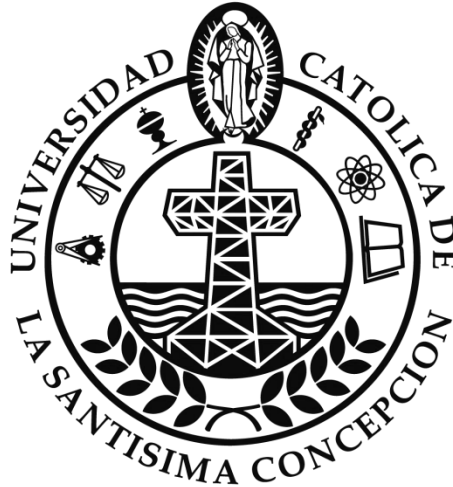


Universidad Católica de la Santísima Concepción

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil



**"MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL DE LA ZONA BAJA DEL RÍO
BIO BÍO MEDIANTE EL SOFTWARE DELFT3D"**

KARLA CONTRERAS FERNÁNDEZ

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía:

Diego Caamaño Avendaño

Profesor Informante:

Mauricio Villagrán Valenzuela

Concepción, Julio 2016

Resumen

El presente estudio y sus resultados buscan caracterizar la hidráulica de la zona baja del río Biobío. Esto con el fin de cuantificar las principales variables que mejor representan los fenómenos hidráulicos que condicionan los procesos de transporte y mezcla.

Se realizó una modelación hidráulica por medio del software Delft3D para varios escenarios de caudales. Lo anterior con el objetivo de caracterizar la zona de influencia de la marea en el flujo del río. Las simulaciones bidimensionales permiten observar el campo vectorial en la desembocadura del río, en el tramo afectado por la barra de sedimentos y en la zona que conecta ambos.

Las superficies de elevación del agua y específicamente el contorno que ésta describe se utilizan para calibrar y validar el modelo.

Los principales resultados indican que la influencia de los niveles de marea no afectan la zona más angosta del río, y además para los escenarios modelados se observó que dicho angostamiento peralta el flujo sugiriendo una condición favorable para la migración de la barra de sedimentos hacia aguas arriba.

Los resultados aquí encontrados permiten plantear una nueva hipótesis que propone que la variación de la barra de sedimentos estaría condicionada por el angostamiento, además de incluir otros forzantes físicos con el fin de identificar el grado de influencia que éstos tienen en la hidrodinámica del río.

Abstract

This study and its results seek to characterize the hydraulics of Biobío river lower area. This in order to quantify the main variables that best represent the hydraulic phenomena that influence transport processes and mixtures.

A hydraulic modeling was performed using Delft3D software for various flow scenarios. This with the aim of characterizing the influence zone of the tide in the river flow. Two-dimensional simulations allow observing the vector field at the river estuary, in the section affected by the sediment bar and connecting both.

The surface water elevation and specifically the outline described are used to calibrate and validate the model.

The main results indicate that the influence of tide levels do not affect the narrowest part of the river, and also for the modeled scenarios it was observed that the narrowing increases the flow, emerging a favorable condition for the migration of sediment bar upstream.

The results allow raising some new hypotheses, such as sediments bar variation due to the increase caused by the narrowing, also includes physical forcing in order to identify the influence degree they have on the hydrodynamics of the river.

*"Yo quiero construir. Pero no soy sino una parte insignificante
pero importante de un todo del que todavía no tengo conciencia"*

Frida Kahlo

*"A mi mamá, hermana y sobrinos, por ellos crezco
A mis amig@s, que son la familia que escogí y alegran mi vida
A mis tíos y primos por estar antes, ahora y siempre"*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi mamá, hermana y sobrinos por ser mis fans número uno y apoyarme incondicionalmente, por hacer de mí una mejor persona y llenar mi vida de buenos momentos. A mis tí@s y prim@s por siempre motivarme a ser mejor y apoyarme en las buenas y sobre todo en las malas.

También agradecer a mis grandes amigos, Karen Leal, Karen Salgado, Javiera Padilla y Jean Pierre Manríquez quienes fueron con quienes comencé esta carrera y tengo innumerables e incontables historias, sin ustedes esta etapa no habría sido ni la mitad de increíble de lo que fue. A Luis Zamora, Cesar Cerda, Nicole Sarmiento, Jael Millan, Evelyn Pedrero, Diego Espinoza y Juan José Olivera, por las incontables horas de trabajo y buenos momentos.

A mis amigas de la vida, Nicole, Cristina, Noelia, Camila, Evelyn y Sandy, quienes entendieron y aceptaron mi poca vida social durante los últimos 8 años y a pesar de eso siempre estuvieron para mí.

A Luis, por ser más que un pololo, por ser mi amigo, por darme apoyo incondicional y siempre tener una palabra o un abrazo tranquilizador. Por su paciencia con mis cambios de humor, mi mal genio y mis arranques de locura.

A la tía Mariella, por su cariño inmenso, su bondad gigantesca y su paciencia infinita. Con un abrazo y un saludo al comenzar la jornada es capaz de cambiar el día de cualquiera.

Al profesor Diego Caamaño, por su apoyo y ayuda para desarrollar este trabajo, pero además por incontables conversaciones y consejos que me permitieron tomar mejores decisiones tanto en mi vida universitaria como personal.

Al profesor Mauricio Villagrán por su buena disposición para aclarar mis dudas.

Y finalmente a todos los profesores que ayudaron en mi formación profesional.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Marco teórico.....	3
1.3 Objetivos.....	6
1.1.1 Objetivo General	6
1.1.2 Objetivos Específicos	6
Capítulo 2. Métodos.....	7
2.1 Zona de estudio.....	7
2.2 Modelo hidrodinámico.....	9
2.2.1 Introducción a Delft3D.....	9
2.2.2 Ecuaciones del modelo hidráulico.....	9
2.3 Batimetría y discretización espacial.....	13
2.4 Escenarios de modelación: Condiciones iniciales y borde.....	15
2.5 Análisis de sensibilidad.....	23
2.6 Calibración.....	23
Capítulo 3. Resultados	24
3.1 Predicción de marea.....	24
3.3 Análisis de sensibilidad.....	28
3.3 Calibración.....	31
3.4 Resultados para cada uno de los escenarios propuestos.....	35
Capítulo 4. Discusión y Conclusiones	45
Capítulo 5. Referencias bibliográficas.....	46
Capítulo 6. Anexos	49

Anexo A: Tablas de caudales medios diarios mensual.....	49
Anexo B: Tablas de mareas	51
Anexo C: Predicción de mareas.....	54
Anexo D: Código MATLAB para predicción de mareas.....	59

Índice de figuras

Figura 1.1: Zona de estudio correspondiente a la parte baja del río Biobío en su desembocadura (E5923833, N663646 Huso 18 Sur, WGS84).....	1
Figura 1.2: Ilustración de la morfología del cauce y barra del Río Biobío en su Desembocadura para los años a) 1955, b) 1978, c) 1992, y d) 2011, Fuente: SAF.....	2
Figura 2.1: Imagen satelital de la crecida de Julio del 2006 en el río Biobío. Fuente: DGA.....	8
Figura 2.2: Componentes del vector de velocidad.....	11
Figura 2.3: Batimetría de la zona de estudio, (+) Valores bajo el nivel medio del mar, (-) Valores sobre el nivel medio del mar.....	14
Figura 2.4: Imagen satelital escenario 1.....	16
Figura 2.5: Imagen satelital escenario 2.....	16
Figura 2.6: Imagen satelital escenario 3.....	17
Figura 2.7: Puntos de observación del nivel de agua.....	17
Figura 2.8: Ubicación estación fluviométrica Río Biobío en Desembocadura (08394001-8) y del mareógrafo Coronel_CL.....	19
Figura 2.9: Esquema de las fuerzas generadoras de marea.....	20
Figura 2.10: Variación de marea el 23 y 24 de Octubre del 2012.....	21
Figura 2.11: Variación de marea el 28 y 29 de Diciembre del 2012.....	21
Figura 2.12: Variación de caudal ingresado al modelo el 10 y 11 de Junio del 2011.....	21
Figura 2.13: Variación de caudal ingresado al modelo el 23 y 24 de Octubre del 2012.....	22
Figura 2.14: Variación de caudal ingresado al modelo el 28 y 29 de Diciembre del 2012.....	22
Figura 3.1: Serie temporal de marea registrada por el mareógrafo Coronel_CL desde el 01-07-2014 hasta el 31-07-2014.....	24
Figura 3.2: Serie temporal de marea predicha para la estación Coronel_CL para la fecha desde el 28-02-2015 hasta el 31-03-2015.....	25
Figura 3.3: Serie temporal de marea medida versus predicción (01-03-2015 hasta el 31-03-2015).....	25
Figura 3.4: Error entre la predicción de marea y los valores medidos por el mareógrafo desde el 01-03-2015 hasta el 31-03-2015.....	26

Figura 3.5: Predicción de marea desde el 09-06-11 hasta el 12-06-11.	27
Figura 3.6: Batimetría interpolada	27
Figura 3.7: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 1 (rojo malla 4 x 12 m, verde malla 12 x 30 m y azul malla 35 x 90 m).	28
Figura 3.8: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 1 en la ribera norte (rojo malla 4 x 12 m, verde malla 12 x 30 m y azul malla 35 x 90 m).....	29
Figura 3.9: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 1 en la ribera sur (rojo malla 4 x 12 m, verde malla 12 x 30 m y azul malla 35 x 90 m).	30
Figura 3.10: Cotas del pelo de agua para diferentes valores de manning, perfil punto 2 de observación.	31
Figura 3.11: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 2 en la ribera norte; a) $n=0.02$, b) $n=0.025$, c) $n=0.03$, d) $n=0.035$ y e) $n=0.04$	32
Figura 3.12: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 2 en la ribera sur; a) $n=0.02$, b) $n=0.025$, c) $n=0.03$, d) $n=0.035$ y e) $n=0.04$	33
Figura 3.13: Variación de la distancia horizontal entre; a) riberas de pendiente suave, b) riberas de pendiente fuerte.....	35
Figura 3.14: Profundidades de agua modeladas para el escenario 1.....	36
Figura 3.15: Profundidades de agua modeladas para el escenario 2.....	36
Figura 3.16: Profundidades de agua modeladas para el escenario 3.....	37
Figura 3.17: Variación de marea versus cota de la superficie del agua para el punto 2 (figura 2.7), escenario 2.	38
Figura 3.18: Variación de la marea versus Froude en el punto 2, escenario 2.....	39
Figura 3.19: Ubicación del perfil longitudinal de la superficie del agua, aguas arriba del angostamiento.	39
Figura 3.20: Eje hidráulico, aguas arriba del angostamiento para el E1.....	40
Figura 3.21: Eje hidráulico, aguas arriba del angostamiento para el E2.....	40
Figura 3.22: Eje hidráulico, aguas arriba del angostamiento para el E3.....	41
Figura 3.23: Vectores de velocidad en zona de desembocadura escenario 1; a) marea baja, b) marea alta.....	42
Figura 3.24: Vectores de velocidad en zona de desembocadura escenario 2; a) marea baja, b) marea alta.....	43

Figura 3.25: Vectores de velocidad en zona de desembocadura escenario 3; a) marea baja, b) marea alta.....	44
Figura C.1: Esquema de los astros alineados.....	54
Figura C.2: Esquema de los astros en ángulo recto	55
Figura C.3: Serie temporal del nivel del mar durante un mes.....	56
Figura C.4: Componentes principales de la marea astronómica.	57
Figura C.5: Predicción de la serie temporal de marea astronómica mediante la suma de componentes armónicas	58

Índice de tablas

Tabla 2.1: Escenarios de modelación.....	15
Tabla 3.1: Distancias horizontales entre modelación e imagen satelital.....	31
Tabla 3.2: Distancia horizontal entre riberas y espejo de agua para diferentes valores de manning.	34
Tabla 3.3: Variación de elevación de la superficie del agua para los 3 escenarios.....	37
Tabla 3.4: Velocidad media para los 3 escenarios.	41
Tabla A.1 : Caudales medios diarios (m ³ /s) estación “Río Biobío en desembocadura”.	49
Tabla B.1: Marea 9, 10 y 11 de Junio del 2011 estación Coronel_CL	51
Tabla B.2: Marea 22, 23 y 24 de Octubre del 2012 estación Coronel_CL	52
Tabla B.3: Marea 27, 28 y 29 de Diciembre del 2012 estación Coronel_CL	53

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

El río Biobío es uno de los sistemas fluviales más importantes de Chile, puesto que es relevante histórica (*Torrejón, et al. 2004*) y económicamente (*Goodwin, et al. 2006*). Recorre desde la Cordillera de los Andes al Océano Pacífico una longitud de 380 km drenando una cuenca de 24.262 km², con caudales medios anuales que alcanzan los 1.000 m³/s. El río Biobío presenta un ancho variable con un promedio de 2 km en el sector de la desembocadura (figura 1.1), descarga al mar a través de una sección compuesta por una barra de sedimentos que ha mostrado significativos cambios en las últimas décadas (figura 1.2). Parte del sedimento transportado por el río se deposita aguas arriba de la barra en el sector sur de la desembocadura (*Saldías, et al. 2012*), el restante se distribuye entre el cañón marino (i.e. oeste) y una porción que es transportada hacia el sur por la corriente litoral dando forma a la playa de escuadrón y provocando una creciente depositación en la bahía de Coronel (*Isla, et al. 2012*).

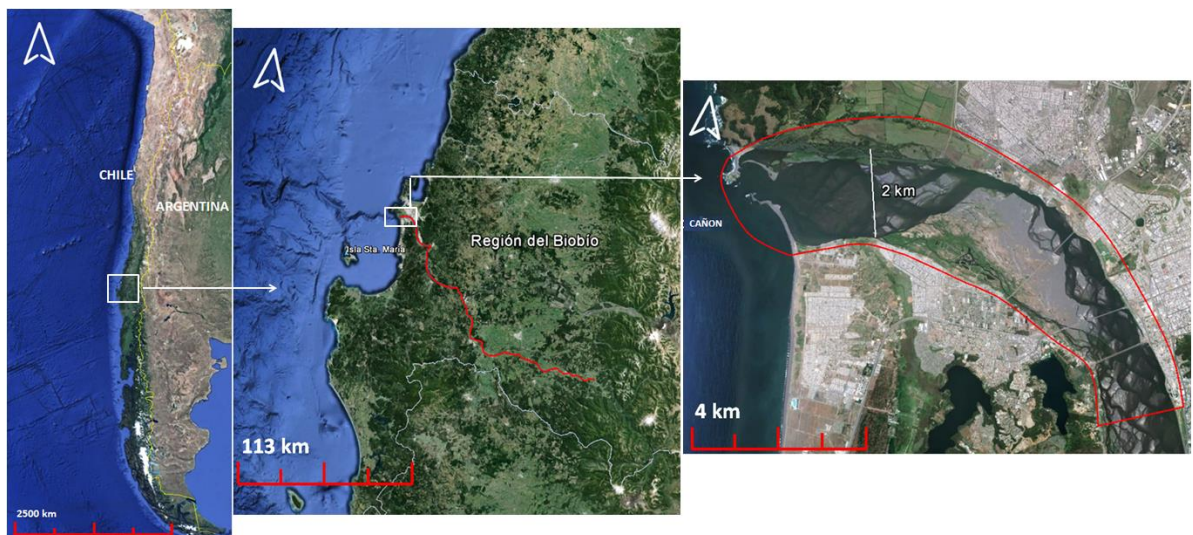


Figura 1.1: Zona de estudio correspondiente a la parte baja del río Biobío en su desembocadura (E5923833, N663646 Huso 18 Sur, WGS84).

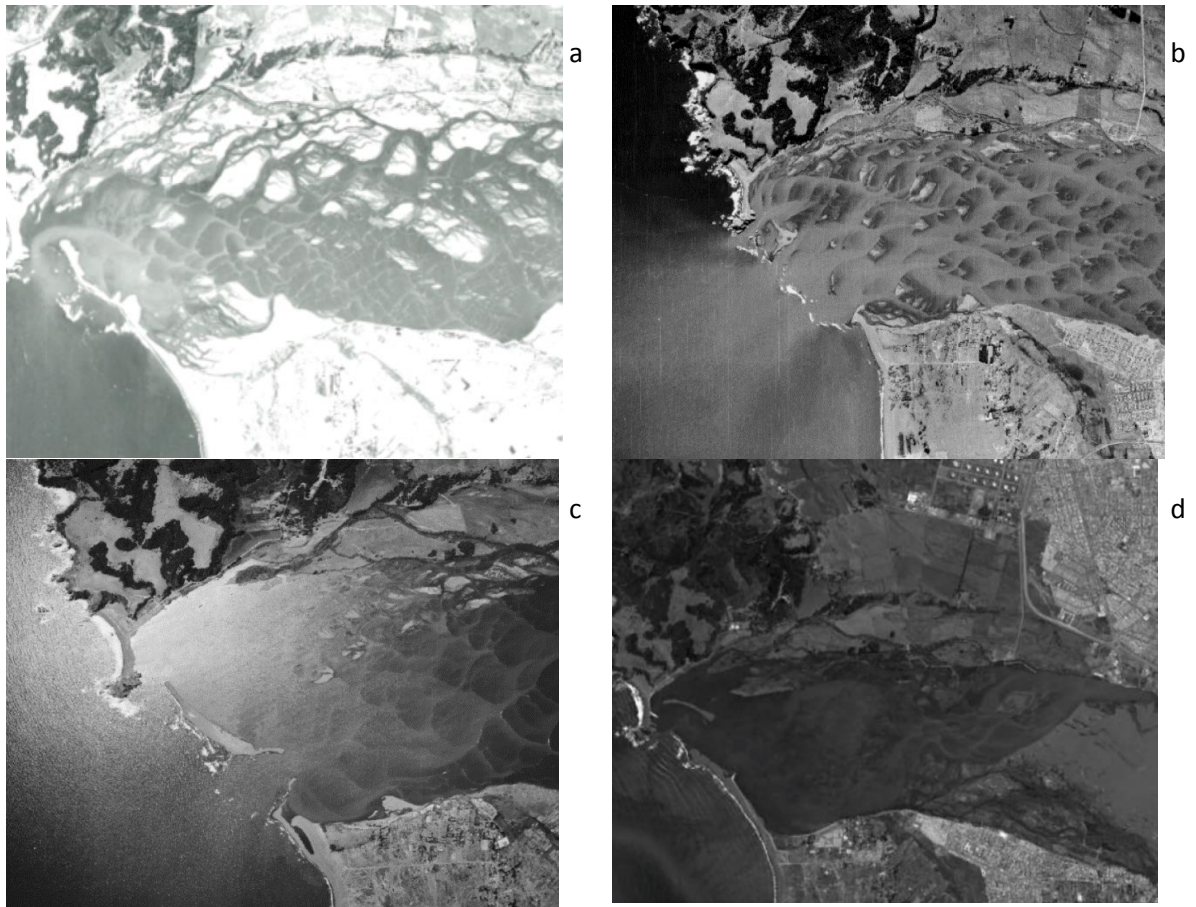


Figura 1.2: Ilustración de la morfología del cauce y barra del Río Biobío en su Desembocadura para los años a) 1955, b) 1978, c) 1992, y d) 2011, Fuente: SAF.

El presente estudio y sus resultados buscan caracterizar la hidrodinámica en la parte baja del río Biobío. Lo anterior con fines de evaluar la influencia de las mareas en el flujo e identificar controles hidráulicos locales responsables de fenómenos de erosión o depositación. Se compiló información topobatimétrica en la zona de estudio e interpolaron espacialmente los datos para sustentar una modelación hidrodinámica bidimensional por medio del software Deflt3D (*Deltares, 2014*). Se definen escenarios de modelación para ventanas temporales representativas de la información dispuesta en el proceso de calibración. Los resultados del modelo calibrado se utilizan para evaluar la evolución temporal de las variables hidráulicas en cuatro sectores del dominio

1.2 Marco teórico

La necesidad de estudiar de manera conjunta los fenómenos que interactúan en un sistema fluvial, tales como, el transporte de sedimentos y las mareas, precisa de herramientas sofisticadas para caracterizar la hidrodinámica del río. En la actualidad se utilizan modelos físicos y numéricos, los cuales han sido perfeccionados gracias a los avances tecnológicos.

En el campo de la hidrodinámica, la modelación matemática ha adquirido cada vez más importancia y ha sido una importante herramienta para conocer el comportamiento de variables ambientales e hidrodinámicas que influyen en el comportamiento del flujo en los estuarios y su interacción con zonas costeras, lagunas, etc. (*Herrera, et al. 2013*).

Con el desarrollo computacional en las últimas décadas, los modelos numéricos se han convertido en una herramienta muy atractiva para estudiar el movimiento de las aguas. Dicho desarrollo ha permitido que en la actualidad exista una gama de modelos numéricos, la gran mayoría de éstos utilizan las ecuaciones de conservación de masa, conservación de cantidad de movimiento y conservación de energía para cuantificar los procesos hidrodinámicos (*Martín y McCutcheon, 1999*).

En particular, todos los modelos matemáticos aplicables a los estudios de estuarios y costas, se basan en el modelo de ondas largas en base a las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier Stokes) y por lo tanto ofrecen una formulación similar. Las diferencias radican en los términos utilizados para caracterizar los fenómenos turbulentos, comúnmente denominados como “cierre turbulento”, que matemáticamente son necesarios para completar el sistema de ecuaciones planteado por las RANS.

Definido el sistema de ecuaciones diferenciales parciales es necesario decidir el método numérico que se utilizará para resolver el problema propuesto. Entonces se considera una discretización finita del espacio a modelar a través de elementos, diferencias o volúmenes finitos. Consecuentemente es fundamental definir un dominio de modelación apropiado y que permita representar matemáticamente los procesos físicos que predominan en la zona de estudio. De esta forma el dominio puede discretizarse uni, bi o tridimensionalmente (1D, 2D, o 3D).

La mayoría de los modelos unidimensionales se formulan en un sistema de coordenadas rectilíneas y resuelven las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento mediante el uso de diferencias finitas en estado dinámico y en estado estacionario utilizan la ecuación de energía. Algunos modelos unidimensionales utilizados son MOBED (*Krishnappan, 1981*), IALLUVIAL (*Karim y Kennedy, 1982*) y HEC-RAS (*U.S. Army Corps of Engineers, 1995*).

Desde principios de 1990, se comenzaron a implementar los modelos computacionales en dos dimensiones. La mayoría de éstos posee una interfaz que permite ingresar y visualizar los resultados de forma amigable para el usuario. Los modelos 2D entregan información sobre la profundidad del agua, magnitud y sentido de la velocidad en un plano (i.e. horizontal o vertical). La mayoría de los modelos 2D resuelven las ecuaciones de Navier Stokes y promedian la ecuación de continuidad en la vertical (*Papanicolaou, 2008*).

Además cabe notar que en varias aplicaciones de ingeniería hidráulica es necesario estudiar fenómenos verticales distribuidos en el espacio, para ello se hace necesario emplear modelos 3D.

Tal como se indicó, además de los modelos numéricos, existen modelos físicos que permiten cuantificar los procesos a una escala reducida.

Los métodos numéricos se han convertido en una herramienta de gestión y predicción dadas sus ventajas. Entre éstas se pueden mencionar: flexibilidad para evaluar diversos escenarios y estados del sistema y su bajo costo de implementación en comparación con otras alternativas como los modelos físicos.

A la fecha, algunos de los modelos anteriormente mencionados se realizaron en la zona baja del río Biobío, los que se han enfocado principalmente en los cambios morfológicos de éste, considerando sólo los forzantes producidos por el flujo del río.

Se han identificado las zonas de erosión, cuantificando los volúmenes y dimensionamiento de las profundidades de sedimento removido desde el lecho del río debido a las modificaciones geométricas asociadas al escenario vial proyectado para la intercomuna Concepción-Chiguayante (*Escobar, 2013*).

Se ha evaluado el estado de la evolución del lecho de río debido a procesos de agradación y degradación ocurridos en los últimos 25 años. Concluyendo que la zona baja

del río ha presentado variaciones en el transporte de sedimentos, las que van desde los 37 millones t/año, antes de la construcción de los embalses en la zona alta, hasta los 56 millones de t/año posterior a la construcción de estos, lo que sugiere que la zona baja presenta una tendencia a la agradación (*Gaete, 2013*).

Se ha determinado y cuantificado las zonas de erosión y depositación en la zona baja del río para condiciones hidráulicas de un año seco (1998), uno medio (1987) y uno lluvioso (1997). Los principales resultados indican que el material que desemboca el río en un año lluvioso, aproximadamente es el doble del material que expulsa el río en un año promedio, y el material que llega a la desembocadura es un año seco, aproximadamente es el 2% del material expulsado por el río en un año promedio (*Vidal, 2013*).

También se han contemplado los efectos que provocan y el rol que juegan los cambios morfológicos en el comportamiento hidráulico que presenta la parte baja del río Biobío, concluyendo que el crecimiento de la barra, en conjunto con el aumento de la vegetación asociada produce un incremento de la velocidad del flujo en la ribera norte. Esto sugiere mayores esfuerzos de corte aplicados sobre la ribera y el fondo del río (*Fernández, 2013*).

A diferencia de lo que se ha desarrollado hasta ahora, este estudio espera determinar la hidrodinámica de la zona baja del río Biobío considerando, además de los forzantes producidos por el flujo del río, los ocasionados por las variaciones de marea en la desembocadura, y así identificar las zonas afectadas por esta variación.

1.3 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Caracterizar la hidrodinámica de la parte baja del río Biobío mediante un modelo hidrodinámico bidimensional considerando forzantes fluviales y mareales.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Calibrar los parámetros y validar los resultados obtenidos por el modelo.
- Definir y caracterizar escenarios de caudales y mareas.
- Identificar y cuantificar la zona de influencia de las mareas para los escenarios definidos.
- Caracterizar la hidrodinámica de la zona baja del río Biobío en puntos de interés morfológico.

Capítulo 2. Métodos

2.1 Zona de estudio

El río Biobío se ubica en la Región del Biobío, Chile (*Figura 1.1*). Nace de la laguna Galletué y el lago Icalma, ubicadas en el extremo nororiental de la región de la Araucanía en la cordillera de Los Andes, luego recorre parte de la zona sur del valle central (*Vila, et al. 2006*). Su principal entrada de sedimentos corresponde a los aportes realizados por el río Laja, que provienen del sistema del volcán Antuco (*Beltrán, et al. 2001*), y por lo tanto, el sedimento en la parte baja del río corresponde a arenas negras con un d_{50} cercano a 1 mm (*Beltrán, et al, 2001*). Estos volúmenes se transforman en significativas cargas anuales de sedimento entregadas al mar (*Link et al. 2002; Caamaño et al. 2015*). Un evento importante corresponde a la crecida del año 2006 (i.e. $15.800 \text{ m}^3/\text{s}$, $T=100$ años) que generó plumas que avanzaron más de 40 km mar adentro (*figura 2.1*).

La cuenca del río Biobío cuenta con un área de 24.260 km^2 , está ubicada entre los $36^\circ 45'$ y los 39° de latitud sur. Su desembocadura está ubicada en la comuna de San Pedro de la Paz, sobre el Golfo de Arauco, punto en el cual el caudal varía entre los 250 y $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudales medios mensuales) (*Beltrán et al, 2001*).

En su avance el río Biobío atraviesa tres geoformas características del país, la cordillera de los Andes formada principalmente por rocas ígneas producto de la gran actividad volcánica de la zona, el valle central o depresión intermedia que se compone esencialmente de sedimentos aluviales y fluvio-glaciares junto a depósitos volcánicos; y por último se encuentra la cordillera de la costa constituida principalmente por rocas graníticas y metamórficas con aportes de sedimentos marinos terciarios y fluvio-marinos del cuaternario, estos últimos encontrados en la plataforma costera adyacente (*Cisternas, 1993*)

Se definen los 10 km finales del río como zona de interés para caracterizar la hidrodinámica en la parte baja, esto corresponde desde el puente Chacabuco hasta la desembocadura.

El tramo corresponde a la parte más ancha del río, en que destacan estructuras morfológicas tales como la barra de sedimentos lateral ubicada en la ribera sur y la barra de sedimentos que se produce en la desembocadura del río, presentando ambas estructuras influencia en el flujo. La primera contribuye a definir un canal preferente localizado en la

ribera norte, donde se observan las más altas velocidades y profundidades de la zona de estudio, y la segunda produce una reducción de la velocidad del flujo en la ribera sur, y una aceleración positiva del agua en la ribera norte conectando el río con el océano. A pesar que ambas presentan un carácter dinámico se han mantenido en el tiempo producto de una combinación de factores.

Los caudales son caracterizados por la estación fluviométrica administrada por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile (DGA-MOP) denominada “Río Biobío en Desembocadura” y que define la sección para la condición de borde aguas arriba del dominio de modelación (i.e. condición de entrada de caudal). La condición de borde aguas abajo queda definida por las variaciones de la cota de la marea característica de los periodos de modelación (i.e. escenarios). Se define entonces una malla de cálculo para discretizar espacialmente el dominio de modelación resultando en un total de 53.464 elementos, mediante los cuales se desarrolla el proceso de calibración del parámetro de rugosidad utilizado por el modelo (i.e. coeficiente de Manning).

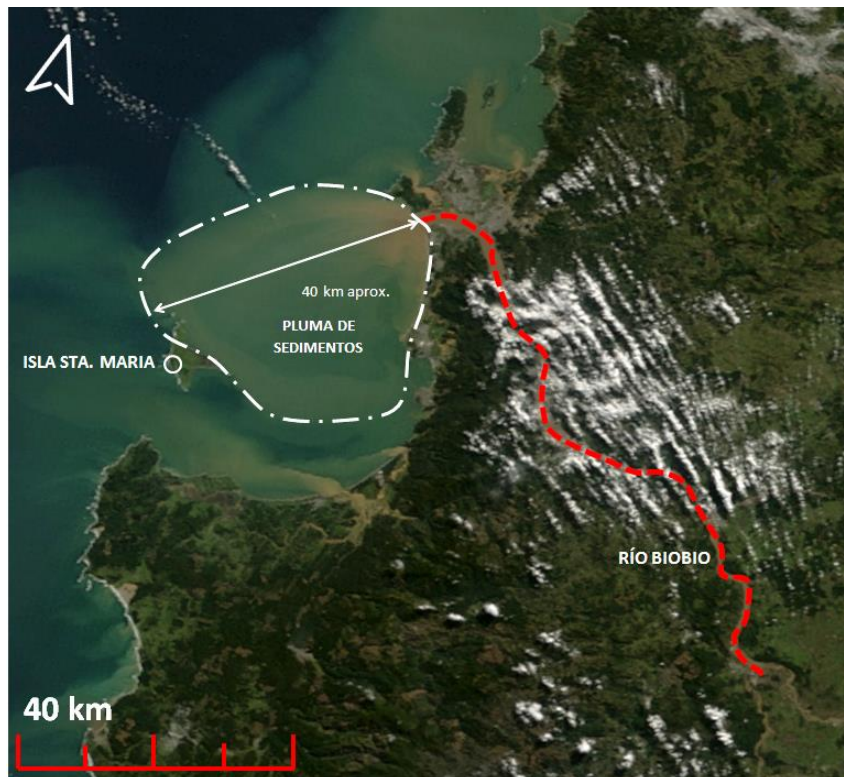


Figura 2.1: Imagen satelital de la crecida de Julio del 2006 en el río Biobío. Fuente: DGA.

2.2 Modelo hidrodinámico

2.2.1 Introducción a Delft3D

Delft3D es un programa de simulación hidrodinámica y morfológica en dos y tres dimensiones que calcula fenómenos de flujo y transporte.

Delft3D se compone de varios módulos agrupados en torno a una interfaz común. Éstos pueden ejecutarse de forma independiente o conjunta. Permite llevar a cabo simulaciones de flujo, transporte de sedimentos, oleaje, calidad de agua, desarrollos morfológicos y ecológicos.

El módulo hidrodinámico Delft3D-FLOW simula bidimensionalmente promediando en la profundidad. El módulo de flujo se puede utilizar para predecir el flujo en aguas poco profundas tales como, áreas costeras, estuarios, lagunas, ríos y lagos. Su objetivo es modelar fenómenos en los cuales las escalas de longitud horizontal y de tiempo son significativamente mayores que las escalas verticales (*Deltares, 2014*).

2.2.2 Ecuaciones del modelo hidráulico.

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan el comportamiento de los fluidos son las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes. La obtención de éstas se basa en las ecuaciones de conservación:

- Conservación de masa o ecuación de continuidad (ecuación 1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

- Conservación del momento o de la cantidad de movimiento (ecuación 2).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Donde:

u = Velocidad del flujo en la dirección x.

v = Velocidad del flujo en la dirección y.

w = Velocidad del flujo en la dirección z.

p = Presión.

ρ = Densidad del fluido.

g = Aceleración de gravedad.

μ = Viscosidad de Eddy.

En estas 4 ecuaciones se tienen 4 incógnitas (u , v , w y p). Sin embargo, las velocidades instantáneas poseen una componente turbulenta que hace muy complicada la solución directa de las ecuaciones 1 y 2. Por ello se utiliza una aproximación denominada como el “promedio de Reynolds para las ecuaciones de N-S” o también conocidas como RANS por sus siglas en inglés (Reynolds Average Navier Stokes).

Esta aproximación plantea la consideración matemática de la velocidad instantánea (u) a través de un promedio temporal (\bar{u}) más una fluctuación turbulenta (u') (figura 2.2), dando forma al sistema de ecuaciones 3. Si bien este método facilita el cálculo, implica el uso de un nuevo set de ecuaciones para resolver la nueva componente turbulenta del

sistema. Éstas se denominan o conocen como el “cierre turbulento” que resuelven los términos relacionados con los esfuerzos de Reynolds (ecuaciones 4 y 5).

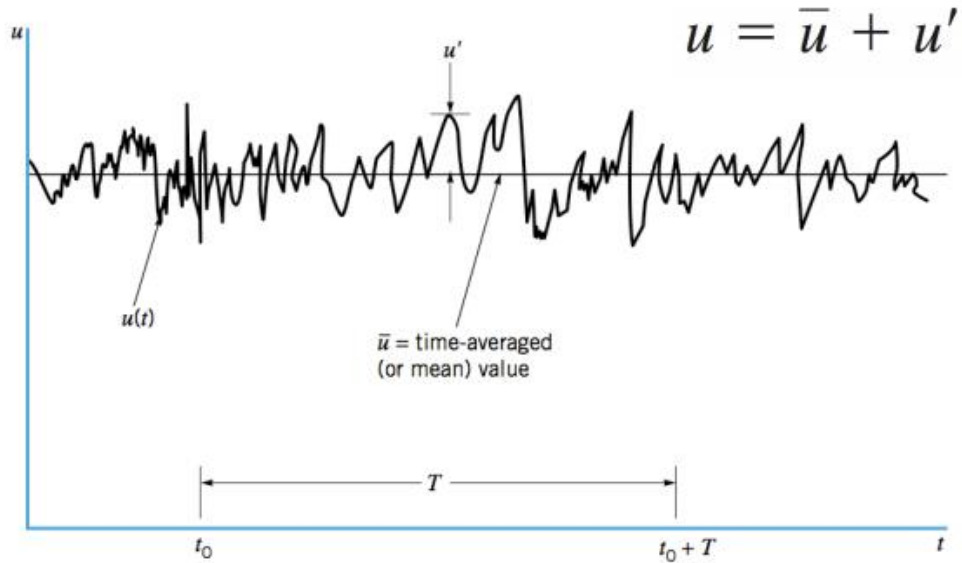


Figura 2.2: Componentes del vector de velocidad.
Fuente: Munson.

$$\sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j) = 0$$

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i - \sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \rho g_i = \rho \frac{d\bar{u}_i}{dt} \quad i = 1,2,3 \quad (3)$$

Donde:

\bar{u} = Promedio temporal de la velocidad.

\bar{p} = Promedio de la presión.

μ = Viscosidad de Eddy.

$\overline{\rho u'_i u'_j}$ = Esfuerzo de Reynolds.

ρ = Densidad del fluido.

g = Aceleración de gravedad.

Energía cinética turbulenta k (ecuación 4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

Disipación ϵ (ecuación 5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

Los parámetros del modelo se estiman según:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

Y las constantes del modelo se definen como:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

Una vez conocidos k y ϵ en el tiempo y espacio, se estima la viscosidad de Eddy y con ésta los esfuerzos de Reynolds necesarios para cerrar el sistema de ecuaciones propuestas por las RANS.

Método numérico y estabilidad:

El método numérico utilizado por el software para calcular la solución corresponde a diferencias finitas. Éste encuentra una solución aproximada al sistema de ecuaciones diferenciales propuesto sobre la base de condiciones iniciales y de contorno (i.e. borde) que se definen a través de los escenarios de modelación.

El paso de tiempo utilizado para el cálculo se define en concordancia con el espaciamiento utilizado en la discretización espacial (i.e. grilla o malla de elementos). La solución numérica no es una solución exacta (i.e. que sería el caso analítico) y presenta fluctuaciones en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, es necesario condicionar la estructura del modelo para satisfacer el criterio de estabilidad, que queda definido por el número de Courant (ecuación 6).

$$C = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}}, \quad (6)$$

Donde;

Δt = Paso de tiempo (s).

g = Aceleración de gravedad (m/s^2).

H = Profundidad total del agua (m).

$\{\Delta x, \Delta y\}$ = Valor característico del espaciado de la cuadrícula en cualquier dirección (m).

El criterio indica que C no debe exceder un valor de 10 para asegurar estabilidad (Deltares, 2014).

2.3 Batimetría y discretización espacial

Para caracterizar la batimetría se utilizaron datos existentes y proporcionados por diversas fuentes.

- a) La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) proporcionó 34 perfiles distribuidos a lo largo de la zona de estudio. Cada uno de los perfiles cubre la sección transversal completa del río y parte de las respectivas zonas de inundación en ambas riberas. Estos datos se levantaron por la DOH en el marco del proyecto “Reposición puente sobre el río Biobío, Concepción-San Pedro de la Paz” realizado durante los veranos del 2011 y 2012.
- b) Un levantamiento de mayor envergadura se realiza el año 2010, mediante un vuelo Lidar organizado por la Universidad del Biobío para el proyecto “Estudio de riesgos de sismos y maremotos en comunas de la región del Biobío”.
- c) También se incorpora información sobre la batimetría en la zona de la desembocadura que abarca 2 km mar adentro cubriendo desde la barra de sedimentos en la desembocadura hasta el cañón submarino. Éstos datos se obtuvieron en el marco del “Estudio preliminar sobre el efecto del cañón del Biobío en la propagación de Tsunamis” el año 2010.

La combinación de los tres set de datos cubre de buena forma las barras de sedimento, la batimetría del río y la topografía de las zonas de inundación aledañas. Toda la información obtenida se compila en coordenadas UTM Datum SIRGAS WGS84, Geoide EGM96 y HUSO 18 Sur. La distribución espacial de la totalidad de los puntos se indica en la figura 2.3.



Figura 2.3: Batimetría de la zona de estudio, (+) Valores bajo el nivel medio del mar, (-) Valores sobre el nivel medio del mar.

La discretización espacial consiste en dividir el dominio en un número finito de elementos, éstos fijan las condiciones locales para desarrollar la solución numérica. En este estudio se consideró una grilla de elementos irregulares.

Delft3D utiliza dos tipos de coordenadas horizontales: cartesianas y esféricas. Se utilizarán coordenadas cartesianas, y consecuentemente se debe especificar la latitud del área de estudio, para calcular la fuerza de Coriolis que se considera constante para todo el dominio.

La calidad de una malla se determina en gran medida por su ortogonalidad, una forma de cuantificar ésta es midiendo el ángulo ϕ formado entre los lados de la malla. Un criterio recomendado es que el $\cos(\phi) < 0.002$ (Deltares, 2014).

Se realizó un análisis de sensibilidad de la malla que consiste en comparar soluciones del modelo para tamaños de malla decrecientes hasta que la respuesta obtenida

satisfaga el criterio establecido, es decir, no exista una diferencia significativa en la solución, declarándose ésta independiente del tamaño de la malla.

Para transferir los datos de la batimetría a la malla de elementos es necesario generar un mapa continuo de información sobre la base de los datos discretos disponibles.

Entonces en zonas de poca densidad de puntos disponibles se utiliza una red triangular irregular (TIN) para definir el mapa de batimetría. En aquellas áreas con alta densidad de puntos se utiliza en cambio el inverso a la distancia. Combinando ambos métodos de interpolación se construye la batimetría que define el dominio de modelación.

2.4 Escenarios de modelación: Condiciones iniciales y borde.

El río Biobío es un sistema altamente dinámico y de manera continua presenta cambios en las formas que componen su lecho. Por ello, y dado que los datos batimétricos son obtenidos los años 2010, 2011 y 2012, se seleccionan escenarios de modelación representativos de los mismos períodos caracterizados en terreno. Dichas fechas quedan representadas por caudales medios diarios e imágenes satelitales que describen el espejo de agua resultante.

Los escenarios idóneos se presentan en la tabla 2.1, en la que se indica la fecha y los caudales medios diarios extraídos de la estación fluviométrica “Río Biobío en Desembocadura” para dichos días.

Tabla 2.1: Escenarios de modelación

Escenario	Fecha de modelación	Caudal (m³/s)
1	10 y 11 de Junio del 2011	674
2	23 y 24 de Octubre del 2012	417
3	28 y 29 de Diciembre del 2012	531

Las imágenes características de estos escenarios se presentan en las figuras 2.4 a 2.6.

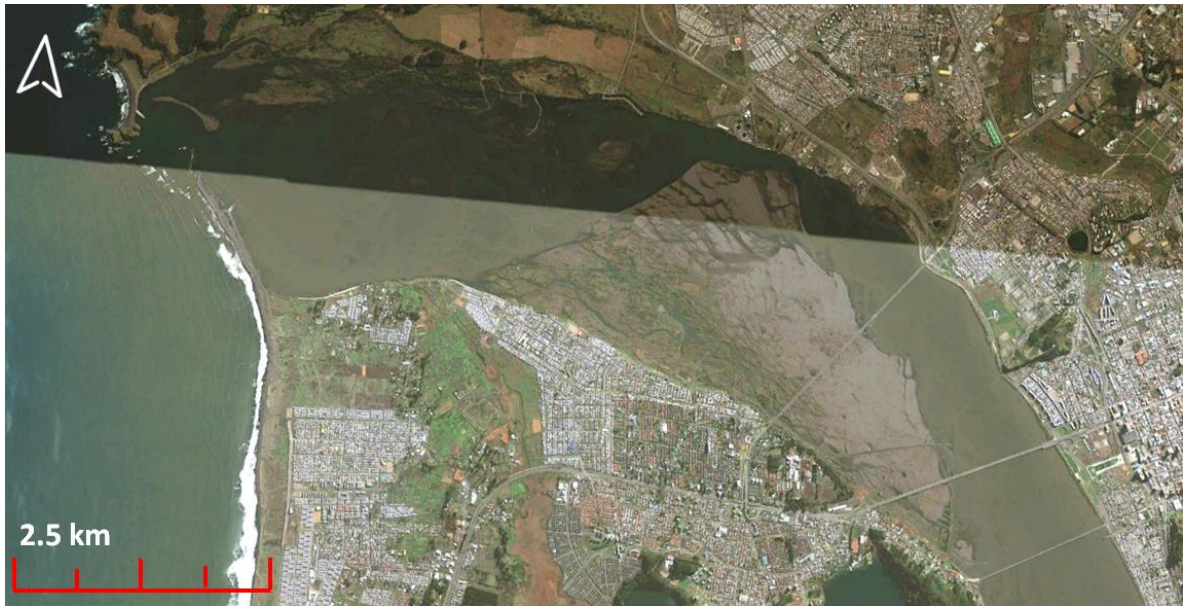


Figura 2.4: Imagen satelital escenario 1.

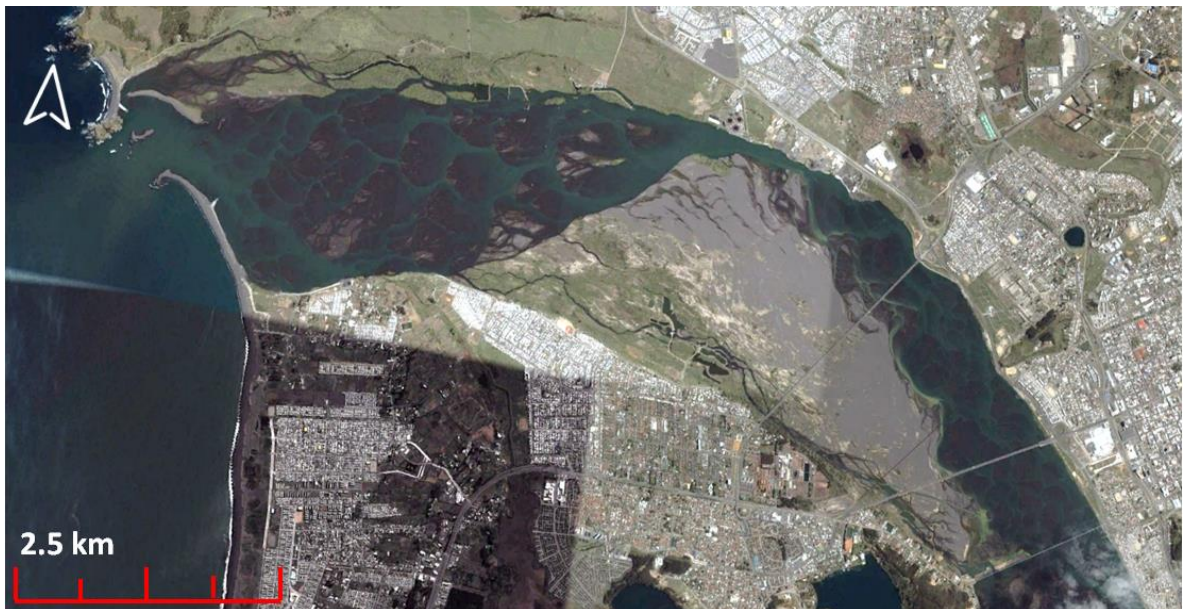


Figura 2.5: Imagen satelital escenario 2.



Figura 2.6: Imagen satelital escenario 3.

Además, con fines de estudiar la influencia de la marea en el flujo del río, se seleccionaron 4 puntos ubicados en la mitad inferior de la zona de estudio (figura 2.7). En ellos se observó la variación de la cota de la superficie del agua en función de la variación de la marea (i.e. tiempo).



Figura 2.7: Puntos de observación del nivel de agua.

- Condiciones iniciales:

La condición inicial corresponde al valor que da inicio a la modelación (i.e. instante cero en la modelación). Dichos valores deben asignarse al menos a una de las variables involucradas. En este estudio se consideró el nivel de la superficie de agua. Cabe notar que en Delft3D los valores de la superficie de agua por sobre el nivel medio del mar son positivos y negativos en el caso contrario.

- Condiciones de borde:

La elección del tipo de condición de borde utilizado depende de los fenómenos a estudiar. Para este caso se utilizó el caudal como condición de borde aguas arriba y niveles de la superficie del agua para simular la marea como condición de borde aguas abajo.

Se debe diferenciar entre fronteras abiertas y cerradas, para las fronteras abiertas se requiere especificar las condiciones de borde del flujo y para las fronteras cerradas el software asume que no hay flujo. Estas condiciones representan la señal que transmite el sistema al dominio de modelación.

Cabe notar que ambos se consideran variables en el tiempo; los niveles de las mareas obedecen a los ciclos respectivos y el caudal se consideró como una función monótonicamente creciente hasta alcanzar el valor constante que representa la condición estacionaria de flujo definida para cada uno de los escenarios de modelación.

Los rangos temporales considerados en las condiciones de borde deben ser lo suficientemente extensos de forma que contengan los periodos de modelación, es decir, para cada intervalo modelado debe existir una condición de borde definida.

Los datos de caudal se obtienen de la estación fluviométrica río Biobío en desembocadura administrada por la Dirección General de Aguas (DGA) (Anexo A).

Los datos de marea corresponden a la estación de monitoreo Coronel_CL administrada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) (Anexo B).

La ubicación de ambas estaciones con respecto al dominio de modelación se indica en la figura 2.8.

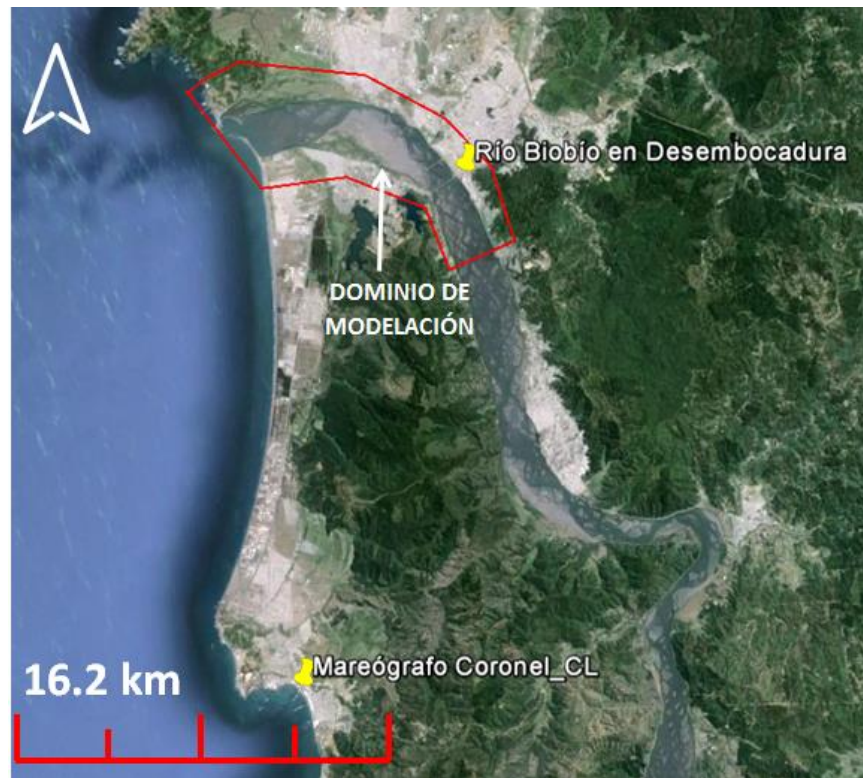


Figura 2.8: Ubicación estación fluviométrica Río Biobío en Desembocadura (08394001-8) y del mareógrafo Coronel_CL.

Cabe notar que para los escenarios de Octubre y Diciembre del 2012 se extrajeron los datos directamente del mareógrafo, pero para el escenario de Junio el 2011 el mareógrafo no registró información, por lo tanto, se realizó una predicción de marea mediante un análisis armónico (anexo C). Se verifica esta predicción a partir de las componentes astronómicas. Una vez verificada la representatividad de los resultados, se obtiene la serie de tiempo para el periodo a modelar correspondiente al escenario 1. Con fines de representar el ciclo de mareas completo, se definió un periodo de modelación de 2 días para cada escenario.

- Predicción de marea

La marea astronómica se define como el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar con períodos próximos a las 12 o 24 horas que se producen por los efectos gravitacionales del sistema tierra, luna y sol (*Universidad de Granada, 2014*).

Las primeras explicaciones científicas de este fenómeno se deben a Newton (1686) y hoy se conocen como teoría de equilibrio. A partir de ésta, se describen las fuerzas

generadoras de mareas en el sistema tierra-luna, sistema tierra-sol y finalmente en el sistema tierra-sol-luna (*Universidad de Granada, 2014*).

Brevemente, las fuerzas generadoras de marea en el sistema tierra-luna se deben a la fuerza resultante neta, en cada punto de la tierra, de la fuerza gravitatoria lunar y de la fuerza centrífuga de rotación del sistema tierra-luna (figura 2.9).

Siendo $\vec{F}_g(X)$ la fuerza gravitatoria lunar, $-\vec{F}_g(M)$ la fuerza centrífuga de rotación de la tierra y \vec{K} la fuerza generadora de mareas en el sistema tierra-luna, se puede definir la ecuación 7:

$$\vec{K}(X) = \vec{F}_g(X) - \vec{F}_g(M) \quad (7)$$

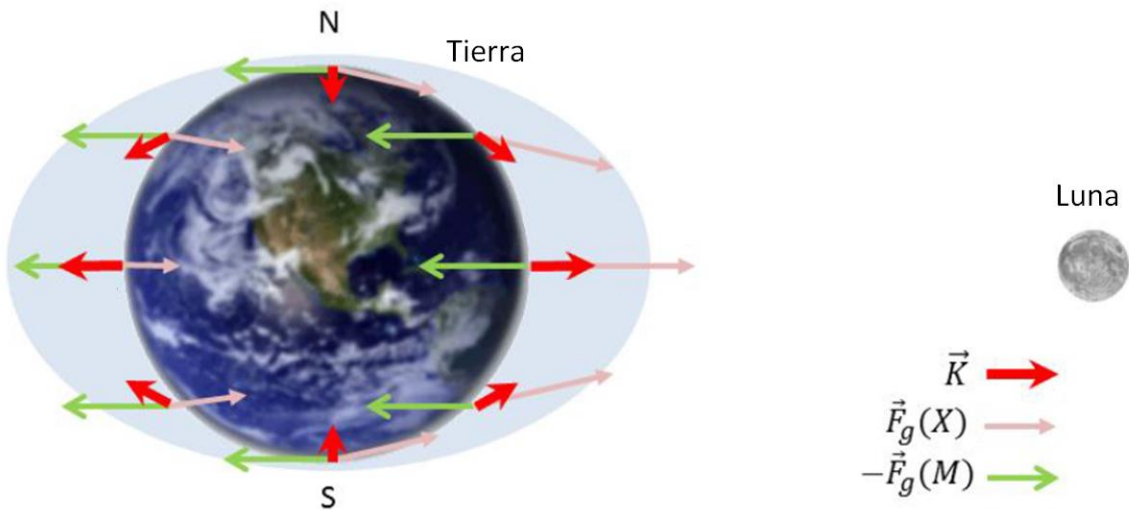


Figura 2.9: Esquema de las fuerzas generadoras de marea.
Fuente: Universidad de Granada, "Oscilaciones de periodo largo: Marea astronómica"

En la actualidad existe un programa llamado T_TIDE que se implementa en el software Matlab, el cual a partir de un registro de mareas y la latitud de la medición, ajusta los constituyentes armónicos de la marea por el método de mínimos cuadrados con frecuencia preestablecida. Con esta información se puede predecir la marea para un periodo de tiempo dado en el que no exista información de ésta.

Entonces las condiciones de borde para cada escenario (excepto la marea del escenario 1) considerado se indican en las figuras 2.10 a 2.14.

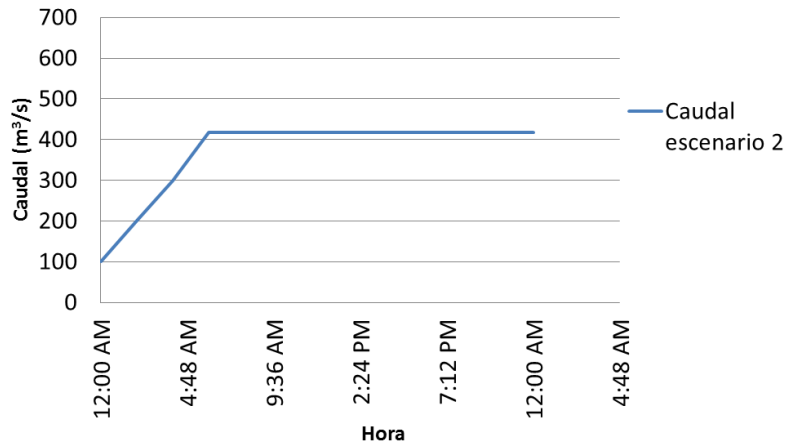


Figura 2.13: Variación de caudal ingresado al modelo el 23 y 24 de Octubre del 2012.

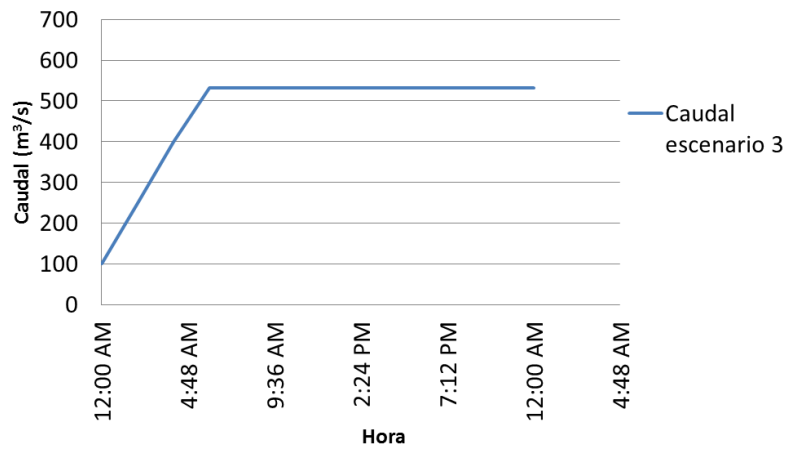


Figura 2.14: Variación de caudal ingresado al modelo el 28 y 29 de Diciembre del 2012.

Al momento de ingresar los caudales como condición de borde, se incrementaron de forma lineal en las primeras 6 horas de modelación, para luego dejarlo constante con el caudal medio diario correspondiente a cada escenario de modelación (figura 2.12 a 2.14).

Este modelo permite especificar los valores de la rugosidad del fondo pudiéndose éstas calcularse con varias fórmulas; su valor puede ser constante o variable en el espacio.

- De fondo: Para la modelación realizada se consideró el coeficiente de manning constante en todo el dominio.

Diferentes trabajos han cuantificado el coeficiente de manning para la zona baja del río Biobío. Para el tramo entre Hualqui y la desembocadura este coeficiente varía entre 0.026 y 0.037 (López, *et al*, 1995). Por lo tanto, y para verificar el rango propuesto por López *et al* (1995) en este estudio se consideró un rango de valores entre 0.02 y 0.04.

- Paredes: Existen tres opciones, las cuales son; Libre deslizamiento, en el que se supone que el esfuerzo de corte es cero. Deslizamiento parcial, en el que se debe especificar la longitud de rugosidad. Y finalmente sin deslizamiento, en el que se asume que la velocidad en las paredes es cero. Para este estudio se consideró sin deslizamiento, ya que es lo que mejor representa la condición real de un río.

2.5 Análisis de sensibilidad

Para optimizar los recursos computacionales se realizó un análisis de sensibilidad de la discretización espacial. Lo que quiere decir es que se determinó un tamaño de malla que representara el escenario a modelar. Para poder determinarlo se modeló el mismo escenario con diferentes tamaños de malla y finalmente se midió la distancia horizontal entre el borde del espejo de agua y la imagen satelital correspondiente a la fecha modelada. Con esta información se decidió que malla utilizar, para así disminuir el tiempo de modelación considerablemente optimizando los recursos computacionales.

2.6 Calibración

Para llevar a cabo la calibración, se compararon los bordes del espejo de agua para diferentes valores de manning del escenario 1 con la imagen satelital extraída de *Google Earth* correspondiente al día de modelación. Se midió la distancia horizontal entre el borde del pelo de agua calculado y el borde visualizado en la imagen satelital en el perfil transversal en el punto 2 de observación (Figura 2.7).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Predicción de marea

No existe información de mareas para el escenario de Junio del 2011 y por lo tanto es necesario generarlas de manera sintética.

Primero, se extrajo la serie de datos para el período 01-07-2014 al 31-07-2014 desde la estación Coronel_CL. Se trabajó con un nivel medio del mar de 2.81 metros (información proporcionada por el SHOA). La figura 3.1 presenta gráficamente las mediciones registradas por dicho mareógrafo.

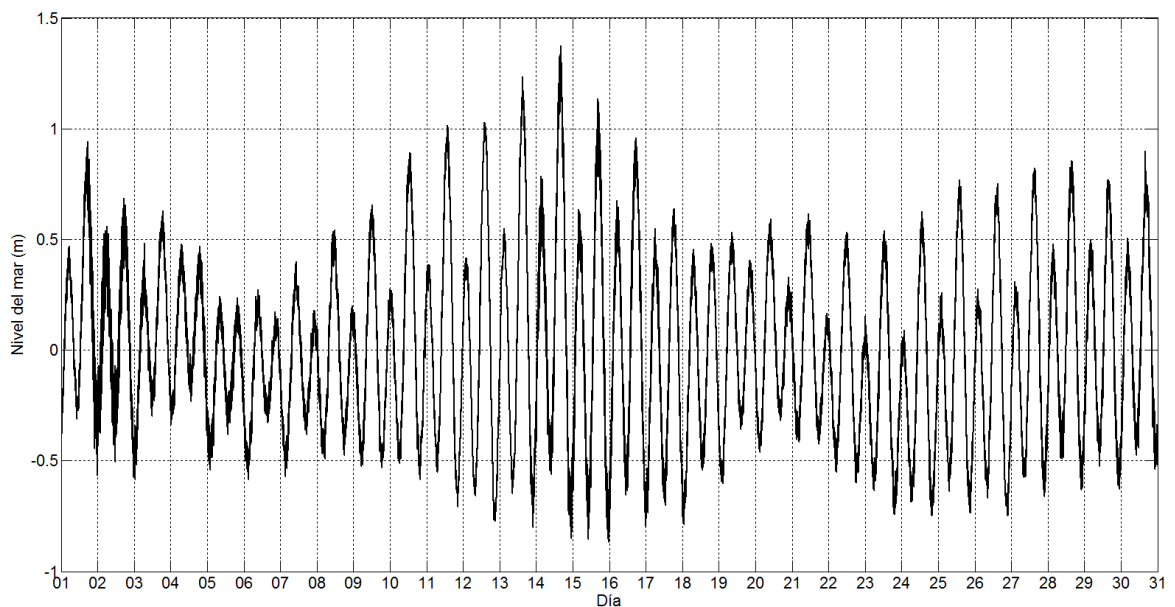


Figura 3.1: Serie temporal de marea registrada por el mareógrafo Coronel_CL desde el 01-07-2014 hasta el 31-07-2014.

Mediante operaciones matemáticas establecidas en código Matlab (anexo D) se obtienen las componentes armónicas asociadas a los datos del mareógrafo, los cuales se tomaron cada un minuto. A continuación se realiza una predicción de mareas considerando las componentes obtenidas y transferidas para el periodo 28-02-2015 al 31-03-2015 (figura 3.2).

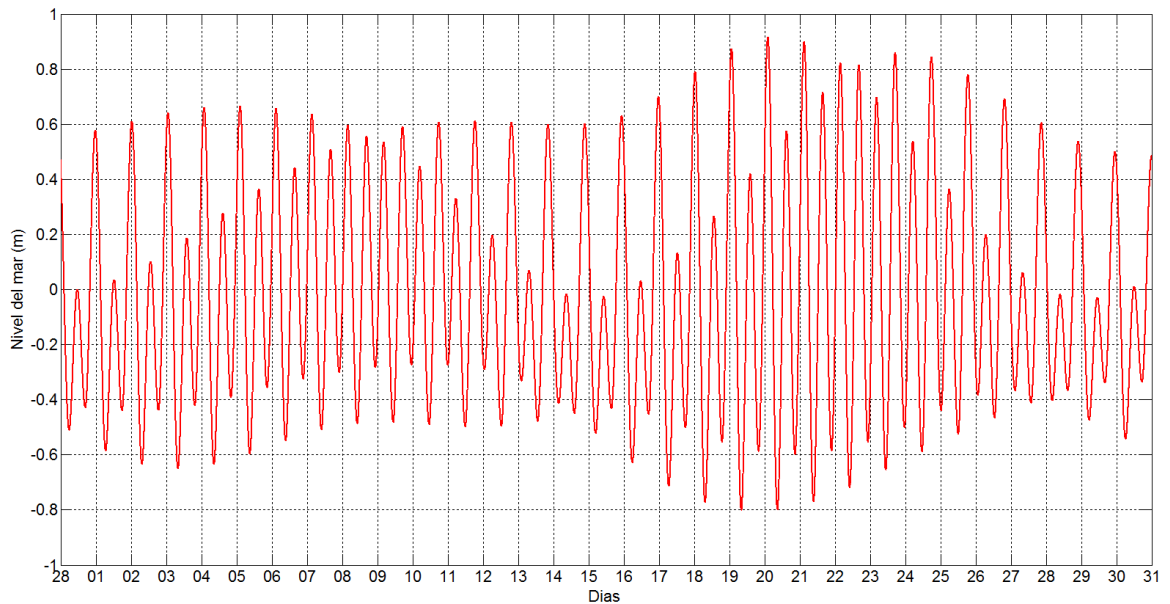


Figura 3.2: Serie temporal de marea predicha para la estación Coronel_CL para la fecha desde el 28-02-2015 hasta el 31-03-2015.

Para validar esta última predicción se compara gráficamente la predicción con los datos medidos en el mareógrafo en esa misma fecha. Los resultados se presentan gráficamente en la figura 3.3, donde se realiza una superposición de la serie temporal de ambas mareas.

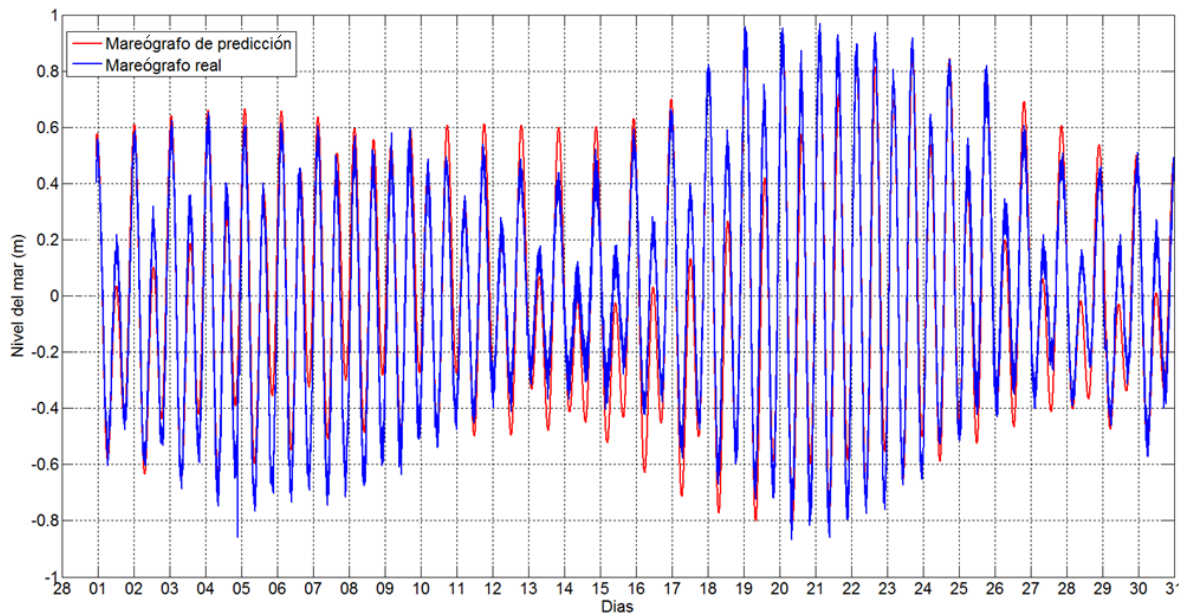


Figura 3.3: Serie temporal de marea medida versus predicción (01-03-2015 hasta el 31-03-2015)

En la figura 3.4 se grafica la diferencia entre los valores medidos y los predichos. Se puede observar que la predicción subestima en algunos puntos, donde el valor del error es positivo y sobreestima en otros, donde el valor del error es negativo.

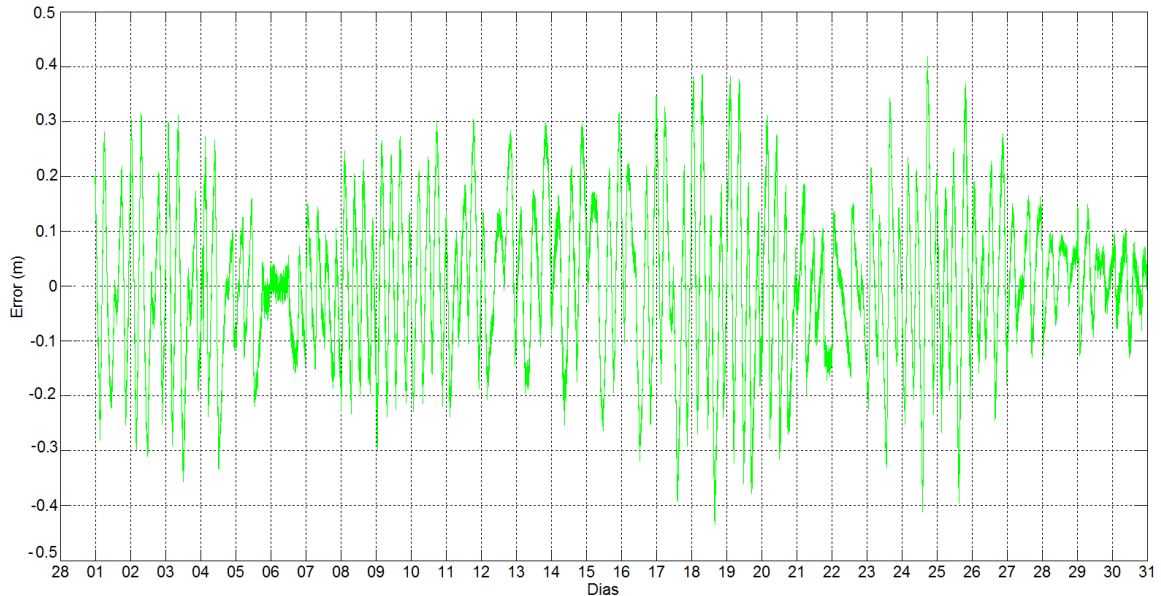


Figura 3.4: Error entre la predicción de marea y los valores medidos por el mareógrafo desde el 01-03-2015 hasta el 31-03-2015.

Dado que los errores son cercanos a los 40 cm, se procede a realizar una nueva predicción, pero esta vez se obtienen las componentes armónicas asociadas a los datos del mareógrafo tomados cada una hora (para generar una señal con menos perturbaciones).

Los errores asociados a esta nueva predicción tienen un rango cercano a los 40 cm al igual que los graficados en la figura 3.4. Dado que la predicción es la única fuente de información disponible, se valida el código, considerando que se tiene un error de más o menos 40 cm.

Una vez validado el código Matlab se procedió a predecir la marea para la fecha de interés como se aprecia en la figura 3.5. Siendo estos valores los que se utilizaron en la modelación en Delft3D.

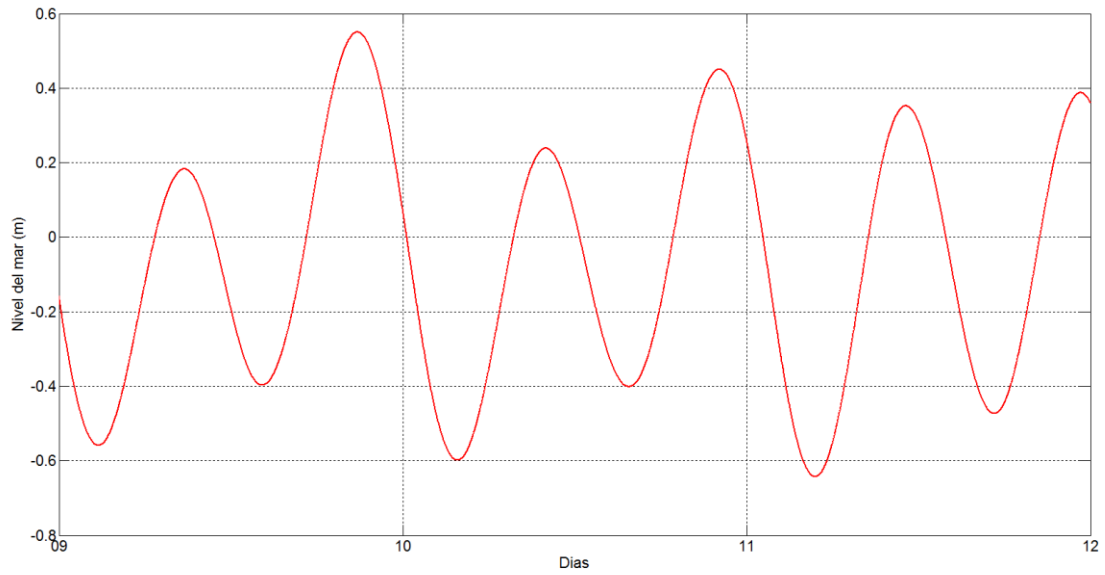


Figura 3.5: Predicción de marea desde el 09-06-11 hasta el 12-06-11.

3.2 Batimetría interpolada

Mediante los métodos de interpolación del software Delft3D se obtienen datos de la batimetría interpolada que se observan en la figura 3.6.

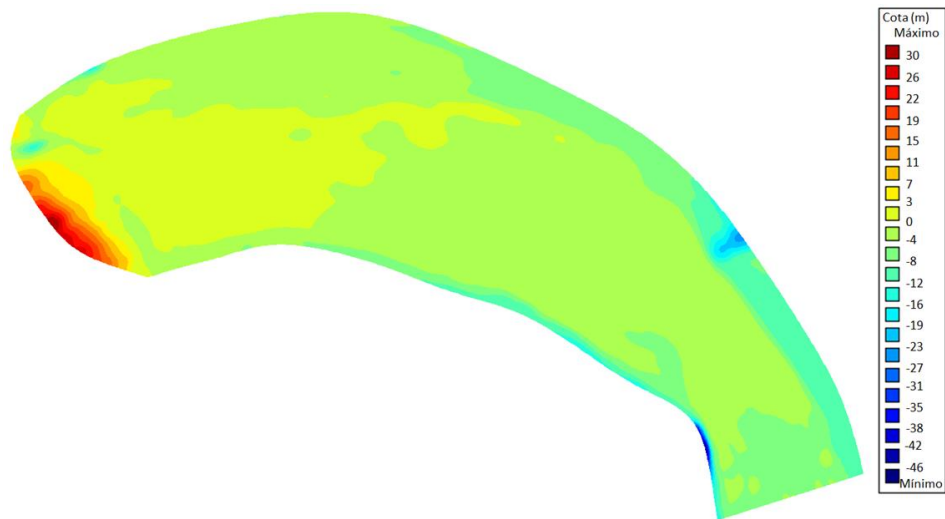


Figura 3.6: Batimetría interpolada

3.3 Análisis de sensibilidad

Se compararon los resultados del perfil del punto 1 del escenario del 11 de Junio del 2011 con diferentes tamaños de grilla (figura 3.7). Para comparar los resultados de grillas de 4 x 12, 12 x 30 y 35 x 90 metros, se midió la distancia horizontal entre el borde del espejo de agua modelado de la ribera norte y sur con la imagen satelital correspondiente a la fecha de modelación.

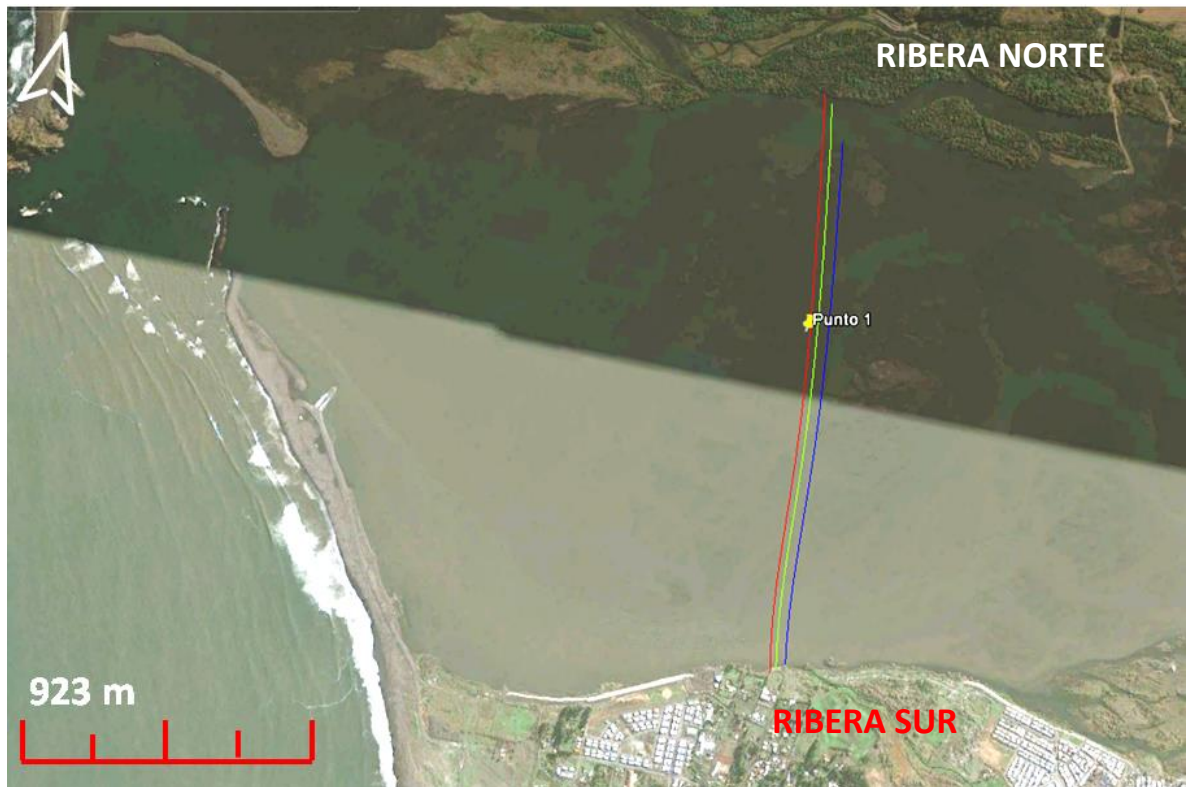


Figura 3.7: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 1 (rojo malla 4 x 12 m, verde malla 12 x 30 m y azul malla 35 x 90 m).

Al observar la figura 3.8 podemos ver en detalle las diferencia entre el resultado de la modelación y la ribera norte del río.

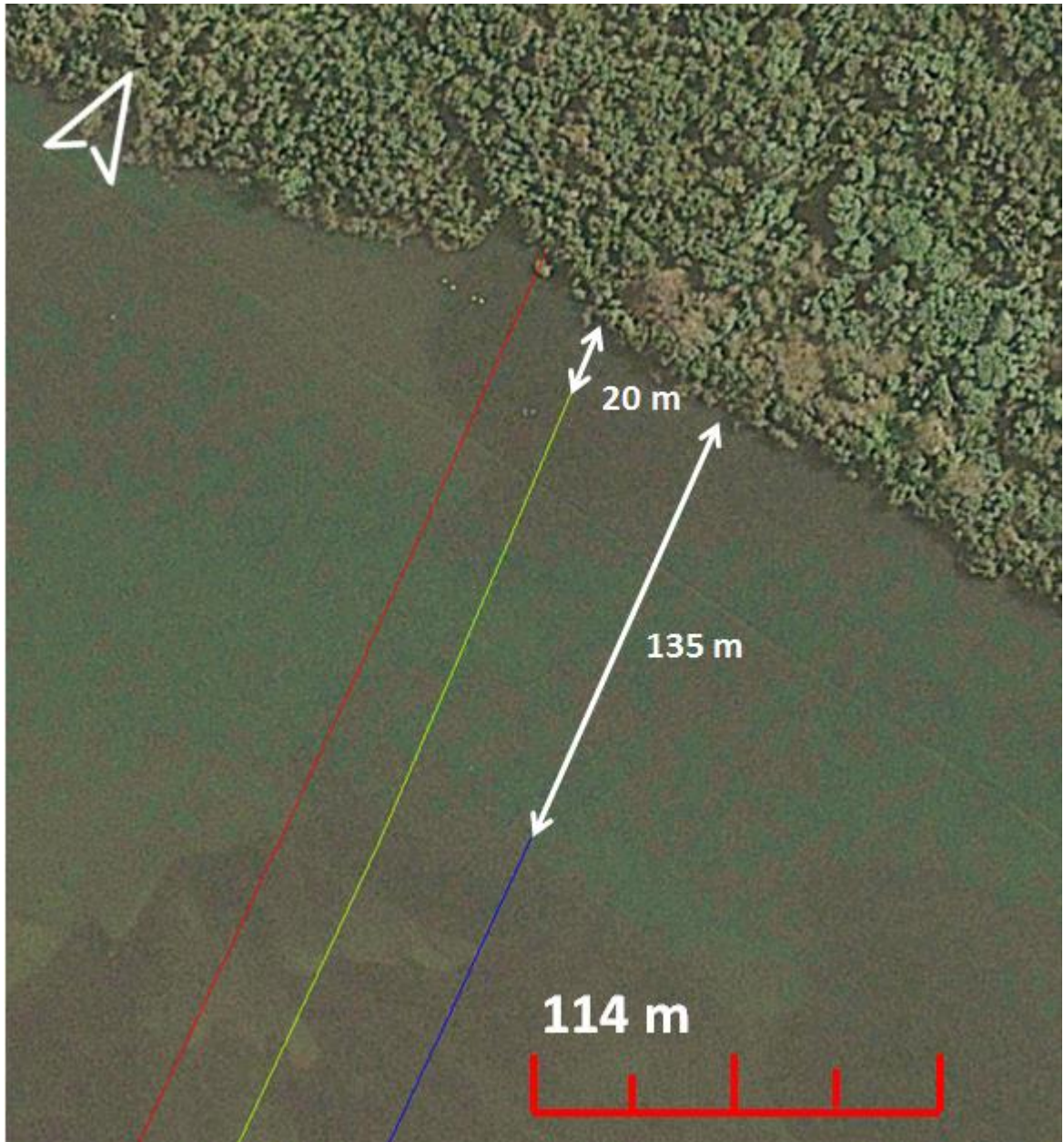


Figura 3.8: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 1 en la ribera norte (rojo malla 4 x 12 m, verde malla 12 x 30 m y azul malla 35 x 90 m).

A su vez en la figura 3.9 podemos ver en detalle las diferencias entre el resultado de la modelación y la ribera sur del río.



Figura 3.9: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 1 en la ribera sur (rojo malla 4 x 12 m, verde malla 12 x 30 m y azul malla 35 x 90 m).

A partir de estos resultados (tabla 3.1) se decide utilizar la malla de 12x30 m, ya que la diferencias en la distancia horizontal entre esta y la de 4 x 12 metros se compensan entre la ribera norte y sur. Además se reduce el tiempo de modelación de 6 días (malla 4 x 12 m) a 9 horas (malla 12 x 30 m) aproximadamente.

Tabla 3.1: Distancias horizontales entre modelación e imagen satelital.

Malla	Dist. Con ribera norte (m)	Dist. Con ribera sur (m)
4 x 12 (m)	0	14
12 x 30 (m)	20	7
35 x 90 (m)	135	6.8

3.3 Calibración

Para calibrar se modeló el escenario 1 correspondiente a la fecha de Jun-2011 con un caudal de $674 \text{ m}^3/\text{s}$ con diferentes valores de manning (i.e $n=0.02$; 0.025 ; 0.03 ; 0.035 y 0.04). Se analizó el perfil correspondiente al punto 2 de observación.

En la figura 3.10 es posible observar las cotas del pelo de agua para diferentes valores de manning para el mismo perfil.

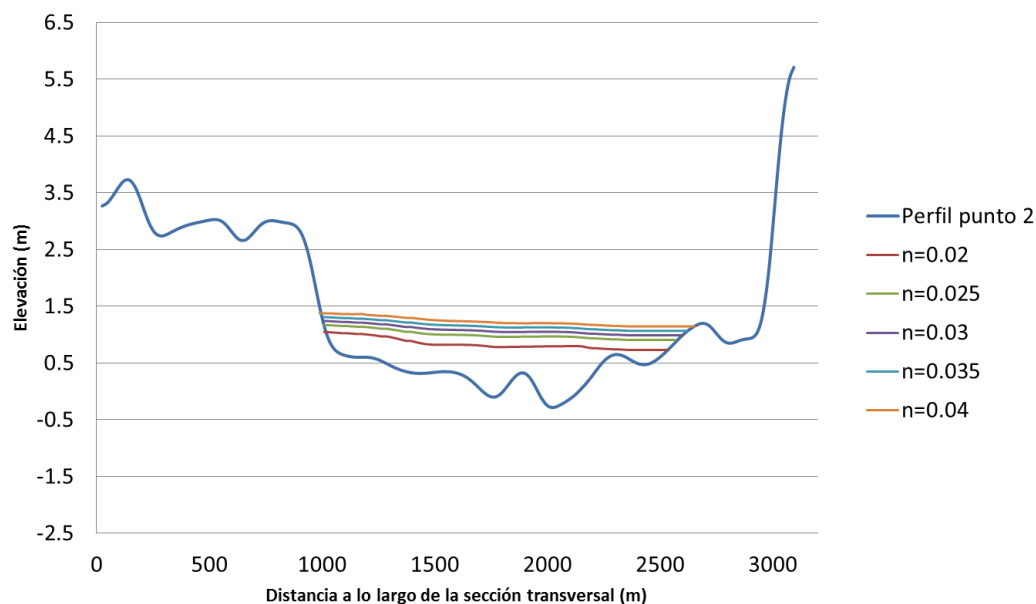


Figura 3.10: Cotas del pelo de agua para diferentes valores de manning, perfil punto 2 de observación.

Al igual que para el análisis de sensibilidad, se midió la distancia horizontal entre el borde del espejo de agua modelado para los diferentes valores de manning y la imagen satelital correspondiente al escenario 1.

En la figura 3.11 es posible visualizar las distancias entre la ribera norte y el perfil del punto 2 de observación modelado.

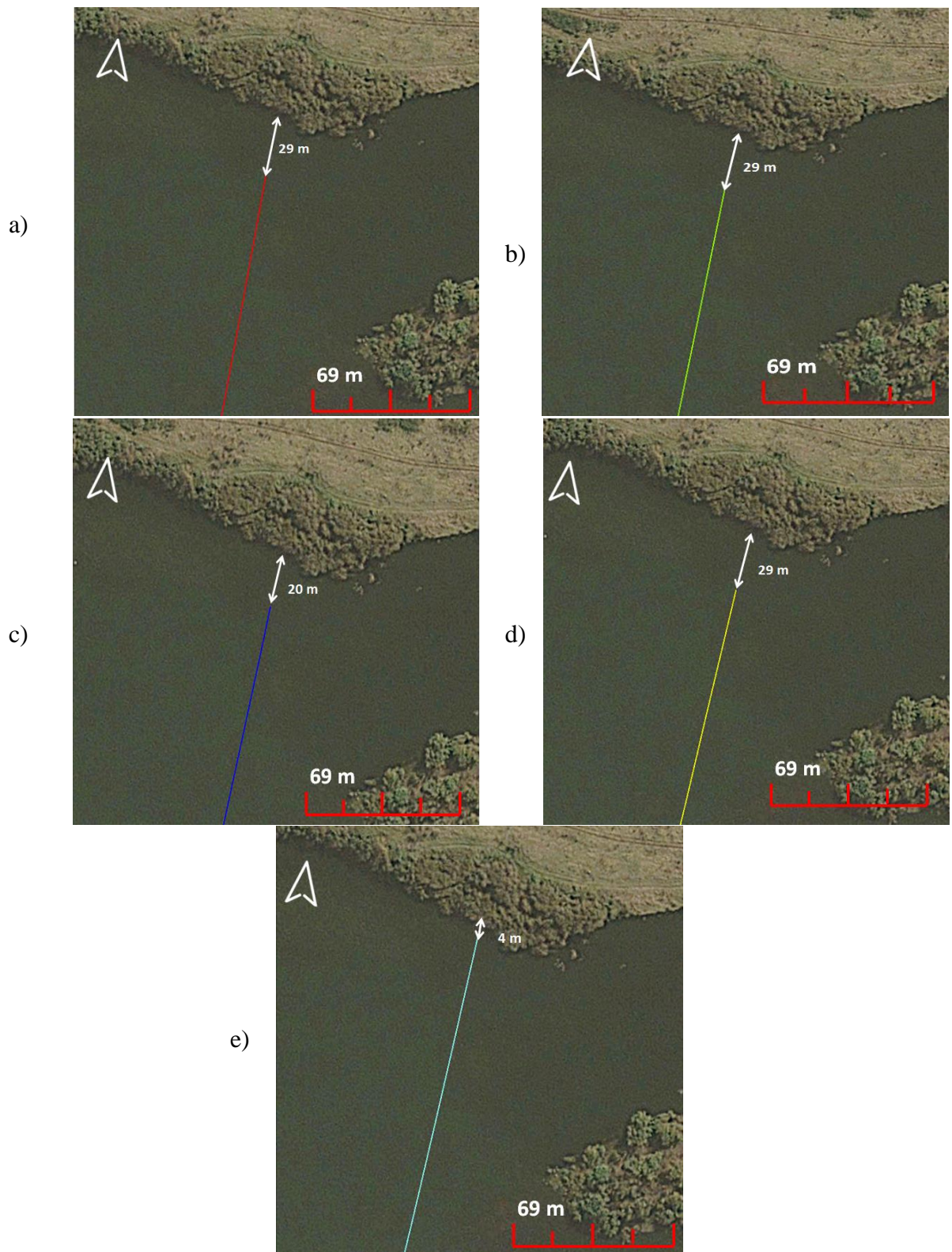


Figura 3.11: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 2 en la ribera norte; a) $n=0.02$, b) $n=0.025$, c) $n=0.03$, d) $n=0.035$ y e) $n=0.04$.

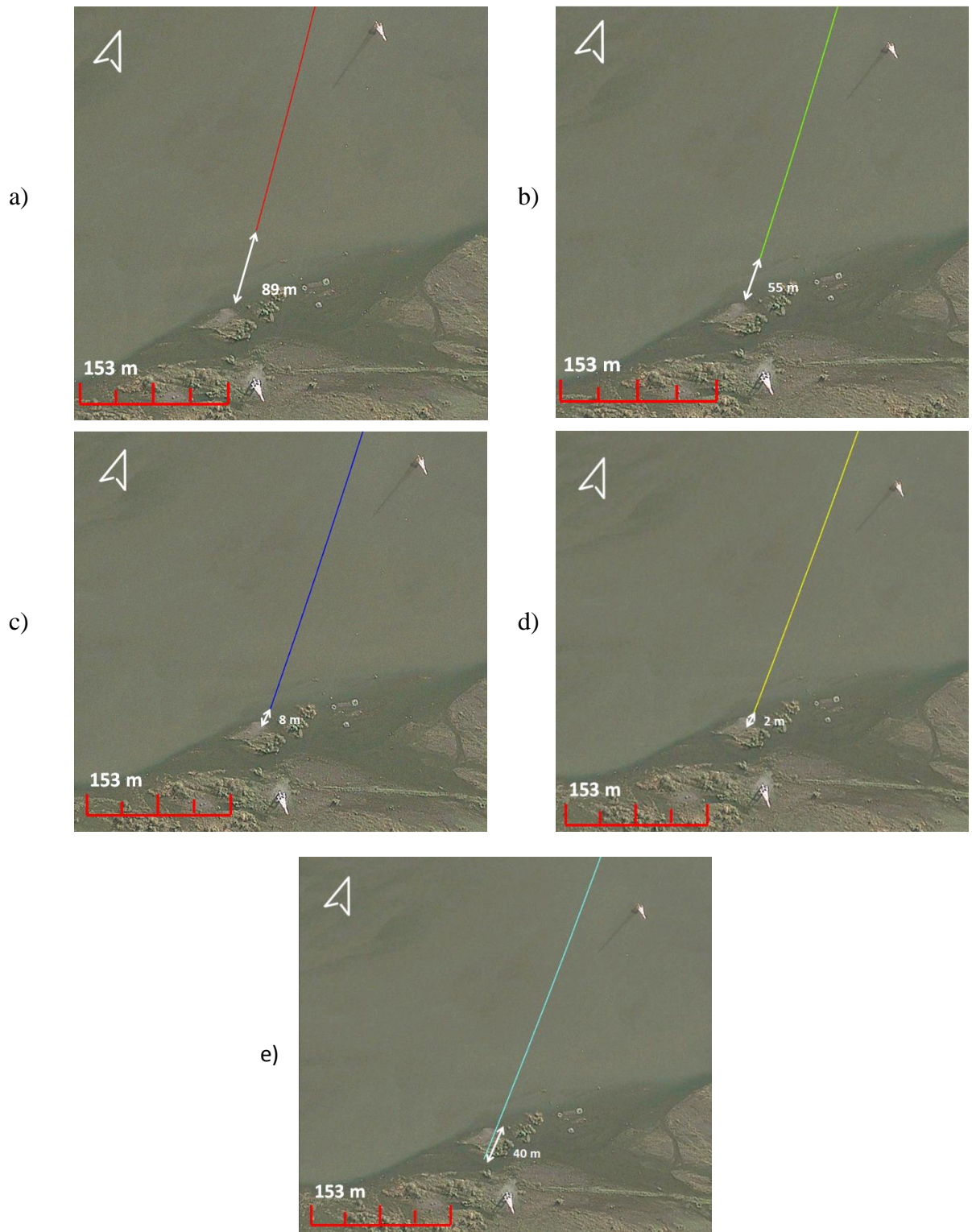


Figura 3.12: Resultado de la modelación del borde del espejo de agua en el perfil del punto 2 en la ribera sur; a) $n=0.02$, b) $n=0.025$, c) $n=0.03$, d) $n=0.035$ y e) $n=0.04$.

A su vez en la figura 3.12 es posible visualizar las distancias entre la ribera sur y el perfil del punto 2 de observación modelado.

Finalmente a partir de los resultados (tabla 3.2), se utilizó un valor de manning de 0.03, ya que es el que presenta menores distancias respecto a la imagen satelital correspondiente a la fecha de modelación.

Tabla 3.2: Distancia horizontal entre riberas y espejo de agua para diferentes valores de manning.

n de manning	Dist. Con ribera Norte (m)	Dist. Con ribera Sur (m)
0.02	29	89
0.025	29	55
0.03	20	8
0.035	29	2
0.04	4	40

Este método de calibración es aplicable sólo en la parte baja del río Biobío, ya que es posible visualizar un desplazamiento horizontal de la superficie del agua en las riberas con la variación del valor de manning. Esto es posible porque la pendiente en las riberas es suave (i.e. figura 3.13 a), en cambio, si se tratara de un canal que posee una pendiente fuerte en sus riberas (figura 3.13 b), no se apreciaría la diferencia entre los escenarios considerados.

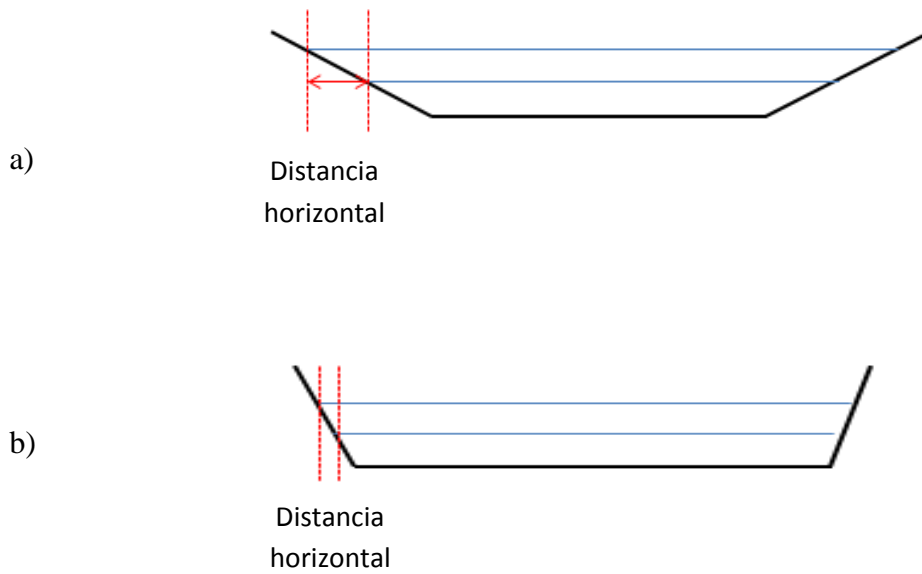


Figura 3.13: Variación de la distancia horizontal entre; a) riberas de pendiente suave, b) riberas de pendiente fuerte.

3.4 Resultados para cada uno de los escenarios propuestos

En las figuras 3.14 a 3.16 se observan las profundidades de agua para los 3 escenarios modelados.

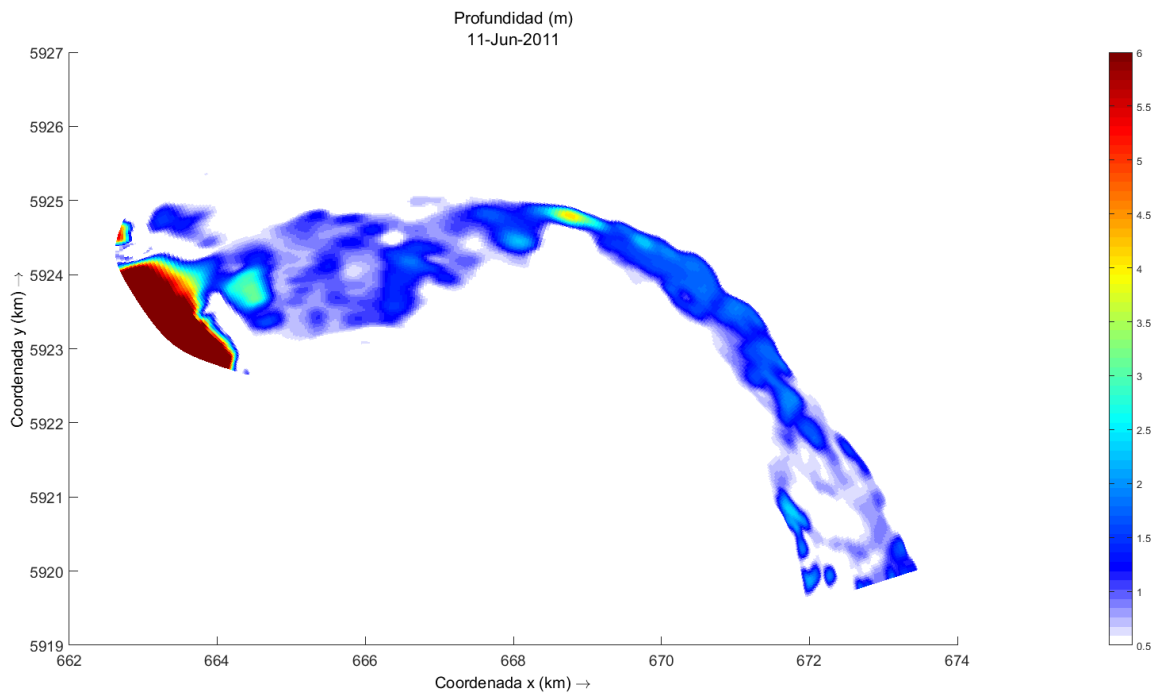


Figura 3.14: Profundidades de agua modeladas para el escenario 1.

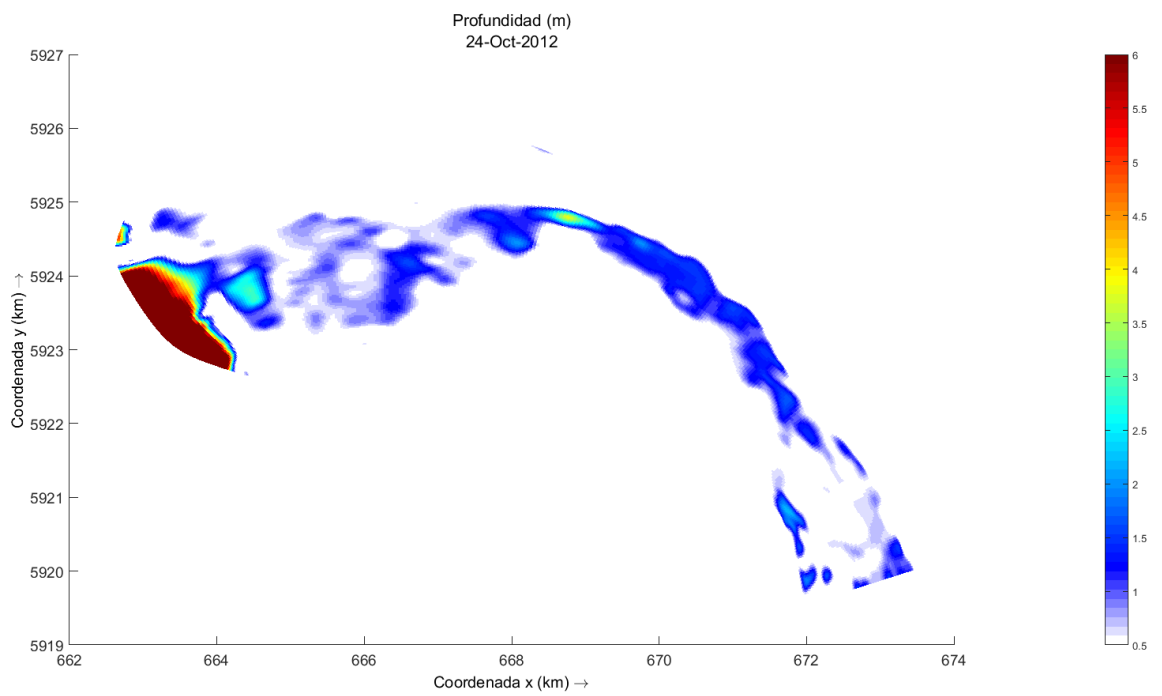


Figura 3.15: Profundidades de agua modeladas para el escenario 2.

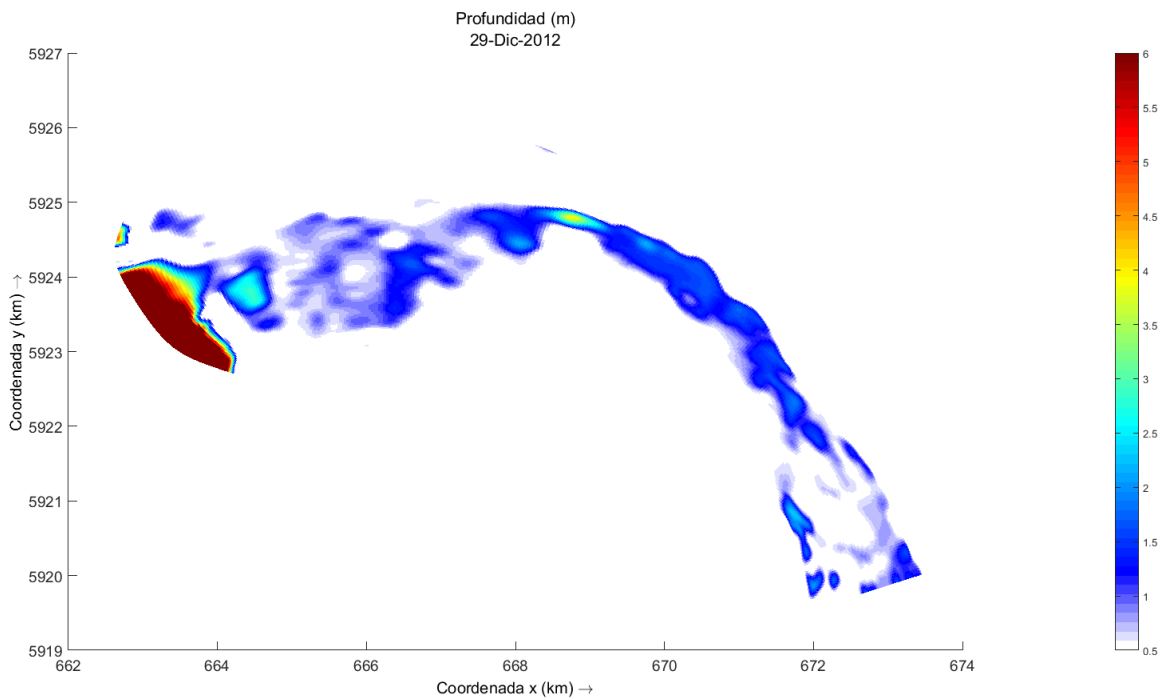


Figura 3.16: Profundidades de agua modeladas para el escenario 3.

Para los 3 escenarios modelados se observaron 4 puntos para visualizar hasta que zona afecta la influencia de la marea en el río, y para esto se calcularon las variaciones entre la mayor y la menos cota de elevación de la superficie del agua, las que se indican en la tabla 3.3. Estas variaciones siguen la misma tendencia de la marea (ejemplo: figura 3.14).

Tabla 3.3: Variación de elevación de la superficie del agua para los 3 escenarios.

	Variación elevación del agua E1 (cm)	Variación elevación del agua E2 (cm)	Variación elevación del agua E3 (cm)
Pto 1	5.8	9.7	19.5
Pto 2	1.5	1.7	6
Pto 3	0	0	0
Pto 4	0	0	0

De la tabla 3.3 podemos decir que para los tres escenarios los puntos 3 y 4 no se ven afectados por la marea, ya que su variación en la elevación del agua es nula a diferencia que en los puntos 1 y 2.

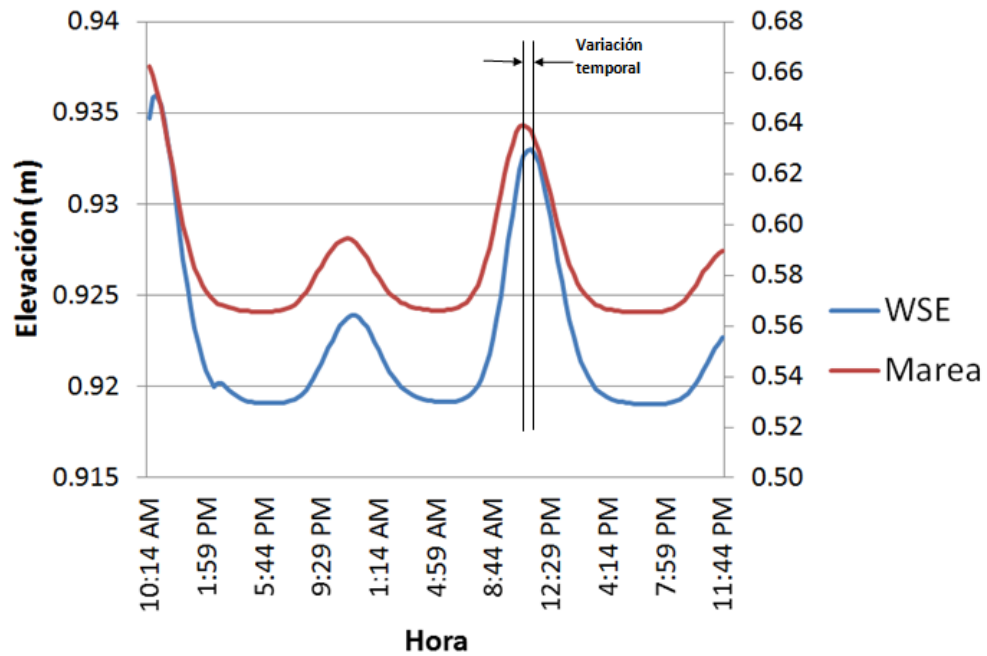


Figura 3.17: Variación de marea versus cota de la superficie del agua para el punto 2 (figura 2.7), escenario 2.

En la figura 3.14 se observa un desfase temporal en la onda de marea que corresponde a 30 minutos. Esto se debe al tiempo de viaje de la onda, que a medida que se aleja de la desembocadura aumenta.

Se observa además que cuando la marea baja, existe un punto en que la cota del agua se mantiene constante (figura 3.15), esto se asocia a que los valores de Froude en ese instante aumentan (figura 3.15) y tienden a la crisis, por lo que la marea no controla el flujo aguas arriba, sino que controla la pendiente del pelo de agua con la que viene el río. En el caso contrario, cuando la marea aumenta, la cota del pelo de agua lo hace con la misma tendencia y los valores de Froude disminuyen.

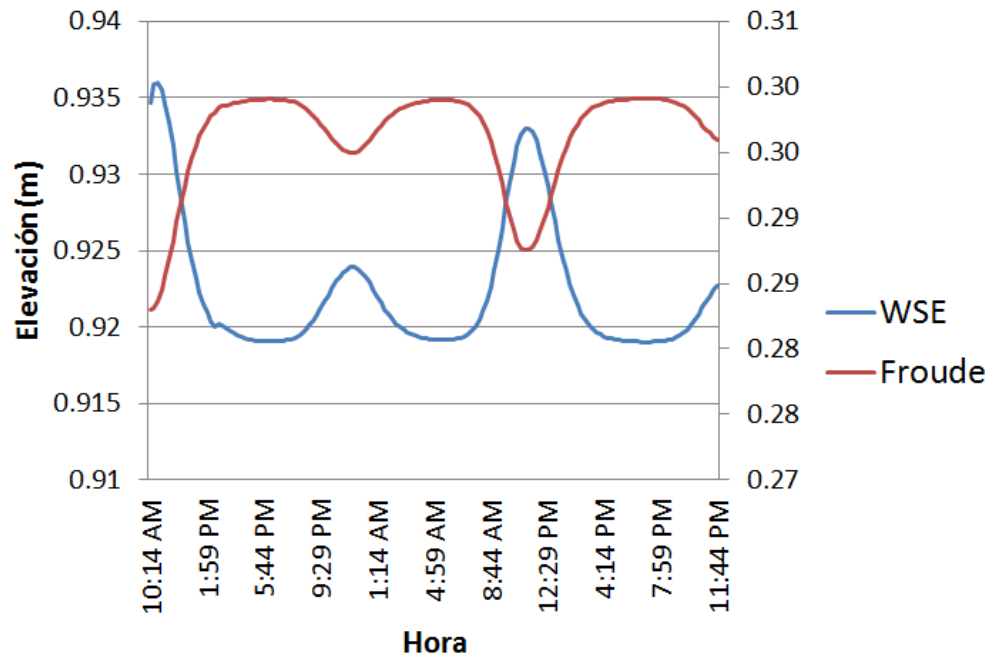


Figura 3.18: Variación de la marea versus Froude en el punto 2, escenario 2.

Finalmente se analizó lo que ocurría aguas arriba del angostamiento (figura 3.16) y para ello se observó un perfil longitudinal para cada escenario (1, 2 y 3) (Figura 3.17, 3.18 y 3.19).



Figura 3.19: Ubicación del perfil longitudinal de la superficie del agua, aguas arriba del angostamiento.

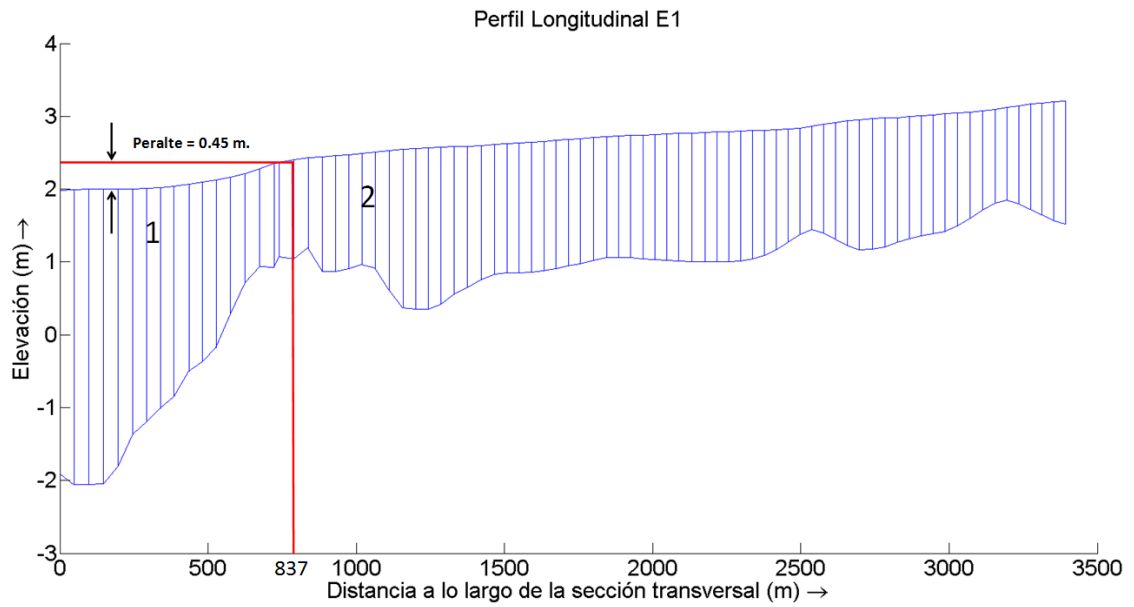


Figura 3.20: Eje hidráulico, aguas arriba del angostamiento para el E1.

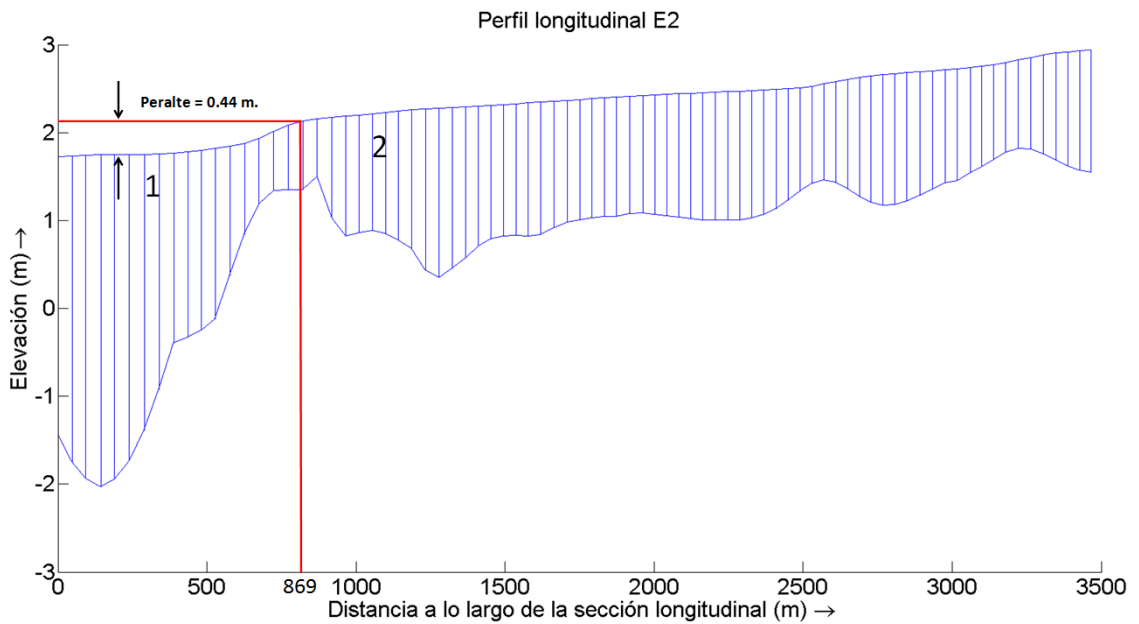


Figura 3.21: Eje hidráulico, aguas arriba del angostamiento para el E2.

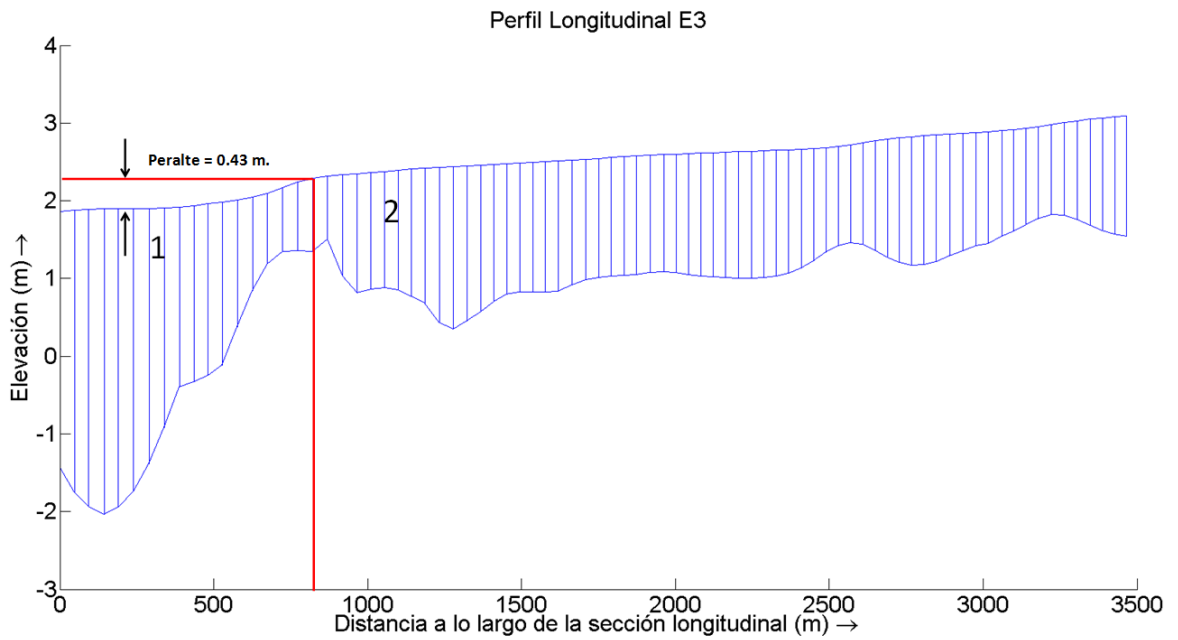


Figura 3.22: Eje hidráulico, aguas arriba del angostamiento para el E3.

En los perfiles se aprecian los puntos 1 y 2. El punto 1 se encuentra a 340 metros y el punto 2 se encuentra a aproximadamente 1050 metros, ambos aguas arriba del inicio del perfil.

Se aprecia que el angostamiento es un punto de control que peralta el flujo para los tres escenarios (figura 3.16, 3.17 y 3.18), ocasionando la disminución de las velocidades en el punto 2 según los datos de velocidades mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Velocidad media para los 3 escenarios.

	Velocidad media punto 1 (m/s)	Velocidad media punto 2 (m/s)
E1	1.18	0.88
E2	1	0.72
E3	1.1	0.78

Además se observó un fenómeno muy particular en la zona de la desembocadura, el cual no responde a los objetivos de esta tesis, pero nos pareció importante de mencionar.

En esta zona se observó que los vectores de velocidad tienden a ir hacia el norte en marea alta y hacia el sur en marea baja, como se observa en las figura 3.23 a 3.25 para los tres escenarios.

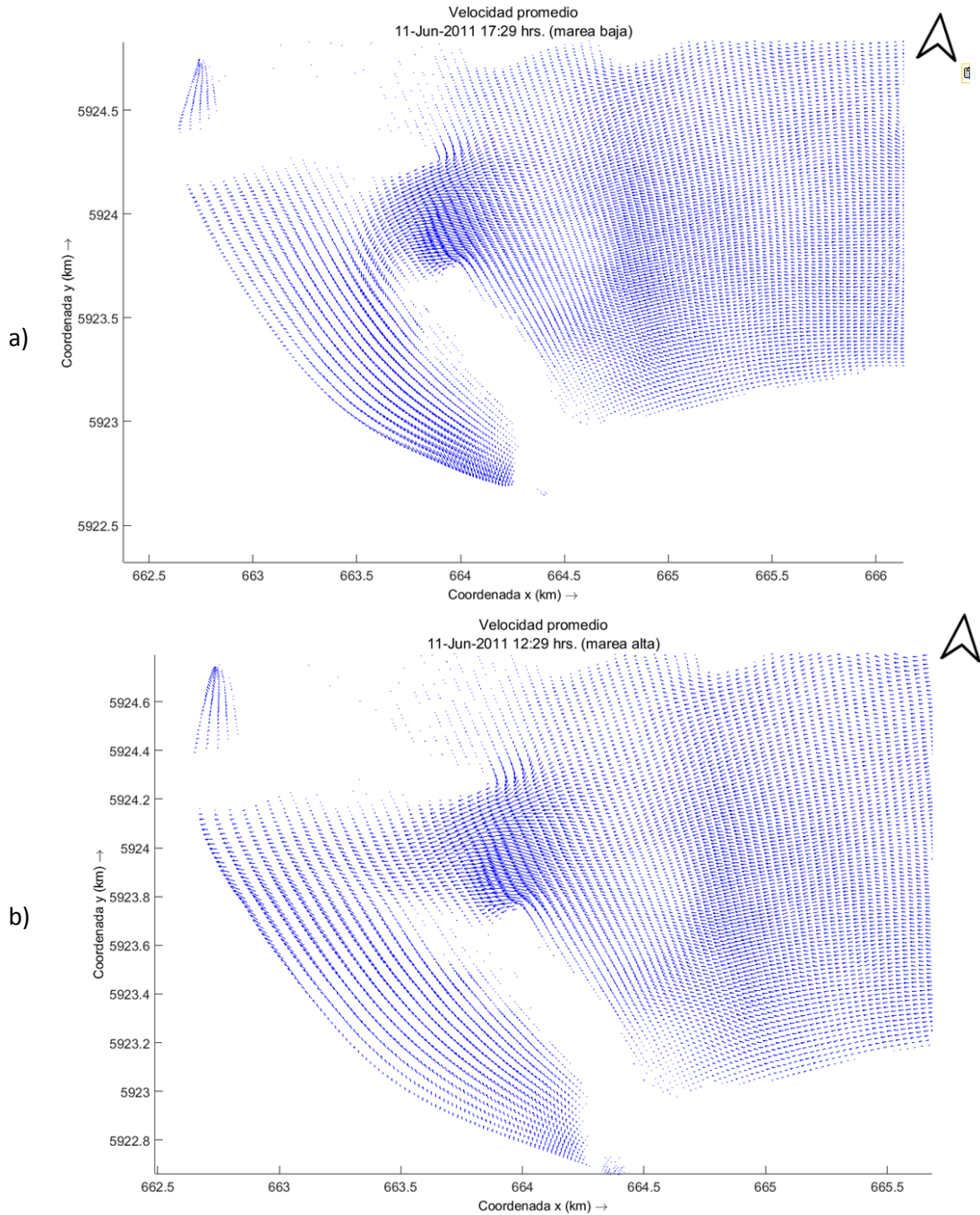


Figura 3.23: Vectores de velocidad en zona de desembocadura escenario 1; a) marea baja, b) marea alta.

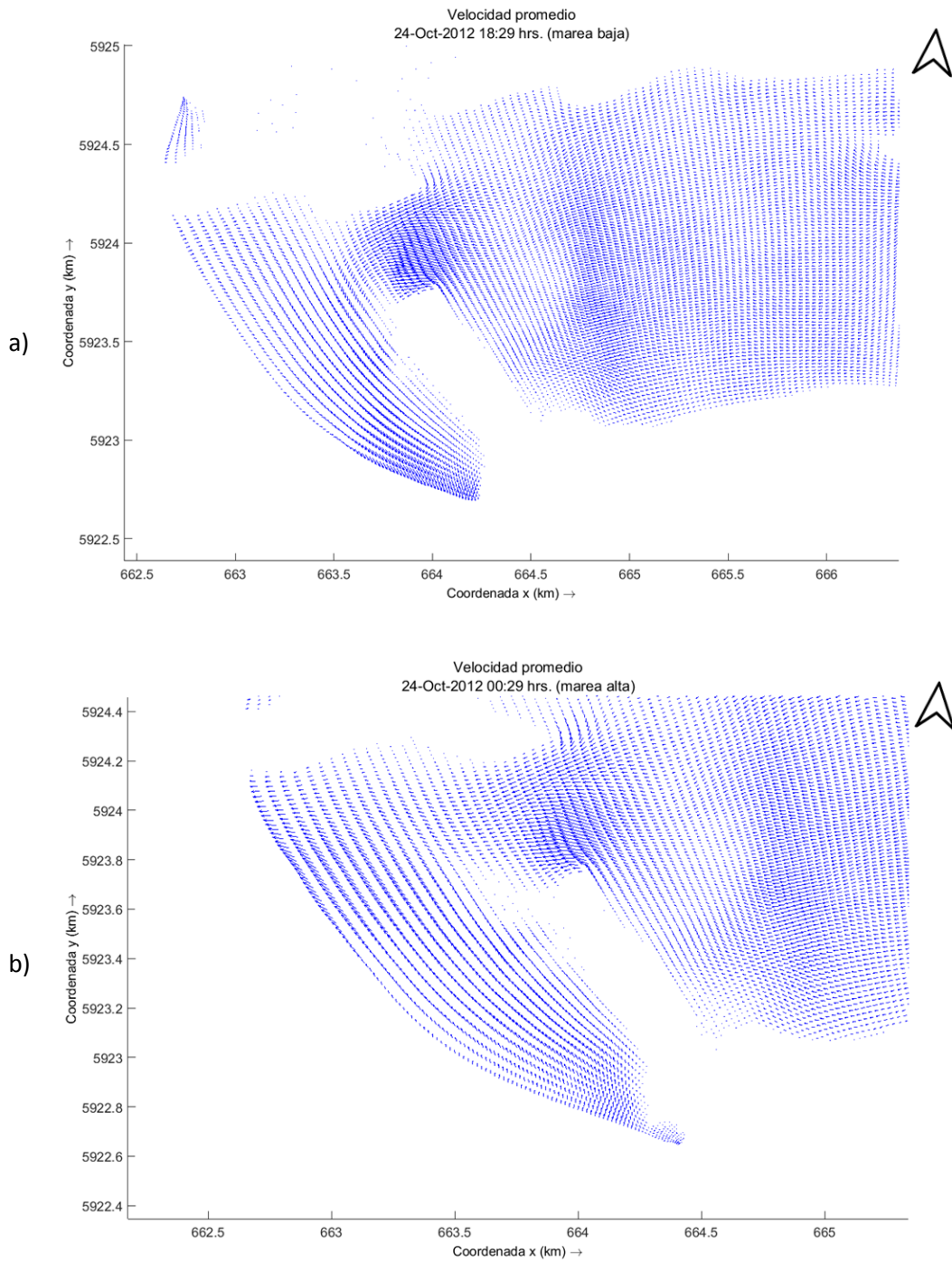


Figura 3.24: Vectores de velocidad en zona de desembocadura escenario 2; a) marea baja, b) marea alta.

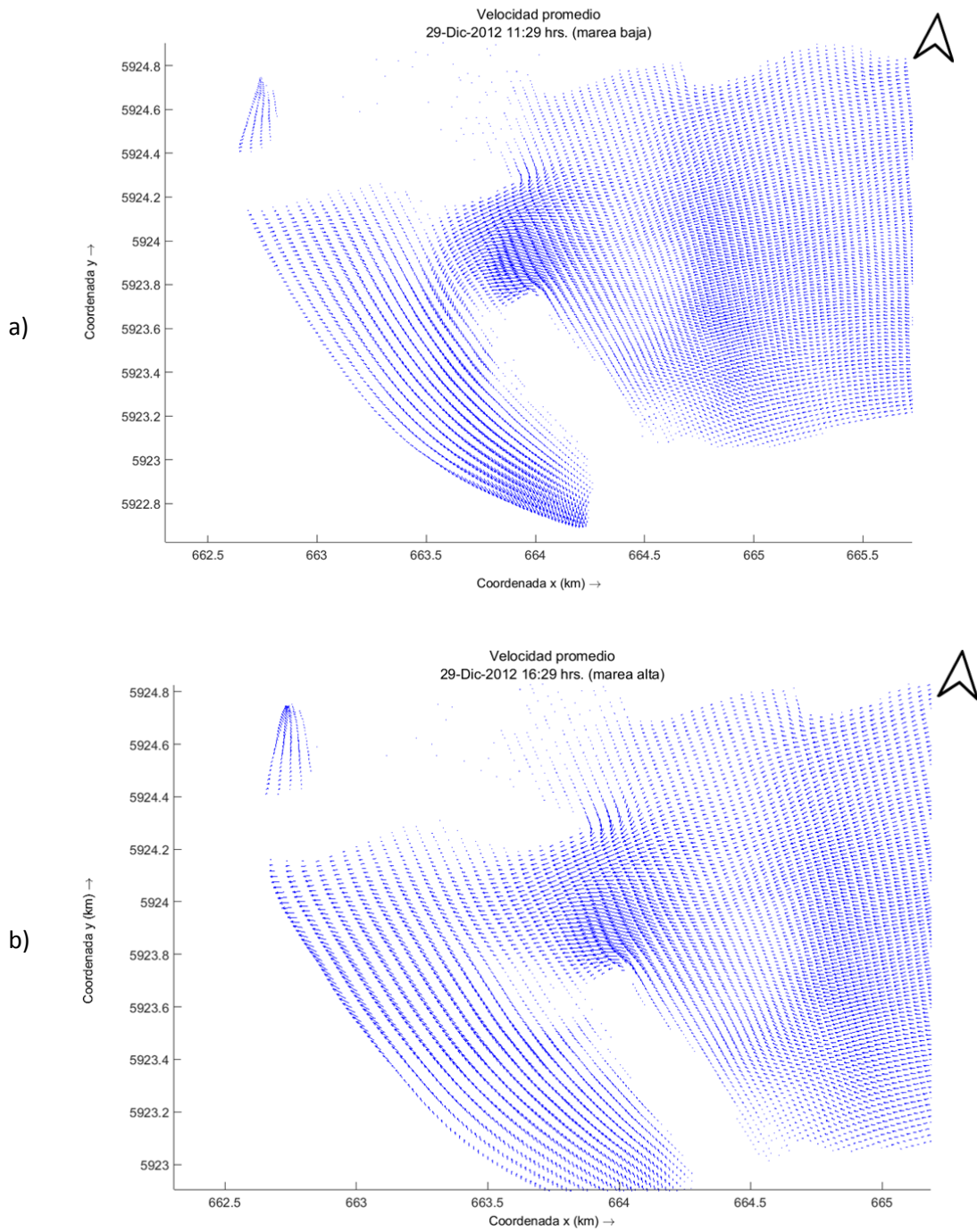


Figura 3.25: Vectores de velocidad en zona de desembocadura escenario 3; a) marea baja, b) marea alta.

Capítulo 4. Discusión y Conclusiones

Para la calibración se utilizaron imágenes satelitales para comparar la superficie de inundación entregada por el software con la imagen de Google Earth® correspondiente a la fecha del modelo, donde las condiciones de aguas arriba (caudal) y aguas abajo (marea) son constantes y el único parámetro variable fue el coeficiente de manning, llegando al valor de 0.03.

Luego de analizar los 4 puntos de observación en cada uno de los 3 escenarios, se define que la marea sólo afecta el sector aguas abajo del angostamiento para los escenarios modelados. El punto más cercano a la desembocadura que se ve afectado es el 2 (ubicado a 3 km de ésta), ya que existen variaciones en la cota del agua mayores a 1.5 cm las cuales siguen la tendencia de la marea.

Se debe señalar que la marea no influye en bajamar, ya que la cota del agua en los puntos observados se mantiene constante, lo que indica que el control está definido por la pendiente de la caída de agua en la desembocadura a diferencia de la pleamar, en que la cota del agua en los puntos observados aumenta con la misma pendiente con la que aumenta la marea. Para caudales mayores a los modelados se espera que la pendiente sea mayor, dado que la cota de la superficie del agua a la salida del río aumenta, incrementa la diferencia de altura en la misma distancia.

El angostamiento no se ve influenciado por la variación de la marea, pero es un punto de control, lo que se evidencia con el peralte del agua que ocurre aguas arriba de este (figuras 3.20, 3.21 y 3.22). A raíz de este fenómeno, las velocidades disminuyen (tabla 3.4), lo que se hipotetiza como uno de los efectos o proceso que facilitan la sedimentación de arena aguas arriba de esta estructura morfológica causando un crecimiento del área de la barra o una migración de ésta aguas arriba.

Capítulo 5. Referencias bibliográficas

Barnes, H. (1967). “Roughness Characteristics of Natural Channels”, *Washington. U.S. Geological survey water Supply paper 1849*

Beltrán, C., Arenas, J., y Parra, O. (2001). “Macrofauna del curso inferior y estuario del río Biobío (Chile): cambios asociados a variabilidad estacional del caudal hídrico”. *Revista Chilena de Historia Natural* 74: 331-340.

Caamaño, D., Behrens, E., Martínez, A., Alcayaga, H. (2015). “Suspended sediment transport characterization along the Biobío river, Chile”. *E-proceeding of the 36th IAHR World Congress. The Hague, the Netherlands.*

Chow, V. (1959). “Open-Channel Hydraulics”. *McGraw-Hill, New York.*

Deltares. (2014). “User Manual Delft3D-Flow, Simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments”.

Escobar, M. (2013). “Cuantificación de la erosión local en el río Biobío debido al nuevo escenario vial”. *Tesis de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Fernández, M. (2013). “Cambios morfológicos y efectos en las velocidades y alturas del flujo en la parte baja del río Biobío”. *Tesis de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Gaete, J. (2013). “Aplicación de un modelo morfológico empírico unidimensional en la parte baja del río Biobío”. *Tesis de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Goodwin, P., Jorde, K. Meier, C. and Parra, O. (2006). “Minimizing environmental impacts of hydropower development: transferring lessons from past projects to a proposed strategy for Chile”. *Journal of Hydroinformatics Vol. 08, No. 4, pp. 253-270.*

Herrera, I. y Ramírez, H. (2013). “Hidrodinámica y transporte de sedimentos en la desembocadura del río Grijalva”.

Isla, F., Quezada, J., Martínez, C., Fernández, A., and Jaque, E. (2012). “The evolution of the Biobío Delta and the Coastal Plains of the Arauco Gulf, Biobío Region: the Holocene Sea-Level Curve of Chile”. *Journal of Coastal Research, Vol. 28, No. 1, pp. 102-111.*

Jalón, I. (2013). “Análisis armónicos de marea astronómica con T_TIDE”. https://fluyendolibremente.wordpress.com/2013/01/11/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t_tide/

James L. Martín and Steven C. McCutcheon (1999). “Hydrodynamics and transport for water quality modelin”. *CRC Press, Inc.*

Karim, M. and Kennedy, J. (1982). “IALLUVIAL: A commuter based flow and sediment routing for alluvial streams and its application to the Missouri River.” *Rep. No. 250, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.*

Krishnappan, B. (1981). “User’s manual: Unsteady, non-uniform, mobile boundary flow model-MOBED”. *Hydraulic division, National Water Research Institute, CCIW, Burlington, Ontario.*

Link, O., Cecioni, A., Duyvestein, A., and Vargas, J. (2002). “Hydrology of the Biobío river. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband N.F.129, pp. 31-39.*

López, A., Nardini, A., Ruiz, R., Quijada, S. (1995). “Un modelo matemático para la predicción de crecidas en tiempo real”.

Papanicolaou, A., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S. and Edinger, J. (2008). “Sediment transport modeling review-current and future developments”. *J. Hydraul. Eng., 2008, 134(1):1-14.*

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. (2002). “Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_Tides”.

Saldías, G., Sobarzo, M. Largier, J., Moffat, C., and Letelier, R. (2012). “Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery”. *Remote Sensing of Environment 123, pp. 220-233.*

Torrejón, F., Cisternas, M. y Herrera, F. (2004). “La navegabilidad histórica del río Biobío, mito y realidad (Reconstitución del paisaje fluvial). *Revista Geográfica de Chile Terra Australis, Vol. 49, pp. 7-30.*

UNESCO/IOC. (2012). “Sea Level Monitoring Facility”, available at <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=crnl>.

Universidad de Cantabria (2010). “Documento de referencia”. Vol. I, sección 5.

Universidad de Granada, Ingeniería marítima (2012). “Oscilaciones de periodo largo: Marea astronómica”. Sección 3.

Universidad del Biobío (2010). “Estudio de riesgos de sismos y maremoto para comunas Costeras de la Región del Biobío”. *Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo del Ministerio del Interior, Gobierno de Chile / Departamento de Planificación y Diseño Urbano, Laboratorio de Estudios Urbanos, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío.*

US Army Corps of Engineers. (2010).” HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual”. Version 4.1.0. Disponible en http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf.

Vidal, G. (2013). “Determinación y cuantificación de los cambios morfológicos en la zona baja del río Biobío”. *Tesis de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Capítulo 6. Anexos

Anexo A: Tablas de caudales medios diarios mensual.

Tabla A.1 : Caudales medios diarios (m³/s) estación “Río Biobío en desembocadura”.
Período: 01/05/2011 – 31/12/2012

AÑO: 2011													
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1							1375	801	1469	1309	702	595	
2							1043	816	1336	1212	679	530	
3							842	854	1288	1077	752	467	
4							824	832	1466	1125	752	513	
5							721	835	1279	1134	741	492	
6							693	968	1238	1057	719	336	
7							647	1289	1246	1049	663	509	
8							646	1315	1219	1091	615	479	
9							640	1465	1227	1091	717	466	
10								604	1548	1526	1041	785	405
11						674	574	2620	1675	958	779	449	
12						772	668	2897	1492	976	724	414	
13						749	822	3378	1346	1040	717	353	
14						631	927	2235	1341	1059	705	443	
15						561	1374	1733	1266	1020	657	449	
16						531	1504	1591	1216	997	723	420	
17						571	1224	1698	1391	914	743	405	
18						669	1117	1903	1423	962	793	435	
19						750	988	1887	1225	937	835	414	
20						1210	928	1567	1022	923	815	285	
21						1099	851	1391	1022	899	728	364	
22						991	837	1337	1142	882	701	334	
23						833	848	1280	1139	898	764	314	
24						765	845	1160	1198	848	696	353	
25						704	857	1266	1169	842	702	367	
26						672	1003	1177	1037	879	705	350	
27						595	1017	1227	1171	845	674	274	
28						565	1017	1434	1130	834	622	326	
29						631	1069	1535	1383	884	583	362	
30						998	1070	1849	1433	816	636	342	
31							951	1749		734		320	

Continuación tabla A.1

DIA	AÑO: 2012											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	322	204	479	276	265	906	1523	617	641	401	307	243
2	258	216	536	269	270	829	1650	639	629	359	383	245
3	220	231	468	251	270	1906	1598	766	597	411	317	234
4	230	253	416	276		1214	1486	822	609	465	286	259
5	284	248	374	291		911	1410	735	619	485	256	290
6	306	220	326	287		882	1335	687	602	482	242	284
7	315	204	393	281		836	1246	651	635	530	273	276
8	301	206	366	264	306	766	1189	587	623	586	283	381
9	279	203	348	248		703	1145	623	593	465	277	433
10	271	209	341	239		652	1092	585	547	509	312	362
11	304	216	351	241		555	1081	617	470	447	373	322
12	325	216	316	263		702	1024	595	538	436	326	306
13	309	211	288	271		908	942	581	532	490	290	295
14	304	198	319	282		1808	890	568	565	463	318	284
15	297	190	306	278		1576	924	674	599	465	328	285
16	275	187	295	260	1058	1376	865	704	549	386	297	283
17	250	203	288	236	1112	1422	786	825	590	350	300	275
18	268	245	279	248	1172	1277	868	807	582	414	277	284
19	302	281	278	273	1207	1227	806	758	532	449	262	289
20	301	408	268	269	1216	1214	810	722	488	431	242	410
21	276	374	280	271	1437	1648	838	682	543	459	236	881
22	234	341	298	269	1580	1929	874	720	605	417	237	869
23	223	309	290	248	1370	1581	931	894	570	400	254	674
24	207	312	295	230	1292	1515	842	897	545	417	243	628
25	203	319	290	242	1247	1344	834	843	473	402	241	508
26	214	290	272	256	1255	1316	805	732	562	393	250	760
27	222	276	252	250	1481	1201	760	699	522	443	252	890
28	222	294	255	257	1994	1116	738	667	506	363	284	752
29	210	335	267	267	3871	1326	615	687	501	361	267	532
30	203		270	263	3907	1260	635	681	470	320	245	562
31	200		290		1968		659	668		319		432

Anexo B: Tablas de mareas

Tabla B.1: Marea 9, 10 y 11 de Junio del 2011 estación Coronel_CL

Marea 10 y 11 de Junio del 2011 Estación Coronel_CL

Fecha	Hora	Min.	Seg.	Cota marea	Fecha	Hora	Min.	Seg.	Cota marea
9/ 6/ 2011	0	0	0	-0.159	10/ 6/ 2011	13	0	0	-0.110
9/ 6/ 2011	1	0	0	-0.387	10/ 6/ 2011	14	0	0	-0.269
9/ 6/ 2011	2	0	0	-0.527	10/ 6/ 2011	15	0	0	-0.374
9/ 6/ 2011	3	0	0	-0.555	10/ 6/ 2011	16	0	0	-0.399
9/ 6/ 2011	4	0	0	-0.476	10/ 6/ 2011	17	0	0	-0.333
9/ 6/ 2011	5	0	0	-0.316	10/ 6/ 2011	18	0	0	-0.181
9/ 6/ 2011	6	0	0	-0.124	10/ 6/ 2011	19	0	0	0.026
9/ 6/ 2011	7	0	0	0.048	10/ 6/ 2011	20	0	0	0.233
9/ 6/ 2011	8	0	0	0.157	10/ 6/ 2011	21	0	0	0.387
9/ 6/ 2011	9	0	0	0.180	10/ 6/ 2011	22	0	0	0.450
9/ 6/ 2011	10	0	0	0.113	10/ 6/ 2011	23	0	0	0.406
9/ 6/ 2011	11	0	0	-0.025	11/ 6/ 2011	0	0	0	0.261
9/ 6/ 2011	12	0	0	-0.191	11/ 6/ 2011	1	0	0	0.039
9/ 6/ 2011	13	0	0	-0.331	11/ 6/ 2011	2	0	0	-0.217
9/ 6/ 2011	14	0	0	-0.396	11/ 6/ 2011	3	0	0	-0.451
9/ 6/ 2011	15	0	0	-0.365	11/ 6/ 2011	4	0	0	-0.604
9/ 6/ 2011	16	0	0	-0.247	11/ 6/ 2011	5	0	0	-0.640
9/ 6/ 2011	17	0	0	-0.060	11/ 6/ 2011	6	0	0	-0.552
9/ 6/ 2011	18	0	0	0.164	11/ 6/ 2011	7	0	0	-0.364
9/ 6/ 2011	19	0	0	0.373	11/ 6/ 2011	8	0	0	-0.124
9/ 6/ 2011	20	0	0	0.512	11/ 6/ 2011	9	0	0	0.110
9/ 6/ 2011	21	0	0	0.549	11/ 6/ 2011	10	0	0	0.282
9/ 6/ 2011	22	0	0	0.475	11/ 6/ 2011	11	0	0	0.352
9/ 6/ 2011	23	0	0	0.306	11/ 6/ 2011	12	0	0	0.310
10/ 6/ 2011	0	0	0	0.072	11/ 6/ 2011	13	0	0	0.176
10/ 6/ 2011	1	0	0	-0.184	11/ 6/ 2011	14	0	0	-0.015
10/ 6/ 2011	2	0	0	-0.413	11/ 6/ 2011	15	0	0	-0.219
10/ 6/ 2011	3	0	0	-0.560	11/ 6/ 2011	16	0	0	-0.385
10/ 6/ 2011	4	0	0	-0.596	11/ 6/ 2011	17	0	0	-0.468
10/ 6/ 2011	5	0	0	-0.520	11/ 6/ 2011	18	0	0	-0.444
10/ 6/ 2011	6	0	0	-0.355	11/ 6/ 2011	19	0	0	-0.311
10/ 6/ 2011	7	0	0	-0.148	11/ 6/ 2011	20	0	0	-0.106
10/ 6/ 2011	8	0	0	0.049	11/ 6/ 2011	21	0	0	0.113
10/ 6/ 2011	9	0	0	0.189	11/ 6/ 2011	22	0	0	0.290
10/ 6/ 2011	10	0	0	0.239	11/ 6/ 2011	23	0	0	0.382
10/ 6/ 2011	11	0	0	0.188	11/ 6/ 2011	23	59	0	0.362
10/ 6/ 2011	12	0	0	0.058	12/ 6/ 2011	0	0	0	0.360

Tabla B.2: Marea 22, 23 y 24 de Octubre del 2012 estación Coronel_CL

Marea 22, 23 y 24 de Diciembre del 2012 Estación Coronel_CL

Fecha	Hora	Min.	Seg.	Cota marea	Fecha	Hora	Min.	Seg.	Cota marea
22/10/2012	0	0	0	-0.205	23/10/2012	13	0	0	0.007
22/10/2012	1	0	0	-0.262	23/10/2012	14	0	0	-0.219
22/10/2012	2	0	0	-0.244	23/10/2012	15	0	0	-0.376
22/10/2012	3	0	0	-0.208	23/10/2012	16	0	0	-0.504
22/10/2012	4	0	0	-0.011	23/10/2012	17	0	0	-0.464
22/10/2012	5	0	0	0.17	23/10/2012	18	0	0	-0.363
22/10/2012	6	0	0	0.391	23/10/2012	19	0	0	-0.208
22/10/2012	7	0	0	0.506	23/10/2012	20	0	0	-0.028
22/10/2012	8	0	0	0.603	23/10/2012	21	0	0	0.163
22/10/2012	9	0	0	0.523	23/10/2012	22	0	0	0.215
22/10/2012	10	0	0	0.425	23/10/2012	23	0	0	0.265
22/10/2012	11	0	0	0.193	24/10/2012	0	0	0	0.201
22/10/2012	12	0	0	-0.023	24/10/2012	1	0	0	0.064
22/10/2012	13	0	0	-0.237	24/10/2012	2	0	0	-0.144
22/10/2012	14	0	0	-0.392	24/10/2012	3	0	0	-0.261
22/10/2012	15	0	0	-0.468	24/10/2012	4	0	0	-0.311
22/10/2012	16	0	0	-0.463	24/10/2012	5	0	0	-0.355
22/10/2012	17	0	0	-0.348	24/10/2012	6	0	0	-0.196
22/10/2012	18	0	0	-0.186	24/10/2012	7	0	0	-0.059
22/10/2012	19	0	0	-0.025	24/10/2012	8	0	0	0.165
22/10/2012	20	0	0	0.09	24/10/2012	9	0	0	0.306
22/10/2012	21	0	0	0.166	24/10/2012	10	0	0	0.418
22/10/2012	22	0	0	0.162	24/10/2012	11	0	0	0.416
22/10/2012	23	0	0	0.079	24/10/2012	12	0	0	0.331
23/10/2012	0	0	0	-0.021	24/10/2012	13	0	0	0.17
23/10/2012	1	0	0	-0.172	24/10/2012	14	0	0	-0.073
23/10/2012	2	0	0	-0.249	24/10/2012	15	0	0	-0.299
23/10/2012	3	0	0	-0.284	24/10/2012	16	0	0	-0.481
23/10/2012	4	0	0	-0.202	24/10/2012	17	0	0	-0.565
23/10/2012	5	0	0	-0.131	24/10/2012	18	0	0	-0.581
23/10/2012	6	0	0	0.108	24/10/2012	19	0	0	-0.456
23/10/2012	7	0	0	0.279	24/10/2012	20	0	0	-0.26
23/10/2012	8	0	0	0.42	24/10/2012	21	0	0	-0.034
23/10/2012	9	0	0	0.505	24/10/2012	22	0	0	0.11
23/10/2012	10	0	0	0.501	24/10/2012	23	0	0	0.228
23/10/2012	11	0	0	0.411	24/10/2012	23	59	0	0.201
23/10/2012	12	0	0	0.245	25/10/2012	0	0	0	0.237

Tabla B.3: Marea 27, 28 y 29 de Diciembre del 2012 estación Coronel_CL

Marea 27 y 28 de Diciembre del 2012 Estación Coronel_CL

Fecha	Hora	Min.	Seg.	Cota marea	Fecha	Hora	Min.	Seg.	Cota marea
27/12/2012	0	0	0	0.408	28/12/2012	13	0	0	-0.027
27/12/2012	1	0	0	0.586	28/12/2012	14	0	0	0.153
27/12/2012	2	0	0	0.693	28/12/2012	15	0	0	0.214
27/12/2012	3	0	0	0.647	28/12/2012	16	0	0	0.138
27/12/2012	4	0	0	0.465	28/12/2012	17	0	0	0.021
27/12/2012	5	0	0	0.17	28/12/2012	18	0	0	-0.172
27/12/2012	6	0	0	-0.121	28/12/2012	19	0	0	-0.391
27/12/2012	7	0	0	-0.37	28/12/2012	20	0	0	-0.481
27/12/2012	8	0	0	-0.538	28/12/2012	21	0	0	-0.484
27/12/2012	9	0	0	-0.612	28/12/2012	22	0	0	-0.409
27/12/2012	10	0	0	-0.518	28/12/2012	23	0	0	-0.171
27/12/2012	11	0	0	-0.351	29/12/2012	0	0	0	0.151
27/12/2012	12	0	0	-0.132	29/12/2012	1	0	0	0.451
27/12/2012	13	0	0	0.074	29/12/2012	2	0	0	0.623
27/12/2012	14	0	0	0.197	29/12/2012	3	0	0	0.762
27/12/2012	15	0	0	0.151	29/12/2012	4	0	0	0.628
27/12/2012	16	0	0	0.104	29/12/2012	5	0	0	0.484
27/12/2012	17	0	0	-0.108	29/12/2012	6	0	0	0.171
27/12/2012	18	0	0	-0.257	29/12/2012	7	0	0	-0.114
27/12/2012	19	0	0	-0.4	29/12/2012	8	0	0	-0.411
27/12/2012	20	0	0	-0.496	29/12/2012	9	0	0	-0.579
27/12/2012	21	0	0	-0.476	29/12/2012	10	0	0	-0.631
27/12/2012	22	1	0	-0.237	29/12/2012	11	0	0	-0.534
27/12/2012	23	0	0	0.029	29/12/2012	12	0	0	-0.346
28/12/2012	0	0	0	0.574	29/12/2012	13	0	0	-0.13
28/12/2012	1	0	0	0.527	29/12/2012	14	0	0	0.103
28/12/2012	2	0	0	0.688	29/12/2012	15	0	0	0.17
28/12/2012	3	0	0	0.672	29/12/2012	16	0	0	0.277
28/12/2012	4	0	0	0.635	29/12/2012	17	0	0	0.141
28/12/2012	5	0	0	0.305	29/12/2012	18	0	0	-0.048
28/12/2012	6	0	0	0.019	29/12/2012	19	0	0	-0.232
28/12/2012	7	0	0	-0.28	29/12/2012	20	0	0	-0.332
28/12/2012	8	0	0	-0.486	29/12/2012	21	0	0	-0.539
28/12/2012	9	0	0	-0.619	29/12/2012	22	0	0	-0.434
28/12/2012	10	0	0	-0.577	29/12/2012	23	0	0	-0.283
28/12/2012	11	0	0	-0.451	30/12/2012	0	0	0	0.036
28/12/2012	12	0	0	-0.227	-	-	-	-	-

Anexo C: Predicción de mareas.

Con respecto a las fuerzas generadoras de mareas en el sistema tierra-sol, debido al efecto de la atracción del sol se obtiene un elipsoide de marea similar al producido por la luna, pero, se puede demostrar fácilmente que el efecto del sol sobre la marea corresponde solo a 0.46 veces al de la luna, lo cual pone en manifiesto que la influencia del resto de los planetas es despreciable. Esto sucede solo porque el sol se encuentra muy alejado de la tierra.

Finalmente, en cada punto de la superficie terrestre, la marea se debe a los efectos combinados de mareas lunares y solares, formándose así el sistema tierra-sol-luna. En las fases de luna nueva o llena, la luna y el sol están alineados con la tierra (figura C.1), de manera que se suman sus fuerzas y se producen las mareas de mayor intensidad, denominadas mareas vivas. Por otro lado, en fases de cuarto menguante o cuarto creciente, los tres astros se encuentran formando un ángulo recto (figura C.2), y los efectos de la luna y el sol se encuentran desfasados, produciéndose mareas muertas, que son mareas de menor intensidad, menos pronunciadas.

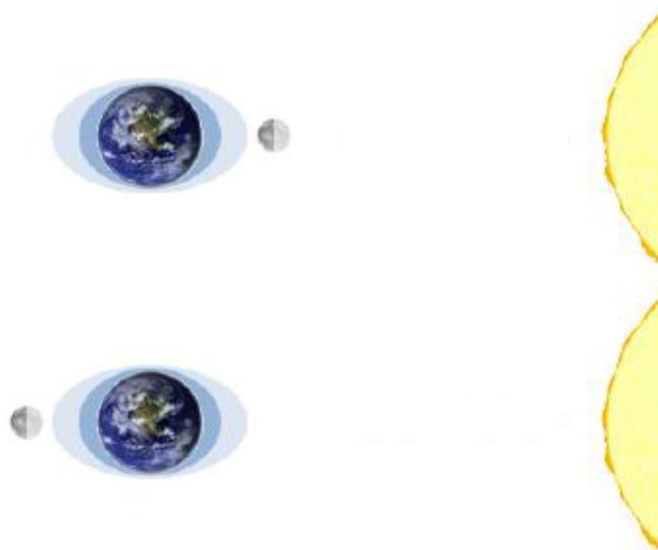


Figura C.1: Esquema de los astros alineados.

Fuente: Universidad de Granada, “Oscilaciones de periodo largo: Marea astronómica”

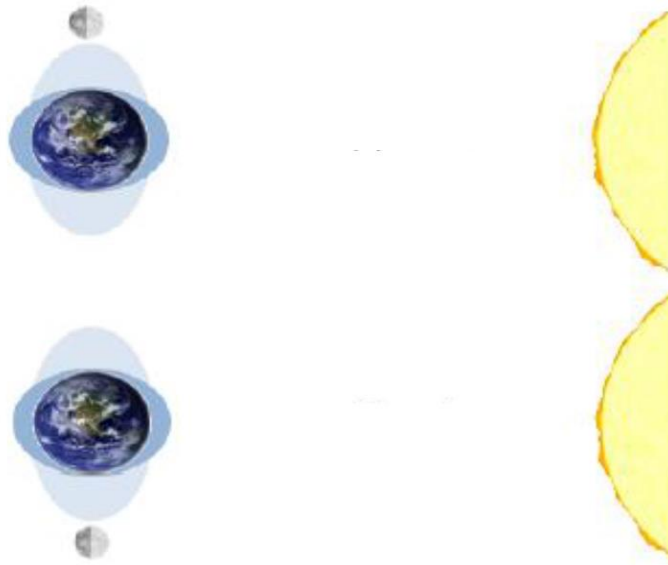


Figura C.2: Esquema de los astros en ángulo recto
 Fuente: Universidad de Granada, “Oscilaciones de periodo largo: Marea astronómica”

En la figura C.3 se presenta una serie temporal del nivel del mar durante un mes. Se puede observar la presencia de mareas vivas y muertas repitiéndose con un período T , que puede observarse a partir de las velocidades angulares de la luna y el sol. Si se considera que la rotación de la luna alrededor de la tierra se produce en $2T$, se tiene la siguiente ecuación (C.1):

$$2T = \frac{2\pi}{\Omega_L - \Omega_S} = \frac{360^\circ}{0.508^\circ/\text{hrs}} = 708 \text{ hrs} \quad (\text{C.1})$$

$$T = 354 \text{ hrs} = 14.8 \text{ días}$$

Donde Ω_L y Ω_S corresponden a la velocidad angular de la luna y el sol respectivamente.

Así, queda de manifiesto que se produce una marea viva aproximadamente dos veces al mes.

$\eta(\tau)$: Nivel del mar de referencia previamente establecido en un instante τ dado.

a_0 : Amplitud del nivel medio respecto a la referencia establecida.

a_n : Amplitud de la componente del armónico n.

t: Tiempo.

ω_n : Amplitud de la componente del armónico n.

α_n : Fase de la componente del armónico n.

Darwin y Doodson bajo la hipótesis de que la marea es una oscilación del nivel del mar que tiene las mismas componentes armónicas que el forzamiento que la induce, consiguieron llevar a efecto esta descomposición realizando un análisis astronómico armónico teniendo en cuenta los movimientos de la tierra, luna y sol, a partir del cual determinaron la frecuencia e importancia relativa de cada una de las componentes. En la figura C.4 se presentan las componentes más importantes que constituyen la marea astronómica incluyendo su nombre, símbolo, velocidad angular/hora solar media, período en horas solares y amplitud relativa. A partir de las componentes descritas en la figura C.4, la marea puede ser totalmente representada (*Pawlowics, et al, 2002*).

Nombre	Símbolo	Perfodo	Coef.
Lunar principal	M_2	12.42	100
Solar principal	S_2	12.00	46.6
Elíptico Lunar mayor	N_2	12.66	19.2
Semidiurno Luni-Solar	K_2	11.97	12.7
Solar elíptico mayor	T_2	12.01	2.7
Solar elíptico menor	L_2	12.19	2.8
Elíptico lunar 2º orden	$2N_2$	12.91	2.5
Diurno Luni-Solar	K_1	23.93	58.4
Diurno Lunar principal	O_1	25.82	41.5
Diurno Solar principal	P_1	24.07	19.4
Elíptico Lunar mayor	Q_1	26.87	7.9
Elíptico Lunar menor	M_1	24.84	3.3
Quincenal Lunar	M_f	327.9	17.2
Mensual Lunar	M_m	661.3	9.1
Semi-anual Solar	S_{sa}	4383	8.0

Figura C.4: Componentes principales de la marea astronómica.

Fuente: Universidad de Cantabria, “Documento de referencia”.

En la figura C.5 se muestra una ilustración en forma de esquema de la predicción de la serie temporal de marea astronómica mediante la suma de componentes armónicas.

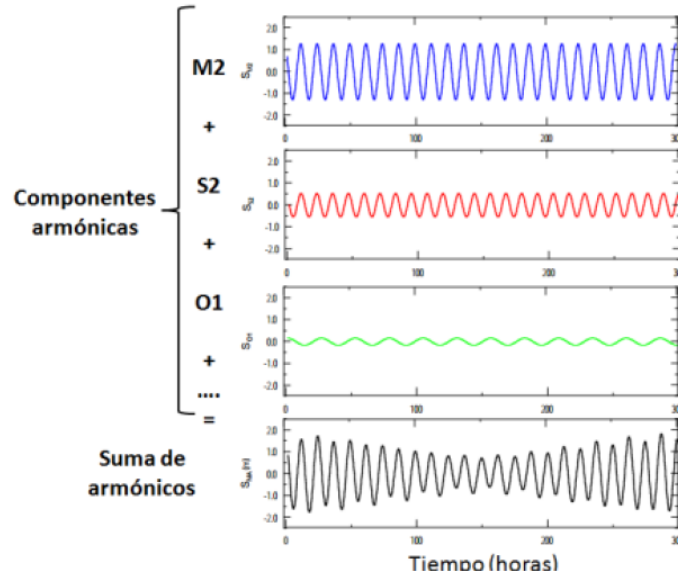


Figura C.5: Predicción de la serie temporal de marea astronómica mediante la suma de componentes armónicas

Fuente: <http://fluyendolibremente.wordpress.com>

Anexo D: Código MATLAB para predicción de mareas.

%PARTE 1, IMPORTAR DATOS

%% Estacion Coronel_CL 06-09-2015 a 06-10-2015

```
%  
% %Sacar los datos de excel  
datos_dia=xlsread('DATOS.xlsx','Componentes','A2:A43202');  
datos_mes=xlsread('DATOS.xlsx','Componentes','B2:B43202');  
datos_anos=xlsread('DATOS.xlsx','Componentes','C2:C43202');  
datos_hrs=xlsread('DATOS.xlsx','Componentes','D2:D43202');  
datos_min=xlsread('DATOS.xlsx','Componentes','E2:E43202');  
datos_seg=xlsread('DATOS.xlsx','Componentes','F2:F43202');  
datos_prs=importdata('armonica.txt');  
%  
format long  
Datos=[datos_anos datos_mes datos_dia datos_hrs datos_min datos_seg];  
tiempo=datenum(Datos);  
%  
save tiempo  
save datos_prs
```

%% Estacion Coronel_CL 02-07-2015 a 02-08-2015 (Mes cualquiera)

%Sacar los datos de excel

```
datos_diamc=xlsread('DATOS.xlsx','Comparacion','A2:A43202');  
datos_mesmc=xlsread('DATOS.xlsx','Comparacion','B2:B43202');  
datos_anosmc=xlsread('DATOS.xlsx','Comparacion','C2:C43202');  
datos_hrsmc=xlsread('DATOS.xlsx','Comparacion','D2:D43202');  
datos_minmc=xlsread('DATOS.xlsx','Comparacion','E2:E43202');  
datos_segmc=xlsread('DATOS.xlsx','Comparacion','F2:F43202');  
datos_prsmc=importdata('comparacion.txt');  
  
format long  
Datosmc=[datos_anosmc datos_mesmc datos_diamc datos_hrsmc datos_minmc  
datos_segmc];  
tiempomc=datenum(Datosmc);  
  
save tiempomc  
save datos_prsmc
```

%% PARTE 2, PREDICCIÓN

%% Cargar datos de tiempo y nivel del mar.

```

load datos_prs %Carga datos de PRS Estacion Coronel_CL 06-09-2015 a 06-10-2015
load tiempo %Carga tiempo de Estacion Coronel_CL 06-09-2015 a 06-10-2015
e_prs=datos_prs;
t_c=tiempo;

%% Obtención de componentes

% Coronel se encuentra en la latitud -37.03
[TIDESTRUC_V,XOUT_V]=t_tide(e_prs,'interval',0.0166666666,'start
time',t_c(1),'latitude',-37.03); %Nos entrega las componentes de marea

%% Gráfico

% Gráfico del mareógrafo Estacion Coronel_CL 06-09-2015 a 06-10-2015

figure(1);
plot(t_c,e_prs-2.810*ones(length(e_prs),1),'k','LineWidth',2); %NMM referido al cero
absoluto del PRS 2.517 m
grid on;
title('Mareografo Estacion Coronel CL 06-09-2015 a 06-09-2015')
xlabel('Día')
ylabel('PRS absoluto')
t_a1=datenum([2014 7 1 0 0 0]); % transforma esa fecha a calendario juliano
t_a2=datenum([2014 7 31 0 0 0]);
dias=t_a1:1:t_a2;
set(gca,'XTick',dias)
datetick('x','dd','keepticks')

%% Predicción de mareas

%Periodo para predicir comportamiento Estacion Coronel_CL 02-07-2015 a 01-08-2015
(Mes cualquiera)
t_1=datenum([2006 7 10 0 0 0]); % transforma esa fecha a calendario juliano
t_2=datenum([2006 7 16 23 10 0]);
tim_pp=t_1:(t_2-t_1)/(10080-1):t_2;

%Obtnección de nivel del mar para el periodo seleccionado

bp_2010=t_predic(tim_pp,TIDESTRUC_V.name,TIDESTRUC_V.freq,TIDESTRUC_V.ti
decon);
days=t_1:1:t_2;
bp_2010t=bp_2010';

%% Gráficos

```

```
load tiempomc
load datos_prsmc

%Gráfico de nivel del mar según T_TIDE (Predicción)
figure(2);
plot(tim_pp,bp_2010,'r','LineWidth',2);
grid on
title('Predicción del nivel del mar según T-TIDE MATLAB')
set(gca,'XTick',days)
datetick('x','dd','keepticks')
xlabel('Dias')
ylabel('Nivel del mar (m)')
```