza el proceso de análisis de los valores no armónicos de la marea el Puerto de Valparaíso (3 años), considerado como puerto patrón para el sector de Coliumo.

Cuadro N° 4.1: Valores no armónicos de la marea, Coliumo

Plano mareal	[m] NRS
Pleamar Máxima	+1,90
Altura Media de la Pleamar	+1,39
Nivel Medio del Mar	+0,73
Altura Media de la Bajamar	+0,43
Bajamar Mínima	-0,23

Fuente: Elaboración propia, a partir de la corrección del Puerto Patrón Valparaíso.

Los cálculos que se presentarán más adelante serán efectuados con el *nivel medio del mar* (salvo indicación contraria), en razón que corresponde a un nivel modal (con mayor probabilidad de ocurrencia).

Sin perjuicio de lo anterior, los modelos numéricos han sido alimentados con información de mareas del modelo global de MIKE.

4.3 Modelación hidrodinámica

Para analizar la condición de equilibrio en el corto plazo, se realizaron modelaciones numéricas mediante el software MIKE 21 y sus módulos SW (oleaje espectral) y HD (módulo hidrodinámico), tanto para la situación actual como proyectada.

4.3.1 Situación Actual

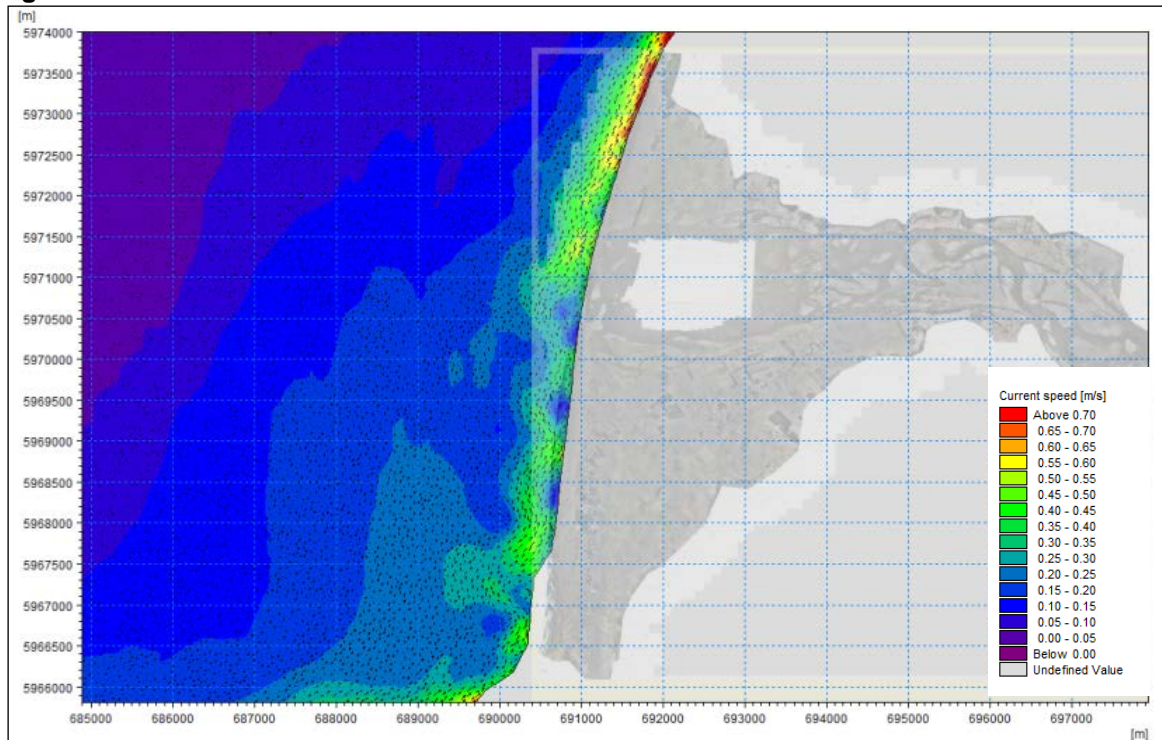
Para efectos de modelación se han definido casos, los cuales consideran altura de ola desde 1,5 m hasta los 3,5 m, períodos entre los 11 y 15 s, mientras que las direcciones entre 225° y 247,5°.

Importante mencionar que los casos escogidos se centran en los rangos los cuales tienen mayor probabilidad de ocurrencia, sumando en total un del orden del 90%.

Las modelaciones mostraron que la dirección de las corrientes y transporte de sedimentos son de sur a norte (en los casos analizados), es de esperar, que bajo otros eventos (de menor frecuencia), las corrientes varíen en magnitud y dirección.

La magnitud aumenta a medida que la altura de ola aumenta, por ejemplo, en la desembocadura del río Itata las velocidades pueden ir desde los 0,22 m/s hasta los 0,58 m/s.

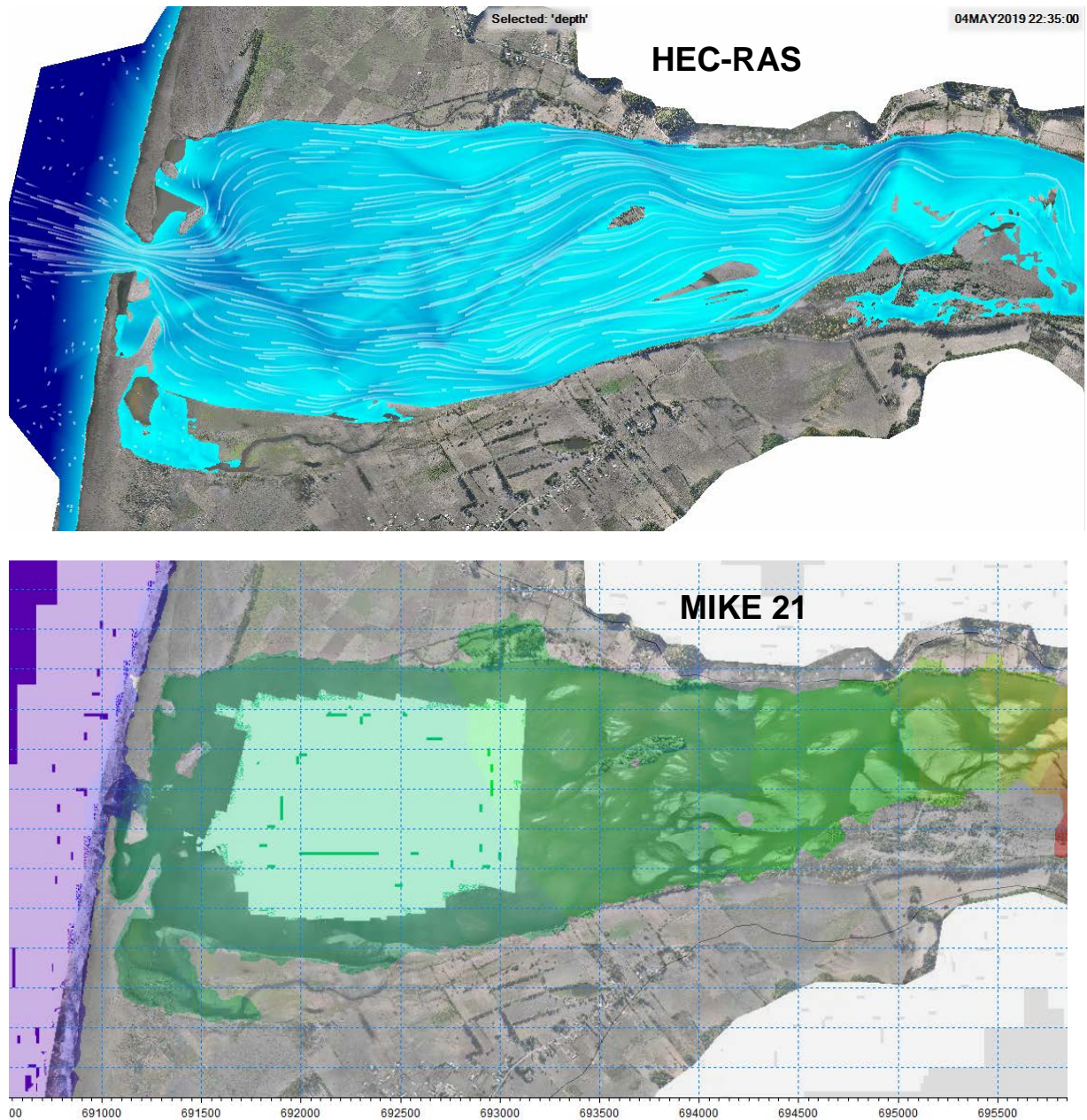
Figura N° 4.2: Resultado corrientes río Itata – Situación Actual



Fuente: Elaboración propia.

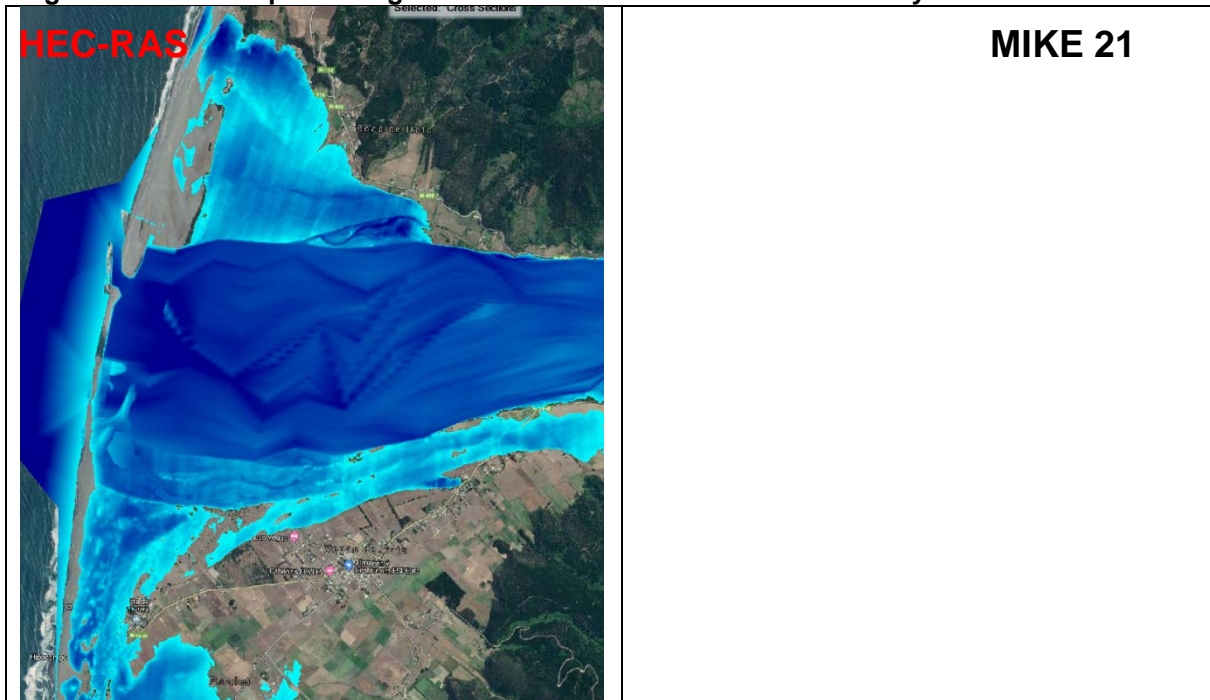
Además se estudiaron dos casos para evaluar las cotas de inundación, el primero corresponde al evento de mayo de 2019, que es cuando se efectuó la topobatemetría, mientras que el segundo caso analiza la crecida de junio de 2015, estos fueron comparados con los resultados de la modelación hidráulica (modelada con HEC-RAS).

Figura N° 4.3: Comparación global HEC-RAS v/s MIKE 21 – evento mayo 2019



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 4.4: Comparación global HEC-RAS v/s MIKE 21 – evento mayo 2019



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que en ambos casos se produce una correspondencia en las zonas inundadas calculadas con HEC-RAS y con MIKE 21, con algunas diferencias principalmente en la zona norte, donde HEC-RAS genera una mayor inundación, sin embargo, para propósito de este estudio se consideran aceptables.

El detalle de los resultados y análisis se encuentran en el Anexo 5.

4.3.2 Situación con Obras

Para estudiar el comportamiento hidrodinámico del sector, disponiendo los dos espigones de retención, se han modelado los siguientes casos:

Cuadro N° 4.2: Casos a modelar con obra

Casos	Oleaje	Caudal	Marea
1	Reinante Hm0=2,5 m (promedio)	Medio de Verano/Q=100 m ³ /s	Marea típica (max=1,54 m/min=0,11 m)
2	Reinante Hm0=2,5 m (promedio)	Tr=2 años/Qmax=3.700 m ³ /S	Marea típica (max=1,54 m/min=0,11 m)
3	Reinante Hm0=2,5 m (promedio)	Tr=10 años/Qmax=7.680 m ³ /S	Marea típica (max=1,54 m/min=0,11 m)
4	Tormenta Hm0=4,3 m (promedio)	Medio de Verano/Q=100 m ³ /s	Marea típica (max=1,54 m/min=0,11 m)
5	Tormenta Hm0=4,3 m (promedio)	Tr=2 años/Qmax=3.700 m ³ /S	Marea típica (max=1,54 m/min=0,11 m)
6	Tormenta Hm0=4,3 m (promedio)	Tr=10 años/Qmax=7.680 m ³ /S	Marea típica (max=1,54 m/min=0,11 m)

Nota 1: Para descripción del oleaje Reinante y Tormenta ver numeral 5.2.1.3 del Anexo 5.

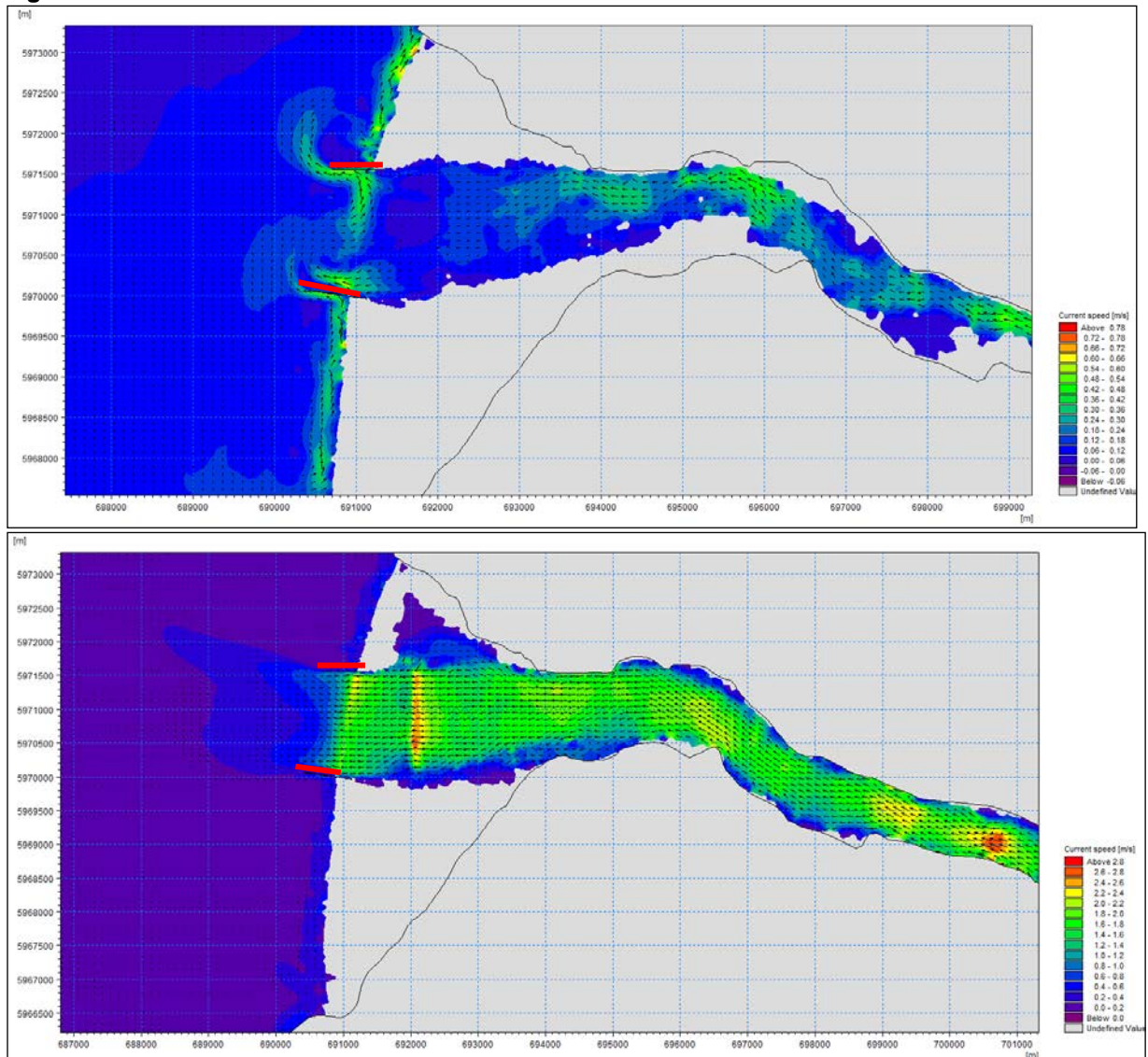
Nota 2: Para descripción de las mareas ver numeral 5.2.1.5. del Anexo 5

Fuente: Elaboración Propia.

Respecto de los resultados de las modelaciones numéricas para la situación con obras, se pudo observar lo siguiente:

- Las magnitudes de las corrientes aumentan a medida que el caudal del río aumenta.
- La hidrodinámica en la desembocadura está dominada por el río para oleaje operacional, esta situación se hace más notoria a medida que el caudal del río aumenta.
- La hidrodinámica de la desembocadura está dominada en mayor medida por el oleaje de temporal.
- Los espigones modifican el patrón de corrientes con respecto a la situación actual, esto es más evidente en los casos de oleaje es de mayor magnitud (temporal). Se observa la generación de corrientes circulatorias en torno a ambos espigones, pero más pronunciado en el espigón norte.
- Para condiciones de crecidas extremas se producen inundación localizada en la ribera norte, lo que se debe a que es un sector extremadamente bajo (de acuerdo a lo indicado en las cotas topográficas), incluso llegando a menos de 2 mNRS en cierto tramo. Es por ello, que bajo eventos de crecidas extremas la apertura permanente de la barra no es capaz que evitar la inundación en dicho sector específico, razón por la cual se debe proteger dicho sector con alguna obra de contención.

Figura N° 4.5: Resultados corrientes río Itata – Situación con Obras



Fuente: Elaboración propia.

El detalle de los resultados y análisis se encuentran en el Anexo 5.

4.4 Transporte de sedimentos

Se evalúa el comportamiento morfodinámico del sistema para las situaciones con y sin obras, con los resultados que a continuación se describen.

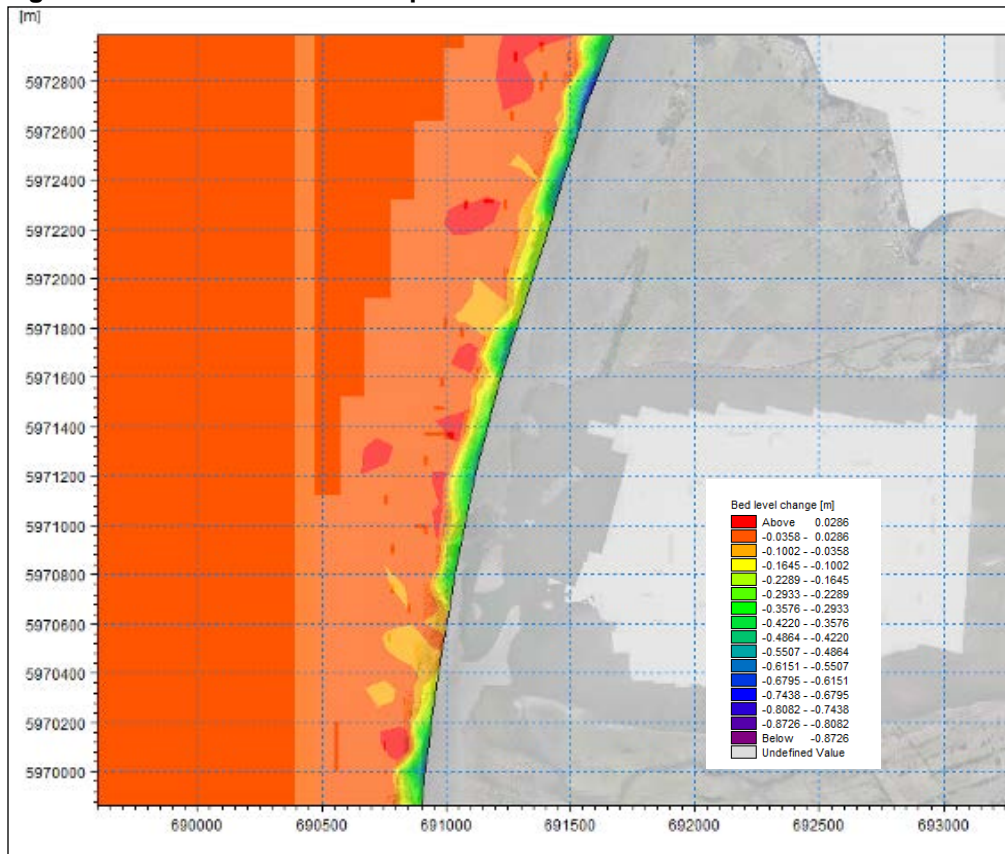
4.4.1 Situación Actual

Respecto de los resultados de las modelaciones numéricas para la situación actual, se pudo evaluar que el transporte de sedimentos responde a la hidrodinámica del sector, los

resultados obtenidos de las corrientes indican cómo se moverán las arenas (de sur a norte). Se aprecia erosión en la desembocadura del río Itata, la cual aumenta a medida que la altura de ola crece y también a medida que el ángulo de incidencia se hace más perpendicular.

Si bien se observan tasas de erosión, como se demostró en el numeral 4.1.2.1 del Anexo 5, el sistema costero en general se encuentra en equilibrio gracias a los aportes de sedimentos del río Itata, que nutre de arenas el sector.

Figura N° 4.6: Resultados transporte de sedimentos río Itata – Situación actual



Fuente: Elaboración propia.

El detalle de los resultados y análisis se encuentran en el Anexo 5.

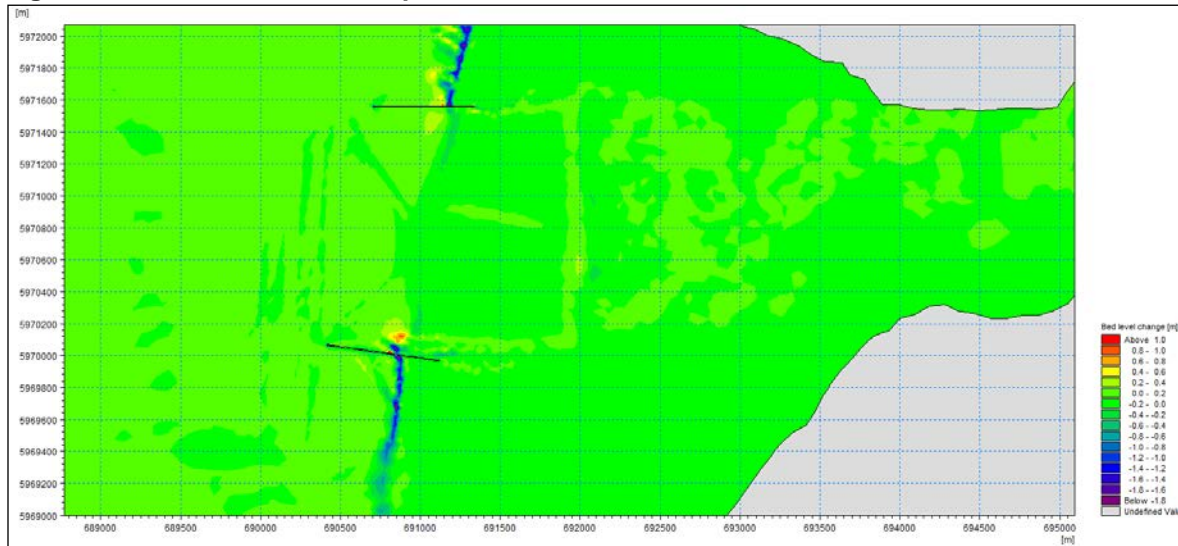
4.4.2 Situación con Obras

Respecto de los resultados de las modelaciones numéricas para la situación con obras, se pudo observar lo siguiente:

- En todos los casos modelados se observa erosión del lado exterior de ambos molos, que aumenta significativamente en función de las características del oleaje.

- Se observa cierto grado de sedimentación en la desembocadura del río Itata, por ende, no es posible garantizar la apertura permanente de la barra en todo su ancho.
- Producto de la erosión detectada en las modelaciones, es de esperar que en el largo plazo el sector sur de la playa sufra retroceso de la línea de costa, ya que la modificación hidrodinámica que producen los espigones no permitiría alimentar con sedimentos dicho sector, tal como se estudia en el numeral 5.2 del Anexo 5.

Figura N° 4.7: Resultado Transporte de Sedimentos Caso 1



Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Conclusiones y Recomendaciones Estudios Marítimo

En la primera parte del estudio se realizó una especie de calibración, en la cual se comparan las modelaciones realizadas con MIKE 21 y HEC-RAS, encontrándose similitudes para las dos situaciones de análisis.

Las inundaciones del lado norte (para condiciones extremas), se deben a que es un sector extremadamente bajo (de acuerdo a lo indicado en las cotas topográficas), incluso llegando a menos de 2 mNRS en cierto tramo. Es por ello, que bajo eventos de crecidas extremas la apertura permanente de la barra no es capaz que evitar la inundación en dicho sector específico.

Las condiciones de oleaje no influyen de manera significativa el patrón de inundación.

Respecto de la hidrodinámica, en los tres primeros casos (con oleaje reinante), se observa que en la desembocadura es el río el que marca la tendencia de las corrientes, mientras que en los casos siguientes es el oleaje el que domina la circulación, a excepción del caso 6 (caudal de río para $T_r=10$ años), donde se observa la incidencia del río, pero en menor medida que el caso 3 (que es su similar).

Los espigones modifican el patrón de corrientes con respecto a la situación actual, esto es más evidente en los tres últimos casos, donde el oleaje es de mayor magnitud (temporal). Se observa la generación de corrientes circulatorias en torno a ambos espigones, pero más pronunciado en el espigón norte.

Se observa cierto grado de sedimentación en la desembocadura del río Itata, por ende, no es posible garantizar la apertura permanente de la barra en todo su ancho.

Producto de la erosión detectada en las modelaciones, es de esperar que en el largo plazo el sector sur de la playa sufra retroceso de la línea de costa, ya que la modificación hidrodinámica que producen los espigones no permitiría alimentar con sedimentos dicho sector.

En la primera actividad de Participación Ciudadana, la comunidad del sector de Vegas de Itata expresó de manera explícita que no quieren obras permanentes en la ribera sur del río Itata, es por ello, que la solución planteada no está de acuerdo con el requerimiento ciudadano.

En caso de que la alternativa 3 avance en su ciclo de vida (etapa de prefactibilidad y/o factibilidad), se recomiendan trabajos adicionales dentro de los cuales se proponen:

- Mediciones de oleaje y corrientes (mínimo 30 días) en la zona de la desembocadura. Adicionalmente se propone realizar un estudio de mareas para la determinación del NRS local, considerando que el sector de estudio tiene como Puerto Patrón Valparaíso.
- Verificación del PR definido por la DOP (ver análisis del numeral 9 de la Memoria Explicativa) para nuevos levantamientos del terreno, en el caso de no realizar la determinación del NRS local.
- Batimetría de detalle del mar y río (zona de desembocadura y riberas inundables).
- Modelación numérica incorporando la información de terreno antes comentada. Puede surgir la necesidad de ampliar los escenarios de modelación (tiempo) en el caso de encontrar una cierta estacionalidad en las mediciones de terreno.
- Modelación Física
 - Para estabilidad de los elementos que componen los molos
 - Para estudiar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la solución

5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL CUERPO FLUVIAL

5.1 Antecedentes para la modelación

La modelación fluvial se efectuó con el *software* HEC-RAS 5.0.7 en su modalidad 2D. Su ventaja radica en la posibilidad de identificar lugares sensibles a las inundaciones que podrían no estar representados en los perfiles transversales.

Para realizar esta modelación se requiere un modelo digital de terreno (DEM) sobre el cual escurra el río, características de rugosidad de este, condiciones de borde del volumen de control en análisis pudiendo ser estas un Hidrograma de crecida del río o un nivel de marea en la descarga.

En lo que sigue se detalla la elaboración de estos antecedentes, la calibración del modelo y los resultados obtenidos a nivel de diagnóstico.

5.2 Descripción del modelo

5.2.1 Área de estudio y generación de malla

El levantamiento topográfico fue realizado entre el 23 de Abril al 14 de Mayo con tecnología LIDAR utilizando un dron, generándose una nube de puntos de toda el área de estudio de terreno seco.

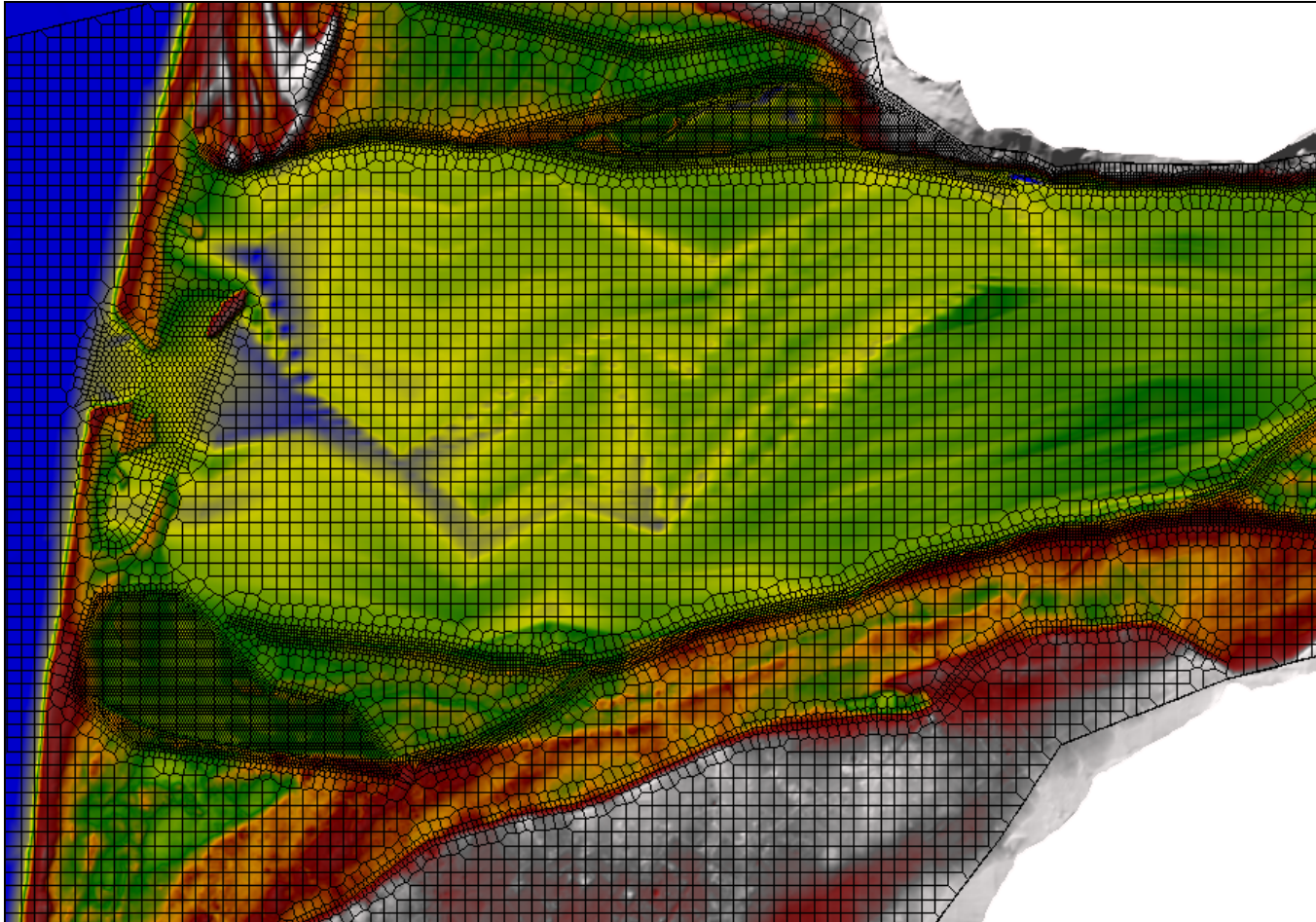
Estos puntos fueron filtrados previamente eliminándose puntos que no representan fielmente el nivel de terreno, esto es, las copas de los árboles, puentes o elementos que cruzan de forma aérea el río entre otros. Luego, al terreno se asocia coeficientes de rugosidad para la representación de los distintos grados de vegetación, caminos o río.

Para los sectores bajo agua, se generó una interpolación entre perfiles batimétricos transversales desde HEC-RAS, describiéndose los principales patrones de flujo para luego generar una superficie, unirlos al terreno y así conformar un único modelo de elevación digital.

La malla la genera automáticamente con el software, pudiendo demarcar bordes para las celdas donde exista algún quiebre en el terreno como las riberas del río, el sector de la apertura de la barra, canales, calles, etc. Además, es posible generar celdas de distintos tamaños por si hay un sector que se desee con un mayor nivel de precisión sin tener que aumentar el tiempo computacional de manera apreciable. Esto se aprecia en la Figura N° 5.1 para el sector de la desembocadura y en la Figura N° 5.2 donde se encuentra la bodega.

Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

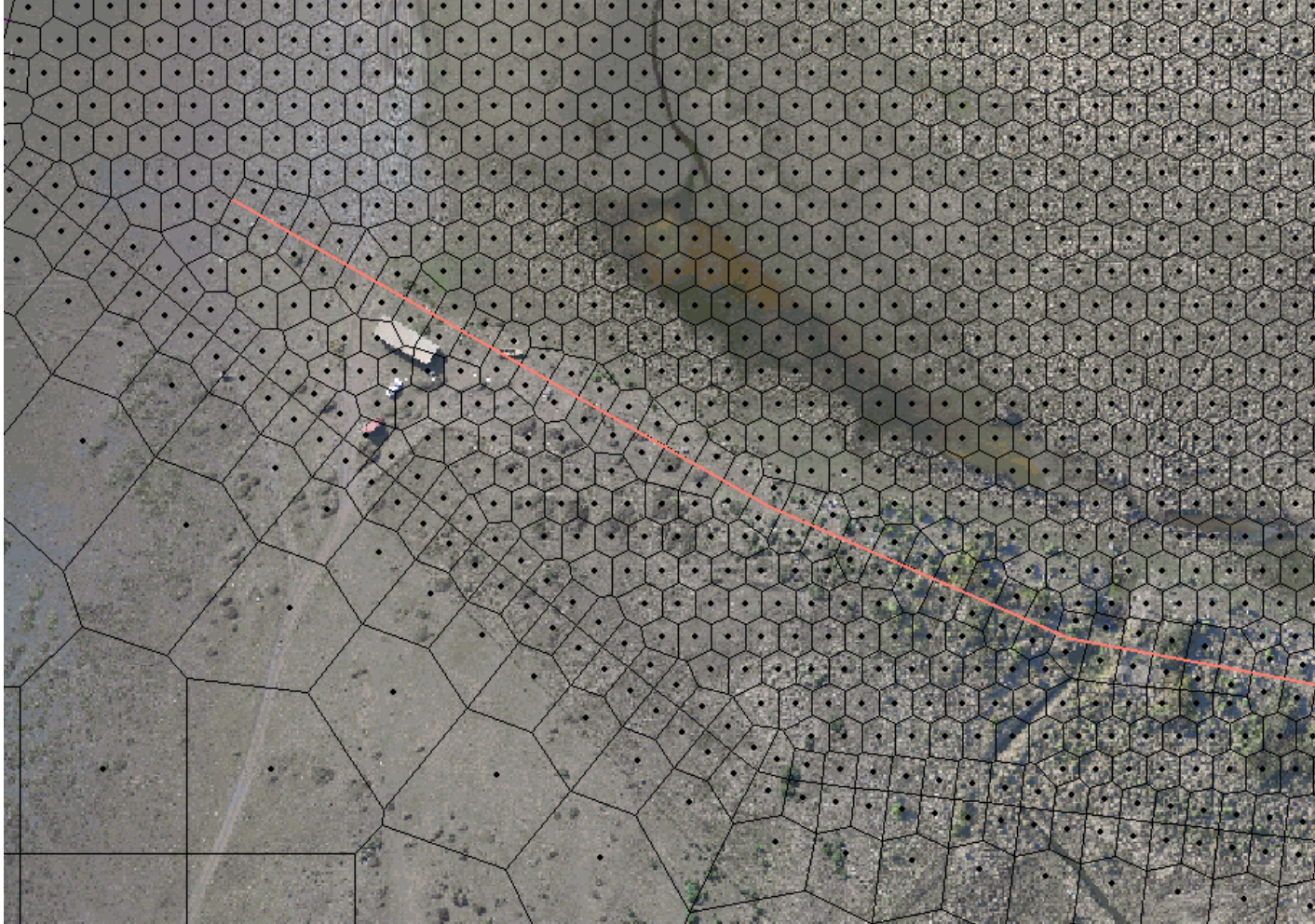
Figura N° 5.1: Malla modelo HEC-RAS 2D desembocadura



Fuente: Elaboración propia

Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

Figura N° 5.2: Malla irregular modelo HEC-RAS 2D. Sector Bodega



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Coeficientes de Manning

Se distinguieron 3 tipos de suelo con distintos coeficientes de rugosidad a partir de la ortofoto, tal como se presenta en la Figura N° 5.3. Estos corresponden a: Río, Áreas cultivables y Zona de matorrales, acorde con valores medios recomendados en la literatura (Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow).

Cuadro N° 5.1: Coeficientes de Manning adoptados

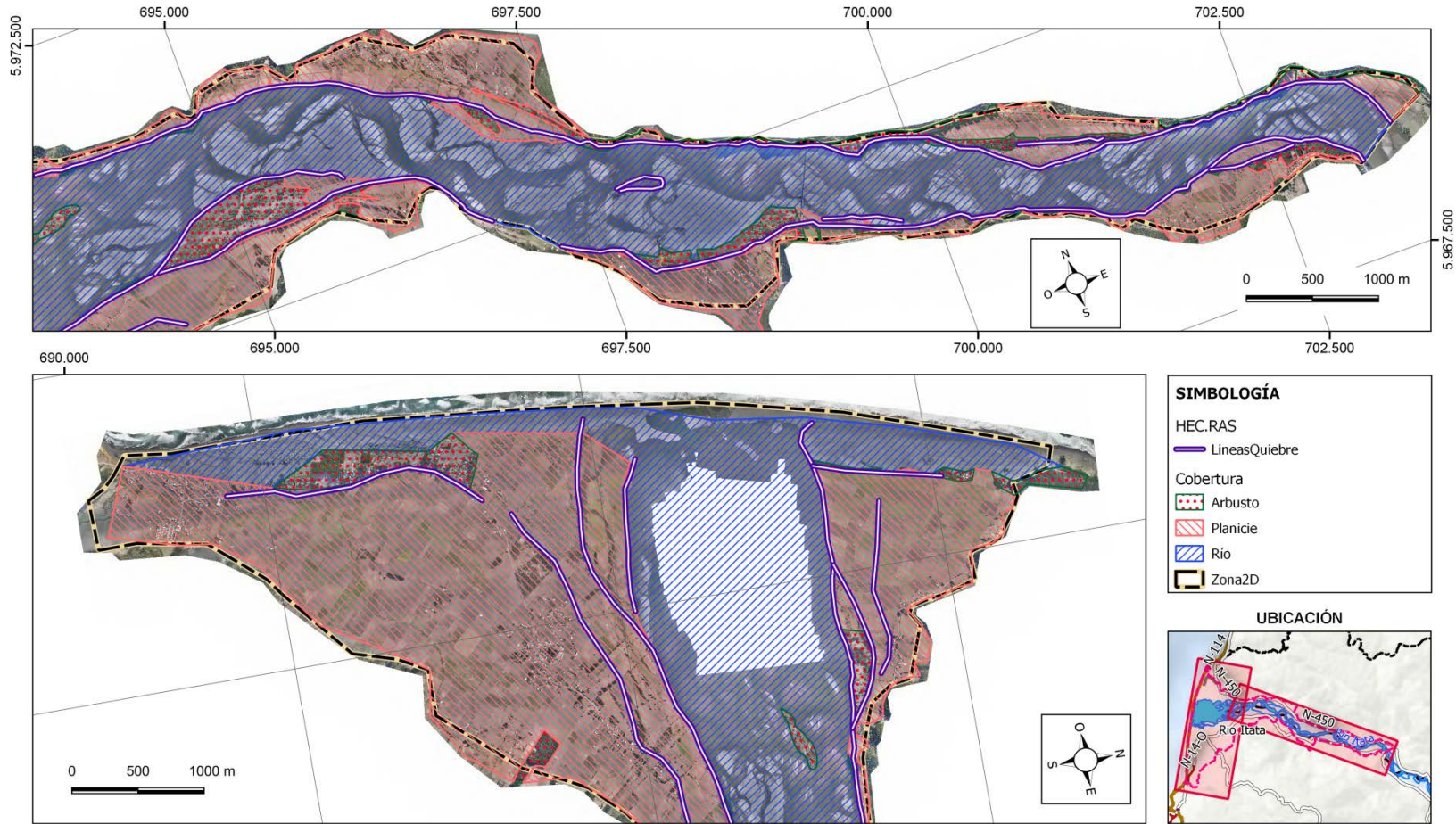
Superficie	Coeficiente de Manning	
	Rango	Valor adoptado
Río ancho	0,025 – 0,10	0,030
Área de cultivos	0,02 – 0,05	0,045
Zona de matorrales y árboles	0,035 – 0,16	0,065

Fuente: Elaboración propia a partir de Tabla 5-6 (Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow)

Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad del modelo al coeficiente de Manning adoptado.

Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

Figura N° 5.3: Tipos de suelo identificados



Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Condiciones de borde

Se han considerado dos condiciones de borde en este caso, a saber:

- i) Por el lado de aguas arriba: ingreso aguas arriba en forma de Hidrograma de flujo.
- ii) Por el lado de aguas abajo: se condiciona la salida a una serie de tiempo de los niveles de marea.

5.3 **Calibración de parámetros**

Hay dos antecedentes claros que son de utilidad para la calibración.

- M19: La información topográfica fue levantada en el mes de mayo del año 2019. Para esa ocasión se conoce el estado efectivo de apertura de la barra además de poder visualizar la zona mojada desde la ortofoto. La información de caudales se estima a partir de estaciones de la DGA en línea relacionadas con el caudal de la desembocadura.
- JN15: Otra información importante es que para la ocurrencia de la crecida del 6 de junio del año 2015, se inundaron ambas riberas del río.¹

5.3.1 Mayo 2019

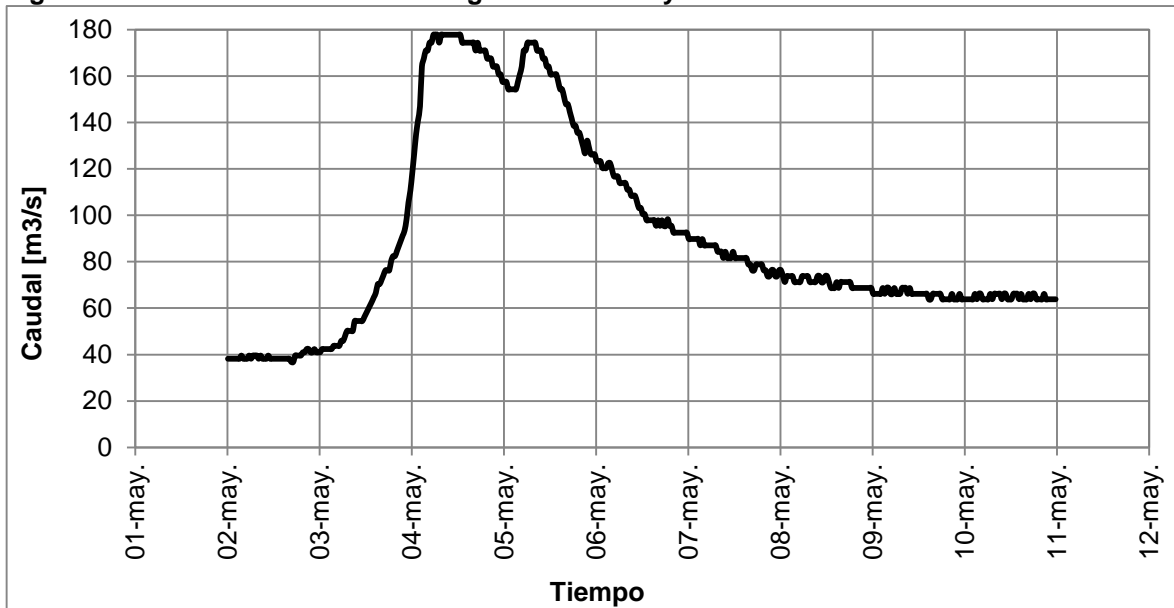
Los días en que se levantó la información topográfica, batimétrica y ortofoto fue entre el 2 y 10 de mayo el 2019. En dicho periodo la estación fluviométrica de Río Itata en Paso Hondo registró caudales entre los 30 y 130 m³/s. La relación de esta estación con Coelemu aumenta el caudal en un factor de 1,35 llegando a un máximo en torno a 180 [m³/s].

Se sabe que bajo las condiciones topográficas de ese periodo la laguna de inundación estuvo cercana al desborde sin llegar a inundar una bodega en la ribera sur.

Lamentablemente se desconoce el nivel máximo exacto alcanzado.

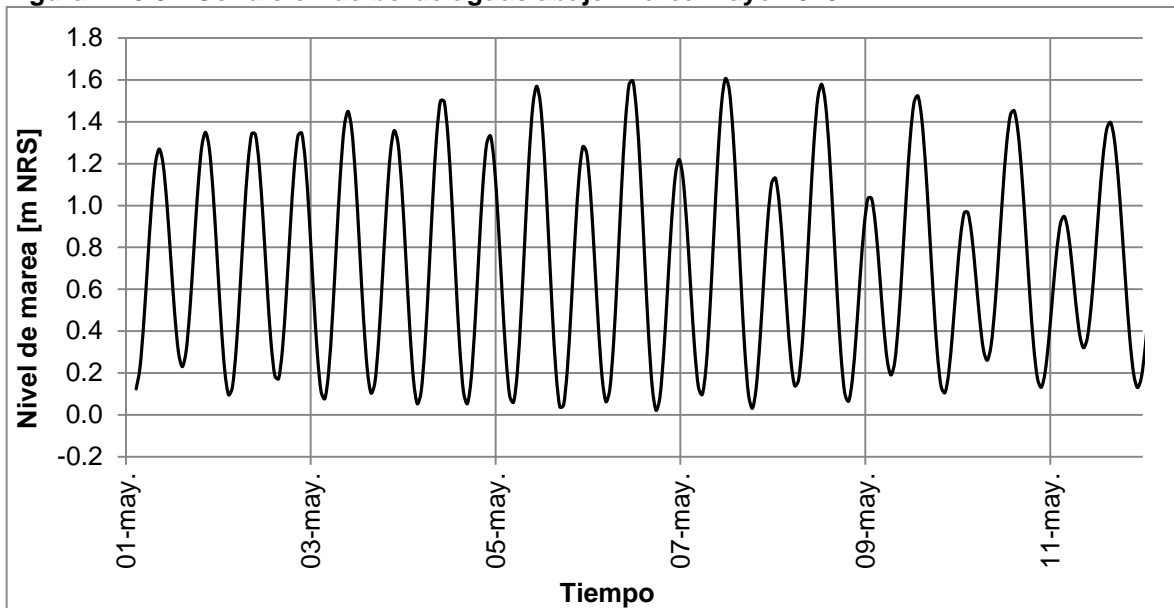
¹ <https://www.biobiochile.cl/noticias/2015/06/06/desborde-de-rio-itata-deja-2-familias-damnificadas-y-mas-de-100-hectareas-comprometidas.shtml>

Figura N° 5.4: Condición de borde aguas arriba. Mayo 2019



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5.5: Condición de borde aguas abajo. Marea Mayo 2019



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la modelación para esta situación han reproducido lo observado, es decir, que no existe inundación en la ribera norte, la laguna está bastante llena (cota máxima de agua 1,96 [m NRS] en la bodega) y la bodega no ha sido inundada.

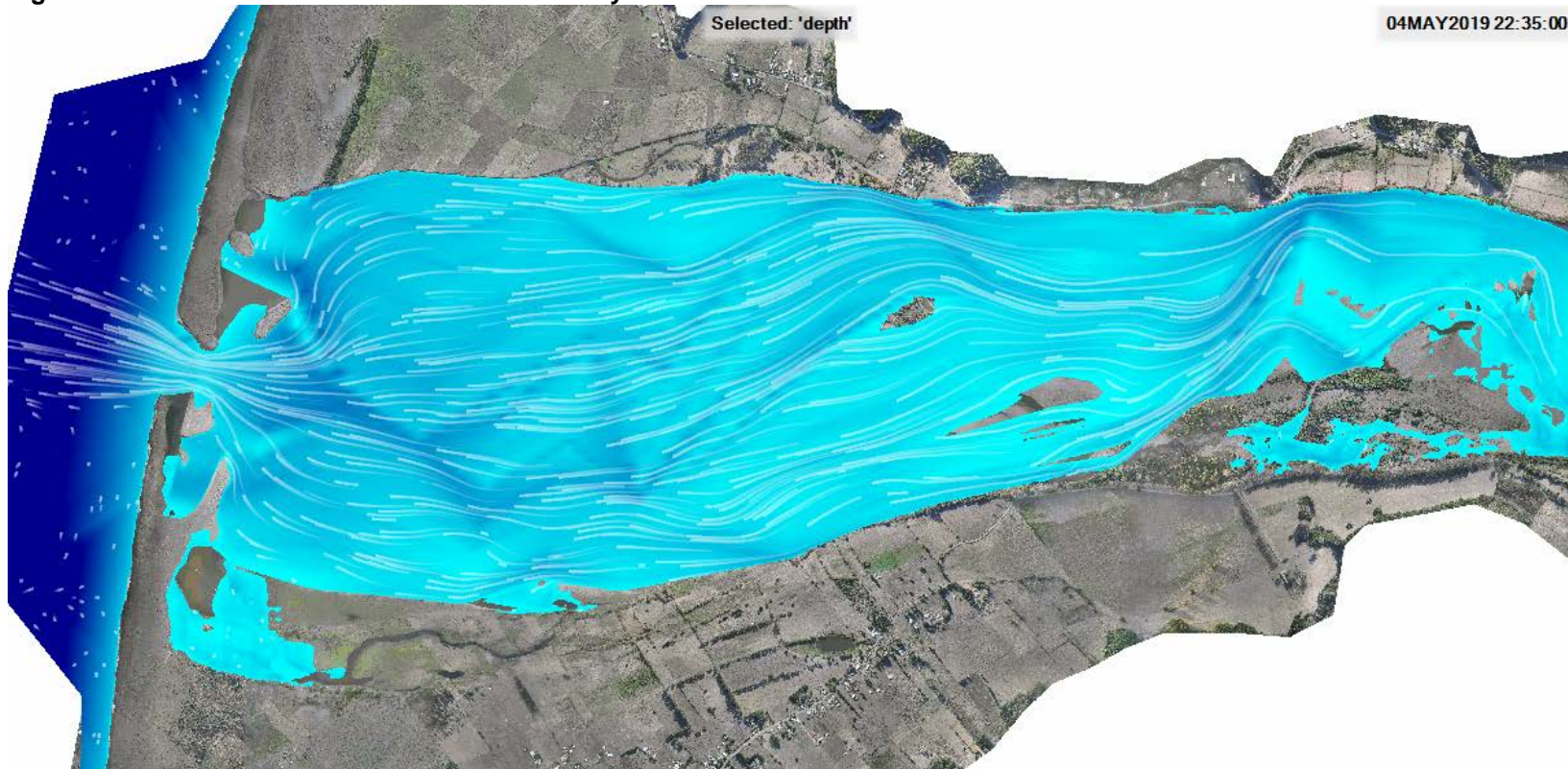
Cabe destacar que la apertura de la barra se encontraba entre 100 y 200 metros y la cota inferior de la apertura de la barra era de 0,87 [m NRS].

Dado que los caudales registrados en ese periodo fueron bajos y el nivel de marea no se acercó a sus máximos registrados (1,90 [m NRS]) el factor más importante que gatilla los desbordes correspondería a la cota inferior de la barra. Dicho de otra manera, es posible ver la abertura de la barra, sin embargo, si la cota inferior sobrepasa un umbral por determinar, se debe considerar que está cerrada.

El resultado de la modelación para las máximas profundidades se presenta a continuación en la Figura N° 5.6.

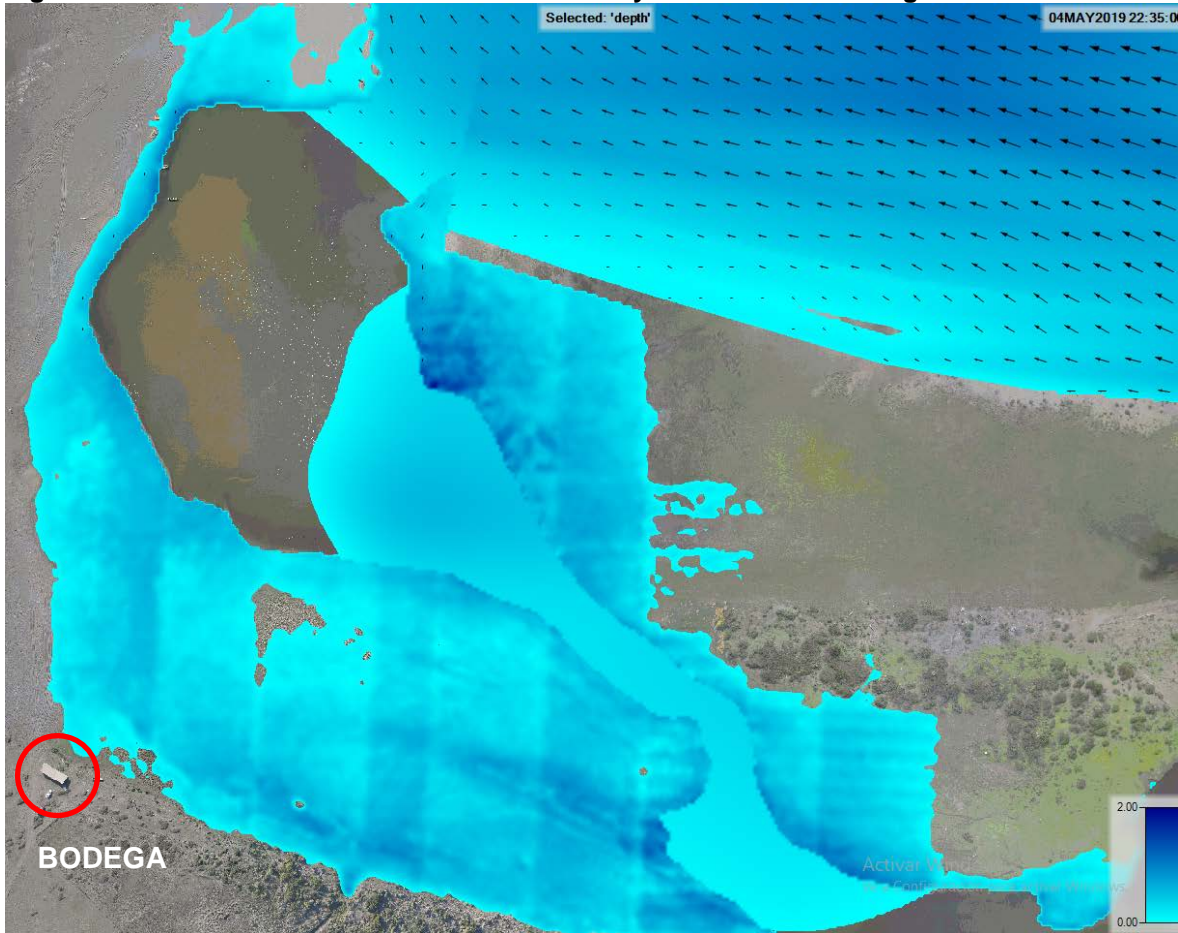
Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

Figura N° 5.6: Máxima mancha de inundación Mayo 2019 en la desembocadura



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5.7: Máxima mancha de inundación Mayo 2019. Sector Bodega



Fuente: Elaboración propia.

Nótese que en el sector de la bodega la circulación del agua tiene menores velocidades de flujo y la bodega no llega a inundarse. Los valores máximos de nivel de agua en dicho sector resultan de 1,95 [m NRS].

Cabe señalar que el nivel de terreno en el sector bodega es de 3,8 mNRS aproximadamente.

En este modelo y caudales luego se han generado 3 nuevas simulaciones modificando la capa de coeficientes de Manning. Se consideraron un 20% menos y un 20% más con respecto a los adoptados los cuales se agrupan en el Cuadro N° 5.2.

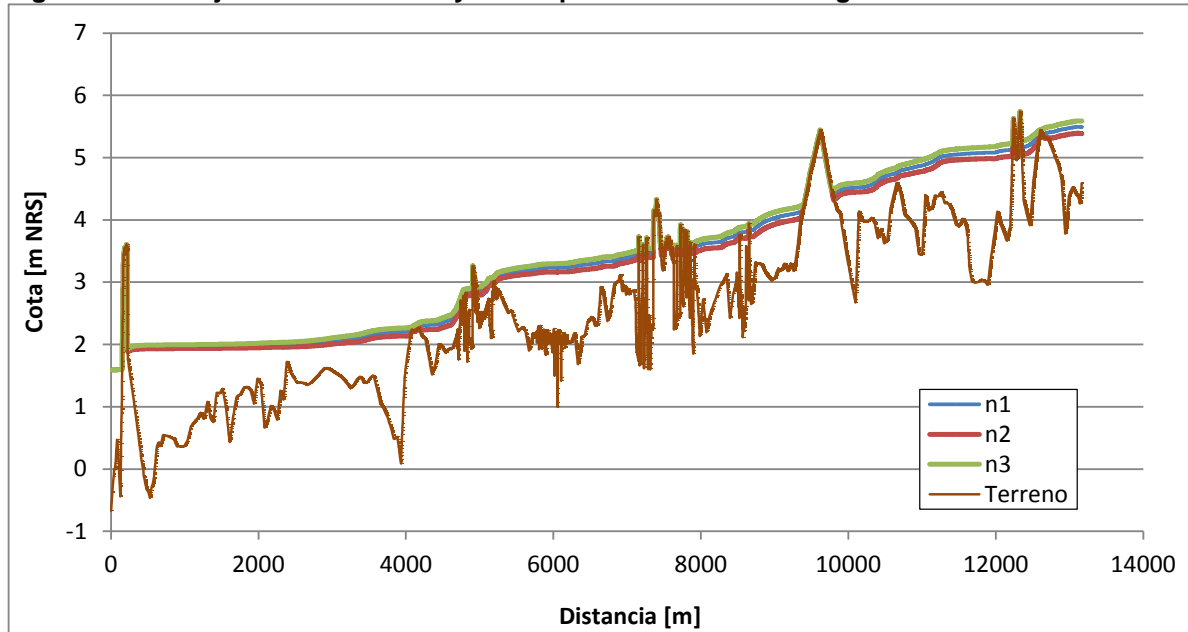
Cuadro N° 5.2: Coeficientes de Manning sensibilizados

Superficie	n_1 Base	$n_2 = 80\%n_1$	$n_3 = 120\%n_1$
Río ancho	0,030	0,024	0,036
Área de cultivos	0,045	0,036	0,054
Zona de matorrales y árboles	0,065	0,052	0,078

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de estas modelaciones son 3 niveles máximos de agua durante la crecida en la zona estudiada. El nivel de agua máxima en el eje a lo largo de toda la extensión del río modelado presenta las mayores diferencias en la condición de borde aguas arriba según al coeficiente de Manning modelado. La Figura N° 5.8 presenta el nivel de agua con las 3 serie de rugosidades presentes en el Cuadro N° 5.2.

Figura N° 5.8: Eje hidráulico en Mayo 2019 para distintos Mannings



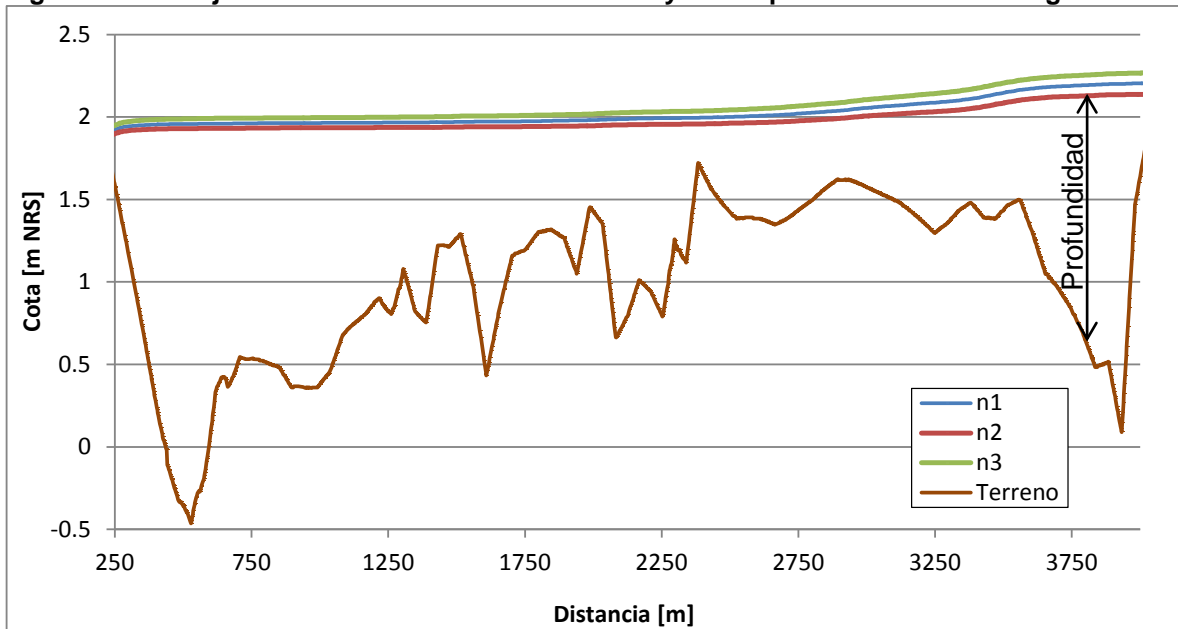
Fuente: Elaboración propia.

En la figura el nivel de agua producto de la modelación con los coeficientes base de Manning se presenta en la serie azul n_1 . La serie roja n_2 , donde los coeficientes de Manning se han reducido en un 20%, estima niveles de agua máximos menores a la situación base, consistente con una menor pérdida de energía por fricción.

Por otra parte, la serie verde n_3 es el resultado de la modelación con coeficientes de Manning 20% superiores a la situación base lo cual se traduce en mayores niveles máximos de agua.

En la Figura N° 5.9 presenta estos niveles de agua en la zona de interés, los 4 kilómetros más aguas abajo en la desembocadura misma.

Figura N° 5.9: Eje hidráulico desembocadura en Mayo 2019 para distintos Mannings



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar una comparación cuantitativa de las figuras previamente presentadas se promedian las profundidades a lo largo de un sector de 1000 metros en distintos tramos, para luego comparar los valores según la situación modelada.

Las diferencias en las profundidades medias se resumen en el Cuadro N° 5.3. La diferencia promedio es de 9% estando concentrada en el sector de aguas arriba mientras que en el sector de la desembocadura la diferencia de un 20% del coeficiente de Manning se traduce en un cambio del 2,7% en las profundidades estimadas.

Cuadro N° 5.3: Análisis de sensibilidad para coeficientes de Manning adoptados

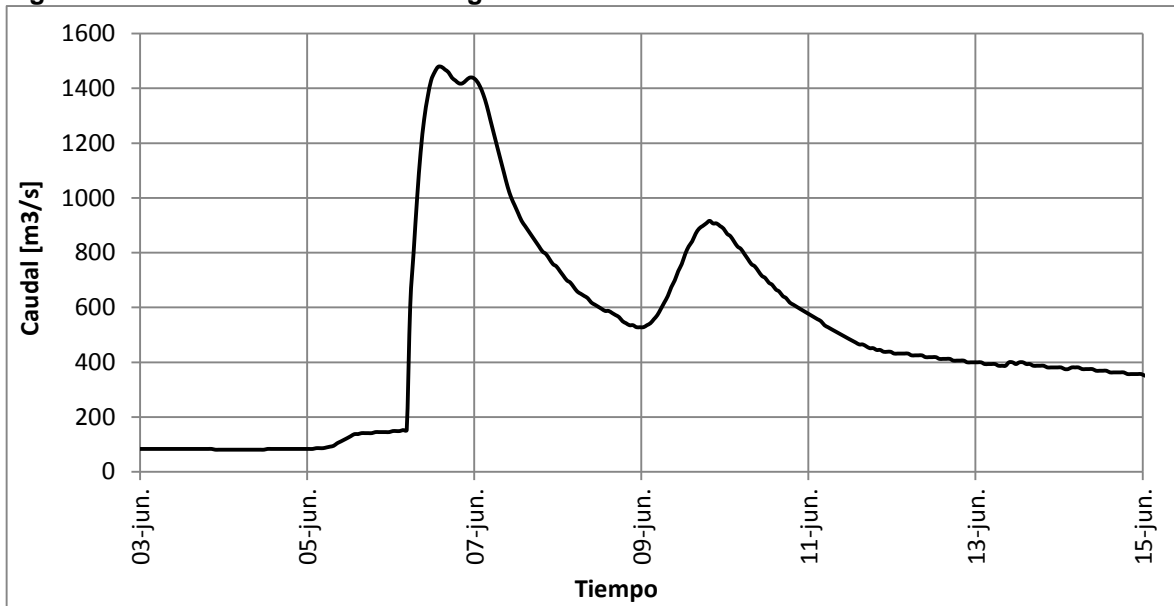
Sector	Profundidad media [m]			Diferencia con valores base [%]	
	n_1 (Base)	$n_2=80\%n$	$n_3=120\%n$	n_2	n_3
Total	0,79	0,72	0,86	-8,9	8,7
Aguas Arriba	1,05	0,95	1,14	-9,5	8,9
Desembocadura	1,21	1,18	1,24	-2,5	2,8

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Junio 2015

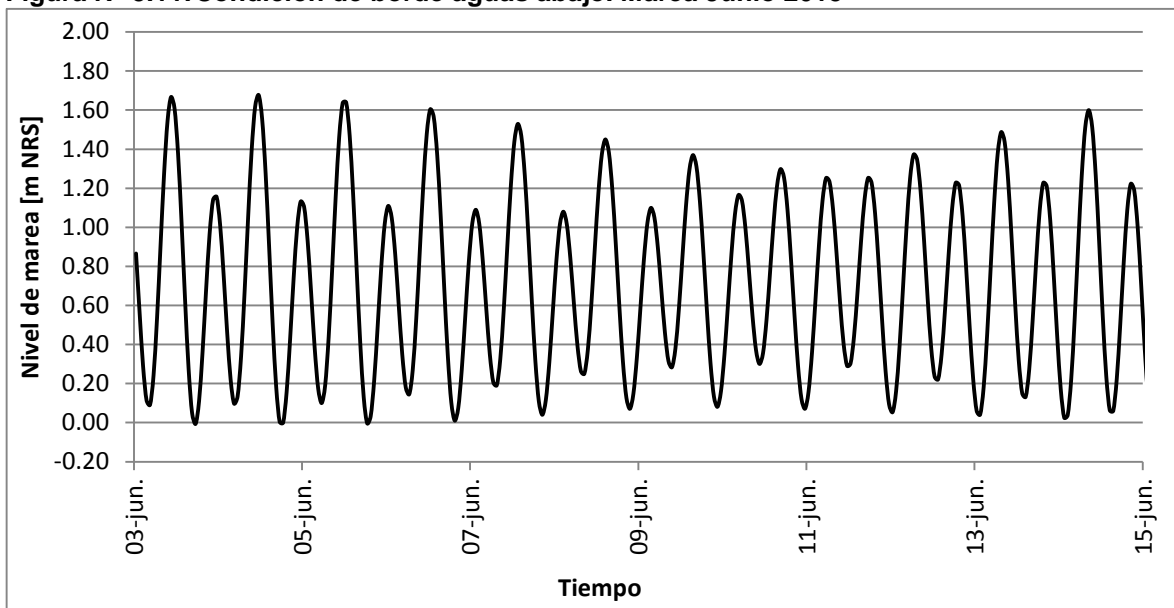
El registro en la prensa de la crecida ocurrida el 6 de junio del 2015 declara la inundación en ambas riberas del río. Dicha crecida tuvo un máximo de 1498 [m³/s] en la estación de Coelemu (Figura N° 5.10).

Figura N° 5.10: Condición de borde aguas arriba. Junio 2015



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 5.11: Condición de borde aguas abajo. Marea Junio 2015

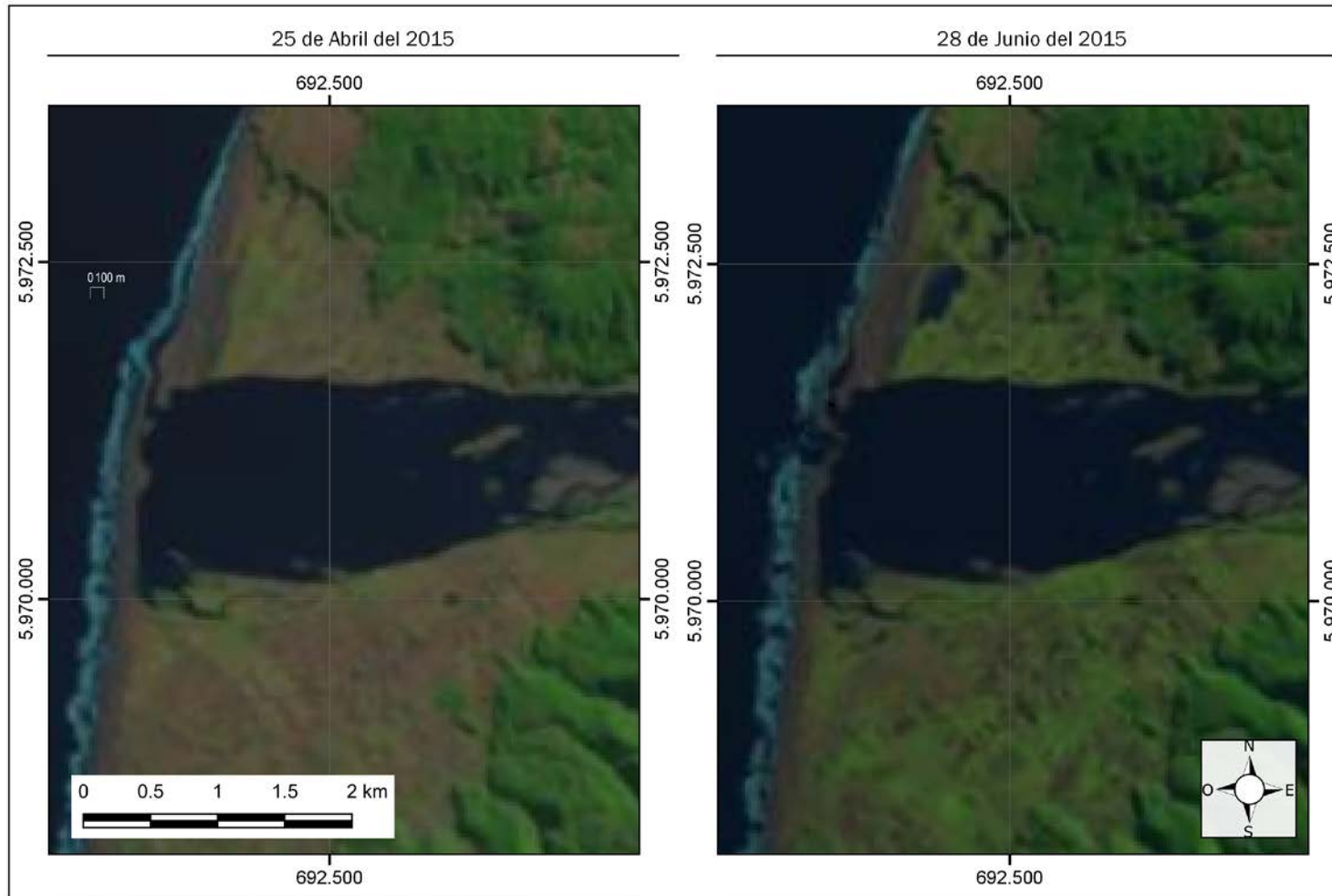


Fuente: Elaboración propia.

Para la caracterización de la barra se utilizó la última imagen satelital correspondiente al 25 de abril del año 2015. En la Figura N° 5.12 se presenta la imagen de la fecha mencionada junto a la siguiente imagen registrada luego de la crecida con fecha 28 de junio del 2015.

Ministerio de Obras Públicas/ Dirección de Obras Portuarias
Análisis Hidráulico Desembocadura Río Itata, Comunas de Trehuaco y Coelemu – Región del Ñuble

Figura N° 5.12: Estado de la barra antes y después crecida Junio 2015

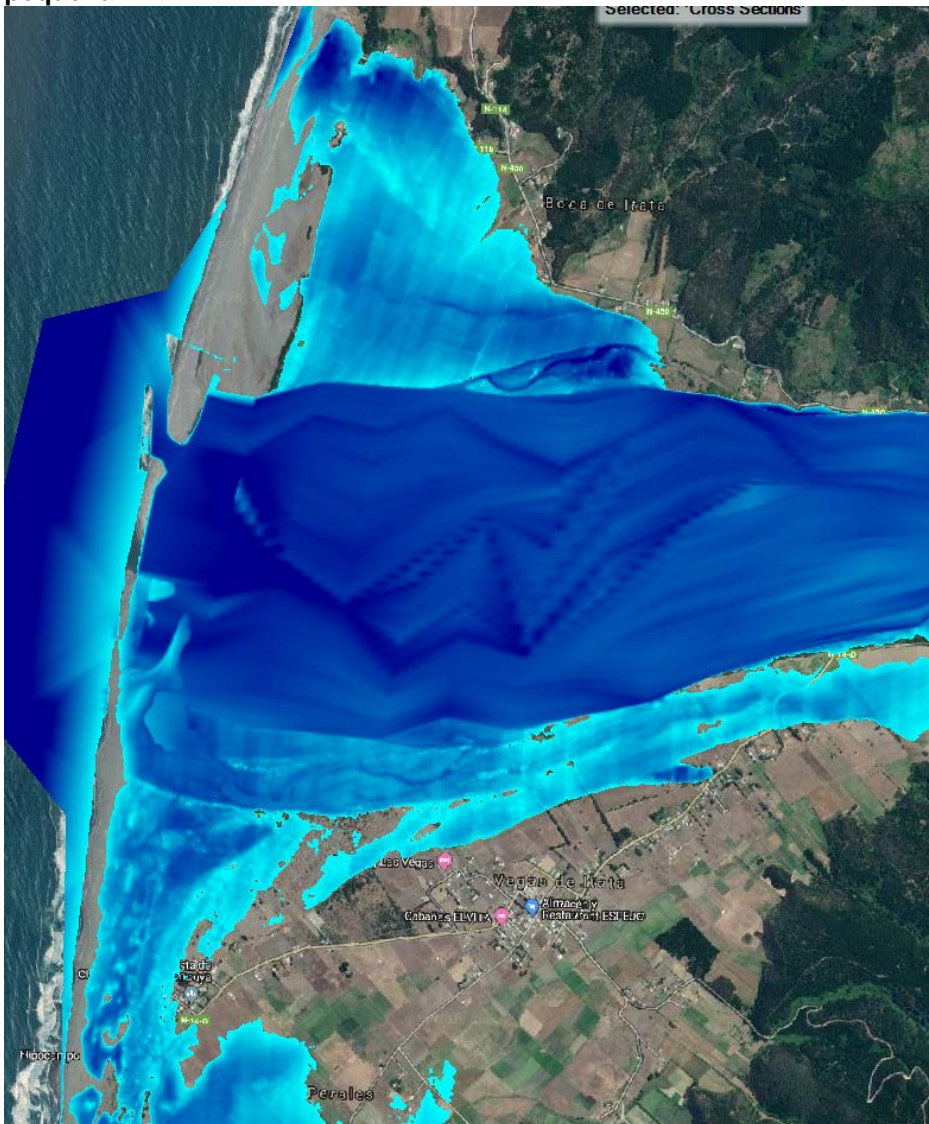


Fuente: Elaboración propia con imágenes LANDSAT.

En la imagen de abril se observa una laguna a elevados niveles, luciendo como a las 12:40 del 4 de mayo del 2019 donde el pelo de agua era 1,891 [m NRS] cerca de la bodega. Por esto se supone la cota inferior de la apertura de la barra a 0,75 [m NRS] para efectos de modelación.

La Ilustre Municipalidad de Coelemu ha informado de la apertura de la barra en el curso del evento luego del máximo registrado. Se han generado dos modelaciones, una con la barra original y su pequeña abertura, lo que entrega una mancha de inundación como la vista en la Figura N° 5.13, además de una barra donde la sección en el lado de Coelemu tenga una cota superior de 2 [m NRS], permitiendo la evacuación adicional de agua luego de alcanzar un nivel de carga suficientemente alto.

Figura N° 5.13: Máxima mancha de inundación Junio 2015 en la desembocadura. Apertura pequeña



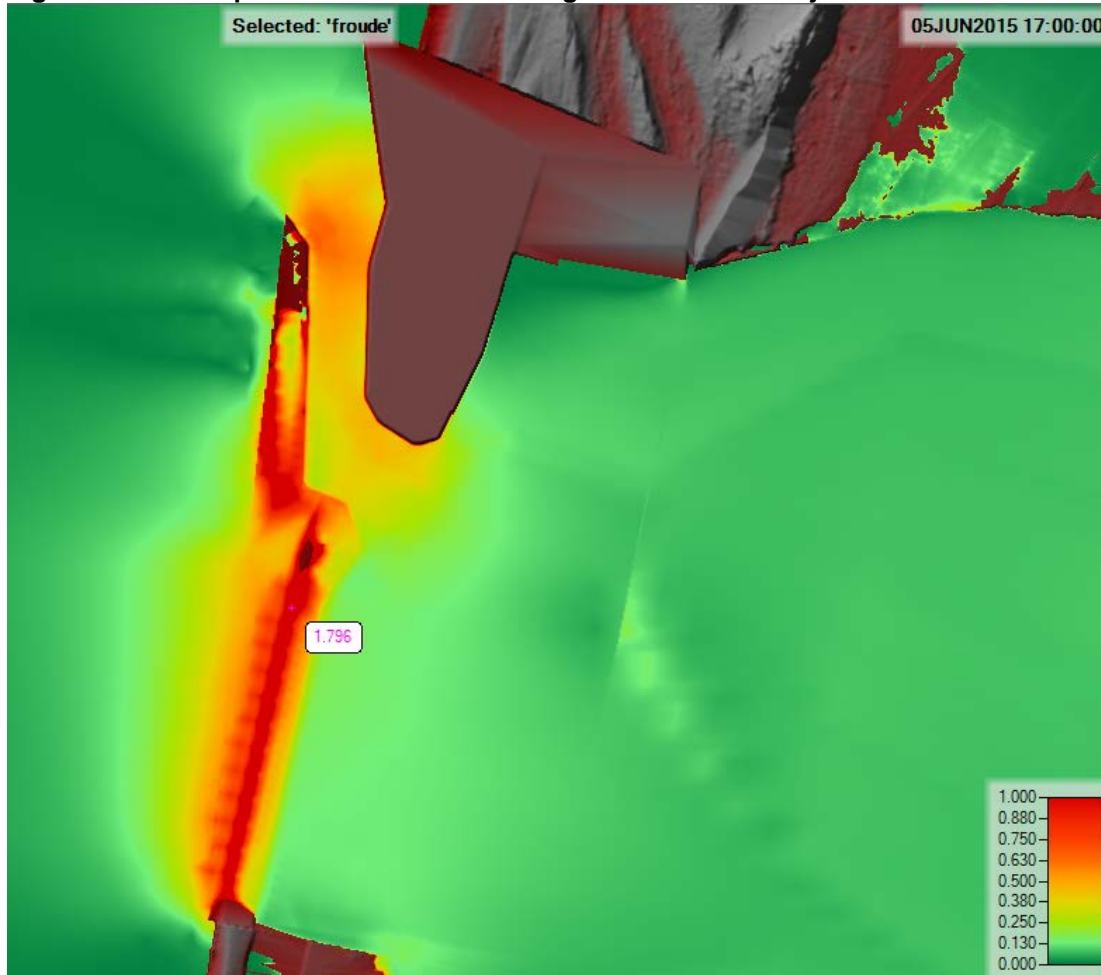
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.14: Máxima mancha de inundación Junio 2015 en la desembocadura. Apertura mayor.



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.15: Mapa de Froude en la descarga alternativa. 5 de junio del 2015 17:00



Fuente: Elaboración propia

En este caso una sección de la descarga presenta un sector con números de Froude² mayores a 1 (flujo supercrítico o de torrente), independizándose del nivel del mar. La cota de descarga en ese sector es de 2 [m NRS]. Así, debe haber una cota umbral para la barra donde se logra la independencia del mar entre las cotas 0,75 y 2 [m NRS].

5.3.3 Conclusiones de calibración

Se han simulado con el modelo desarrollado dos situaciones con alcance de inundación conocida. El alcance de la inundación es de forma general pues no se cuenta con información levantada en terreno de situaciones de control. Así, la calibración se centra en la construcción de una malla que logre representar fielmente las principales áreas mojadas.

² Número de Froude: da cuenta de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. $Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_H}}$, donde v es la velocidad del flujo y D_H es la profundidad hidráulica.

Para Mayo del 2019 se plantea una malla más fina en el sector de la bodega para la verificación de no inundación de la “Bodega” en dichos días lo cual se cumple.

Para dicha fecha también se ha realizado un análisis de sensibilidad para el coeficiente de Manning estudiando los efectos de un cambio de éste. Se obtienen diferencias en la profundidad del orden de una escala menor al cambio en el coeficiente.

Las diferencias reales son del orden de los 7 cm, las cuales se consideran marginales considerando el nivel de precisión del levantamiento en el río con perfiles cada 250 metros.

Para la modelación de Junio del 2015 se consideró inicialmente una apertura de la barrera acorde a la última imagen satelital obteniéndose enormes inundaciones catastróficas. Ante esto, se considera que, si bien la barrera puede ser pequeña que genere una inundación, debe lograr abrir en alguna medida la barrera.

Las limitaciones del modelo impiden trabajar con una superficie móvil que abra la barrera en el tiempo, así, se opta por generar geometrías para posteriormente para el diagnóstico con apertura de barra al menos de 100 metros para considerar la capacidad erosiva del flujo.

Ampliando la zona de escurrimiento hacia el mar, la crecida de junio 2015 inundo tanto la ribera norte como la ribera sur, así, se considera que la generación de la geometría es consistente.

En definitiva,

- i) Se ha logrado generar geometrías que describa el terreno fielmente al inundarse primero el norte y luego el sur.
- ii) Para dos condiciones de caudales conocidos se ha reproducido la existencia o no de inundación.
- iii) El análisis de sensibilidad del coeficiente de Manning arroja que no tiene una influencia predominante en la zona de la desembocadura considerándose aptos los valores escogidos acorde a la reproducción de las situaciones del punto ii).

5.4 Diagnóstico

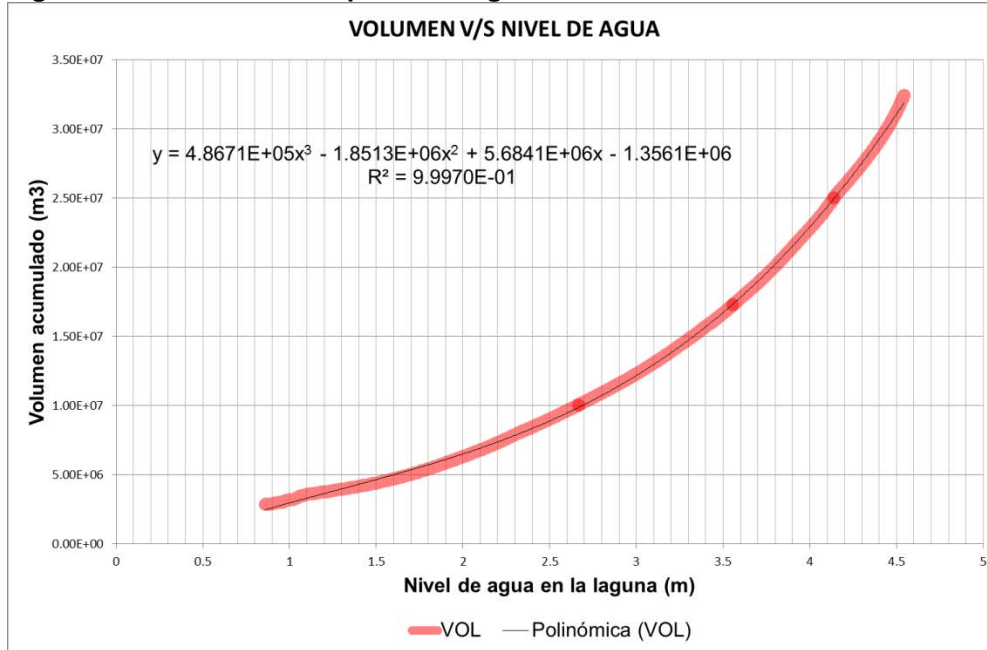
5.4.1 Variable 1: Nivel inicial de la laguna

La percepción de la población es que el nivel inicial de la laguna es importante para la capacidad de amortiguación de la crecida.

Para caracterizar de manera objetiva este aspecto (capacidad de amortiguación), se realizó un modelo hidráulico simplificado, en planilla Excel, del proceso de llenado y salida de agua en la laguna para distintas aperturas y cotas de fondo de barrera.

La curva de capacidad de la “laguna” se obtuvo mediante el modelo HEC-RAS, que incorpora la topografía de detalle, con el siguiente resultado.

Figura N° 5.16: Curva de capacidad Laguna



Fuente: Elaboración propia

En el siguiente cuadro se presentan los resultados correspondientes a la modelación de 8 casos, con distintos niveles iniciales de laguna, y distintas cotas de fondo de la apertura de barrera, para un apertura constante de 300 m con una crecida de 2.399 m³/s (TR=2).

Cuadro N° 5.4: Resumen Verificación Incidencia Nivel Inicial de la “Laguna”

Caso	Qmáx	Apertura	Cota Fondo	Nivel Inicial	Nivel Máx.	Dif. Nivel c/Cota Fondo B. (m)
	Crecida (m ³ /s)	Barrera (m)	Barrera (mNRS)	Laguna (mNRS)	Laguna (mNRS)	
Caso 17	2899	300	0.5	0.5	3.58	3.08
Caso 14	2899	300	0.5	1.0	3.58	3.08
Caso 15	2899	300	0.5	1.5	3.58	3.08
Caso 16	2899	300	0.5	2.0	3.58	3.08
Caso 18	2899	300	1.0	0.5	4.08	3.08
Caso 19	2899	300	1.0	1.0	4.08	3.08
Caso 20	2899	300	1.0	1.5	4.08	3.08
Caso 21	2899	300	1.0	2.0	4.08	3.08

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que independientemente del nivel inicial de la laguna, el nivel máximo de agua en la misma se mantiene. Sólo depende del nivel o cota de fondo de la apertura de barrera.

Se puede apreciar también que la diferencia de nivel entre el nivel de inicio de vertido y el nivel máximo se mantiene constante en todos los casos, pues sólo depende de la longitud de la apertura de la barrera.

En consecuencia se demuestra que, independientemente del nivel inicial de la laguna, la cota máxima que alcanza sólo depende de la longitud y cota de fondo de la apertura de barrera.

Por otra parte, como era de esperarse, la diferencia de nivel entre la cota de fondo de la barrera y el nivel máximo del agua alcanzado en la laguna es siempre el mismo. Ello tiene que ver con la capacidad de evacuación de la apertura de barrera.

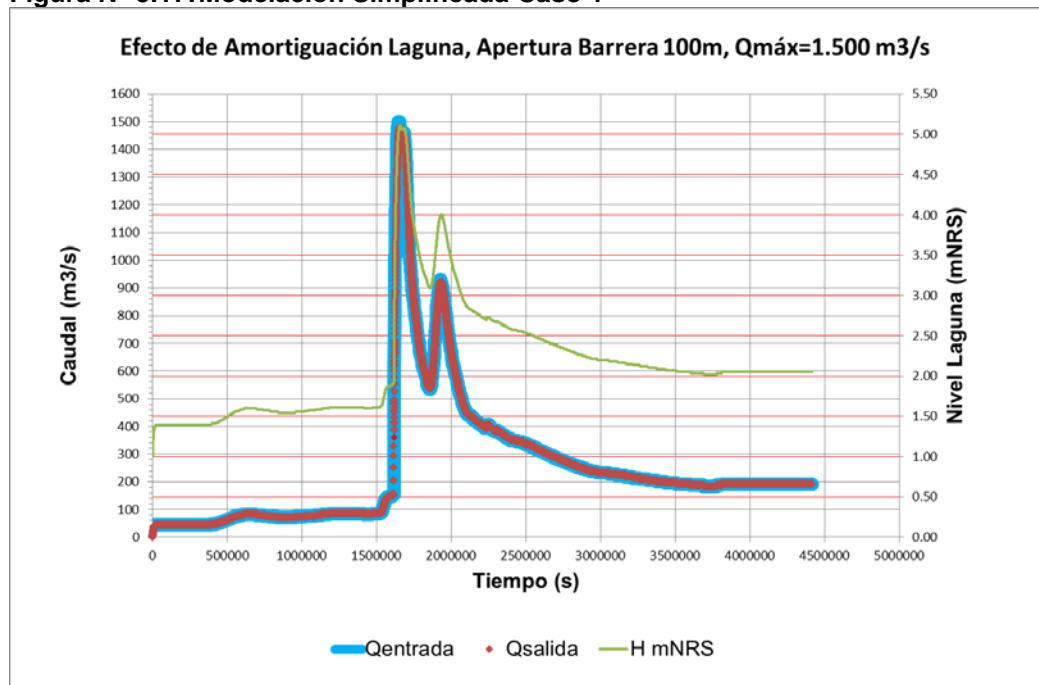
5.4.2 Variable 2: Efecto de amortiguación de la laguna

En las figuras siguientes se muestran los casos modelados, con una crecida de 1.500 m³/s, que no es muy grande (TR < 2 años), y con una apertura de barrera de 100, 300 y 500 m respectivamente.

En todos los casos se ha supuesto descarga libre, es decir, sin considerar el efecto de la marea, situación en que el posible efecto de amortiguación se vería aún más disminuido.

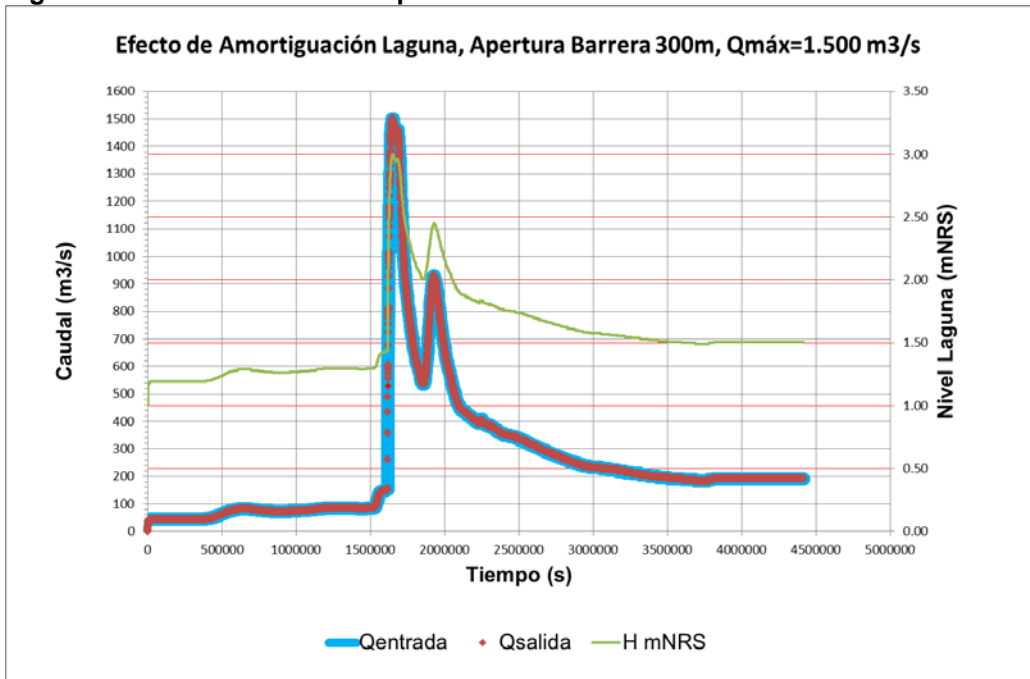
El nivel inferior de la barrera se ha supuesto a 1 mNRS en todos los casos.

Figura N° 5.17: Modelación Simplificada Caso 1



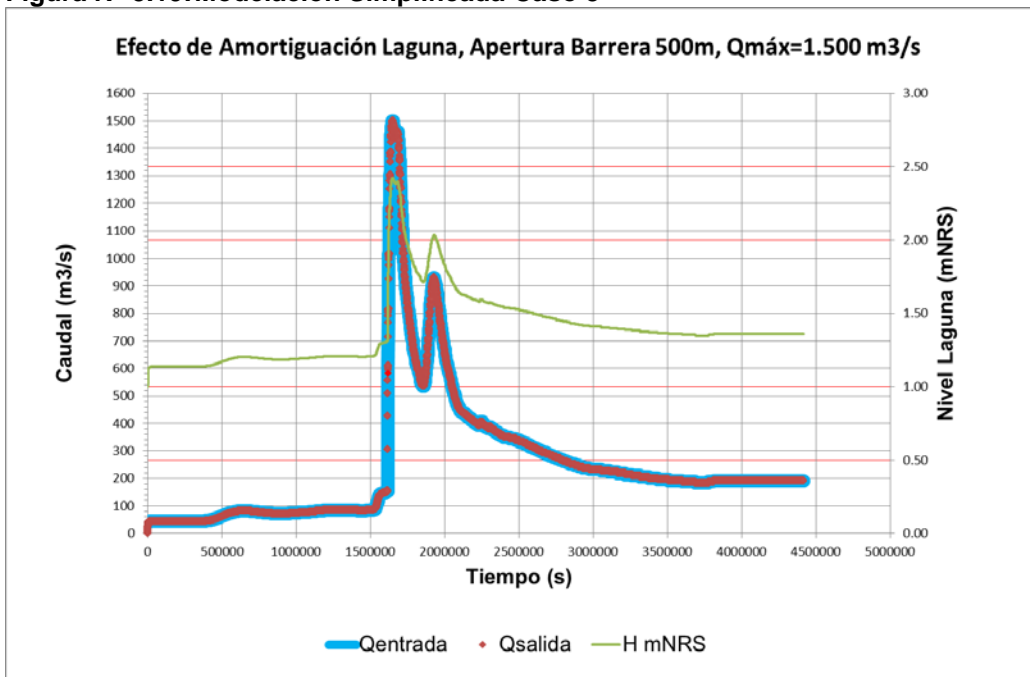
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.18: Modelación Simplificada Caso 2



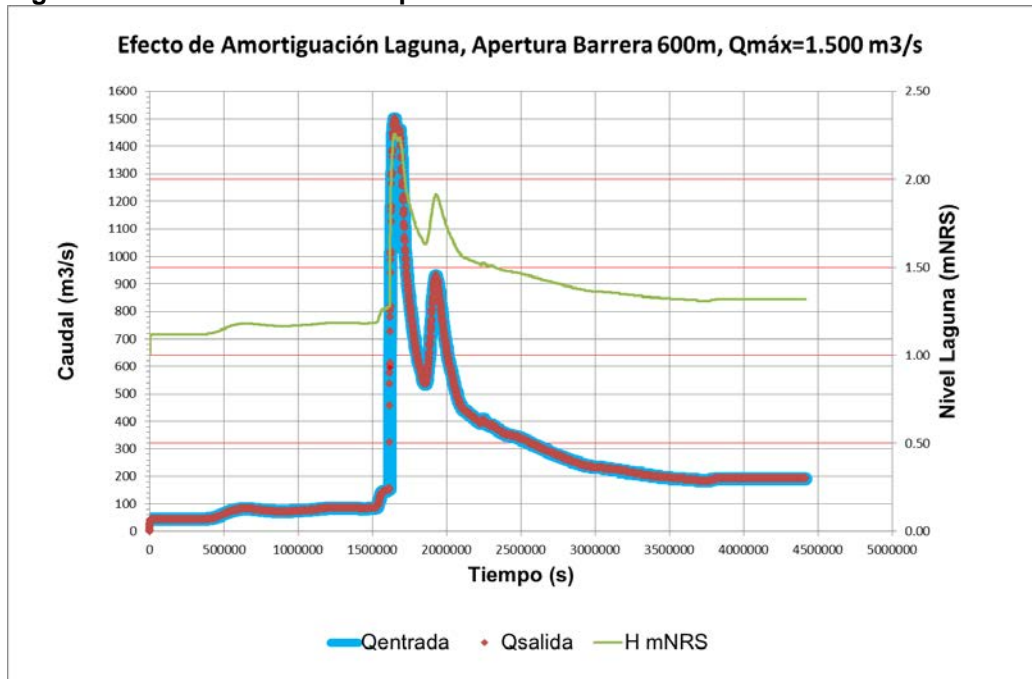
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.19: Modelación Simplificada Caso 3



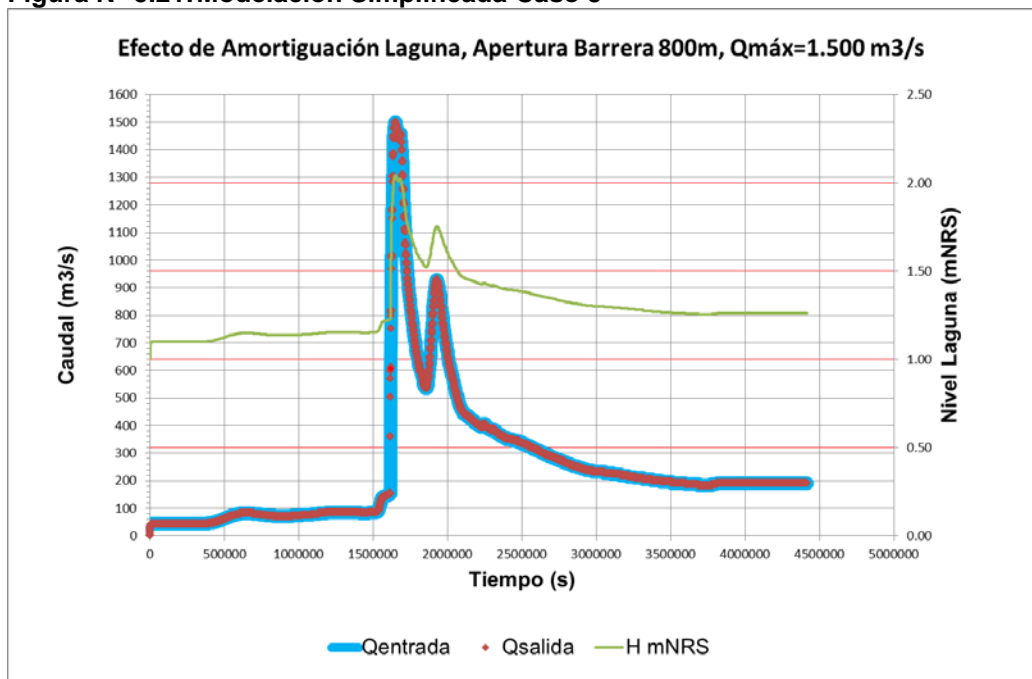
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.20: Modelación Simplificada Caso 4



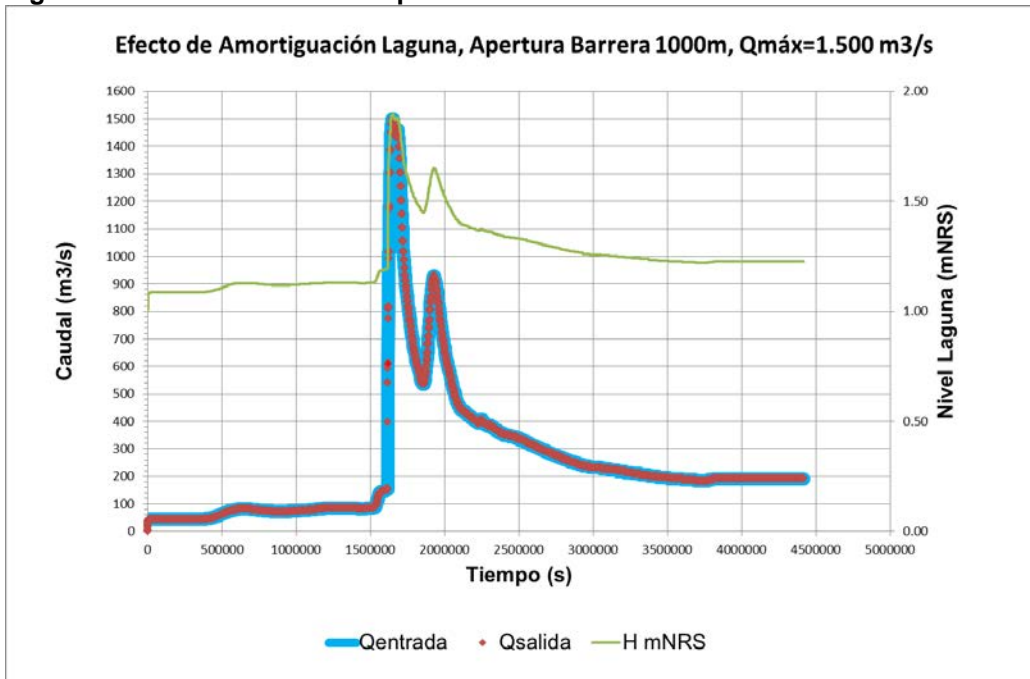
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.21: Modelación Simplificada Caso 5



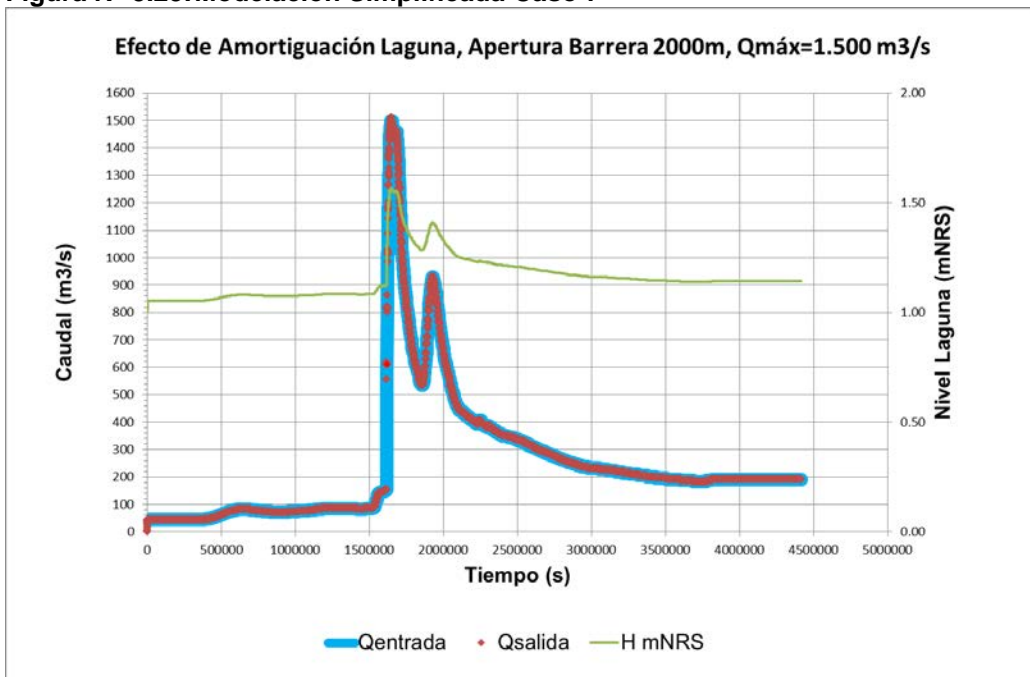
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.22: Modelación Simplificada Caso 6



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 5.23: Modelación Simplificada Caso 7



Fuente: Elaboración propia

En el cuadro siguiente se resumen los niveles iniciales y máximos alcanzados en cada caso.

Cuadro N° 5.5: Resumen de Corridas Capacidad de Amortiguación “Laguna”

Caso	Q _{máx} Crecida (m ³ /s)	Apertura Barrera (m)	Nivel Inicial Laguna (mNRS)	Nivel Máx. Laguna (mNRS)	Diferencia Nivel (m)
Caso 1	1500	100	1.4	5.05	3.65
Caso 2	1500	300	1.19	2.98	1.79
Caso 3	1500	500	1.14	2.39	1.25
Caso 4	1500	600	1.12	2.24	1.12
Caso 5	1500	800	1.1	2.03	0.93
Caso 6	1500	1000	1.09	1.89	0.8
Caso 7	1500	2000	1.05	1.56	0.51

Fuente: Elaboración propia

Inspeccionando las figuras, se puede apreciar que las curvas del caudal de entrada y de caudal de salida a través de la barrera abierta son prácticamente coincidentes, en magnitud y en tiempo. En otras palabras, a medida que ingresa agua a la laguna, esta se evacua inmediatamente. Por lo tanto, la capacidad de amortiguación de la laguna es prácticamente nula.

Por otra parte, si se revisa el cuadro precedente, la diferencia de nivel entre el valor inicial de la laguna y el valor máximo alcanzado durante la crecida modelada, depende mucho de la apertura de la barrera. Cabe destacar que en el caso modelado, para llegar a una diferencia de nivel de 0,5 m, se requiere una apertura de barrera de 2.000 m, es decir, prácticamente la barrera totalmente abierta.

Finalmente, considerando una apertura de barrera entre 500 y 1000 m, con crecidas de 2, 5 y 10 años de periodo de retorno, los niveles alcanzados son los siguientes:

Cuadro N° 5.6: Resumen de Corridas Capacidad de Amortiguación “Laguna”

Caso	Q _{máx} Crecida (m ³ /s)	Apertura Barrera (m)	Nivel Inicial Laguna (mNRS)	Nivel Máx. Laguna (mNRS)	Diferencia Nivel (m)
Caso 8	2899	500	1.21	3.18	1.97
Caso 9	5293	500	1.31	4.24	2.93
Caso 10	6879	500	1.37	4.89	3.52
Caso 11	6879	600	1.19	2.91	1.72
Caso 12	6879	1000	1.13	2.36	1.23

Fuente: Elaboración propia

De la inspección del cuadro precedente se puede apreciar que para una crecida de 6.879 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 10 años (en el periodo Febrero-

Junio), el nivel de pelo de agua en la laguna aumentaría en 3,5 m aproximadamente, llegando a una cota de 4,9 m si el nivel inicial de la laguna fuera de 1,37 mNRS.

Cabe señalar que el nivel mínimo de la laguna que puede obtenerse es el nivel de la marea, sin ocupar medios mecánicos ni obras adicionales, es prácticamente el nivel de marea.

En la desembocadura, el nivel máximo de marea es de 1,9 mNRS, el nivel medio es de 0,73 mNRS y el nivel mínimo es de -0,23 mNRS. En consecuencia, con un nivel máximo de marea (criterio conservador), el nivel de pelo de agua en la laguna sería al menos de 1,9 mNRS.

Por otra parte, el nivel de terreno en las zonas que se desea proteger de la inundación, es variable entre 2 y 3 mNRS aproximadamente (en Boca Itata). En consecuencia, partiendo de un nivel en la laguna de 1,9 mNRS, se dispondría de una holgura de apenas 0,1 m.

Si el nivel de la laguna fuera de 0,73 mNRS, que corresponde al nivel medio del mar, se tendría una holgura de 1,27 m. Es decir, se requiere de una apertura de barrera de poco menos de 1.000 m. Cabe destacar que este caso queda supeditado al nivel de marea, es decir, no es controlable.

En resumen, con un nivel de laguna normal del orden de 1,9 mNRS, no se dispone de holgura para, mediante la apertura de la barrera, evitar la inundación de las zonas de protección (Boca de Itata y Vega de Itata).

5.4.3 Variable 3: Apertura de la barra

La apertura de la barra queda definida por dos dimensiones, su ancho y su cota de fondo.

La barra más abierta registrada en las imágenes es de 540 m por lo que se adopta 500 m como tope superior en primera instancia.

Las cotas de fondo evaluadas fueron nivel medio de marea $C1 = 0,73$ m NRS y 1 metro menos que eso, $C2 = -0,27$ m NRS.

Ciertamente el área de salida influye en las inundaciones. Para el mismo ancho (planes 6 y 7, ancho 500).

Lógicamente se produjo desborde para un caudal menor cuando la cota de fondo de salida era mayor.

Cuadro N° 5.7: Resultados de Modelación con HEC-RAS 2D – TR2 Feb-Jun – Apertura 500m

Cota m NRS	Q para desborde m ³ /s
0.73	770
-0.27	900

Fuente: Elaboración propia

Ambos caudales muy por debajo de aquellos asociados a los periodos de retorno analizados.

Si se construye una defensa fluvial en el primer lugar de desborde (OF-A) se contiene la crecida de periodo de retorno 2 años (para periodo Febrero-Junio) cuando el ancho de apertura de la barrera es de 500 metros. Si la cota de fondo de la apertura de barrera se disminuye, y se reduce su longitud a 300 metros, el desborde se produce para 2.250 m³/s.

Si se aumenta la cota de fondo de la apertura de barrera hasta la cota 0,73 mNRS, se produce desborde cuando el caudal llega a los 2.100 m³/s.

Cuadro N° 5.8: Resultados de modelación con HEC-RAS 2D – Variación Barrera-con OF-A

Cota (mNRS)	Ancho apertura m	Q desborde m ³ /s
-0.27	500	Sin desborde (máx. 2.900 m ³ /s)
0.73	500	2100
-0.27	300	2250

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se supuso una capacidad erosiva tal que se elimine la barra casi en su totalidad (1.330 m de ancho), sin obras. Igual se produce desborde, hacia la derecha como siempre a los 1.200 m³/s, y hacia la izquierda a los 7.300 m³/s.

5.4.4 Variable 4: Hidrogramas de crecida

Sin duda que esta es una variable importante a la hora de cuantificar el nivel de inundación esperable.

Se definieron crecidas de diseño para 2, 5 y 10 años de periodo de retorno, las que se obtuvieron del análisis de la estadística anual (que incluye las crecidas de invierno) y de aquella correspondiente a la ventana temporal febrero-junio.

5.4.5 Conclusiones del diagnóstico

De acuerdo con lo señalado en los puntos precedentes, se concluye lo siguiente:

- i) El nivel inicial de la laguna no incide en el nivel máximo que alcance en la crecida. Este depende sólo del nivel de fondo de la apertura de barrera y de la longitud de la misma.
- ii) Por sus características morfológicas, la laguna no tiene capacidad de amortiguación para las crecidas de diseño.
- iii) La apertura de la barrera es la variable más importante, en cuanto a cota de fondo y a su longitud.
- iv) La apertura de la barrera, caracterizada por un ancho y una cota de fondo tiene su mayor importancia en las inundaciones por medio de su cota inferior.

- v) El modelo numérico por el cual se analiza la desembocadura no tiene capacidad de modificar su fondo imposibilitando representar fielmente la erosión de la barrera por lo cual se debe considerar los resultados no a nivel de ingeniería de detalles.
- vi) Dado que con caudales mayores la población dice no estar tan afectada como caudales medios, la capacidad de purga de sedimento para esfuerzos de corte mayores debe ser considerable. Para adquirir conocimiento de esto se debe estudiar el fondo de la laguna de desembocadura a lo largo del año.
- vii) Aceptando que la barrera tiende a formarse, y que su parte más baja está en el nivel medio de marea. Las proyecciones mundiales de la elevación del nivel del mar producto del cambio climático podrían impactar en las conclusiones de este informe disminuyendo en el tiempo el caudal para el cual se generarán inundaciones.

6. DESARROLLO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN

6.1 Requerimientos Participación Ciudadana y la DOP

De acuerdo con lo planteado por la comunidad que habita el sector de la desembocadura del río Itata, las soluciones que esperan son del siguiente tipo:

- Alternativa 1: Establecer un protocolo de apertura de la barrera, con base en pronósticos o alertas de lluvia y/o de crecidas en el río. De este modo, con cierta disponibilidad de tiempo razonable, se traería una máquina excavadora que abra la barrera antes de la crecida, y se evite así las inundaciones, total o parcialmente.
- Alternativa 2: Construir una obra de defensa fluvial por el lado norte, que proteja los sectores susceptibles de inundación, de modo que no se dependa de la apertura de la barrera. Establecer un protocolo de apertura de la barrera, con base en las mismas variables de alerta del protocolo de la alternativa 1, para crecidas superiores considerando la protección que otorga la obra de defensa fluvial proyectada.
- Alternativa 3: Construir dos espigones, que eviten, parcial o totalmente la formación de la barrera (DOP).

6.2 Alternativa 1

De acuerdo con el análisis y diagnóstico efectuados, esta alternativa es inviable para todas las crecidas analizadas, pues al evaluar la menor crecida ($T = 2$ años periodo febrero-junio) se produce desborde hasta con una abertura de barrera de 500 metros de ancho, con una cota de fondo de $-0,27$ [mNRS].

Cabe destacar que la cota de fondo señalada resulta difícil de obtener y mantener, toda vez que el nivel mínimo de marea es de $-0,23$ mNRS.

Sin perjuicio de lo anterior, cabe considerar sin embargo, que la crecida de diseño se definió con base en la estadística del periodo febrero-junio, según lo acordado con la DOP, es decir, incorporando el mes de junio, condición que puede ser demasiado restrictiva.

De hecho, si se considera la estadística del periodo enero-mayo solamente, que se acerca más al periodo de “verano” propiamente tal, la crecida de diseño para $T = 1,5$ años se reduce a $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por otra parte, de acuerdo con los resultados de la modelación bidimensional con HEC-RAS 2D, con una apertura de barrera de 500 m y una cota de fondo de la misma de $0,73$ mNRS, correspondiente al nivel medio del mar, la inundación se produce recién para un caudal de $770 \text{ m}^3/\text{s}$.

En consecuencia, el protocolo asociado a esta alternativa busca contar con la barrera abierta, ante la ocurrencia de una crecida de más de $770 \text{ m}^3/\text{s}$, que es la mínima crecida que produce inundaciones.

Como se ha mencionado, el caudal señalado es el resultado de la modelación hidráulica del río Itata en desembocadura para un ancho de apertura de 500 metros y cota de fondo de la barrera a nivel medio de la marea.

En consecuencia, se define un protocolo de apertura de barrera asociado a dicho caudal ($770 \text{ m}^3/\text{s}$). Para ello se requiere asociar el pronóstico de precipitación con la escorrentía esperada.

Como se ha mencionado en el capítulo 3.5, la estación meteorológica que presenta una mejor correlación de la precipitación con el caudal medido en Coelemu es la estación Diguillín, según la cual, al caudal de $770 \text{ m}^3/\text{s}$ le corresponde una precipitación de 48 horas de 21 mm ($770/36,85$), esto es, 15 mm para una precipitación diaria.

Por otra parte, según la correlación de precipitaciones entre estaciones presentada en el acápite 3.3, en la estación Diguillín la precipitación es un 64% mayor que en la estación Chillán Viejo. Por lo tanto, cuando el pronóstico de precipitación diaria para Chillán sea de 9 mm/día o más, el caudal máximo que llegará a la desembocadura será de $770 \text{ m}^3/\text{s}$ o más, y habrá que proceder a abrir la barrera.

Cabe consignar que si bien la precipitación media anual en Chillán es del orden de 900 mm, la precipitación media mensual en febrero es de sólo 17,9 mm, y la precipitación máxima diaria con un período de retorno de 2 años es de 70 mm.

Otra forma de alertar o detonar la necesidad de abrir la barrera es en función del caudal medido en una o varias estaciones fluviales.

De acuerdo con el análisis efectuado en el acápite 3.4, la estación que aporta un mayor tiempo de retardo entre la medición y su llegada a la desembocadura es la estación General Cruces.

En el cuadro siguiente se resumen los factores de correlación y los tiempos de retardo de las estaciones analizadas.

Cuadro N° 6.1: Relación fluviometría varias estaciones c/r a estación Coelemu

Estación	Factor de máximos	Factor de Correlación (R2)	Relación de desfase $T=aQ^b$ [Hr]		Factor correlación (R2)
			a	b	
Río Itata en Paso Hondo	1.349	0.99	110.45	-0.363	0.89
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	3.153	0.94	125.88	-0.402	0.6
Río Itata en General Cruz	6.026	0.93	106.66	0.374	0.65

Fuente: Elaboración propia

Los caudales y desfases horarios asociados a la crecida de 770 m³/s en la desembocadura se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 6.2: Caudales de alerta para 770 m³/s en desembocadura

Estación	Caudal en Desembocadura [m ³ /s]	Caudal en la estación [m ³ /s]	Desfase Estación a desembocadura [hr]
Río Itata en Paso Hondo	770	571	11.0
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	770	244	13.8
Río Itata en General Cruz	770	128	17.4

Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, si se mide un caudal de 128 m³/s en la estación fluviométrica General Cruz, se dispondrá de 21 horas para abrir la barrera.

Algo similar ocurre con las estaciones Balsa Nueva Aldea y Paso Hondo, con 13,3 y 12,6 horas de retardo respectivamente.

Cabe señalar que esta predicción tiene cierto grado de imprecisión, según el factor de correlación señalado en el Cuadro N° 6.1.

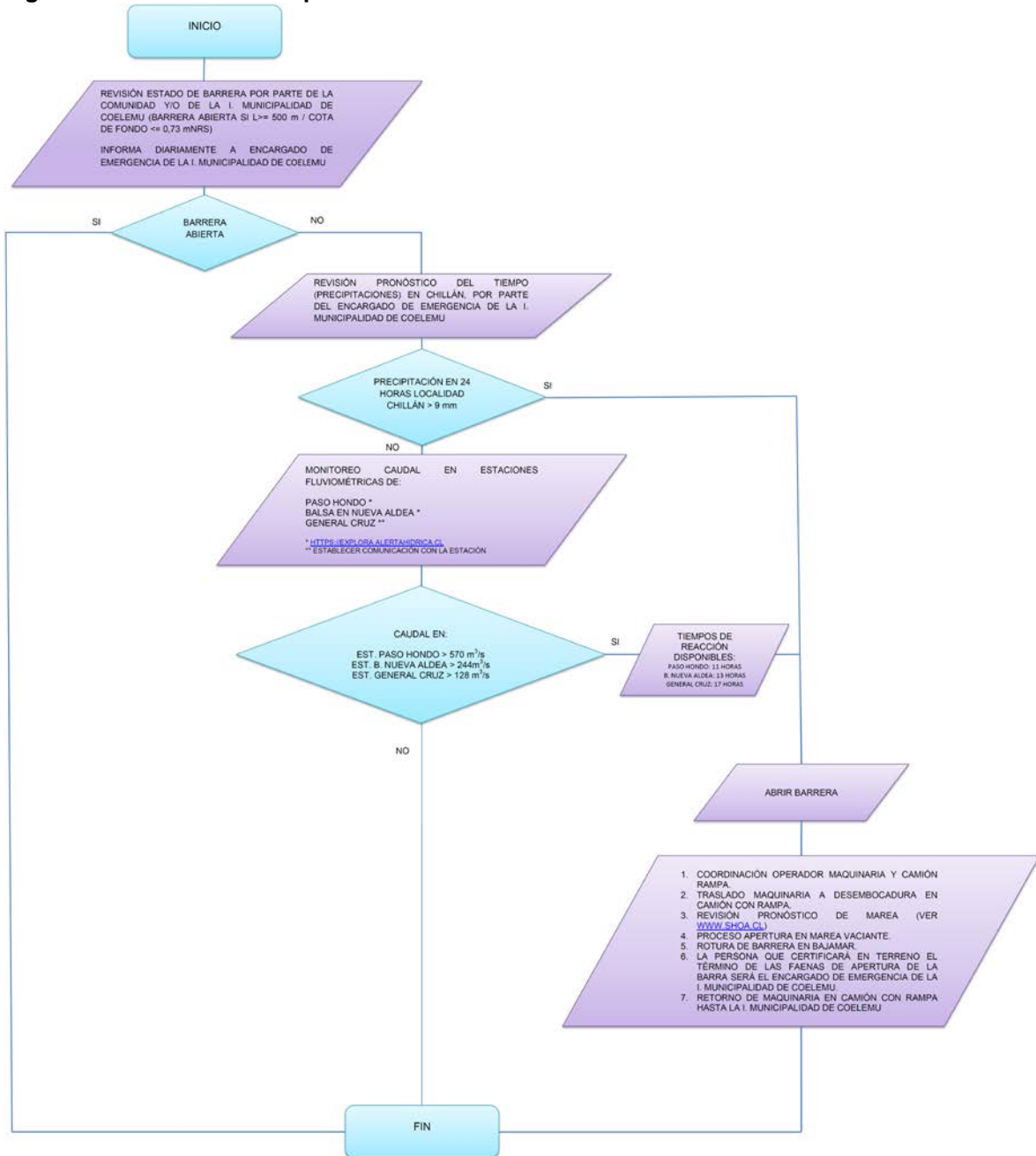
La mejor correlación se obtiene para la estación Paso Hondo, sin embargo es la más cercana a la desembocadura y por tanto la que otorga menor tiempo de reacción.

Por el contrario La estación General Cruz es la que da mayor tiempo de reacción pero tiene menos precisión.

Lo ideal es cotejar los tres valores y reaccionar de acuerdo con el más desfavorable.

A continuación se presenta un diagrama de flujo con el protocolo de apertura de la barra, el que incluye tanto aspectos técnicos como administrativos.

Figura N° 6.1: Protocolo Apertura Barra – Alternativa 1



Fuente: Elaboración propia.

6.3 Alternativa 2

De acuerdo con los resultados de las modelaciones efectuadas (con HEC-RAS 2D), se han definido obras de defensa fluvial, que protegerán las áreas de cultivo de la ribera norte y de la ribera sur en la desembocadura del río.

Estas obras se diseñan para un periodo de retorno de 2 años, considerando la estadística anual parcial (febrero a junio).

Estas obras, en orden de prioridad, son las siguientes.

Cuadro N° 6.3: Resumen de Obras Propuestas Alternativa 2

N°	Locación	Característica	Longitud [m]
OF-A	Ribera norte	Defensa fluvial. De acuerdo con las velocidades medias del sector la materialidad podría ser de tierra o gaviones.	900
OF-B	Canal ribera norte	Obra de control Gaviones con Compuerta.	50
OF-C	Descarga ribera sur	Obra de control Gaviones con Compuerta.	50

Fuente: Elaboración propia

Esta solución se complementa con el protocolo señalado como alternativa 1, dado que consideran que la barra está abierta.

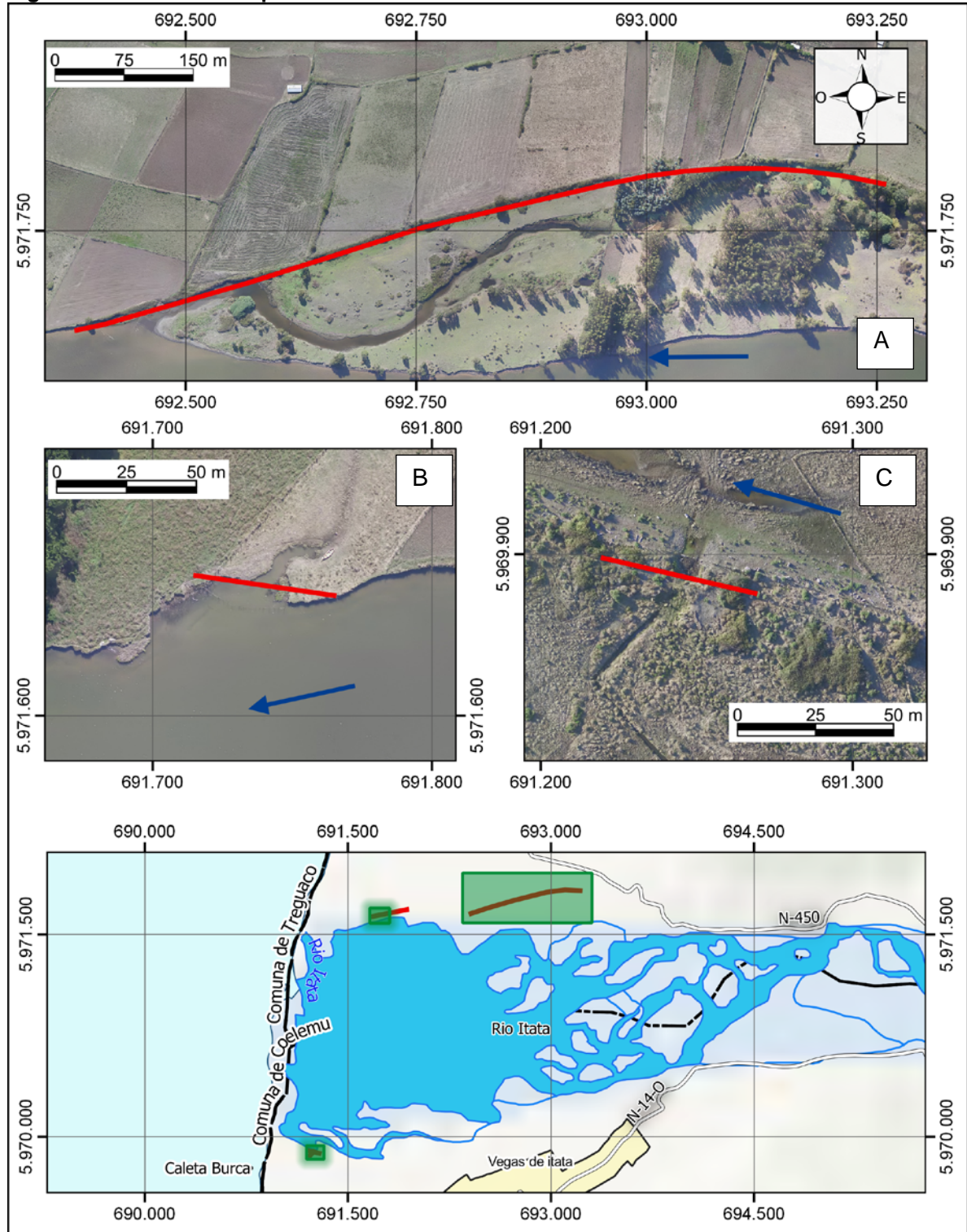
La información correspondiente a las otras estaciones se resume en el Cuadro N° 6.4:

Cuadro N° 6.4: Caudales y tiempos de alerta para 2900 m³/s en desembocadura

Estación	Caudal en Desembocadura [m ³ /s]	Caudal en la estación [m ³ /s]	Desfase Estación a desembocadura [hr]
Río Itata en Paso Hondo	2900	2150	6.8
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	2900	920	8.1
Río Itata en General Cruz	2900	481	10.6

La ubicación y secciones tipo de estas obras se presentan en plano 1 de 2, y de forma esquemática su ubicación se presenta a continuación:

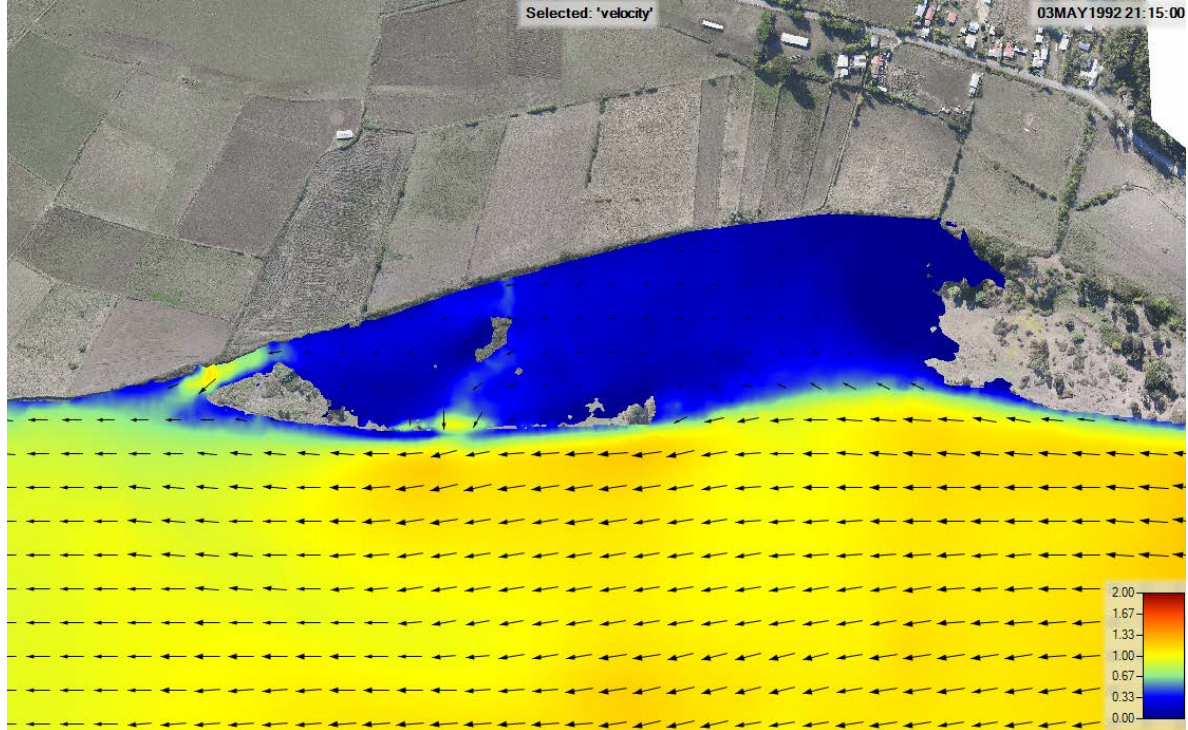
Figura N° 6.2: Obras de protección Alternativa 2



Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la defensa fluvial de mayor largo, como referencia para la materialidad de futuras obras, tiene bajas velocidades de escurrimiento, menores a 1 m/s.

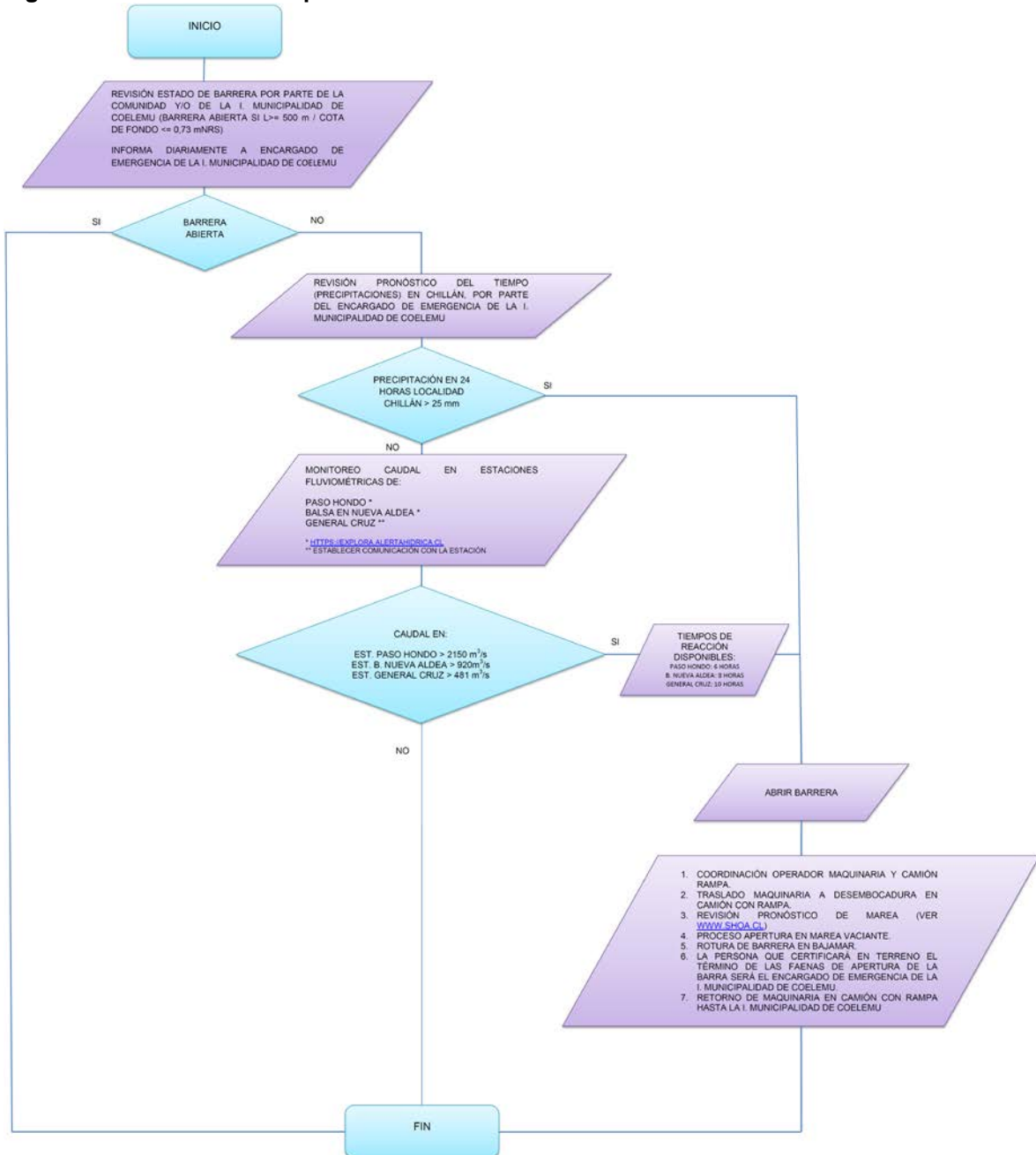
Figura N° 6.3: Velocidades en el sector de la obra fluvial OF-A para T2 (Feb-Jun)



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta un diagrama de flujo con el protocolo de apertura de la barra, el que incluye tanto aspectos técnicos como administrativos.

Figura N° 6.4: Protocolo Apertura Barra – Alternativa 2

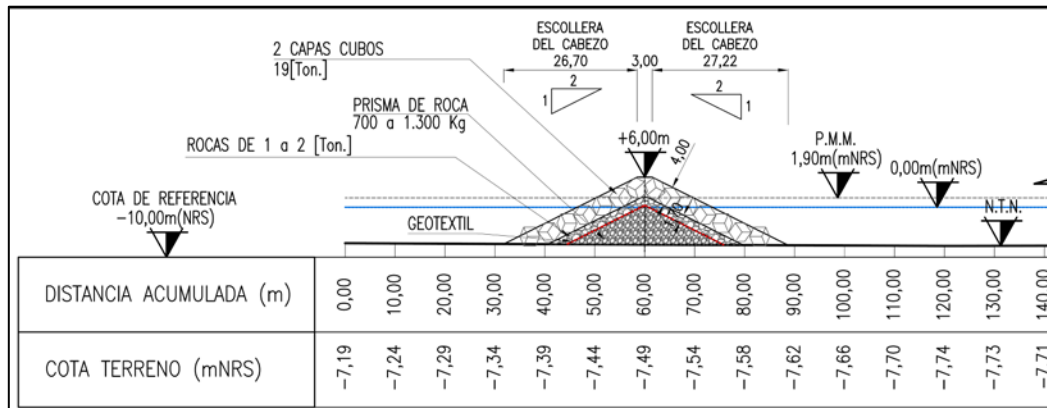
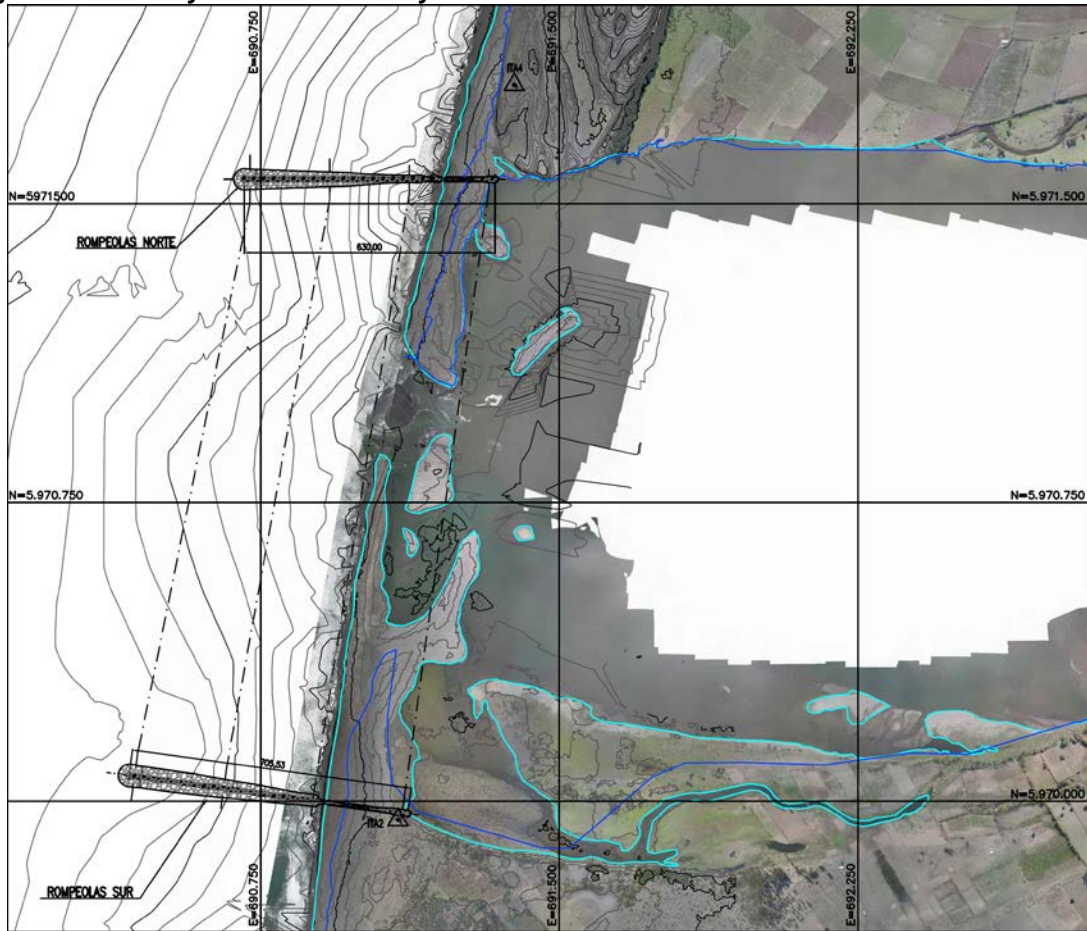


Fuente: Elaboración propia.

6.4 Alternativa 3

Esta alternativa se basa en una solución en base a dos espigones marítimos, el de la ribera norte de 630 m de longitud mientras que el de la ribera sur de 705 m de largo.

Figura N° 6.5: Layout Alternativa 3 y Corte sector Cabezo



Fuente: Elaboración propia.

Ambos espigones tienen la misma materialidad, los cuales se dividen en tres tramos, a saber:

Tramo Arranque: constituido por rocas de 3 ton.

Tramo Tronco: En base a un prisma de rocas de 20 kg, un filtro de rocas de 300 a 600 kg y dos capas de rocas con pesos entre 3 a 5 ton.

Tramo Cabezo: Constituido por un prisma de rocas de 700 a 1.300 kg, un filtro de rocas de 1 a 2 ton y dos capas de cubos con pesos 19 ton.

Se dispone un geotextil que separará los materiales del prima y filtro.

Para el funcionamiento de los espigones, se propone dragar en el sector de la actual barra.

Para mayor detalle de la solución ver Anexo 5 y los planos de proyecto.

6.5 Presupuestos Estimativos

6.5.1 Alternativa 1

Para efectos de costos, se considera en este caso el valor de adquirir la maquinaria pesada (excavadora) con la cual se abrirá la barrera.

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	SUMINISTRO MAQUINARIA				
1.1	Excavadora CAT 320 D2GC modelo motor C4.4	un	1	213.700.797	213.700.797
					213.700.797
				Total Neto	213.700.797
				IVA 19%	40.603.151
				COSTO TOTAL	254.303.948

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
2	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENCIÓN				
2.1	Flete Camión con Rampa (ida y vuelta)	un	4	500.000	2.000.000
2.2	Operario Excavadora	día	4	37.000	148.000
2.3	Ayudante (2)	día	8	31.500	252.000
2.4	Combustible Excavadora	día	4	45.500	182.000
2.5	Mantenimiento	gl	1	1.200.000	1.200.000
				Total Operación y Mantenimiento	3.782.000

6.5.2 Alternativa 2

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	INSTALACIÓN DE FAENAS				
1.1	Instalación y Levante de Faenas	gl	1	55.000.000	55.000.000
				Sub Total 1	\$ 55.000.000
2	OBRAS DE FORTIFICACIÓN				
2.1	OBRA FLUVIAL-A				
2.1.1	Movimiento de Tierras				
2.1.1.1	Excavación	m ³	15.930	11.455	182.478.150
2.1.1.2	Relleno	m ³	14.461	23.925	345.979.425
2.1.1.3	Retiro y Transporte de excedentes	m ³	13.173	10.005	131.795.865
2.1.2	Obras anexas				-
2.1.2.1	Suministro y Colocación Geotextil	m ²	4.170	5.655	23.581.350
2.1.2.2	Suministro y Colocación de Gaviones	m ³	9.650	65.250	629.662.500
					-
2.2	OBRA FLUVIAL-B				
2.2.1	Movimiento de Tierras				
2.2.1.1	Excavación	m ³	1.071	11.455	12.268.305
2.2.1.2	Relleno	m ³	903	23.925	21.604.275
2.2.1.3	Retiro y Transporte de excedentes	m ³	741	10.005	7.410.704
2.2.2	Obras anexas				-
2.2.2.1	Suministro y Colocación Geotextil	m ²	288	5.655	1.628.640
2.2.2.2	Suministro y Colocación de Gaviones	m ³	528	65.250	34.452.000
2.2.3	Obras Cíviles				-
2.2.3.1	Suministro e instalación Compuerta 1,5x2 [m] en obras de hormigón	gl	1	17.400.000	17.400.000
					-
2.3	OBRA FLUVIAL-C				
2.3.1	Movimiento de Tierras				
2.3.1.1	Excavación	m ³	828	11.455	9.484.740
2.3.1.2	Relleno	m ³	758	23.925	18.135.150
2.3.1.3	Retiro y Transporte de excedentes	m ³	716	10.005	7.167.582
2.3.2	Obras anexas				-
2.3.2.1	Suministro y Colocación Geotextil	m ²	216	5.655	1.221.480
2.3.2.2	Suministro y Colocación de Gaviones	m ³	528	65.250	34.452.000
2.3.3	Obras Cíviles				-
2.3.3.1	Suministro e instalación Compuerta 1,5x2 [m] en obras de hormigón	gl	1	17.400.000	17.400.000
				Sub Total 2	\$ 1.496.122.166
3	SUMINISTRO MAQUINARIA				
3.1	Excavadora CAT 320 D2GC modelo motor C4.4	un	1	213.700.797	213.700.797
				Sub Total 3	\$ 213.700.797
				Sub-Total Neto	\$ 1.764.822.963
				Eventualidades 20%	\$ 352.964.593
				Total Neto	\$ 2.117.787.556
				IVA 19%	\$ 402.379.636
				COSTO TOTAL	\$ 2.520.167.191
4	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENCIÓN				
4.1	Flete Camión con Rampa (ida y vuelta)	un	4	500.000	2.000.000
4.2	Operario Excavadora	día	4	37.000	148.000
4.3	Ayudante (2)	día	8	31.500	252.000
4.4	Combustible Excavadora	día	4	45.500	182.000
4.5	Mantenición	gl	1	1.200.000	1.200.000
				Total Operación y Mantenición	3.782.000

6.5.3 Alternativa 3

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unid.	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	INSTALACIÓN DE FAENAS				
1.1	Instalación y Levante de Faenas	gl	1	330.065.123	330.065.123
					330.065.123
2	ESPIGONES				
2.1	Suministro y Colocación de Prisma de Rocas	m ³	66.971	25.000	1.674.275.000
2.2	Suministro y Colocación de Geotextil de Protección	m ²	21.862	8.000	174.896.000
2.3	Suministro y Colocación de Roca Filtro de 300 kg a 600 kg	m ³	17.543	25.000	438.575.000
2.4	Suministro y Colocación de Roca Filtro de 1 a 2 ton	m ³	16.017	48.000	768.816.000
2.5	Suministro y Colocación de Roca Coraza de 3 a 5 ton	m ³	34.902	52.000	1.814.904.000
2.6	Suministro y Colocación de Cubos de Hormigón de 19 ton	m ³	52.825	135.000	7.131.375.000
2.7	Suministro y Colocación de Roca Coraza de 3 ton	m ³	22.878	48.000	1.098.144.000
2.8	Dragado Desembocadura	m ³	590.286	16.000	9.444.576.000
2.9	Limpieza de fondo	m ³	25.586	13.000	332.618.000
					22.878.179.000
				Sub-Total Neto	23.208.244.123
				Eventualidades 20%	4.641.648.825
				Total Neto	27.849.892.948
				IVA 19%	5.291.479.660
				COSTO TOTAL	33.141.372.608

7. ANÁLISIS DE EFECTOS DE LA SOLUCIÓN (AMBIENTAL)

Desde el punto de vista ambiental, se realizó un análisis del área de la desembocadura del río Itata, el cual fue complementado con una visita a terreno realizada el día 28 de agosto de 2019, cuyos resultados se presentan en detalle en el Anexo 6. Este análisis ambiental expone las áreas de relevancia de esta perspectiva definidas en el área de estudio, con cartografías a color; presenta además fotografías de los aspectos de relevancia identificados en el sector y además presenta un análisis de pertinencia de ingreso de cada una de las alternativas del Proyecto al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Entre los principales resultados de este análisis ambiental, se destaca que se identificaron dos centros poblados relevantes asociados a la desembocadura del río Itata, uno correspondiente a Vega del Itata en la ribera sur y Boca del Itata en la ribera Norte.

De estos dos centros poblados se indica que sólo la localidad de Vega del Itata se encuentra comprendida en el Plan Regulador Comunal de Coelemu (Resolución N° 163/2010), precisando tres áreas principales: área consolidada, área de extensión urbana y área especial y de restricción.



Por otro lado, se puntualizaron áreas de relevancia ambiental, entre ellas destaca el Sitio Prioritario de la Estrategia Regional de Biodiversidad denominado “Vegas de Itata”, el cual comprende una superficie de 2.011 ha y alberga especies de flora, vegetación y fauna en problemas de conservación según el Reglamento de Clasificación de Especies Silvestres (RCE), tales como el queule (*Gomortega keule*), zorro chilla (*Pseudalopex griseus*), sapo de antifaz (*Batrachyla taeniata*), becacina (*Gallinago paraguaiiae*), flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*) y culebra de cola corta (*Tachymenis chilensis*), categorizados, respectivamente, como: En peligro (EN), Preocupación Menor (LC), Casi Amenazada (NT), Preocupación Menor (LC), Rara (R), Preocupación Menor (LC).

Por otra parte, en relación al Suelo del área de estudio, se analizaron las Clases de Capacidad de Uso de suelo, identificando que la ribera norte posee uso de suelo arable de clase II, mientras que la ribera sur posee suelos arables de la clase II, III, IV y suelos no arables de la clase VIII. Además, de acuerdo a información indicada por CONAF, el área de estudio se encuentra entre los rangos de erosión moderada a muy severa. Es decir, se trata de suelos que han perdido entre el 25% al 100% del horizonte superficial.

Entre las principales actividades económicas identificadas, se concluye que en ambas localidades se privilegia la pesca, donde incluso se evidenció venta de pescados en las viviendas aledañas al río. Asimismo, a lo largo de la barra se identificaron estaciones de almacenaje de aparejos de pesca y zonas de atracadero de embarcaciones (Fotografía N° 7.1).

También, en los predios aledaños a la desembocadura se evidenciaron predios agrícolas y de pastoreo con presencia de animales de ganadería, lo cual también representa una actividad económica de los lugareños (Fotografía N° 7.1).

Fotografía N° 7.1: Algunas de las actividades económicas identificadas en las riberas de la desembocadura del río Itata.

Aspecto Identificado	Fotografía
<p><i>Predios agrícolas y animales de ganadería identificados en predios aledaños a la ribera norte del río Itata.</i></p>	
<p><i>Estación de almacenaje de aparejos de pesca de pescadores del sector Boca de Itata (ribera sur). Esta se encuentra en la ribera del río.</i></p>	

Fuente: Registro GSI.

Finalmente, se analizó la Pertinencia de Ingreso de las tres alternativas propuestas por el diseño de ingeniería, estas propuestas son:

- **Alternativa 1: Protocolo de apertura de la barra**
- **Alternativa 2: Defensa Fluvial + Protocolo**
- **Alternativa 3: Defensa Marítima**

En este sentido, se destaca que la alternativa 1 debido a que no considera obras de construcción, no aplica análisis de pertinencia bajo ninguno de los literales indicados en la Ley y el RSEIA.

Por otro lado, para la alternativa 2, se evaluó el literal a) del artículo 3° del RSEIA³, concluyendo que para la construcción de la obra fluvial correspondiente a muros de

gaviones, se considera alterar el curso del río Itata, movilizándolo una cantidad aproximada de 10.000 a 15.000 m³ de arena, cantidad mucho menor a los 50.000 m³ establecidos en el RSEIA como movimiento de material por sobre el cual se debiera ingresar al SEIA. En base a ello se estableció que esta opción no debería ser sometida al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

En definitiva, la única alternativa que debería ser sometida al Sistema de Evaluación Ambiental, es la alternativa 3, la cual ingresa por el literal a) del artículo 3° del RSEIA³. Ello debido a que las obras de dragado para constituir las obras de la defensa marítima superarían el valor indicado en el reglamento de 50.000 m³; siendo el volumen específico a dragar de 590.286 m³. En conclusión, la Alternativa 3, bajo estas circunstancias, debería ser sometida al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

³ a) *Acueductos, embalses, tranques y sifones. Presas, drenaje, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de agua.*

8. PARTICIPACIÓN CIUDADANA DE TÉRMINO

En el Anexo 1 se presenta el Informe de Participación Ciudadana con Enfoque de Género, correspondiente a la Etapa 2 del Estudio Hidráulico Desembocadura Río Itata”. Aquí se da cuenta, en una apretada síntesis, lo principal de las actividades realizadas, conducentes a involucrar a la comunidad en la iniciativa de la Dirección de Obras Portuarias.

El proceso de Participación Ciudadana con Enfoque de Género se realizó de acuerdo con la Metodología previamente consensuada con la Inspección Fiscal. Durante la Etapa 2 – de acuerdo con los Términos de Referencia de la Consultoría - ha correspondido actualizar el listado de actores relevantes y la realización de la segunda reunión de participación ciudadana con enfoque de género, en las comunas de Coelemu y Trehuaco.

Debe recordarse que en la Etapa 1 del estudio se realizó un “Análisis Dimensional” relacionado con los siguientes 5 factores: Geográfico, Demográfico, Histórico-Antropológico, Socioeconómico y de Bienestar Social Básico. Igualmente, en la misma etapa se identificaron los actores relevantes, se realizaron entrevistas semiestructuradas y se desarrollaron sendas reuniones de participación ciudadana con enfoque de género en las comunas de Coelemu (Vegas de Itata) y Trehuaco (Boca de Itata), lo que permitió construir un Mapa de Percepciones e identificar los requerimientos de la comunidad como, también, los potenciales conflictos existentes. De todo esto se dio cuenta en el Informe PAC de la Etapa 1.

Actividades PAC en Etapa 2

De acuerdo con los Términos de Referencia del estudio se debía hacer una reunión de Participación Ciudadana ya avanzada la Etapa 2. Se consensó con la Inspección Fiscal que aquello era inconveniente, pues se llegaría a la comunidad con un proyecto ya muy avanzado como para introducirle modificaciones, si eventualmente la comunidad hacía reparos importantes. Ante esto la DOP decidió hacer reuniones adicionales con la comunidad, programadas al inicio de la Etapa 2, eximiendo al Consultor para su realización. El día lunes 29 de julio la DOP realizó una reunión de Participación Ciudadana con Enfoque de Género en Vegas de Itata, comuna de Coelemu, oportunidad en la que se expusieron las alternativas del proyecto en evaluación y se consensó su continuación. De esta manera la segunda reunión de Participación Ciudadana con Enfoque de Género realizada por el Consultor, correspondiente a la Etapa 2, contó con una reunión previa, llevada adelante por la DOP, lo que facilitó la comprensión de las alternativas planteadas.

A continuación se da cuenta de las actividades desarrolladas en la Etapa 2 del estudio, por parte del Consultor, señalando las actividades previas a las reuniones participativas y las conclusiones del proceso.

Actividades previas

Con el objeto de posibilitar la asistencia de la mayor cantidad posible de miembros de la comunidad a las actividades participativas, se realizaron las siguientes acciones:

- Actualización de actores relevantes
- Elección de lugar y oportunidad para realizar las actividades PAC
- Distribución de invitaciones
- Distribución de Trípticos informativos
- Instalación de Afiches informativos
- Contactos telefónicos
- Comunicaciones radiales de convocatoria

Reuniones con la Comunidad

Las reuniones de participación ciudadana con enfoque de género, se realizaron en la modalidad expositiva, seguido de un espacio de consultas por parte de la comunidad y aclaración de ellas por parte del Inspector Fiscal del Estudio y de los profesionales de la Empresa Consultora. Se hizo una presentación breve del estudio con apoyo de medios audiovisuales, describiéndolo con ideas y lenguaje claro, concreto y comprensible al grupo objetivo, dando posteriormente espacio para aclarar dudas y recibir las inquietudes de los asistentes.

En el Cuadro N° 8.1 se presenta el número de asistentes en cada reunión participativa realizada.

Cuadro N° 8.1: Participantes en Reunión PAC con Enfoque de Género

COMUNA	HOMBRES	MUJERES	TOTAL
Coelemu	19	8	27
Trehuaco	18	5	23
TOTAL	37	13	50

Fuente: Elaboración propia

Las reuniones de participación ciudadana se realizaron desde una perspectiva de género, es decir, no se discriminó de ninguna forma los participantes que participaron en ella, dejando un espacio inclusivo en donde todos y todas pudieron realizar sus observaciones libremente. Si bien se procuró invitar a las reuniones de participación ciudadana con enfoque de género, tanto a hombres como mujeres en cuantía similar, se observa que se contó con más hombres que mujeres. Esto puede entenderse a partir de las desigualdades que persisten en relación a la participación de mujeres en las instancias de poder, como también a nivel de las organizaciones sociales, en especial vinculadas a actividades agrícolas y de pesca. Observando que se trata de un Estudio que beneficiará a quienes realizan actividades agrícolas y de pesca en la zona de desembocadura del río Itata, actividades tradicionalmente masculinas, puede entenderse la minoritaria participación de mujeres en las instancias de participación. Con todo, en las dos reuniones se observó una activa participación de las mujeres presentes, algunas de ellas involucradas directamente en las actividades productivas de la zona, lo que manifiesta

una lenta pero sostenida evolución, en términos de dejar atrás antiguas estereotipos acerca de los roles de hombres y mujeres, al interior de las familias y en la propia sociedad.

Requerimientos Ciudadanos

En las reuniones de participación ciudadana con enfoque de género realizadas con anterioridad, la comunidad expresó su satisfacción por la realización del “Estudio Hidráulico Desembocadura del Río Itata”, puesto que se espera que él permita solucionar los problemas actuales de manera definitiva. En términos de requerimientos del Estudio, manifestaron lo que se indica en el Cuadro N° 8.2, donde se indica la prioridad asignada y la atención de cada uno de ellos, de acuerdo con el proyecto presentado a su consideración.

Cuadro N° 8.2: Requerimientos Ciudadanos

N°	Requerimiento	Prioridad	Atención
1	Evitar inundaciones para asegurar la continuidad de la actividad agrícola y de engorda de animales, en la zona de desembocadura	1	Se satisface con el Proyecto
2	Gestión de la desembocadura mediante Protocolo de Alerta Temprana ante obstrucción de la descarga del río al mar	1	Se satisface con el Proyecto
3	Asegurar un nivel mínimo del río en la desembocadura, para permitir la continuidad de la actividad de pesca	1	Se satisface con el Proyecto
4	Gestión de la cuenca del Itata en términos de regular las extracciones de agua y la operación del futuro Embalse Punilla	3	No está dentro del alcance del Estudio (sin embargo las autoridades del MOP han tomado debida nota)
5	Evitar intervenciones mediante obras civiles en la desembocadura	2	El Proyecto considera un mínimo de obras civiles
6	Respetar el Sitio Prioritario existente vinculado a los humedales como lugar de descanso de aves migratorias	2	Se satisface con el Proyecto
7	Dar solución, mediante obras civiles de protección al problema de erosión de la ribera norte del río (Trehuaco), en el sector cercano a desembocadura	2	Se satisface con el Proyecto
8	Gestión de la cuenca del Itata en términos de regular las extracciones de agua y la operación del futuro Embalse Punilla	3	No está dentro del alcance del Estudio (sin embargo las autoridades del MOP han tomado debida nota)

Prioridad 1=Altísima; Prioridad 2=Alta; Prioridad 3=Media
Fuente: Elaboración propia

Potenciales Conflictos

No se observa la existencia de potenciales conflictos con relación al Estudio Hidráulico de la Desembocadura del Río Itata; Si bien no existen conflictos al interior de las comunidades, se observa una cierta molestia de los vecinos con las autoridades, por un sentimiento de abandono. Naturalmente la realización del presente estudio, y la materialización del proyecto en el próximo futuro, cambiará esta percepción.

No se observan diferencias ni conflictividad étnica de ninguna naturaleza. Por su parte, los roles asignados y asumidos por hombres y mujeres, son los que se observan en el país y no manifiestan conflictividad adicional.

Conclusiones y Recomendaciones Proceso PAC

En Anexo 1 se presenta en detalle las conclusiones del estudio realizado, con relación al proceso de participación ciudadana con enfoque de género. Aquí basta señalar que se cumplieron plenamente los objetivos de la DOP – tanto generales como específicos en términos de la inclusión de la comunidad en los procesos de inversión impulsados por el MOP – como con relación a las percepciones y requerimientos expresados por la comunidad directamente relacionada con el estudio.

La comunidad expresó su satisfacción por el estudio realizado y las soluciones propuestas, manifestando su deseo de que las obras y los protocolos de intervención de la desembocadura del Río Itata, se materialicen a la mayor brevedad posible.

Como se ha señalado, en el Anexo 1 se presenta en detalle el proceso de participación ciudadana con enfoque de género llevado adelante en el contexto del desarrollo de la Etapa 2 del Estudio.

9. REVISIÓN PR ENTREGADO POR LA DOP

Como método de comprobación de alturas ortométricas de los vértices geodésicos ITA1, ITA2, obtenidas del procesamiento GPS con vinculación al vértice altimétrico (NRS), denotado como IT01 (DOP), se ejecutaron mediciones adicionales planificadas en dos etapas. Dichas mediciones fueron realizadas mediante el método RTK (Cinemático en Tiempo Real), en base a correcciones emitidas desde una estación Base.

En la primera etapa de comprobación el punto Base utilizado fue el IT01 (DOP), mientras que en la segunda etapa se utilizó como punto Base el ITA1, vinculado según medición GPS en modo estático al vértice MELA (X, Y) y al IT01 (Z).

En cuanto al equipo GPS Móvil, fue utilizado para verificar la altura de los vértices en cuestión. Cabe destacar, que de igual forma se comprobaron las alturas ortométricas (NRS) de los puntos facilitados por el mandante (IT01/IT02).

Los resultados de las etapas de verificación en las alturas ortométricas (NRS), se presentan en los siguientes cuadros:

Cuadro N° 9.1: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.

ETAPA I			
BASE Vértice IT01			
Vértice	Altura NRS (Procesamiento GPS Estático)	Altura NRS (Verificación Bordemar Ingeniería SpA)	Diferencias ΔH (m)
IT01 (DOP)	6.745	6.733	0.012
ITA1	7.846	7.880	-0.034
ITA2	4.029	4.000	0.029

Cuadro N° 9.2: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.

ETAPA I			
BASE Vértice IT01			
Vértice	Altura NRS (Monografía)	Altura NRS (Verificación Bordemar Ingeniería SpA)	Diferencias ΔH (m)
IT02 (DOP)	5.332	5.399	-0.067

Cuadro N° 9.3: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.

ETAPA II				
BASE Vértice ITA1				
Vértice	Altura NRS (Procesamiento GPS Estático)	Vértice	Altura NRS (Verificación Bordemar Ingeniería SpA)	Diferencias ΔH (m)
ITA1	7.846	ITA1	7.832	0.014
ITA2	4.029	ITA2	3.957	0.072
IT01 (DOP)	6.745	IT01 (DOP)	6.707	0.038

Cuadro N° 9.4: Diferencias de altura ortométrica (NRS) según verificación con GPS Doble Frecuencia.

ETAPA II				
BASE Vértice ITA1				
Vértice	Altura NRS (Monografía)	Vértice	Altura NRS (Verificación Bordemar Ingeniería SpA)	Diferencias ΔH (m)
IT02 (DOP)	5.332	IT02 (DOP)	5.354	-0.022

Adicionalmente, se calcularon los desniveles entre puntos, permitiendo hacer un análisis comparativo.

Figura N° 9.1: Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de procesamiento GPS modo Estático

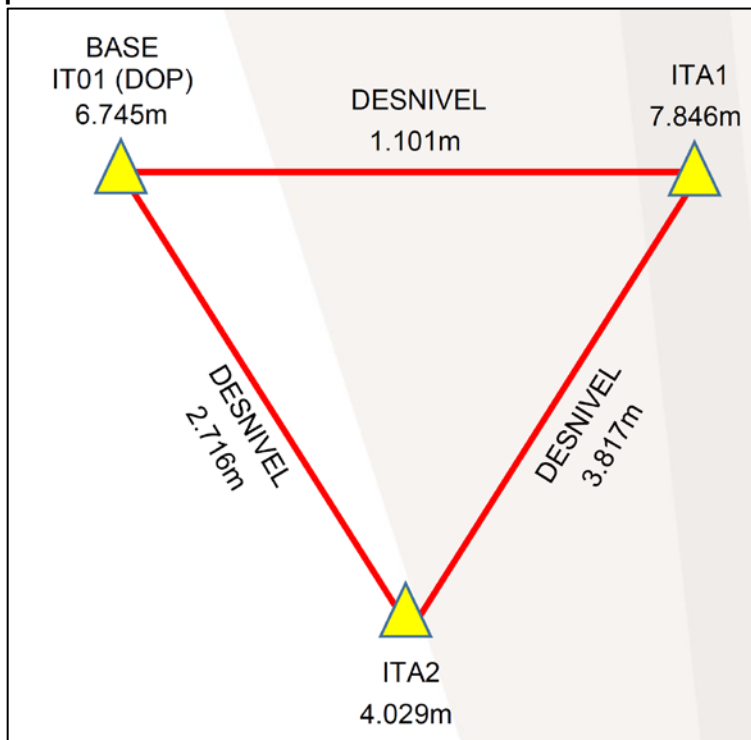
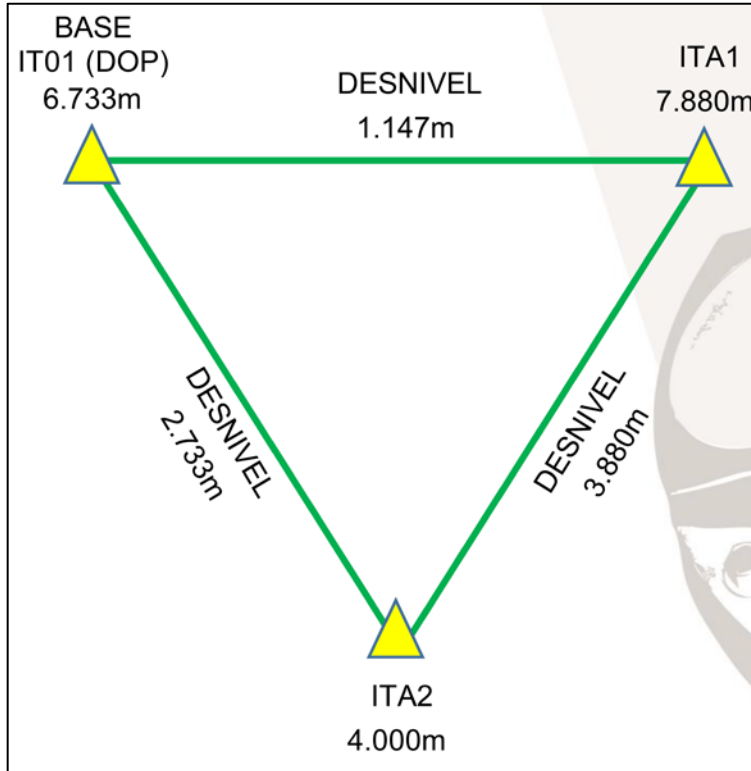


Figura N° 9.2: Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de la verificación GPS modo RTK (Etapa I).



Cuadro N° 9.5: Diferencias de desnivel entre vértices (Etapa I)

Vector	Desnivel según Procesamiento GPS Estático (m)	Desnivel según verificación con GPS RTK (m)	Diferencias de Desnivel
IT01 (DOP)-ITA1	1.101	1.147	-0.046
IT01 (DOP)-ITA2	2.716	2.733	-0.017
ITA1-ITA2	3.817	3.880	-0.063

Figura N° 9.3: Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de procesamiento GPS modo Estático

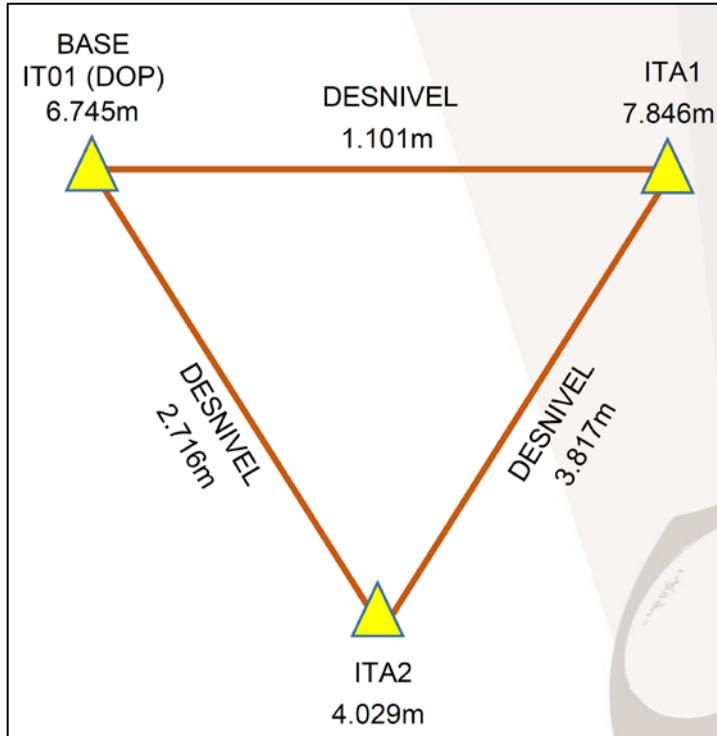
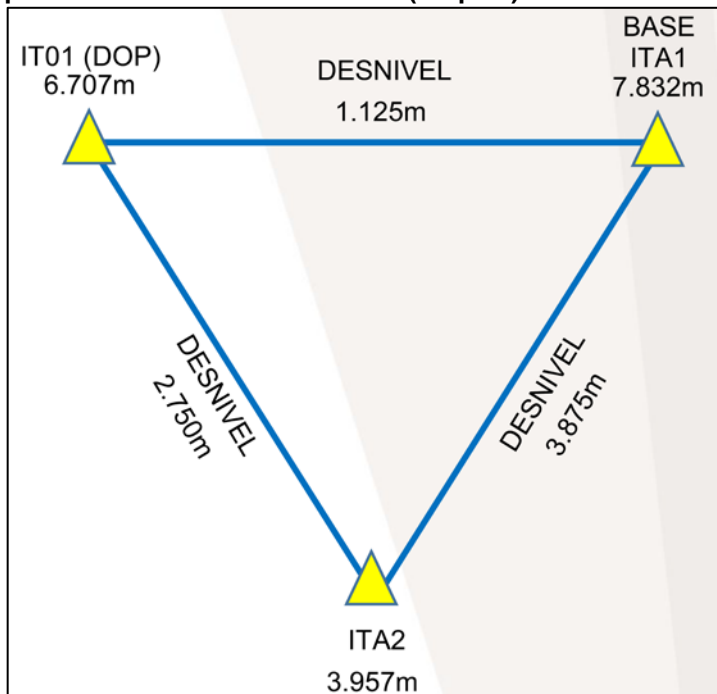


Figura N° 9.4: Cálculo de desniveles a partir de alturas ortométricas (NRS) provenientes de procesamiento GPS modo RTK (Etapa II).



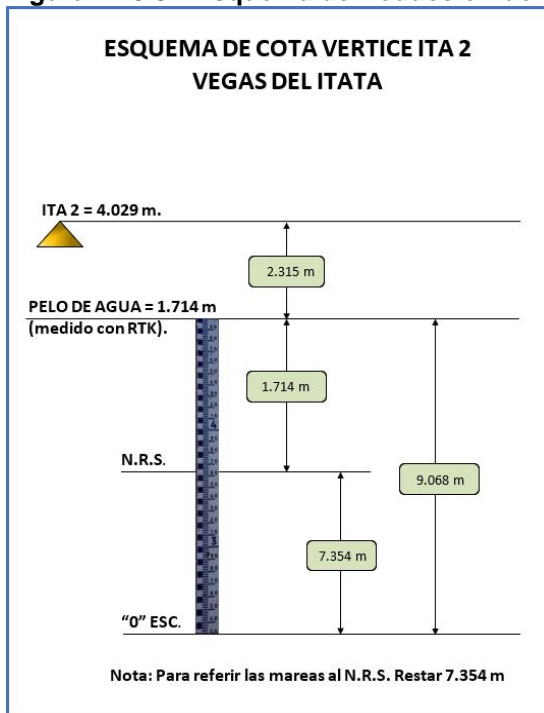
Cuadro N° 9.6: Diferencias de desnivel entre vértices (Etapa II)

Vector	Desnivel según Procesamiento GPS Estático (m)	Desnivel según verificación con GPS RTK (m)	Diferencias de Desnivel
IT01 (DOP)-ITA1	1.101	1.125	-0.024
IT01 (DOP)-ITA2	2.716	2.750	-0.034
ITA1-ITA2	3.817	3.875	-0.058

Una vez obtenidos los resultados arrojados de la verificación de alturas ortométricas (NRS), se puede concluir que no existen diferencias significativas entre las obtenidas por el procesamiento de data GPS en modo estático y las etapas de verificación correspondientes, deduciendo de esta manera que la vinculación de los vértices ITA1 e ITA2 al vértice IT01 (DOP), se encuentran dentro de parámetros técnicos según las alturas entregadas por la D.O.P. No obstante, las alturas de los vértices de partida para la vinculación del N.R.S, fue transportada por la DOP, lo que no puede ser controlado en estas mediciones.

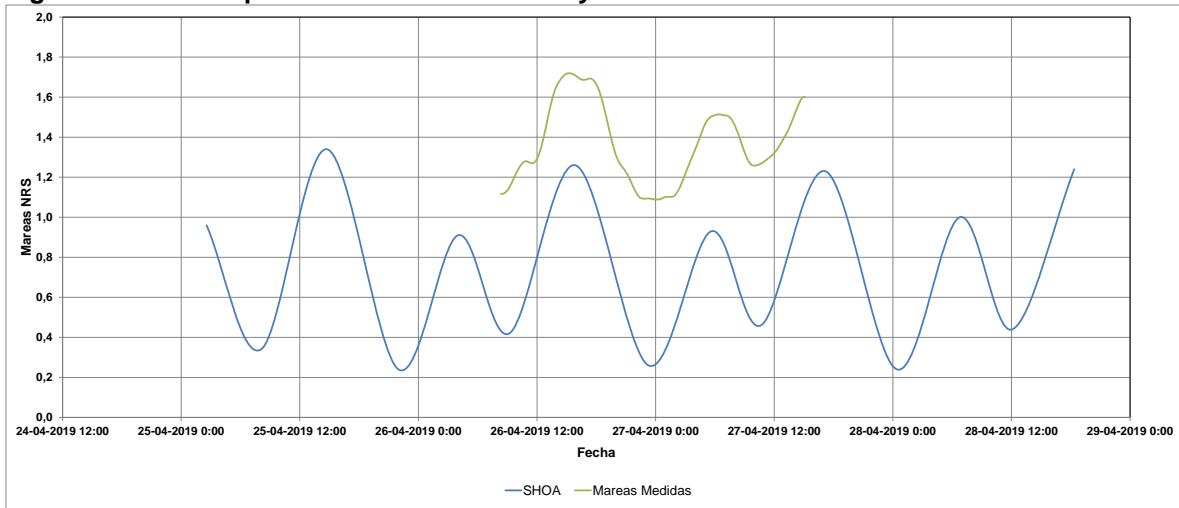
Luego, se compararon las mareas medidas a propósito del levantamiento batimétrico con las mareas del SHOA (corregidas con Puerto Patrón Valparaíso), las que se refieren al NRS bajo el siguiente esquema:

Figura N° 9.5: Esquema de Reducción de Mareas



Como se observa en la siguiente figura, se detectan diferencias significativas (del orden de 60 cm) entre las mareas medidas y las mareas del SHOA, esto supone (en base a los cálculos mostrados anteriormente) que la diferencia entre ambas fuentes se debe a un error en el PR entregado por la DOP.

Figura N° 9.6: Comparación Mareas medidas y Mareas SHOA



Si bien las mareas del SHOA son correcciones desde el Puerto Patrón Valparaíso, las diferencias son lo suficientemente significativas para suponer un error en el PR proporcionado por la DOP.

Por lo anterior, se recomienda a la DOP realizar un estudio de marea en base a una medición de al menos 30 días, de lo contrario revisar y/o corregir su PR, luego de aquello deberá actualizar la información topobatimétrica.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Alternativa 1 (Protocolo)

- Se propone un protocolo de apertura de la barrera, con base en el pronóstico de lluvia en la ciudad de Chillán y/o en la medición de caudal en la estación General Cruz, que da un tiempo de reacción de 21 horas.
- El protocolo señalado se asocia a la crecida de 770 m³/s, que es aquella que está en el límite antes de provocar inundaciones.
- Esta alternativa no cubre los eventos para TR=2, 5 y/o 10 años.
- Cabe señalar que los resultados obtenidos, respecto de inundaciones y su caudal asociado, no coincide exactamente con la experiencia de la comunidad, situación que lleva a dudar, por ejemplo de las cotas de referencia topográfica, lo que deberá revisarse.

Alternativa 2 (Obras de Defensas Fluviales)

- Se proponen las siguientes obras de defensa fluviales:

Cuadro N° 10.1: Resumen de Obras Propuestas Alternativa 2

N°	Locación	Característica	Longitud [m]
OF-A	Ribera derecha	Defensa fluvial. De acuerdo con las velocidades medias del sector la materialidad podría ser de tierra o gaviones.	900
OF-B	Canal ribera norte	Obra de control Gaviones con Compuerta.	50
OF-C	Descarga ribera sur	Obra de control Gaviones con Compuerta.	50

Fuente: Elaboración propia

- Estas obras se han dimensionado con base en la estadística reducida (Febrero-Junio), para un periodo de retorno de 2 años.
- El valor de las obras propuestas asciende a MM\$ 2.600 (incluye suministro de maquinaria)
- Esta alternativa incluye el mismo protocolo definido para la alternativa 1.
- Esta alternativa se genera para evitar inundaciones y no así para controlar erosiones.

Alternativa 3 (Espigones)

Las inundaciones del lado norte (para condiciones extremas), se deben a que es un sector extremadamente bajo (de acuerdo a lo indicado en las cotas topográficas), incluso llegando a menos de 2 mNRS en cierto tramo. Es por ello, que bajo eventos de crecidas extremas la apertura permanente de la barra no es capaz que evitar la inundación en dicho sector específico.

Las condiciones de oleaje no influyen de manera significativa en el patrón de inundación.

Respecto de la hidrodinámica, para un oleaje medio (reinante) se observa que en la desembocadura es el río el que marca la tendencia de las corrientes, mientras que ante un evento de mal tiempo (temporal) es el oleaje el que domina la circulación costera.

Los espigones modifican el patrón de corrientes costeras con respecto a la situación actual, esto es más evidente cuando el oleaje es de mayor magnitud (temporal). Se observa la generación de corrientes circulatorias en torno a ambos espigones, pero más pronunciado en el espigón norte.

Se observa cierto grado de sedimentación en la desembocadura del río Itata, por ende, no es posible garantizar la apertura permanente de la barra en todo su ancho, esto sumado a que en la modelación no se incluyó el aporte de sedimentos del río, por ende, es de esperar que la depositación en la desembocadura sea mayor.

Es de esperar que en el largo plazo el sector sur de la playa sufra retroceso de la línea de costa, ya que la modificación hidrodinámica que producen los espigones no permitiría alimentar con sedimentos dicho sector.

En la primera actividad de Participación Ciudadana, la comunidad del sector de Vegas de Itata expresó de manera explícita que no quieren obras permanentes en la ribera sur del río Itata, es por ello, que la solución planteada no está de acuerdo con el requerimiento ciudadano.

En caso de que la alternativa 3 avance en su ciclo de vida (etapa de prefactibilidad y/o factibilidad), se recomiendan trabajos adicionales dentro de los cuales se proponen:

- Mediciones de oleaje y corrientes (mínimo 30 días) en la zona de la desembocadura. Adicionalmente se propone realizar un estudio de mareas para la determinación del NRS local, considerando que el sector de estudio tiene como Puerto Patrón Valparaíso.
- **Verificación del PR definido por la DOP (ver análisis del numeral 9 de la presente memoria) para nuevos levantamientos del terreno, en el caso de no realizar la determinación del NRS local.**
- Batimetría de detalle del mar y río (zona de desembocadura y riberas inundables).
- Modelación numérica incorporando la información de terreno antes comentada (mediciones de terreno y topobatimetría corregida). Puede surgir la necesidad de

ampliar los escenarios de modelación (tiempo) en el caso de encontrar una cierta estacionalidad en las mediciones de terreno.

- Modelación Física
 - Para estabilidad de los elementos que componen los molos
 - Para estudiar el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico de la solución