

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Implementación del modelo ADCIRC para el cálculo de mareas y corrientes en
el Golfo de Guayaquil

Andrés Aurelio Salazar Cueva

Jesús Portilla, Ph.D., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, Ecuador

Diciembre, 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Implementación del modelo ADCIRC para el cálculo de mareas y corrientes en
el Golfo de Guayaquil

Andrés Aurelio Salazar Cueva

Jesús Portilla, Ph.D.
Director de la Tesis

Juan Carlos de los Reyes, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Carlos Luis Pérez, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, Ph.D.
Coordinador Ingeniería Mecánica

Ximena Córdova, Ph.D.
Decana Escuela de Ciencias
Colegio de Ciencias e Ingenierías

Quito, diciembre 2014

©DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Andrés Aurelio Salazar Cueva

C. I.: 1719877134

Lugar y fecha: Quito, diciembre 2014

Agradecimientos

Agradezco especialmente a mi tutor de tesis, Jesús Portilla, por su paciencia, soporte y enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo.

A mis padres y a mi hermana por darme siempre todo el apoyo que necesito.

Y a mis amigos y compañeros por estar junto a mí brindándome amistad incondicional y grandiosos momentos.

Resumen

En el presente trabajo se describe la implementación del modelo de circulación y transporte de fluidos ADCIRC en el Golfo de Guayaquil. El objetivo es contar con una herramienta para simular las mareas en la zona de estudio. Para esta simulación es fundamental contar con datos batimétricos precisos y condiciones de contorno en aguas profundas. Los datos batimétricos fueron obtenidos de la digitalización de cartas náuticas mientras que las condiciones de contorno en aguas profundas se obtuvieron de del modelo TPXO (OSU Tidal Inversion Model). A través de un análisis de frecuencias utilizando la transformada rápida de Fourier se obtuvieron los constituyentes principales de la marea. Los resultados obtenidos muestran coherencia con valores observados en sus periodos representativos, diurnos, semidiurnos, de sicigia y cuadratura. Estos resultados muestran que el modelo ADCIRC puede ser utilizado exitosamente para modelizar las mareas en la zona de estudio, sin embargo, para su aplicación definitiva y validación es necesaria una comparación más exhaustiva con datos de campo.

Abstract

The present document describes the implementation of the Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters (ADCIRC) in the Gulf of Guayaquil. The final purpose is to create a computational tool to simulate tides within the area of study. For the simulation to run, accurate bathymetric data and boundary conditions in deep waters are essential. Bathymetric values were obtained from digitized nautical charts while boundaries conditions were specified by using the TP-XO (OSU Tidal Inversion) model. It was possible to obtain the properties of the principal tidal constituents for the area by applying frequency analysis and Fourier analysis (FFT). Results obtained from the model are coherent with observed values in the diurnal, semidiurnal, neap and spring tide periods. These results show that the ADCIRC model can be used successfully to predict tides within the area; however, a comprehensive and exhaustive analysis with observed values is required for its permanent application.

Índice general

1. Introducción	10
1.1. Sitio de estudio	11
1.2. Marco Teórico	13
1.2.1. Descripción de Mareas y Corrientes	13
1.2.2. Herramientas numéricas	15
2. ADCIRC	17
2.1. Ecuaciones y procesos físicos	18
2.2. Implementación	23
2.2.1. Instalación	24
2.2.2. Archivos de entrada y salida	25
3. Diseño de mallas computacionales	28
3.1. Procesamiento de datos batimétricos crudos	28
3.2. Diseño de mallas usando BlueKenue™	32
3.2.1. Mallas de prueba	33
3.2.2. Mallas con batimetría real	36
4. Reducción del modelo y condiciones de contorno	42
4.1. Reducción del modelo	42
4.1.1. Filtro de batimetría	43
4.2. Condiciones de contorno	47
4.2.1. Caudal de entrada del río Guayas	49
5. Condiciones de contorno en mar abierto	51
5.1. Requerimientos de las condiciones de contorno	51
5.2. Obtención de series de tiempo de mareas	52
5.3. Determinación de zonas de niveles de marea homogéneas	55
5.4. Análisis de series de tiempo usando FFT	57
5.5. Condiciones de contorno finales	63
6. Implementación final y resultados	65
6.1. Implementación final	65
6.2. Comparación con datos históricos	69

	9
7. Resumen, conclusiones y trabajo futuro	74
A. Archivo fort.15	78
Bibliografía	82

Capítulo 1

Introducción

La medición y predicción de mareas es de gran importancia. Ingenieros y científicos utilizan datos de niveles de agua para propósitos tanto comerciales como recreativos; estos datos son necesarios para el diseño y construcción de puentes y muelles, manejo de tráfico marino, pesca, surf, entre otras actividades. Los sistemas de información de mareas son de vital relevancia para los ecologistas, pues las mareas transportan animales y plantas hacia aguas profundas y conocer estos fenómenos permite desarrollar proyectos de restauración de hábitats (NOAA, 2008, 2014). Por esta razón, se han desarrollado numerosos modelos de predicción del fenómeno de mareas.

El presente trabajo describe la implementación del modelo de circulación ADCIRC para la simulación de mareas en el Golfo de Guayaquil. El objetivo es desarrollar una herramienta de cálculo de variables fundamentales (niveles de agua y velocidad), que son la base para la descripción de otros procesos físicos que se llevan a cabo en el golfo, como transporte de sedimentos, procesos biológicos, fenómenos de contaminación, erosión costera, hábitats marinos, entre otros procesos.

El alcance de este trabajo comprende el proceso de instalación del modelo ADCIRC en sistema Linux (capítulo 2), el procesamiento de datos, que incluye la definición de líneas de costa y batimetría (capítulo 3), el diseño y desarrollo de las mallas computacionales (capítulo 3), la adquisición y análisis de las condiciones de contorno (capítulos 4 y 5) y una simulación preliminar con su respectivo análisis de resultados (capítulo 6).

1.1. Sitio de estudio

El Golfo de Guayaquil está ubicado en Ecuador; país sudamericano con salida al Océano Pacífico. Este golfo es un sitio de gran importancia para el Ecuador en términos socio-económicos; alberga a la ciudad de Guayaquil, la más grande del Ecuador, y a la cuenca del río Guayas. Esta cuenca abarca 12 provincias y se divide en seis subcuencas que en total suman una extensión aproximada de 53,299 km², acogiendo a aproximadamente el 45 % de la población nacional. Es un área de vital relevancia para el desarrollo del país pues es clave para el comercio, agricultura, ganadería, pesca, turismo y minería (Montaño y Sanfeliu, 2008).

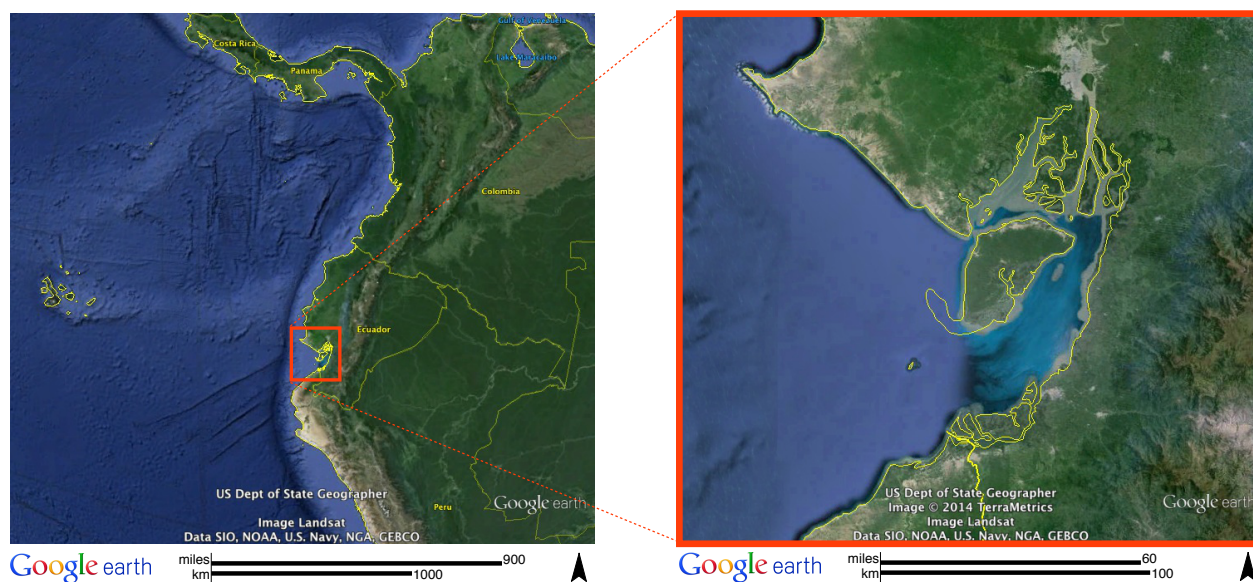


Figura 1.1: Sitio de estudio

Además, el Golfo de Guayaquil es el estuario tropical más grande de la costa oeste sudamericana. Se extiende aproximadamente por 12000 km², desde Cabo Blanco al sur hasta la puntilla de Santa Elena al norte (Jiménez, 1983). En el ámbito de la agricultura, el área del Golfo de Guayaquil contribuye a la producción de arroz, caña de azúcar, maíz, camarón, banano, palma africana, cacao, pesca, café y ganado. Es la zona de mayor producción pesquera dentro del país y es lugar de cultivo tanto de frutas exóticas como de vegetales medicinales (Montaño y Sanfeliu, 2008).

El sistema portuario basado en Guayaquil consiste de 16 terminales portuarios privados, los cuales mueven aproximadamente el 89 % de las exportaciones e importaciones nacionales (excluyendo el petróleo). Asimismo, existen campos gasíferos en la zona (como el campo Amistad en el bloque 6) y, según Cobos y Montenegro (2010), la zona es muy atractiva para una posterior exploración de yacimientos y extracción de hidrocarburos.

En términos medio-ambientales, en el Golfo de Guayaquil existen especies únicas de animales; así como también tierra, vegetación, fauna y paisajes que son muy valorados por su atractivo turístico. Estos atractivos están “en peligro de desaparecer por falta de inversión e incentivos para su estudio y por el deterioro del medio ambiente” (Montaño y Sanfeliu, 2008).

Otro factor muy importante a considerar es la sedimentación. Al norte de la ciudad de Guayaquil se encuentra la unión de los ríos Daule, Vinces y Babahoyo para formar el Río Guayas. Este descarga aproximadamente 30 mil millones de metros cúbicos de agua al año (Montaño y Sanfeliu, 2008). Todo aporte sedimentario proviene de las seis subcuencas y se transporta material categorizado como de tamaño medio, fino y muy fino. Gran parte de este sedimento consiste de arenas limosas, fragmentos de concha y lodo (CAAM, 1996). Sin embargo, según la Cámara Marítima del Ecuador CAMAE (2013), la tala de árboles y el mal uso del suelo en toda la cuenca hidrográfica a causado una tasa promedio anual de erosión laminar de 0.5 mm, equivalente a más de 15 millones de toneladas métricas de sedimentos. La erosión laminar es el tipo de erosión mas perjudicial pues reduce la fertilidad de la tierra (Tapia, 2012). Además, se incrementa “ el riesgo potencial de inundación en las áreas bajas (. . .) especialmente en la parte norte de la ciudad de Guayaquil” (CAMAE, 2013). Por otro lado, la baja profundidad afecta a la navegación, haciendo necesarios procesos de dragado que implican también un alto costo económico.

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Descripción de Mareas y Corrientes

La superficie del océano se encuentra expuesta a diferentes perturbaciones ocasionadas por fenómenos de diferente naturaleza. Estas se manifiestan como ondas con escalas de tiempo y espacio que varían en varios órdenes de magnitud (ondas capilares, olas de viento, mareas, tsunamis, entre otros) (Kowalik y Luick, 2013). Una de las más importantes son las mareas. Estas son provocadas principalmente por la atracción gravitacional de la luna y el sol sobre la Tierra, y se ven afectadas por otras fuerzas como la de Coriolis, las diferencias de presión atmosférica y de salinidad, etcétera (Nielsen, 2012). Las mareas se presentan en forma oscilatoria (sinusoidal) y su frecuencia, amplitud y fase dependen de la configuración batimétrica del sitio (Nielsen, 2012).

En referencia a las fuerzas gravitacionales, la atracción de la luna deforma la superficie de los océanos de manera que se crean dos abultamientos de agua en la superficie. Una de estos abultamientos se produce en la dirección de la luna y el otro en la dirección contraria. Cuando la tierra gira, estos abultamientos mantienen sus posiciones originales (en el eje del satélite), por lo que “un observador fijo en la superficie de la Tierra verá pasar un abultamiento (marea alta) (...) dos veces por cada día lunar” (Nielsen, 2012). Cuando se alinean el sol y la luna con la Tierra, ocurren mareas mayores (mareas de sicigia o viva); mientras que cuando están en ángulo recto las mareas presentan intensidad mínima (marea de cuadratura o muerta) (Kowalik y Luick, 2013; Stewart, 1975).

Ya que las mareas resultan principalmente de la rotación y atracción del sol y la luna con respecto a la Tierra (fenómenos completamente predecibles) se podría suponer que las mareas también se pueden predecir con precisión. Sin embargo, existen otros factores que influyen en la magnitud de las mareas locales como la profundidad, el contorno irregular de los continentes, el viento y cambios de presión atmosférica. Además, factores relacionados al cambio climáti-

co, como cambio de temperatura y salinidad, pueden provocar más variaciones (Nielsen, 2012; Kowalik y Luick, 2013).

Aún así, existen formas teóricas de representar y modelar las mareas, generalmente en el contexto de series de Fourier, usando una serie del tipo (Nielsen, 2012):

$$\zeta = \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t - \phi_n) \quad (1.1)$$

donde ζ representa el nivel de agua, t representa el tiempo y A_n , ω_n y ϕ_n representan amplitudes, frecuencias angulares y fases, respectivamente. Por otro lado, Giardino (2008) expone una ecuación más adecuada para la simulación numérica del fenómeno:

$$\zeta = \sum_{n=1}^N f_n A_n \cos[\omega_n t - G_n + (V_n + u_n)] \quad (1.2)$$

donde t es el tiempo en el meridiano de Greenwich (GMT), f_n es el factor nodal, G_n es la diferencia en la fase de la marea local con respecto a la marea en Greenwich, V_n es la parte variable de la fase de la marea en Greenwich y u_n es un valor de ajuste nodal. El término $(V_n + u_n)$ representa un argumento de equilibrio.

En las dos ecuaciones anteriores, el índice n representa a cada componente de la serie. Cada uno de estos componentes son los constituyentes de la marea, y de la superposición de todos los constituyentes se obtienen los valores observables (Giardino, 2008). Para la predicción de mareas con precisión aceptable se utilizan hasta más de 40 constituyentes (Nielsen, 2012), pero existen algunos constituyentes principales que son los más relevantes. Estos se muestran en la tabla 1.1 (Kennish, 1994; Kowalik y Luick, 2013).

Como se ha mencionado, además de la marea, otros procesos de relevancia para la descripción de la superficie del océano incluyen fenómenos atmosféricos como gradientes de presión a escala meso, y el efecto de la transferencia de momento del viento, que dan lugar a las llamadas mareas atmosféricas (surge) y otros fenómenos que involucran resonancia con la configuración

Tabla 1.1: Constituyentes principales de la marea

Símbolo	Constituyente	Periodo(h)	Descripción
M_2	Semidiurno	12,4	Constituyente lunar principal
S_2	Semidiurno	12,0	Constituyente solar principal
N_2	Semidiurno	12,7	Constituyente lunar elíptico
K_2	Semidiurno	11,9	Constituyente solilunar
K_1	Diurno	23,9	Constituyente solilunar
O_1	Diurno	25,8	Constituyente lunar principal
P_1	Diurno	24,1	Constituyente solar principal
M_1	Mareas de largo periodo	327,9	Constituyente quincenal principal

batimétrica como “seiges”. Por otro lado, están los efectos de la fuerza de Coriolis, y los efectos baroclínicos (debidos a las diferencias de densidad) y termoclínicos (debido a las diferencias de temperatura) (Pugh, 1996; Kowalik y Luick, 2013).

1.2.2. Herramientas numéricas

Gracias al desarrollo de los recursos computacionales, los métodos numéricos han ganado relevancia en las últimas décadas pues permiten simular condiciones complejas con precisión y en periodos de tiempo relativamente cortos. Ya que muchos fenómenos físicos se modelan mediante sistemas de ecuaciones diferenciales, cuyas soluciones analíticas pueden ser complicadas. Los métodos numéricos resultan por lo tanto ideales para resolver problemas que involucran ecuaciones diferenciales dependientes del tiempo (Giardino, 2008).

En la actualidad, los modelos numéricos se encuentran bastante desarrollados y con ellos se puede obtener fácilmente resultados numéricos y gráficos. Sin embargo, se debe tener entendimiento de los procesos y las ecuaciones que se resuelven en segundo plano, pues “la confiabilidad de los modelos numéricos está estrechamente relacionada a una buena calibración y validación del modelo” (Giardino, 2008).

ADCIRC es un modelo numérico que permite simular procesos hidrodinámicos; resuelve desde simples problemas de movimiento de aguas en dos dimensiones hasta problemas de transporte de sedimentos y predicción de tormentas muy complejos. La aplicación de ADCIRC en el

Golfo de Guayaquil se detalla en el capítulo 2.

Capítulo 2

ADCIRC

Para la simulación a realizarse se escogió el software de modelización ADCIRC (*An **AD**vanced **CIR**culation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters*). ADCIRC “es un sistema de programas computacionales para resolver problemas de circulación y transporte en flujos de superficie libre dependientes del tiempo, (...) utilizando el método de elementos finitos en el espacio, y permitiendo el uso de mallas altamente flexibles o no estructuradas”(ADCIRC, 2014). La versión actual del programa utilizada en la presente implementación es 51,12.

ADCIRC es ampliamente utilizado en la comunidad científica e incluso por organizaciones como la NOAA o el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Resuelve modelos en coordenadas cartesianas o esféricas sean en dos o tres dimensiones. Entre algunas de las aplicaciones de ADCIRC se puede mencionar la predicción de tormentas e inundaciones, la modelización de mareas y circulación por viento, estudios de transporte de larvas, operaciones marinas cerca de la costa, estudios de disposición de material y viabilidad de operaciones de dragado

2.1. Ecuaciones y procesos físicos

De forma general, ADCIRC resuelve las ecuaciones para un fluido en movimiento sobre la tierra en rotación. Estas ecuaciones son planteadas y formuladas utilizando los principios de presión hidrostática y las aproximaciones de Boussinesq (ADCIRC, 2014). Para un modelo simple en el que solo se necesitan niveles y velocidades de mareas, ADCIRC resuelve específicamente dos conjuntos de ecuaciones: la Ecuación Generalizada para Continuidad de Olas (*GWCE: Generalized Wave Continuity Equation*) y las ecuaciones de momento.

Se puede obtener la ecuación GWCE a partir de un conjunto de ecuaciones para el desplazamiento y velocidad (Luettich *et al.*, 1992). Para el caso de dos dimensiones, estas ecuaciones en su forma conservativa, son:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial UUH}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} - fVH = \\ -H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + M_x + D_x + B_x + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial VUH}{\partial x} + \frac{\partial VVH}{\partial y} - fUH = \\ -H \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + M_y + D_y + B_y + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde:

ζ = elevación

α = factor de elasticidad de la tierra ($\alpha = 0,69$)

$B_{x,y}$ = fuerzas baroclínicas

$D_{x,y}$ = momentos de dispersión

$\eta(x,y,t)$ = potencial de equilibrio newtoniano

$M_{x,y}$ = difusión horizontal de momentos

$U(x,y,t), V(x,y,t)$ = velocidades horizontales

Reed (1990) en Luetlich *et al.* (1992) propone la ecuación 2.4 para definir el potencial de equilibrio η .

$$\eta(\lambda, \varphi, t) = \sum_{n,j} C_{jn} f_{jn}(t_0) L_j(\varphi) \cos \left[\frac{2\pi(t - t_0)}{T_{jn} + j\lambda + v_{jn}(t_0)} \right] \quad (2.4)$$

donde

λ, φ = longitud y latitud en grados, respectivamente.

$j = 0, 1, 2$ = especie de la marea ($j = 0$, de declinación; $j = 1$, diurna; $j = 2$, semidiurna)

C_{jn} = constante que caracteriza la amplitud del constituyente n de la especie j .

f_{jn} = factor nodal dependiente del tiempo.

v_{jn} = argumento astronómico dependiente del tiempo.

$$L_0 = 3 \sin^2 \varphi - 1$$

$$L_1 = \sin(2\varphi)$$

$$L_2 = \cos^2(\varphi)$$

t_0 = tiempo referencial.

T_{jn} = periodo del constituyente n de la especie j .

Derivando la ecuación 2.1 con respecto al tiempo y las ecuaciones 2.2 y 2.3 con respecto a x y y respectivamente, se puede obtener después de sustituir:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_o \frac{\partial \zeta}{\partial t} \tag{2.5} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\frac{\partial UUH}{\partial x} - \frac{\partial UVH}{\partial y} + fVH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + M_x + D_x + B_x + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} + \tau_o UH \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{\partial UVH}{\partial x} - \frac{\partial VVH}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + M_y + D_y + B_y + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} + \tau_o VH \right\} \\
& = 0
\end{aligned}$$

Nótese que en la ecuación 2.5 se añadió también una constante τ_o . Como siguiente paso, se expanden los términos de difusión horizontal de momentos M_x y M_y en las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.5 y se obtienen las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8. El término E_{h2} es un coeficiente generalizado de difusión.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_o \frac{\partial \zeta}{\partial t} \tag{2.6} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\frac{\partial UUH}{\partial x} - \frac{\partial UVH}{\partial y} + fVH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + D_x + B_x + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} + \tau_o UH \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{\partial UVH}{\partial x} - \frac{\partial VVH}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + D_y + B_y + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} + \tau_o VH \right\} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left[E_{h2} \left(\frac{\partial^2 UH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial y^2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[E_{h2} \left(\frac{\partial^2 VH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 VH}{\partial y^2} \right) \right] = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] \tag{2.7} \\
& + \frac{1}{H} E_{h2} \left[\frac{\partial^2 UH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial y^2} \right] + \frac{D_x}{H} + \frac{B_x}{H} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o H}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = & - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] \\ & + \frac{1}{H} E_{h2} \left[\frac{\partial^2 VH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 VH}{\partial y^2} \right] + \frac{D_y}{H} + \frac{B_y}{H} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o H} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Finalmente, se incluye en las ecuaciones un tensor de arrastre. Se definen los siguientes términos:

$$\tau_* \equiv \frac{C_f(U^2 + V^2)^{1/2}}{H}$$

$$f' \equiv f + \tau_* \sin(\gamma)$$

$$\tau'_* \equiv \tau_* \cos(\gamma)$$

donde $C_f = g/C^2$ (C es el coeficiente de fricción de Chezy) y γ es el ángulo medido entre el vector de velocidad y el vector de esfuerzo. Reemplazando estos últimos términos en las ecuaciones 2.6, 2.7, 2.8, expandiendo las derivadas parciales y reorganizando términos se obtiene el conjunto de ecuaciones finales:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_o \frac{\partial \zeta}{\partial t} & \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ U \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial U}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} + f' VH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] \right. & \\ - E_{h2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial t} + D_x + B_x + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} + (\tau_o - \tau'_*)UH & \left. \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial V}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} - f' UH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] \right. & \\ - E_{h2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y \partial t} + D_y + B_y + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} + (\tau_o - \tau'_*)VH & \left. \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - f'V = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] \\ + \frac{1}{H} E_{h2} \left[\frac{\partial^2 UH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial y^2} \right] + \frac{D_x}{H} + \frac{B_x}{H} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o H} - \tau'_* U \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - f'U = - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] \\ + \frac{1}{H} E_{h2} \left[\frac{\partial^2 VH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 VH}{\partial y^2} \right] + \frac{D_y}{H} + \frac{B_y}{H} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o H} - \tau'_* V \end{aligned} \quad (2.11)$$

La ecuación 2.9 es la GWCE mencionada anteriormente y las ecuaciones 2.10 y 2.11 son ecuaciones de momentos en x y y respectivamente. Posteriormente, se utiliza el método de Galerkin de residuos ponderados para obtener expresiones ponderadas por una función ϕ_i e integradas sobre un dominio Ω (Luettich *et al.*, 1992). La ecuación generalizada GWCE final es:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} + \left\langle \tau_o \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} + \left\langle gh \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right\rangle_{\Omega} + \left\langle gh \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right\rangle_{\Omega} \\ + E_{h2} \left\langle \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial t}, \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right\rangle_{\Omega} + E_{h2} \left\langle \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y \partial t}, \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right\rangle_{\Omega} \\ = \left\langle U \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right\rangle_{\Omega} + \left\langle V \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right\rangle_{\Omega} + \left\langle W_x, \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right\rangle_{\Omega} + \left\langle W_y, \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right\rangle_{\Omega} \\ - \int_{\Gamma_Q} \left(\frac{\partial Q_{n*}}{\partial t} + \tau_o Q_{n*} \right) \phi_i d\Gamma \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde Q_{n*} es el flujo a través de la frontera y Γ es la frontera del dominio Ω . Los términos W_x y W_y se definen como:

$$W_x \equiv -UH \frac{\partial U}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} + f'VH - \frac{g}{2} \frac{\partial \zeta^2}{\partial x} - gH \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_s}{\rho_o g} - \alpha\eta \right) + D_x + B_x + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} + (\tau_o - \tau'_*)UH$$

$$W_y \equiv -UH \frac{\partial V}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} - f'UH - \frac{g}{2} \frac{\partial \zeta^2}{\partial y} - gH \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_s}{\rho_o g} - \alpha \eta \right) + D_y + B_y + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} + (\tau_o - \tau'_*) VH$$

La notación $\langle \rangle$ se define como

$$\langle a, b \rangle \equiv \iint_{\Omega} a b d\Omega \quad (2.13)$$

De igual forma, las ecuaciones finales de momento son

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial U}{\partial t}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} - \langle f'V, \phi_i \rangle_{\Omega} + E_{h2} \left\langle \frac{\partial UH}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\phi_i}{H} \right) \right\rangle_{\Omega} + E_{h2} \left\langle \frac{\partial UH}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\phi_i}{H} \right) \right\rangle_{\Omega} \\ = \left\langle \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha \eta) \right] - \frac{\tau_{sx}}{\rho_o H} + \tau'_* U, \phi_i \right\rangle_{\Omega} - \left\langle U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} + \left\langle \frac{D_x}{H} + \frac{B_x}{H}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial V}{\partial t}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} + \langle f'U, \phi_i \rangle_{\Omega} + E_{h2} \left\langle \frac{\partial VH}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\phi_i}{H} \right) \right\rangle_{\Omega} + E_{h2} \left\langle \frac{\partial VH}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\phi_i}{H} \right) \right\rangle_{\Omega} \\ = \left\langle \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_o} + g(\zeta - \alpha \eta) \right] - \frac{\tau_{sy}}{\rho_o H} + \tau'_* V, \phi_i \right\rangle_{\Omega} - \left\langle U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} + \left\langle \frac{D_y}{H} + \frac{B_y}{H}, \phi_i \right\rangle_{\Omega} \end{aligned} \quad (2.15)$$

ADCIRC resuelve las ecuaciones 2.12, 2.14 y 2.15 para cada nodo i , obteniendo valores de elevación ζ y velocidad U, V .

2.2. Implementación

En esta sección se describirá el proceso de instalación del software ADCIRC en un sistema operativo Linux. Además, se explicará el requerimiento de archivos básicos requeridos para

correr una simulación

2.2.1. Instalación

ADCIRC se distribuye en un solo archivo comprimido, llamado `adc51_12.tar`. Este archivo y todos sus subdirectorios deben ser descomprimidos. Posteriormente, utilizando Terminal, se accede al subdirectorio `work` mediante

```
cd work
```

Se procede a ejecutar el comando

```
./config.guess
```

para obtener información acerca de la arquitectura de la plataforma. Posteriormente, se ejecuta un comando `make` para compilar ADCIRC y crear un ejecutable. Dependiendo del sistema, se debe escoger un *flag*, una palabra clave que especifica que compiladores de utilizarán. En el mismo directorio `work` existe un archivo llamado `cmplrflags.mk`, el cual permite escoger un *flag* adecuado según la máquina que se esté utilizando. En este caso, se escogió el *flag* `gnu`, correspondiente a los compiladores de distribución libre GNU. El comando `make` se ejecuta de la siguiente manera:

```
makefile adcirc compiler=gnu
```

Si se desea correr ADCIRC en paralelo (PADCIRC), se deben correr los siguientes comandos en el siguiente orden:

```
makefile adcirc compiler=gnu  
makefile metis compiler=gnu  
makefile adcprep compiler=gnu  
makefile padcirc compiler=gnu  
makefile adcpost compiler=gnu
```

PADCIRC necesita de una malla descompuesta en un número de partes (dominios) igual al número de procesadores que se utilizarán. Esta se consigue con el ejecutable `adcprep` que depende de las librerías `metis`. El ejecutable `padcirc` realiza el procesamiento del modelo para cada dominio en paralelo y el ejecutable `adcpost` une los resultados de cada dominio y los reensambla en un solo conjunto de archivos. PADCIRC es muy útil cuando el número de nodos y elementos es muy alto, o cuando se requieren simular largos periodos de tiempo.

2.2.2. Archivos de entrada y salida

Para una simulación básica que involucre solo mareas, ADCIRC necesita dos archivos de entrada:

- `fort.14`: Este archivo se denomina *ADCIRC Grid and Boundary Information File* y es donde se especifica la estructura de la malla, sus nodos, elementos y el tipo de fronteras. También se especifica un valor de profundidad para cada nodo. El archivo `fort.14` está compuesto de la siguiente manera:
 - **Datos:** Nombre de la malla, número de nodos y elementos.
 - **Lista de nodos numerados:** Estos pueden ser especificados tanto en coordenadas *xyz* como en valores de latitud y longitud y elevación (valores positivos de elevación corresponden a profundidad batimétrica y valores negativos corresponden a tierra).
 - **Lista de elementos finitos:** Lista de 4 columnas especificando número de elemento, tipo de elemento (triangular) y los números de los tres nodos que lo forman.
 - **Frontera:** en ADCIRC puede especificar las fronteras del modelo de dos formas:
 - Frontera de flujo: Fronteras con flujo de entrada como ríos u océanos, de flujo de salida como diques, o flujos iguales a cero como islas o continentes.
 - Frontera de elevación: Fronteras con niveles de agua preestablecidos, los cuales pueden variar de forma periódica (mareas) o no periódica.

- `fort.15`: Este archivo se denomina *Model Parameter and Periodic Boundary Condition File* y es donde se especifican todos los parámetros que utiliza la simulación. Entre estos parámetros están:
 - **Parámetros de la simulación:** Tipo de análisis, tiempo total de simulación, pasos de tiempo (*time step*), tipo de rampa para fronteras, entre otros.
 - **Parámetros de fronteras de elevación periódica:** Si en `fort.14` se especificaron fronteras de elevación periódica (mareas), aquí se especifican amplitudes, fases y periodos para cada uno de los constituyentes.

Los dos archivos `fort.14` y `fort.15` permiten correr una simulación básica con constituyentes de mareas como únicas entradas. Sin embargo, para la simulación de mareas en el Golfo de Guayaquil, se requiere de un archivo extra que especifique el flujo (o flujos) de entrada del río Guayas:

- `fort.20`: Este archivo se denomina *Non-periodic Normal Flow Boundary Condition File* y es donde se especifica el flujo de entrada en m^2/s , para cada uno de los nodos de la frontera de flujo de entrada especificada en `fort.14`.

En esta simulación se utilizarán estos tres archivos, los cuales deben ser creados después de desarrollar la malla. El método que se usó para crear la malla se describe en el capítulo 3.

Una vez terminada la simulación, ADCIRC retorna varios archivos de salida. Entre los más relevantes, están:

- `fort.16`: Este archivo se denomina *General Diagnostic Output* y muestra toda la información recibida de los archivos `fort.14` y `fort.15`. Revisar este archivo es una excelente forma de verificar que ADCIRC está interpretando los datos de entrada de manera correcta.
- `fort.63`: Este archivo se llama *Elevation Time Series at All Nodes in the Model Grid* y

proporciona, para cada nodo de la malla, la elevación ζ en un cierto tiempo. Esta se guarda cada cierto número de *time steps*; esta frecuencia se especifica en el archivo `fort.15`.

- `fort.64`: Este archivo se denomina *Depth-averaged Velocity Time Series at All Nodes in the Model Grid* y proporciona dos valores de velocidad, U y V para cada nodo en la malla en un cierto tiempo. De igual forma, la frecuencia de guardado se especifica en el archivo `fort.15`.

Dependiendo de la complejidad de la simulación se podrían obtener archivos de salida con datos de presión atmosférica, esfuerzos debidos a viento, concentración de sedimentos, entre otras variables. Sin embargo, para los propósitos de esta simulación, se necesitarán únicamente los archivos `fort.63` y `fort.64`.

Capítulo 3

Diseño de mallas computacionales

El preprocesamiento es el primer paso en un análisis numérico. En este capítulo se describe el procedimiento utilizado para convertir los datos crudos de batimetría al formato utilizado por el modelo. También se muestra la construcción de la malla numérica, partiendo de un mallado básico hasta llegar a una malla detallada y eficiente para la simulación.

3.1. Procesamiento de datos batimétricos crudos

Con el fin de obtener una malla para el archivo `fort.14`, se necesitan datos batimétricos que corresponden, en este caso, a datos de cartas náuticas digitalizadas. Los datos batimétricos en el Golfo de Guayaquil comprenden el espacio entre las coordenadas -1.7996 y -3.5002 latitud y -79.6046 y -81.7418 longitud. El área encerrada es de aproximadamente 108300 km^2 y encierra toda la cuenca del río Guayas, toda la línea costera de las provincias de Guayas y El Oro y parte de la línea costera de la provincia de Santa Elena. Los datos se obtuvieron en coordenadas xyz , con un total de 4465000 puntos en un archivo `.txt`.

Para la conversión a un formato de matriz que pueda operarse en entorno MATLAB, se utilizaría normalmente el comando `griddata`. Este comando interpola los datos xyz y retorna una matriz en la que cada entrada representa un valor de batimetría para cada valor de latitud y

longitud. Sin embargo, la gran cantidad de datos del archivo de batimetría hace que MATLAB no sea capaz de procesarlos, por lo que fue necesario realizar este proceso por medio de un script creado específicamente para este propósito (`GEO_GRILLE_TO_BATHYMETRY.m`). Así se obtuvo, en primer lugar, la resolución de los datos. Como se puede ver en la tabla 3.1, los datos batimétricos tienen una resolución espacial de $9,047 \times 10^{-4}$ grados de latitud y de $9,0030 \times 10^{-4}$ grados de longitud.

Tabla 3.1: Propiedades de los datos

Latitud máxima	-79.6046
Longitud máxima	-1.7996
Latitud mínima	-81.7418
Longitud mínima	-3.5002
Resolución en latitud (dy)	$9,047 \times 10^{-4}$
Resolución en longitud (dx)	$9,0030 \times 10^{-4}$

A partir de esto, y tomando en cuenta los valores máximos y mínimos de longitud y latitud, se armó una matriz con 1880 valores de latitud (filas) y 2374 valores de longitud (columnas). Cada entrada de esta matriz corresponde a un par de coordenadas a la que se le asigna su valor de batimetría. El resultado final es una matriz con 4463120 entradas, es decir, un 99,95 % de los datos originales.

Con esta matriz (`bathymetry.mat`), y con los correspondientes vectores de latitud y longitud, se pudo obtener una visualización de los datos en MATLAB mediante el comando `mesh`. La gráfica obtenida (3.1) es una imagen ráster pues a cada entrada de la matriz le corresponde a un valor de relieve. La gráfica muestra que en los datos existen no sólo datos de batimetría, sino también de elevación. Además, debido a la alta resolución, no se puede distinguir entre las partes que representen agua y las que representen tierra. Por esta razón, el siguiente paso fue eliminar, temporalmente, todo valor mayor a cero. El resultado se muestra en la figura 3.2, la cual muestra que existe gran detalle en el delta río Guayas. Los brazos y entradas del río están muy bien definidos y existen numerosas islas detalladas.

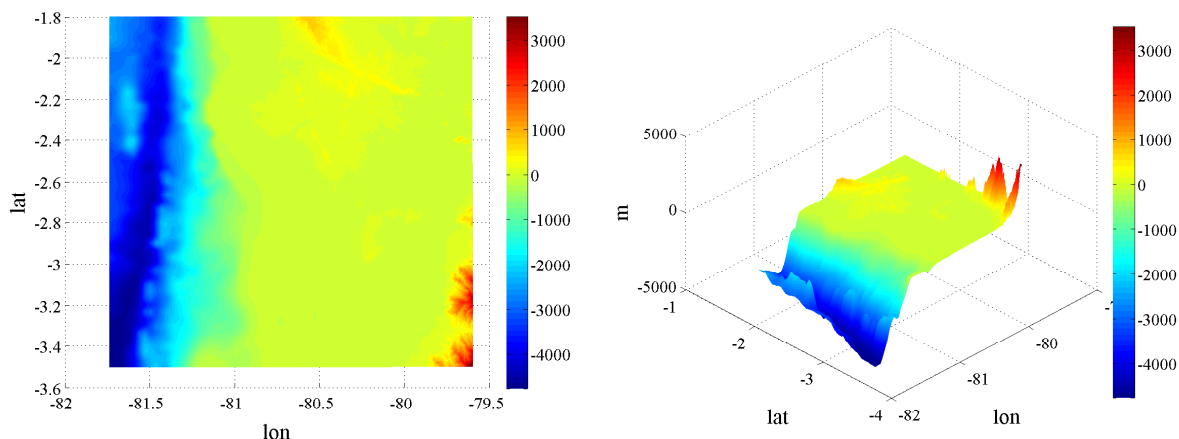


Figura 3.1: Datos de relieve

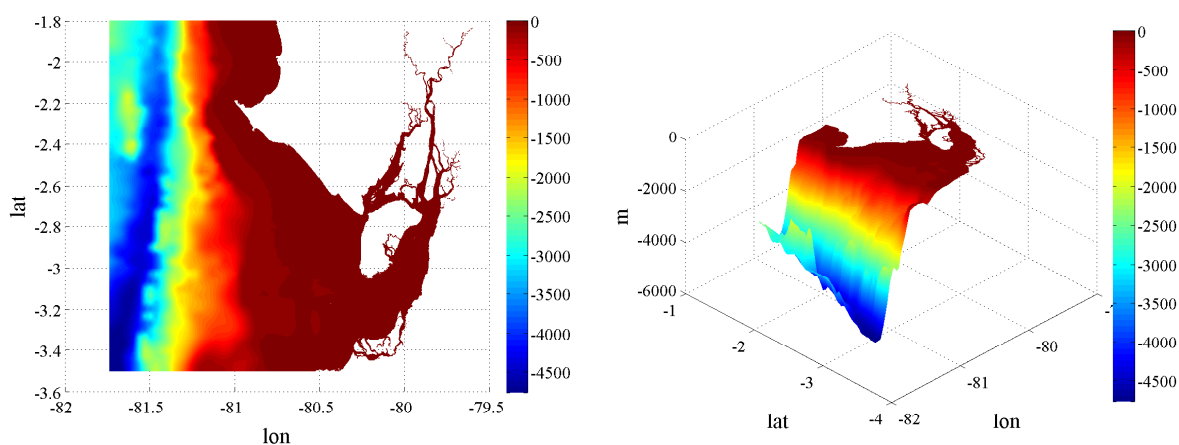


Figura 3.2: Datos de batimetría

Con el fin de definir los límites entre islas, continente y mar, es necesario obtener el contorno de todos estos elementos. Para ello, se escribió un script (`BATH_AND_ELEV_TO_BATH.m`) que barre cada fila de la matriz `bathymetry.mat` de izquierda a derecha. El algoritmo busca cambios de signo en el relieve; cuando se encuentra uno quiere decir que se ha encontrado una transición de mar a tierra y dicha entrada se marca. Al final, todas las entradas marcadas se trasladan en forma de números 1 a una matriz de ceros. Esta matriz se llama `contour.mat` y contiene, por lo tanto, los puntos de costa encontrados en la matriz `bathymetry.mat`. Una imagen ráster de la matriz `contour.mat` se observa en la figura 3.3.

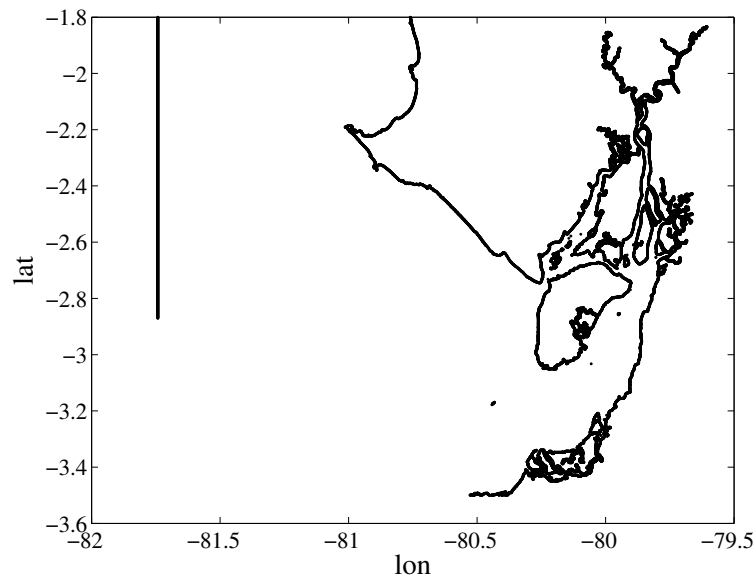


Figura 3.3: Contorno obtenido

Sin embargo, los programas que se utilizarán más adelante no admiten datos en formato ráster, sino que lo hacen en formato de imagen vectorial. Es decir, se necesita tener el contorno en coordenadas x y y . Con este fin se desarrolló un último script (`CONTOUR.m`) que barre la matriz `contour.mat` buscando los contornos y obteniendo sus coordenadas. El algoritmo funciona de la siguiente manera.

1. Se revisa todas las entradas de la matriz `contour.mat` hasta encontrar un contorno (un número 1)
2. Se sigue el contorno, almacenando las coordenadas del contorno en un vector.
3. Cuando el contorno regresa al lugar donde empezó (contorno de isla) o llega al filo de la matriz (contorno de continente) da por finalizado el contorno.
4. El algoritmo guarda el vector del contorno encontrado en un archivo y empieza desde el paso 1.

De esta forma, se obtuvo un archivo para el contorno del continente y un total de 63 archivos para el contorno de las islas, un archivo por isla. Estos archivos constan de dos columnas para

las dos coordenadas x y y (o latitud y longitud). Los puntos están ordenados de tal forma que si se los gráfica uniendo los puntos en dicho orden con una línea, se obtiene la forma del contorno. Algunos ejemplos se muestran en la figura 3.4. Estos gráficos son gráficos vectoriales y ya pueden ser utilizados para el preprocesamiento y diseño de mallas.

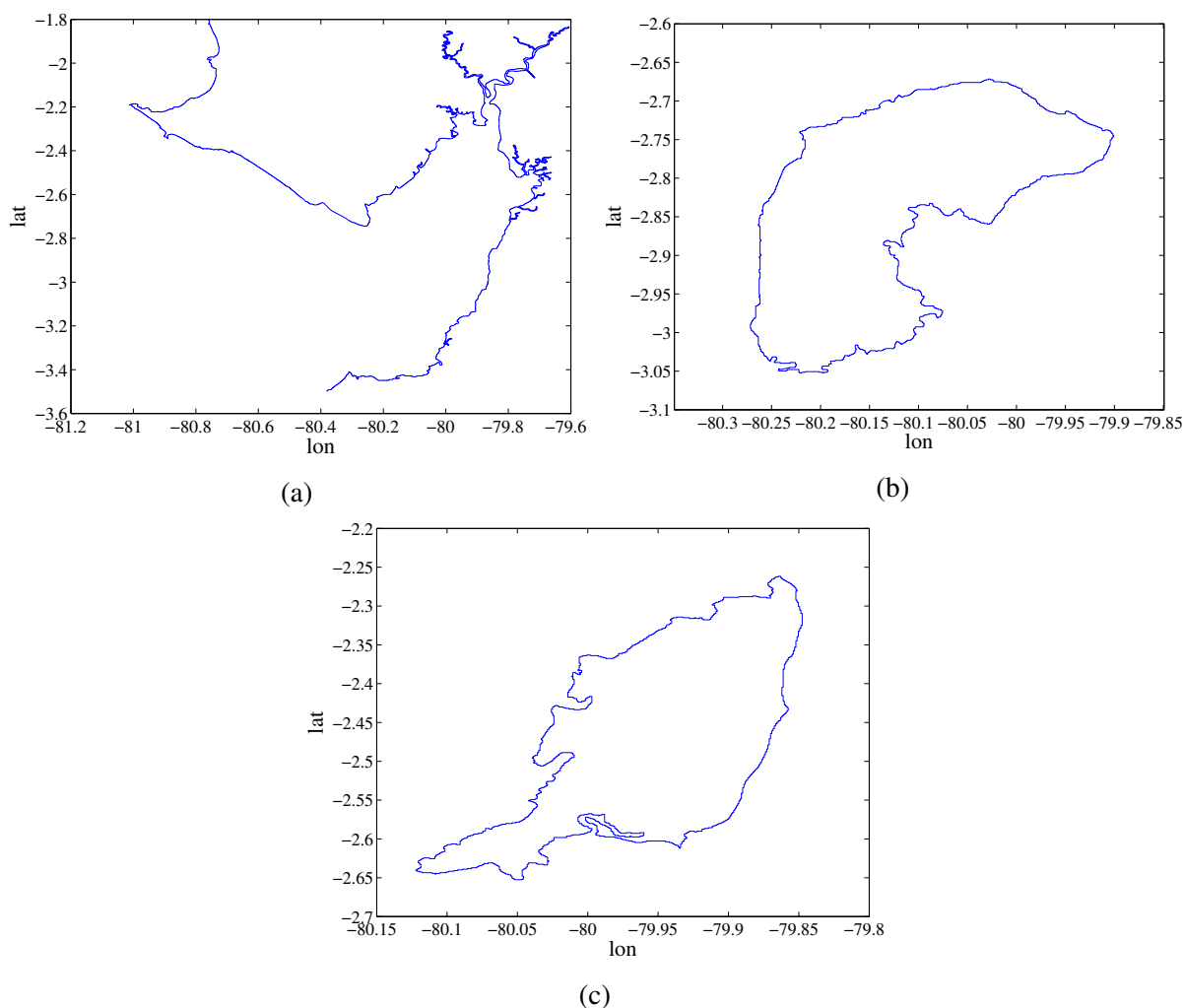


Figura 3.4: Contornos individuales

3.2. Diseño de mallas usando BlueKenueTM

Para el diseño de mallas se utiliza BlueKenueTM. Este software fue desarrollado por el Consejo Nacional de Investigación del gobierno de Canadá y es un programa de diseño de mallas y

visualización de resultados para varios modelos de fenómenos medio-ambientales (Government of Canada, 2012). Provee de una interfaz gráfica fácil de usar y admite los formatos de archivos más comunes. La principal característica de BlueKenue™ es que permite con gran facilidad crear mallas de distintas formas y distintas densidades.

Además de BlueKenue™ existen otras alternativas. El software *SMS Grid Generator* es una poderosa herramienta para el manejo de cualquier tipo de modelo hidráulico y es el líder en proveer soluciones de simulación en la industria (Aquaveo, LLC, 2013). Sin embargo, *SMS Grid Generator* no es software libre. En cambio BlueKenue™ es de libre distribución y, a pesar que ofrece menos prestaciones, contiene todas las herramientas necesarias para la construcción de este modelo.

El principal beneficio de implementar BlueKenue™ junto con ADCIRC es que, luego de crear la malla, esta puede ser exportada directamente en formato `fort.14`. Además, los archivos de salida de ADCIRC como `fort.63` y `fort.64` pueden ser importados directamente a BlueKenue™ para su posterior visualización y análisis.

3.2.1. Mallas de prueba

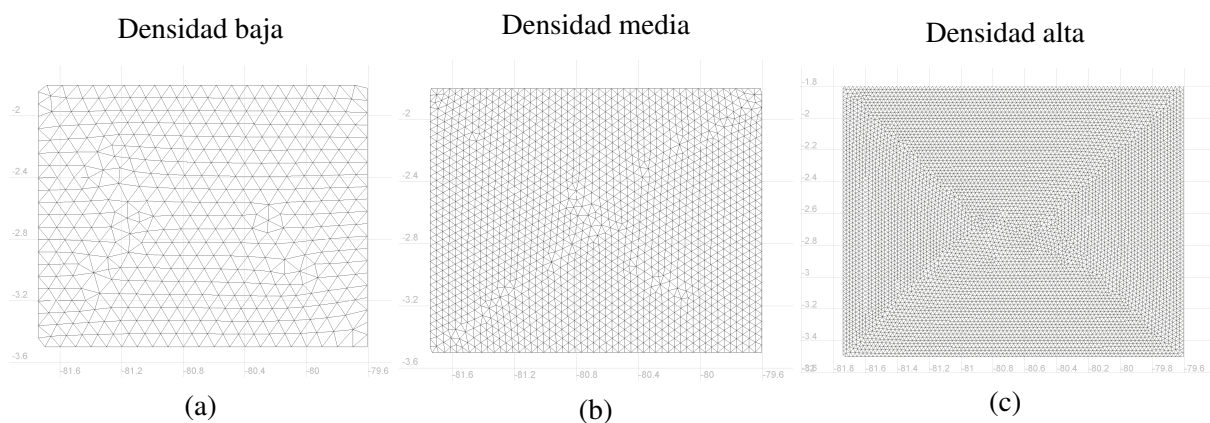
En esta subsección se describen algunas de las mallas básicas que se realizaron con el fin de familiarizarse con el programa. Como primer ejercicio, se realizó un modelo de dimensiones aproximadas y batimetría constante y se experimentó con la capacidad de BlueKenue™ para generar mallas de diferentes densidades. Posteriormente, se cambió la batimetría constante a una batimetría lineal y se utilizó el contorno de continente obtenido en la sección 3.1. Finalmente, se utiliza la batimetría real del modelo y se agregan los contornos de islas. Para todas estas pruebas preliminares se utilizan las mismas condiciones de contorno: elevación periódica en el borde izquierdo de 0.65 m de amplitud a una frecuencia de $1,4545 \times 10^{-4}$ rad/seg (periodo de 12 horas). Se corre esta simulación de prueba para un tiempo de cinco días.

Para fabricar el modelo de dimensiones aproximadas se construyó un rectángulo de las mis-

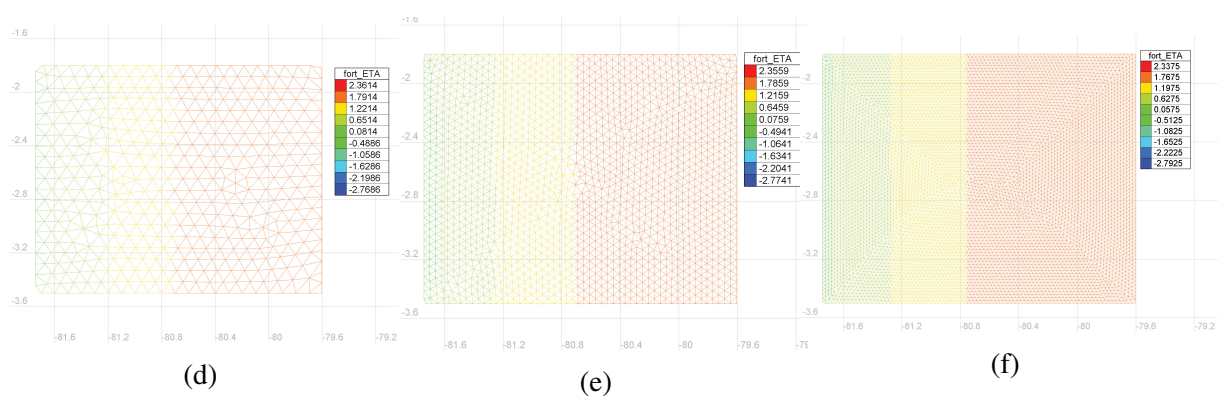
mas dimensiones del área mostrada en la figura 3.1 ($190 \text{ km}^2 \times 570 \text{ km}^2$) y se le asignó una batimetría constante de 50 m de profundidad. Se obtuvieron tres mallados de diferente densidad (figuras 3.5a, 3.5b y 3.5c) y un mallado de densidad variable, compuesto por las tres densidades anteriores (figura 3.6a). Las figuras 3.5d, 3.5e, 3.5f y 3.6b muestran los resultados de elevación de agua (ζ) mientras que las figuras 3.5g, 3.5h, 3.5i y 3.6c muestran los vectores de velocidad (U, V) para las en el tiempo 3 días 4 horas. Como es de esperarse, los resultados son prácticamente iguales en los tres casos pues en este ejercicio no hay gradientes considerables de batimetría o geografía.

Al modelo con mallado de densidad variable se le introdujo una variación lineal de batimetría, de -5000 metros a 0 metros (tomando en cuenta el punto más profundo de la batimetría real, figura 3.2). La simulación arrojó los resultados mostrados en la figura 3.7), sin nada en particular que destacar.

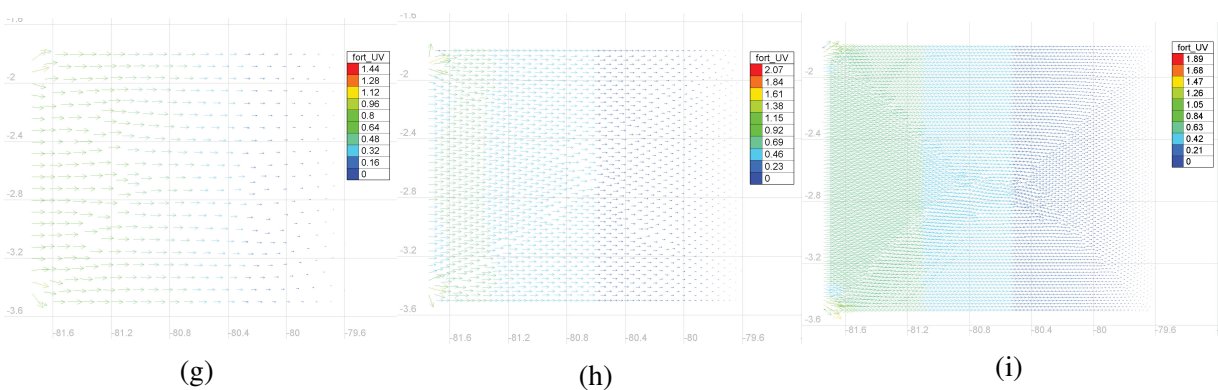
Como último ejercicio de prueba se realizaron las dos mallas mostradas en las figura 3.8; se utilizó el contorno de continente obtenido en la sección 3.1 como borde y se aplicaron valores de batimetría constante (figura 3.8a) y batimetría lineal (figura 3.8d). Estos dos resultados permiten observar el comportamiento del modelo bajo la influencia del continente y de la batimetría; en las figuras 3.8b y 3.8e se observa como el movimiento de la marea se adapta a la forma del golfo. Además, en la figura 3.8f se observa un aumento en la velocidad en el sector del Río Guayas debido a la baja batimetría.



Mallado



ζ en $t = 3$ días 4 horas



U y V en $t = 3$ días 4 horas

Figura 3.5

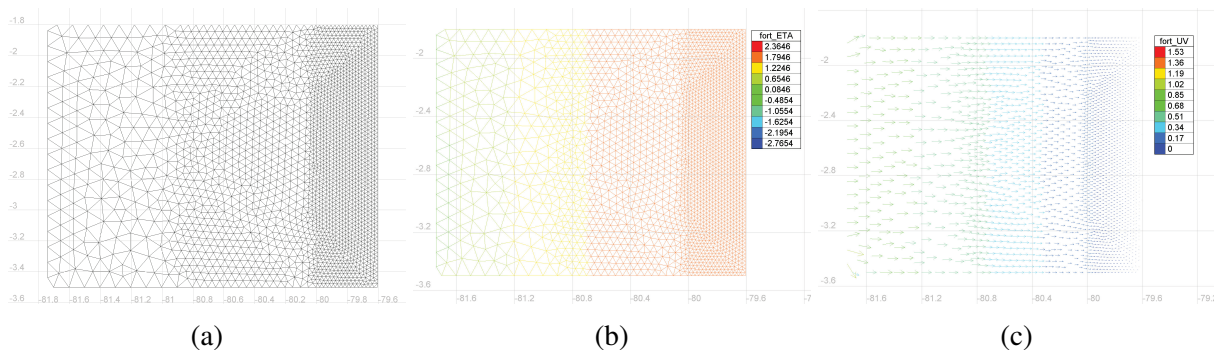


Figura 3.6: Mallado de densidad variable y batimetría constante, ζ , U y V en $t = 3$ días 4 horas

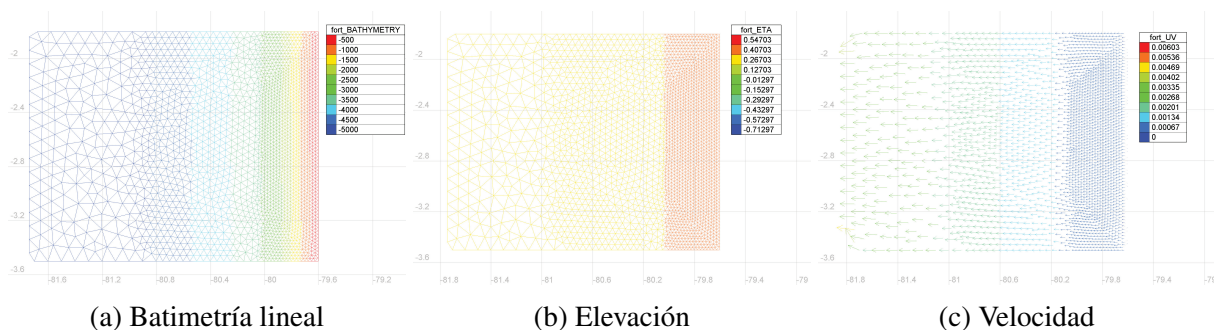


Figura 3.7: Mallado de densidad variable y batimetría lineal, ζ , U y V en $t = 2$ días 16 horas.

3.2.2. Mallas con batimetría real

Una vez que se ha entendido el funcionamiento de BlueKenueTM en el desarrollo de mallas, se empieza a completar el modelo agregando, como primer paso, los datos reales de batimetría y, como segundo paso, los contornos de islas.

En la figura 3.9a se muestra la primera malla con los datos de batimetría mostrados en la figura 3.2. BlueKenueTM acepta como entrada datos de batimetría en coordenadas xyz y asigna automáticamente un valor de profundidad (o elevación) a cada nodo de la malla utilizando interpolación mediante distancia inversa. Ya que aún no se incluyen los contornos de islas, ADCIRC iguala cualquier cualquier valor de relieve mayor a 0 a un valor predeterminado H_0 , en este caso $H_0 = 0,1$ m. Esto se nota claramente en los resultados de velocidad (figura 3.9c) pues se ve como, en cierto tiempo, el agua rodea e inunda el sector donde se debería encontrar la Isla Puná.

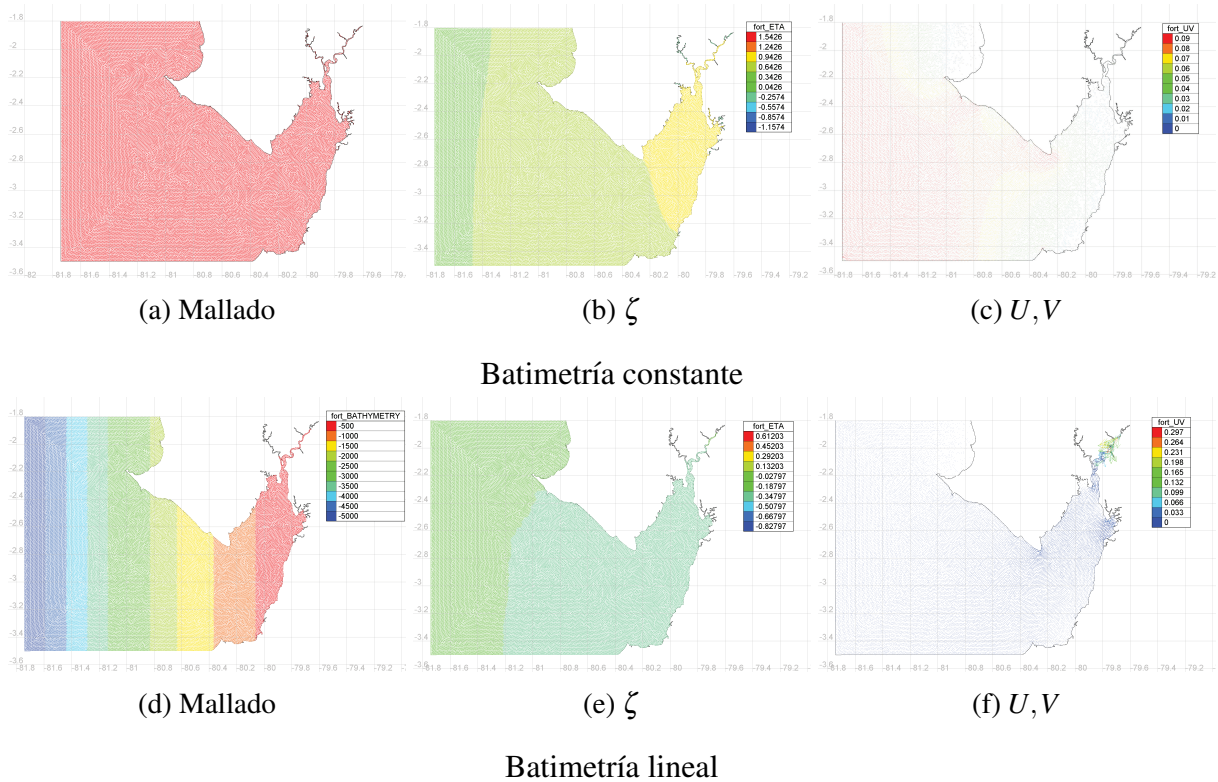


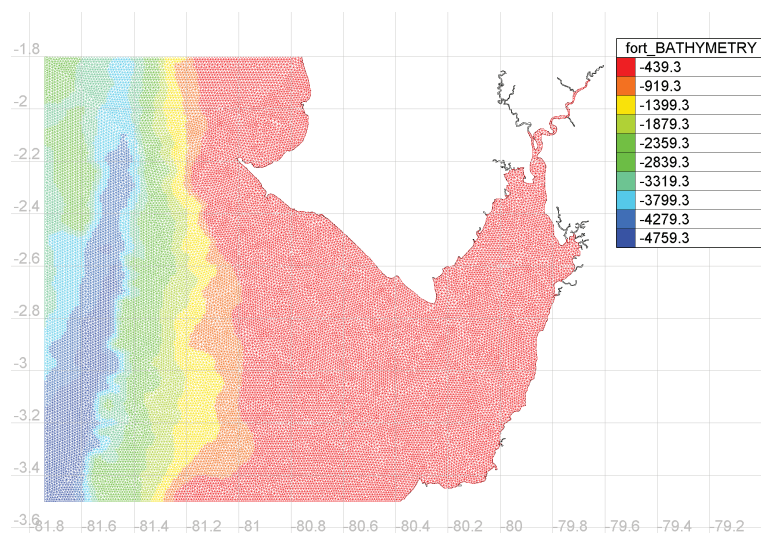
Figura 3.8: Mallado con contorno real, ζ , U y V en $t = 4$ días 7 horas

Finalmente, para agregar las islas al modelo, se consideraron dos alternativas que ADCIRC ofrece. Estas alternativas dependen de la opción *Element wetting/drying* (mojado/secado de elementos), la cual es definida en el archivo `fort.15` de ADCIRC bajo el nombre de `NOLIFA`. En un inicio, ADCIRC considera a todos los nodos con $\zeta < 0$ como nodos mojados (agua) y a los nodos con $\zeta > 0$ como nodos secos (tierra). Cuando `NOLIFA` está activada, ADCIRC cambia el estado de los nodos de secos a mojados cuando los niveles de agua en los nodos adyacentes sobrepasan un cierto nivel H_0 y una cierta velocidad vel_{min} , parámetros también definidos en `fort.15`. Esta opción es útil cuando se quieren modelar áreas propensas a inundaciones o flujo de agua cerca a terrenos bajos.

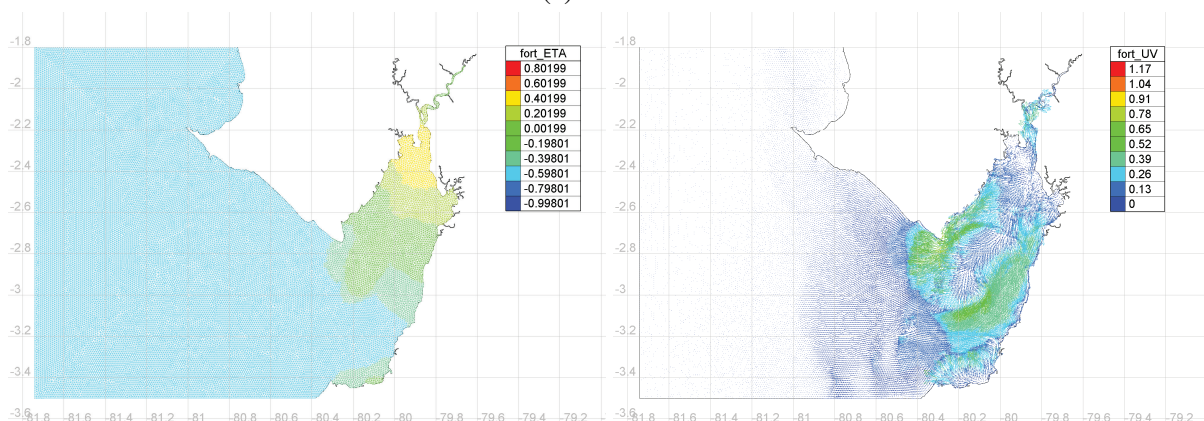
Las alternativas consideradas fueron:

Alternativa 1. Desactivar NOLIFA y definir contornos de continente e islas.

Bajo esta opción, ADCIRC no cambiará el estado de elementos secos durante toda la



(a) Mallado

(b) ζ (c) Velocidad U, V Figura 3.9: Mallado fino con batimetría real, ζ , U y V en $t = 18$ horas.

simulación, por lo que no se podrían modelar escenarios de inundación. Por esta razón, sería inútil e ineficaz realizar un mallado sobre área de tierra. Realizando un mallado de densidad variable únicamente en el área mojada, se obtuvo la malla mostrada en la figura 3.10.

Para obtener la malla de la figura 3.10 se debió definir en BlueKenue™ polígonos que representen el contorno continental y el contorno de cada isla. Estos polígonos fueron obtenidos directamente de los archivos elaborados en la sección 3.1. Con estos polígonos definidos, BlueKenue™ refina automáticamente los elementos cercanos a los bordes. Este

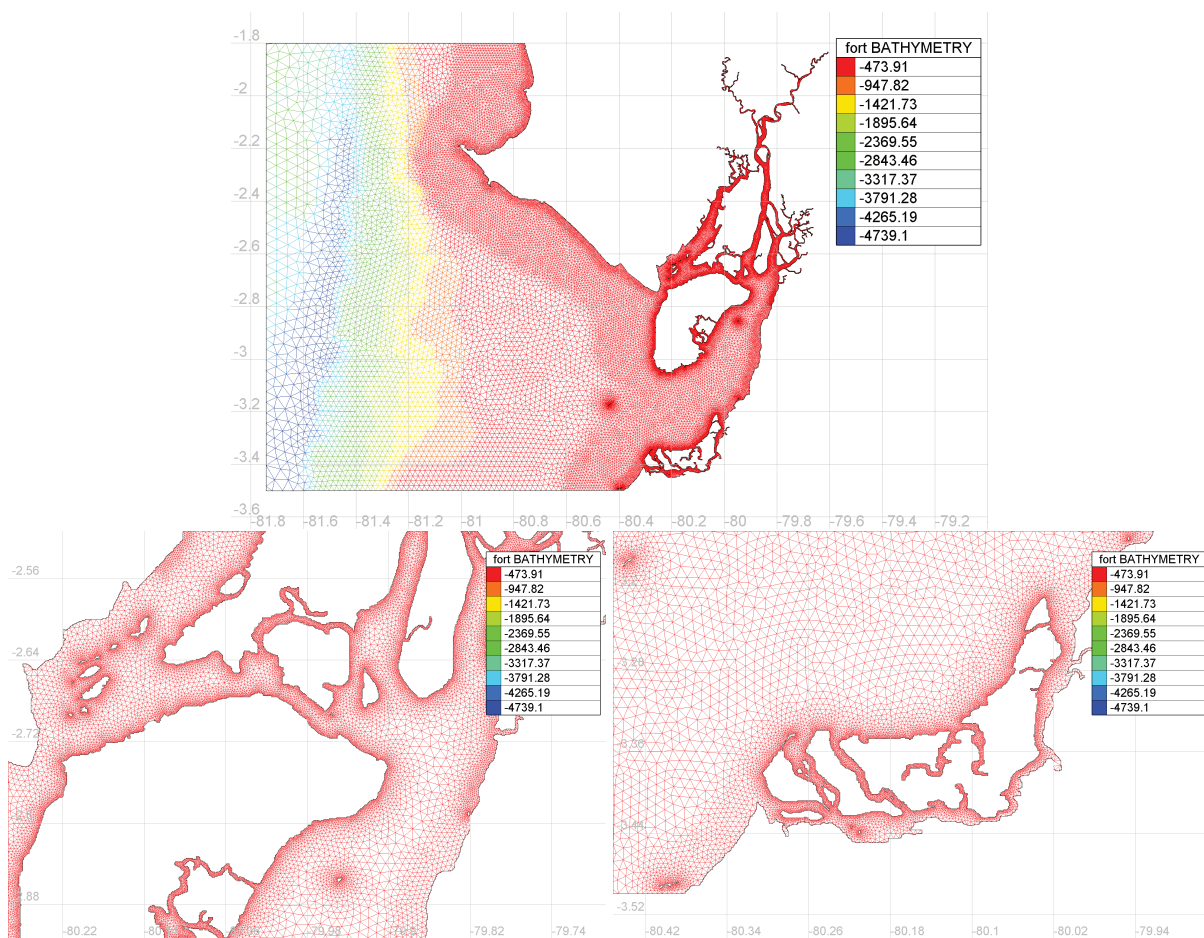


Figura 3.10: Detalle de malla refinada

refinamiento también se ve en la figura 3.10.

Alternativa 2. No definir bordes de islas y activar NOLIFA. En este caso, conviene realizar el mallado también en área de tierra para poder obtener datos de inundación y simplemente se realiza un mallado a toda el área de estudio como se ve en la figura 3.11. Con las mismas condiciones de contorno, se corrió una simulación para 5 días. La figura 3.12 muestra capturas de pantalla de los resultados.

Dado que esta implementación tiene como objetivo el servir de base para poder simular procesos mas complicados (capítulo 1), se opta por la alternativa 2 para subsecuentes simulaciones. Por otro lado, no es necesario tener un mallado fino en áreas muy dentro de la costa, ya que no son parte del alcance del fenómeno principal que se está investigando en este caso (el efecto de

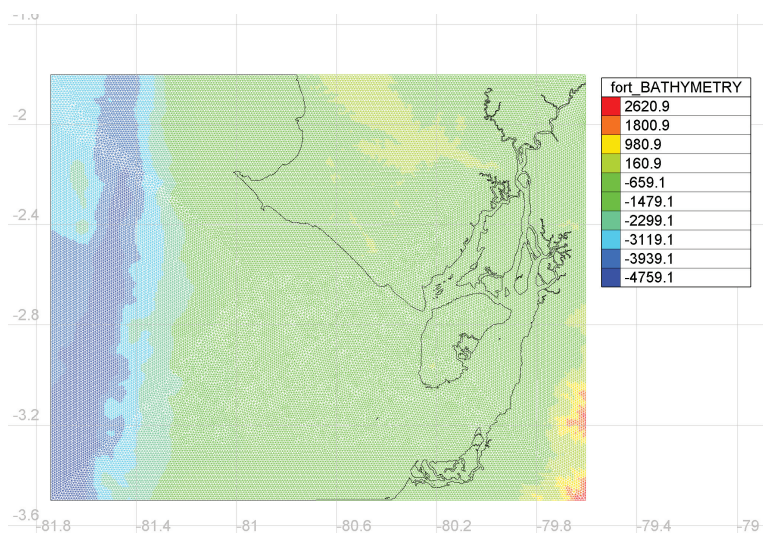
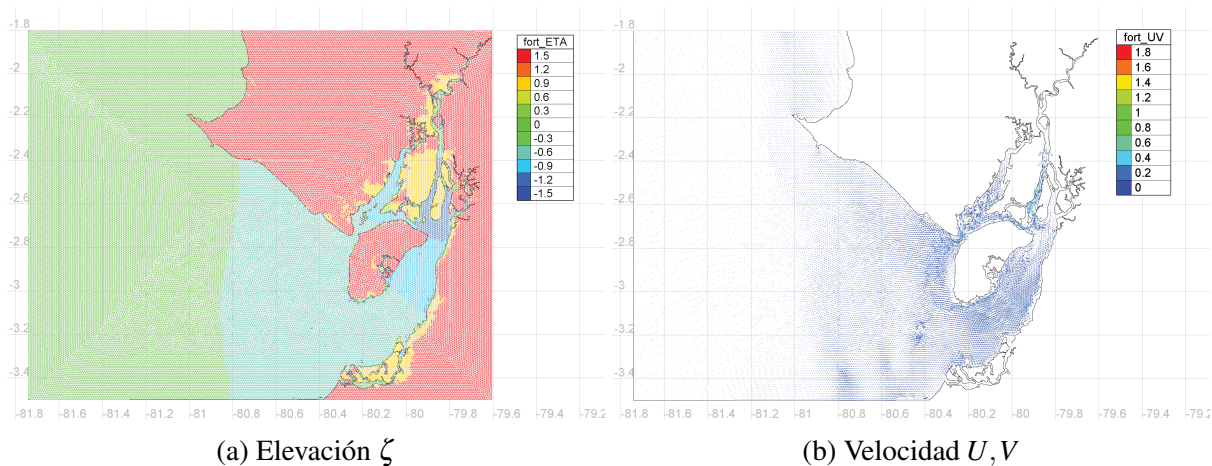


Figura 3.11: Malla completa

(a) Elevación ζ (b) Velocidad U, V Figura 3.12: Resultados para la malla de la figura 3.11, en $t = 20$ horas.

las mareas). Se mejora entonces la malla de la figura 3.11 aplicando densidad variable, obteniendo la malla de la figura 3.13. La densidad es menor a distancias mayores de la costa y aumenta según se acerca al continente. Las áreas con mayor densidad corresponden a los contornos, es decir, donde el mojado/secado de elementos ocurre.

Al correr el modelo con las condiciones antes mencionadas, la simulación falla en el área mostrada en la figura 3.14. A pesar del fino mallado en el área, estos no fueron lo suficientemente pequeños para que la solución converja en una zona interior río arriba, generando valores de velocidad demasiado altos. Por otro lado, esta zona no es la zona de mayor interés en el pre-

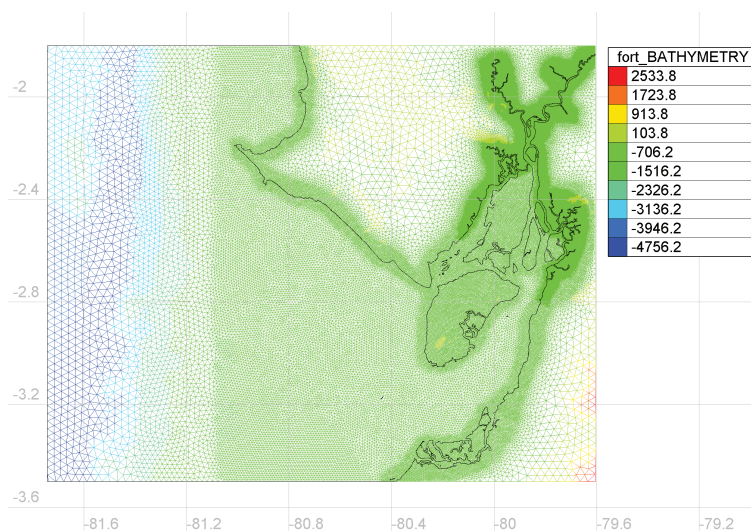


Figura 3.13: Malla completa de densidad variable

sente caso de estudio, y a pesar de que se cuenta con datos batimétricos de gran detalle en esa zona (figura 3.2), es necesario realizar simplificaciones para aumentar la eficiencia computacional del modelo, reduciendo detalle en las zonas de menor interés. El criterio y pasos para esta simplificación se detallan en el siguiente capítulo.

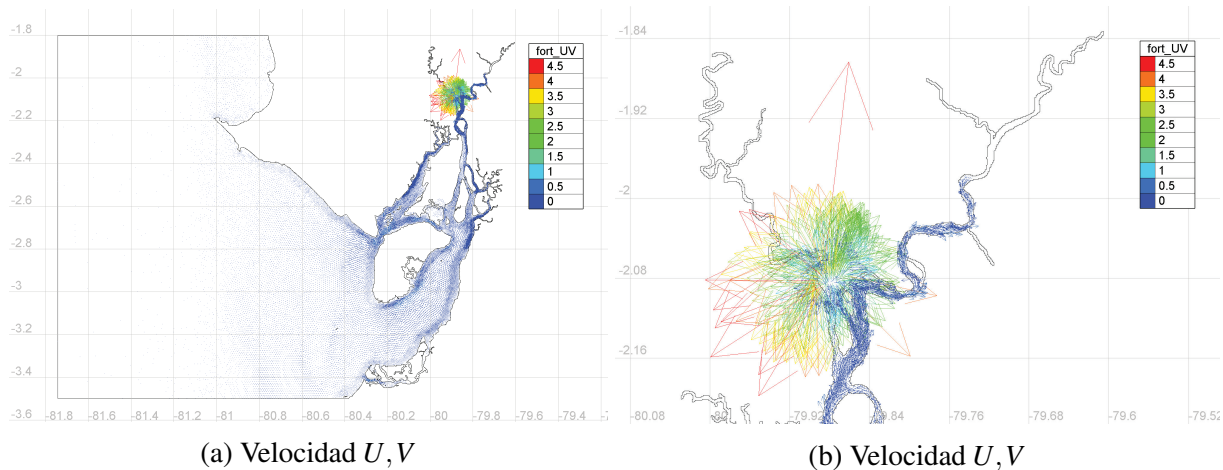


Figura 3.14: Resultados para la malla de la figura 3.13 en el último paso de simulación.

Capítulo 4

Reducción del modelo y condiciones de contorno

En este capítulo se aplicarán medidas para simplificar el modelo y reducir su tamaño. Una vez obtenido el modelo final, se obtendrán y procesarán datos de elevación de agua que serán utilizados como condiciones de contorno.

4.1. Reducción del modelo

La gran resolución de los datos batimétricos permitió obtener contornos con gran detalle. En la figura 4.1 se ven tres áreas de gran importancia dentro del golfo para las que se cuenta con un entradas y brazos de ríos muy bien definidos.

Este nivel de detalle requiere de un mallado lo suficientemente fino como para obtener resultados en toda entrada de agua; de acuerdo a Kenny *et al.* (2012) estas entradas deben tener de cuatro a seis nodos por sección transversal. Para los propósitos de este proyecto no es necesario obtener resultados río arriba, por lo que realizar mallados finos en esta área es ineficiente; en especial por el tiempo computacional que implica. En cambio, si se simplifica el modelo y se obtienen resultados generales, estos resultados pueden ser utilizados posteriormente para

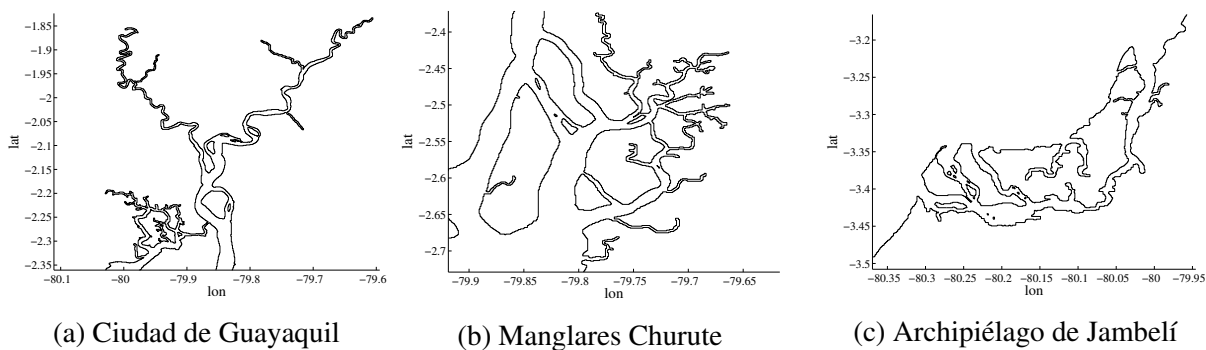


Figura 4.1: Áreas con gran detalle

submodelos de áreas específicas de interés, como las mostradas en la figura 4.1.

El primer paso fue reducir el área de análisis y simulación. Se escogió el contorno en azul mostrado en la figura 4.2 de esta forma se evitan realizar cálculos para gran parte de río arriba, específicamente el área mostrada en la figura 4.1a.

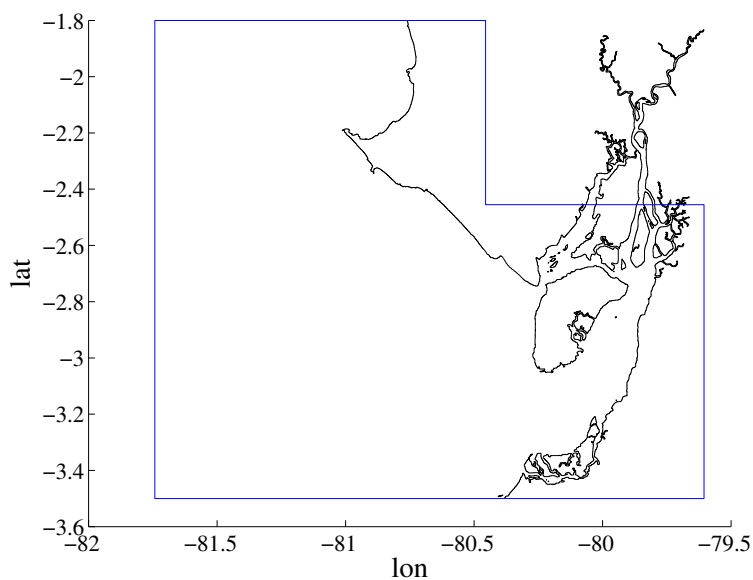


Figura 4.2: Área de análisis

4.1.1. Filtro de batimetría

Dentro del modelo de la figura 4.2 existen aún áreas de gran detalle que requieren mallado extremadamente fino. Específicamente, estas áreas son los Manglares Churute en la provincia

del Guayas (figura 4.1b) y el archipiélago de Jambelí en la provincia de El Oro (figura 4.1c). Eliminar estas áreas del modelo reduciendo el contorno una vez más resultaría en un polígono muy irregular, haciendo difícil la posterior definición de condiciones de borde.

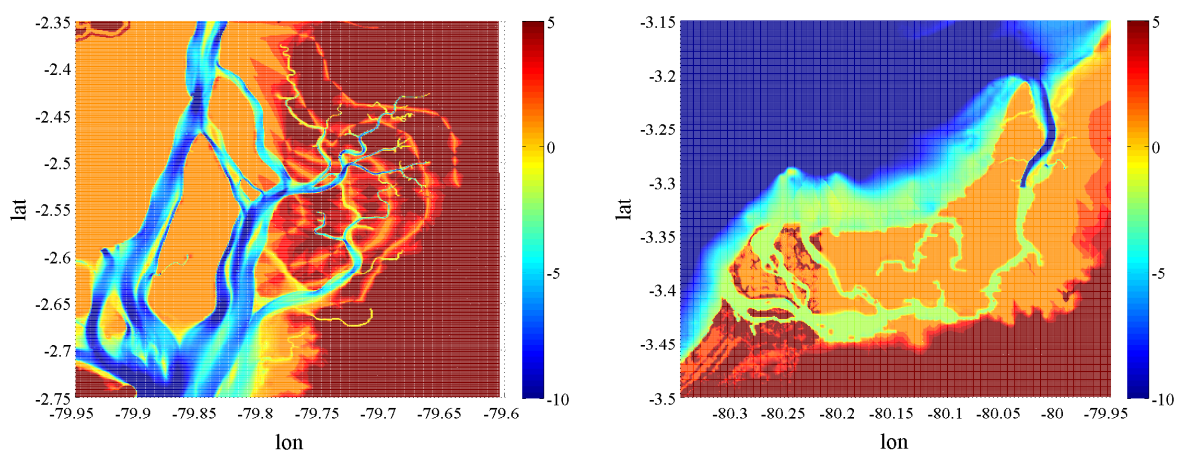
Es por esto que se busca un filtro que suavice los datos batimétricos del modelo con el fin de eliminar entradas de agua y evitar cambios bruscos de relieve. MATLAB no cuenta con un comando o función que devuelva el resultado deseado, por lo que se desarrolló un script (BATH_FILTER.m) implementando un filtro que se puede aplicar directamente a la matriz `bathymetry.mat` (sección 3.1). El algoritmo funcionó de la siguiente manera.

1. Se barre la matriz `bathymetry.mat` tomando conjuntos de 9 elementos en forma de una matriz 3×3 , llamada **M**.
2. Si se cumplen las siguientes dos condiciones:
 - dentro de **M** existen tanto valores positivos como negativos, es decir, una porción de los datos corresponde a tierra y otra a agua
 - existen más de 6 valores positivos en **M**, es decir, aproximadamente el 65 % del área analizada en ese momento por **M** es tierra

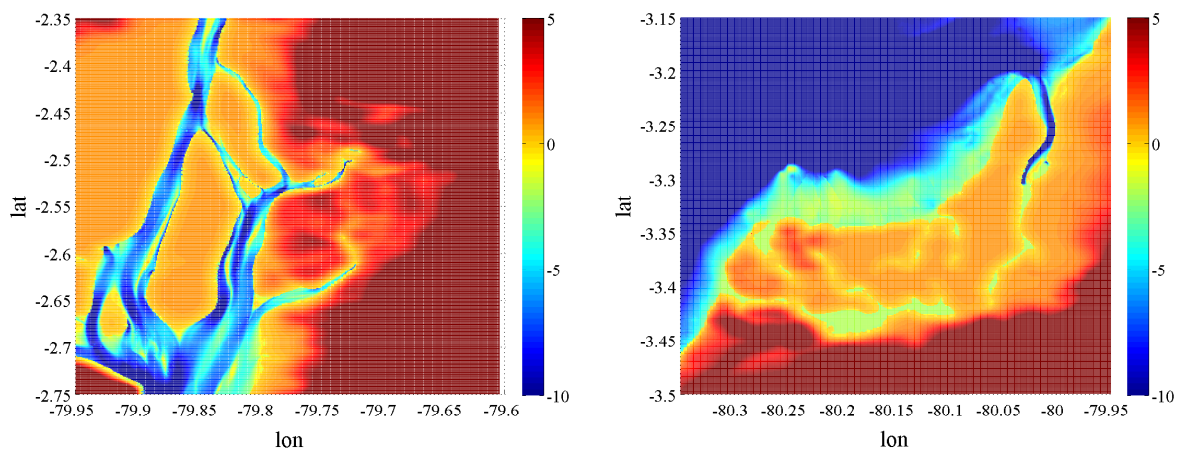
entonces se procede a suavizar el área analizada por **M**:

- a) Se promedian todos los valores de **M** en esa área, obteniendo un valor medio de elevación.
 - b) Se reemplazan las 9 entradas respectivas en `bathymetry.mat` con el valor promedio.
3. La matriz **M** sigue recorriendo `bathymetry.mat` hasta haberla barrido toda.
4. Finalmente, se organizan los datos de la matriz modificada en formato `xyz` para que puedan ser leídos por BlueKenue™.

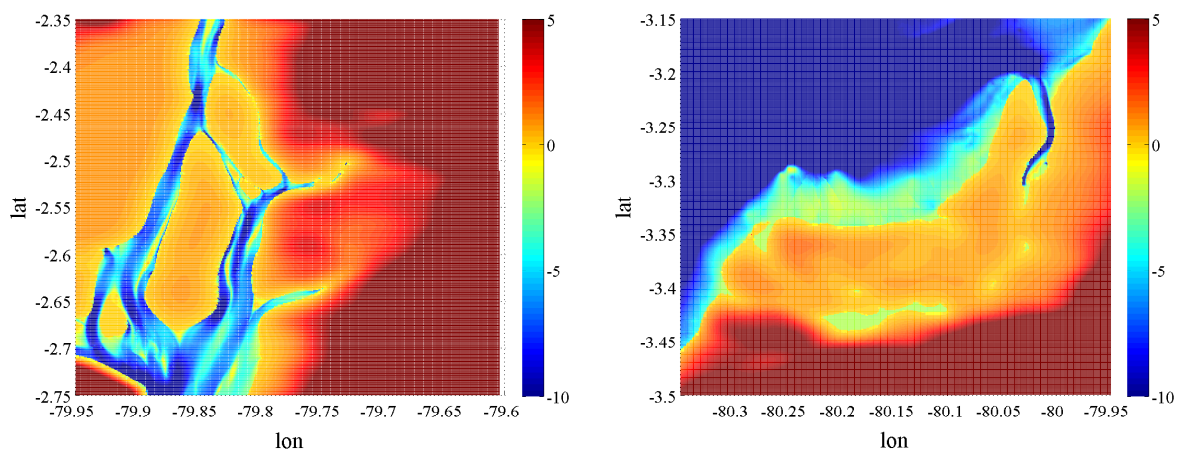
Corriendo este algoritmo varias veces se logró eliminar gran parte del detalle y entradas de agua en el modelo. La figura 4.6 muestra el caso específico de los sectores de Manglares Churute y el archipiélago de Jambelí. Se ve claramente que en ambos casos sólo se suavizaron los sectores de tierra; los valores batimétricos de profundidad no se vieron afectados en absoluto. Después de analizar visualmente los resultados se decide emplear en el modelo los datos batimétricos filtrados 25 veces, pues proporcionan el nivel de suavizado deseado.



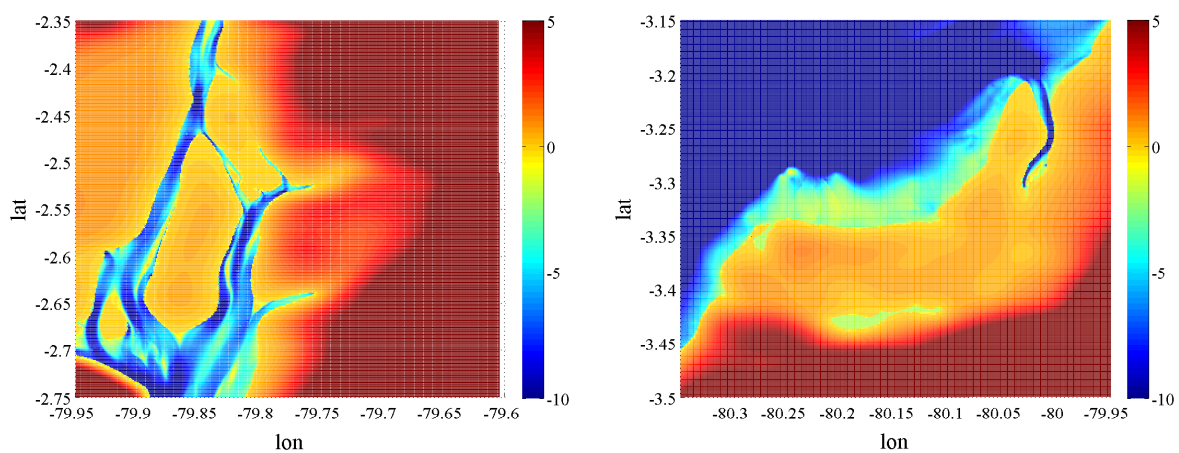
Batimetría original



Filtro aplicado cinco veces



Filtro aplicado 15 veces



Filtro aplicado 25 veces

Figura 4.6: Suavizado de batimetría utilizando el filtro.

4.2. Condiciones de contorno

Una vez establecida el área de estudio y los datos batimétricos finales se proceden a definir las condiciones de borde que serán utilizadas en el modelo. En primer lugar, se dividió el marco en ocho segmentos de línea de características diferentes. Estos se muestran en la figura 4.7. Además, por facilidad, se le asigna un número a cada frontera, mostrados en la tabla 4.1

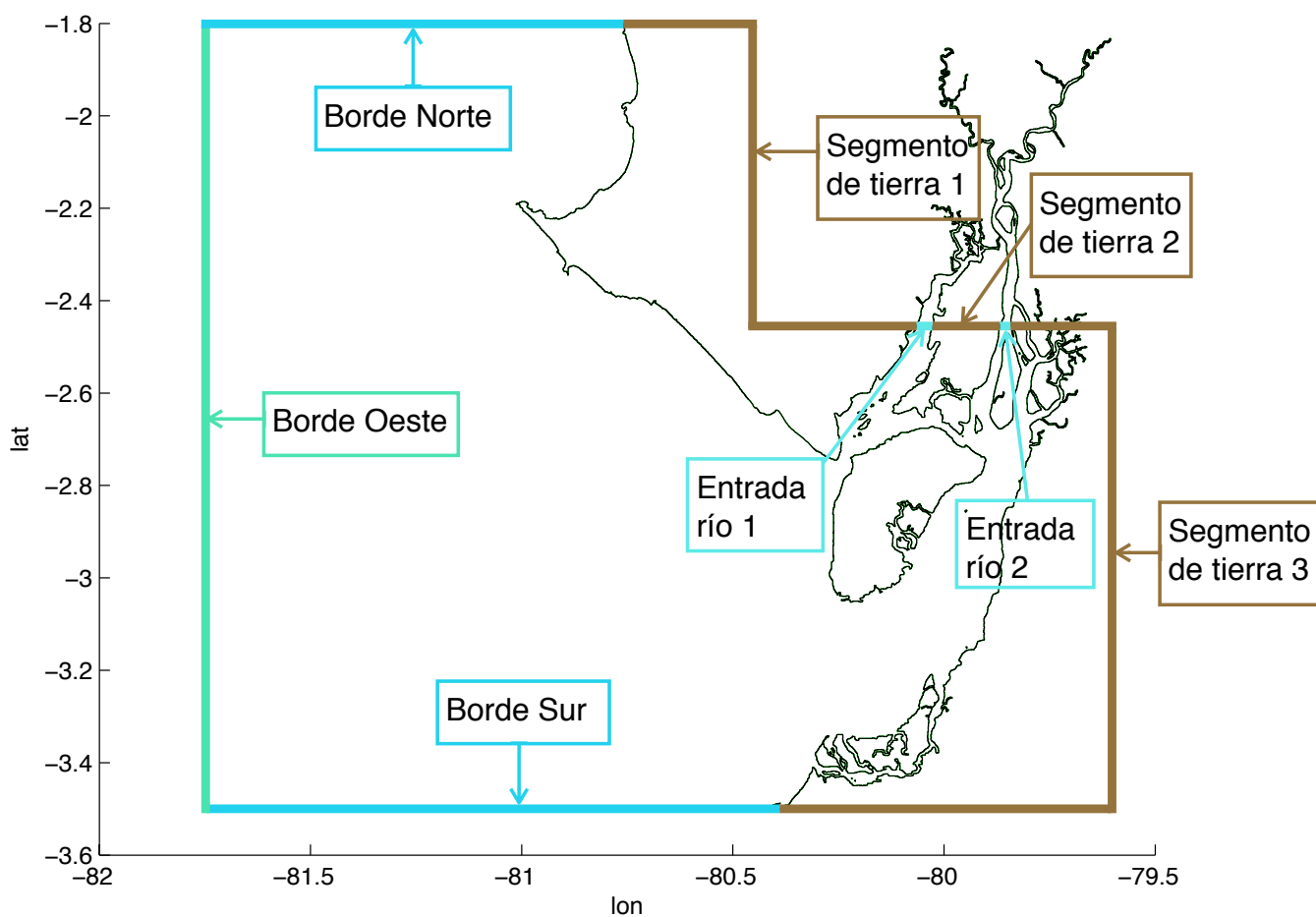


Figura 4.7

Tabla 4.1

Frontera	Número
Borde norte	1
Borde oeste	2
Borde sur	3
Entrada río 1	4
Entrada río 2	5
Segmento de tierra 1	6
Segmento de tierra 2	7
Segmento de tierra 3	8

Se encuentran tres clases de bordes en el modelo:

1. **Segmentos de tierra 6, 7 y 8:** Existen tres segmentos que representan nodos de borde en tierra. Estos nodos no requieren de ninguna especificación ni propiedad y son clasificados en ADCIRC como *Mainland boundaries, type 0*. Para estos nodos la integral de flujo en la ecuación 2.12 se mantiene con un valor de cero durante toda la simulación, es decir

$$\int_{\Gamma_Q} \left(\frac{\partial Q_{n*}}{\partial t} + \tau_o Q_{n*} \right) \phi_i d\Gamma = 0$$

Además, las velocidades también se mantienen en cero en las ecuaciones de momento 2.14 y 2.15.

2. **Entradas de río 4 y 5:** Existen dos pequeños segmentos que representan a entradas de agua al modelo. Estos nodos deben especificarse junto con un valor de caudal definido en m^2/s en el archivo `fort.20` (sección 2.2.2). ADCIRC clasifica a estos nodos bajo la denominación *River inflow boundaries, type 2*. En las ecuaciones, el caudal es aplicado como el valor de Q_{n*} en la integral de flujo de la GWCE, y como velocidades en las ecuaciones de momento.
3. **Bordes de océano 1, 2 y 3:** Se dividió el contorno del océano Pacífico en tres segmentos: norte, oeste y sur. A cada uno de los nodos en estos bordes se les debe proporcionar datos de mareas: amplitud (elevación), frecuencia y fase. ADCIRC clasifica a estos nodos

como *Periodic elevation boundaries* y se aplica directamente el valor de elevación ζ en la ecuación generalizada GWCE (ecuación 2.12).

Por lo tanto, se tienen en el presente modelo cinco fronteras que requieren de condiciones de borde: las dos entrada de flujo de agua al modelo desde el río Guayas (fronteras 4 y 5) y la elevación en los bordes debido a la marea (fronteras 1, 2 y 3). Cada una de estas condiciones de obtuvieron de manera diferente.

4.2.1. Caudal de entrada del río Guayas

Para obtener un valor aproximado de caudal en m^3/s se realizó una estimación a partir de datos promedio. De acuerdo a Tapia (2012) y a Montañó y Sanfeliu (2008), el Río Guayas descarga 30 mil millones de m^3 de agua anualmente ($3 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{año}$) lo cual, transformado a m^3/seg , es igual a $951 \text{ m}^3/\text{seg}$. Sin embargo, el caudal varía de acuerdo a la estación: llega a un mínimo de $230 \text{ m}^3/\text{seg}$ en época seca y a un máximo de $1500 \text{ m}^3/\text{seg}$. El promedio entre el valor máximo y mínimo es de $865 \text{ m}^3/\text{seg}$. Obteniendo un promedio entre estos valores, se obtiene $908 \text{ m}^3/\text{seg}$. (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Cálculo de caudal promedio del Río Guayas

	Caudal	Promedio
Mínimo	$230 \text{ m}^3/\text{seg}$	$865 \text{ m}^3/\text{seg}$
Máximo	$1500 \text{ m}^3/\text{seg}$	
Promedio entre mínimo y máximo		$865 \text{ m}^3/\text{seg}$
Promedio anual		$908 \text{ m}^3/\text{seg}$

Este valor de caudal debe ser aplicado a las dos entradas de río mostradas en la figura 4.7. Cabe recalcar que la aproximación de caudal obtenida de $908 \text{ m}^3/\text{seg}$ es un valor preliminar; a medida que el modelo aumente en complejidad, se deben obtener valores mas precisos y, si es posible, para cada ramal del río.

El valor que se debe incluir en el modelo debe ser en m^2/seg , es decir, el caudal dividido por el ancho del área de descarga. La suma del ancho de estos dos ramales es de 5 km, por lo que el valor final a utilizar es:

$$\left(908 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}\right) \left(\frac{1}{5000\text{m}}\right) = 0,18 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}}$$

Este valor se lo define en el archivo `fort.20` para cada nodo correspondiente a las fronteras de flujo (fronteras 4 y 5).

La obtención de condiciones de contorno para los bordes de mar abierto requirió un proceso más complejo de procesamiento y análisis de datos. Este proceso se describe en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Condiciones de contorno en mar abierto

En el presente capítulo se explicará el procedimiento que se llevó a cabo para determinar las condiciones a aplicarse en las fronteras 1, 2 y 3 de la figura 4.7. Estas condiciones consisten en valores de niveles agua de mareas los cuales se propagarán por el modelo dentro del modelo hacia el golfo, es decir, hacia la zona con baja batimetría

Se detallará proceso de adquisición de estos datos y el procesamiento que se llevó a cabo para obtener valores que se puedan incluir en el modelo.

5.1. Requerimientos de las condiciones de contorno

Como se discutió en la sección 2.2.2 y 4.2, las fronteras 1, 2 y 3 son fronteras de elevación periódica (*Periodic elevation boundaries*) y sus propiedades deben ser especificadas en el archivo `fort.15`. El cuadro 5.1 muestra todos los parámetros que ADCIRC necesita para la simulación con varios constituyentes de mareas. Todos los parámetros corresponden a terminos de la ecuacion 1.2; las amplitudes, frecuencias y fases se pueden obtener mediante el procesamiento de series de tiempo (sección 5.2), mientras que los factores de reducción, nodales y argumentos de equilibrio se obtienen de la literatura (sección 5.5). Cabe recalcar la diferencia entre la amplitud potencial TPK y amplitud EMO; el valor TPK se refiere a la amplitud calculada

teóricamente cuando se considera a una tierra sin continentes y es un valor tabulado. El valor EMO es la amplitud dada en cierta localidad y este valor es el que se determinará en las siguientes secciones. ADCIRC requiere de los dos valores de amplitud

Tabla 5.1: Parámetros incluidos en el modelo

Denominación ADCIRC	Descripción
NTIF	número de constituyentes incluidos en el modelo
NBFR	número de frecuencias en frontera de borde

(de acuerdo a Kenny *et al.* (2012), NTIF = NBFR)

Para cada constituyente incluido:

Denominación ADCIRC	Descripción
TPK	amplitud potencial (m)
AMIGT	frecuencia (rad/seg)
ETRF	factor de reducción
FFT	factor nodal
FACET	argumento de equilibrio (grados)

Para cada nodo en dicho constituyente:

Denominación ADCIRC	Descripción
EMO	amplitud (m)
EFA	fase (grados)

5.2. Obtención de series de tiempo de mareas

Se han desarrollado numerosos modelos de mareas que proporcionan valores de elevación de agua para cierta localidad en cierto tiempo; la gran parte de estos modelos utilizan datos altimétricos del satélite TOPEX/Poseidon y consisten de numerosas ecuaciones discretizadas que son resueltas mediante métodos numéricos. Mazzega y Bergé (1994) han aplicado el método de la solución inversa para obtener los constituyentes de las mareas en mares asiáticos mientras que Kantha (1995) ha desarrollado un modelo barotrópico no lineal para obtener constituyentes en todos los océanos (excluyendo el Ártico). De igual forma, Matsumoto *et al.* (2000) desarrollaron

su propio modelo llamado NAO.99b, diseñado para obtener hasta 16 constituyentes.

Más recientemente, Egbert y Erofeeva (2002) propusieron un método que aplica de igual forma el método de la solución inversa pero además "factoriza la matriz de coeficientes para el dominio de frecuencias de la ecuación de olas" (Egbert y Erofeeva, 2002). De acuerdo a los autores, esto hace a este modelo hasta mil veces más rápidos que otros. Por esta razón se elige el modelo de Egbert y Erofeeva (2002). Este es parte del sistema TPXO de la universidad de Oregon State University - Tidal Inversion Software) y se lo utiliza para resolución de problemas de mareas. Además, este modelo ha sido implementado, de forma independiente, a la página web <http://worldwidetide.com/>. El usuario puede mediante la página web obtener datos de mareas en un punto en forma de series de tiempo con tan solo insertar las coordenadas y el intervalo de tiempo deseado. El proceso es fácil y la interfaz de la página web es amigable.

Para validar los datos obtenidos de <http://worldwidetide.com/> se realizó una comparación entre los datos del modelo y datos reales de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA) Se tomaron los datos de elevación de una boya de la NOAA ubicada en las coordenadas 5.011 latitud y -90.836 longitud entre el 4 de julio al 8 de julio del 2014. También se extrajeron los datos de elevación de <http://worldwidetide.com/> para las mismas coordenadas y el mismo tiempo. Como se ve en la figura 5.1, los resultados son muy similares, tanto en amplitud como en frecuencia y fase.

Una vez corroborada la validez de los datos, se obtienen datos de elevación para 133 puntos distribuidos en las fronteras 1, 2 y 3 (figura 5.2). Para realizar esta labor automáticamente, se utiliza el programa de acceso libre cURL. cURL es una herramienta para línea de comando que permite la transferencia de datos desde o hacia la web, compatible con un sinnúmero de protocolos (cURL, 2014). Cuando es utilizado en un script mediante un loop, cURL permite la descarga y/o subida de datos automática al internet.

Se escribió un script en MATLAB (`CURL_TIDES.m`) que utiliza cURL para obtener los datos de elevación de <http://worldwidetide.com/> de manera automática. Definiendo vectores con

las coordenadas de cada uno de los 133 puntos escogidos, cURL descargó automáticamente datos de elevación vs. tiempo para cada par de coordenadas. Cada serie de tiempo se guardó en una matriz de MATLAB. Los datos descargados son del 1 de enero del 2003 al 31 de diciembre del 2012, con una resolución de 10 minutos. La figura 5.3a muestra los datos obtenidos para el punto 90 (localizado en la frontera 3, borde sur) y la figura 5.3b muestra la porción de los datos para enero-febrero 2005.

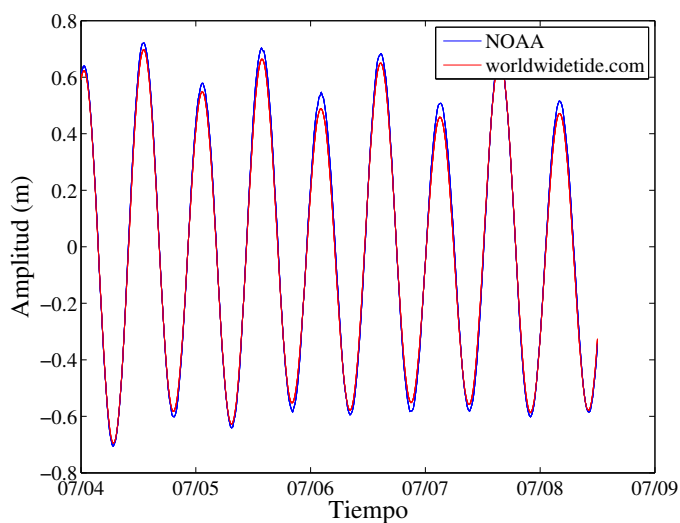


Figura 5.1: Comparación de datos entre la NOAA y <http://worldwidetide.com/>

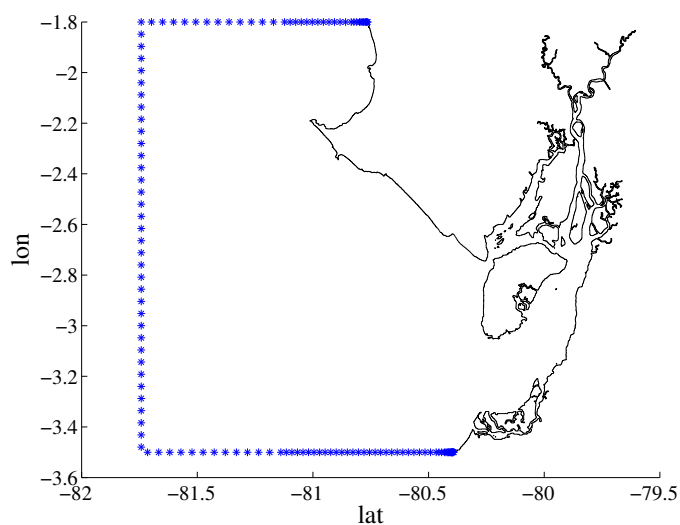


Figura 5.2: Puntos escogidos para la extracción de datos.

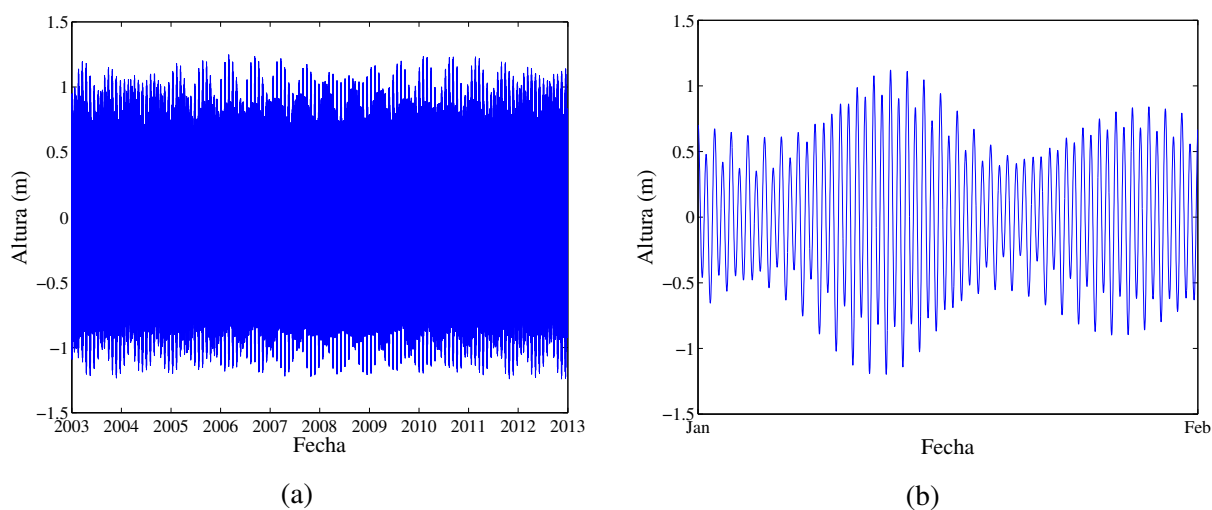


Figura 5.3: Datos de elevación obtenidos para el punto 90

5.3. Determinación de zonas de niveles de marea homogéneas

Una inspección visual de las series de tiempo obtenidas concluyó que no existe gran diferencia entre los datos de cada punto. Por esta razón se intenta identificar en esta sección los puntos en el contorno cuyos valores en la serie de tiempo sean semejantes, con el fin de determinar zonas en las que se pueda utilizar una sola condición de contorno. Estas zonas se denominarán zonas de marea homogénea y se las busca con el fin de simplificar el modelo.

Con este fin se utiliza el coeficiente de determinación R^2 . El valor de este coeficiente nos permite tener una idea de qué tan diferentes son un conjunto de datos con respecto a una tendencia dada (en forma de función). En nuestro caso, el coeficiente nos ayuda a determinar qué tan diferentes son los datos de series de tiempo con respecto a un punto de referencia.

Mediante el comando `coercoeff` de MATLAB, se obtuvo R^2 entre todas las combinaciones posibles de dos puntos. Es decir, se obtuvo R^2 entre los datos del punto 1 y los datos de los puntos 2,3,4,...,133; posteriormente, se obtuvo R^2 entre los datos del punto 2 y los datos de los puntos 3,4,5,...,133; y así sucesivamente. De esta forma, se intenta encontrar el punto con los valores R^2 menos bajos con respecto al resto de puntos.

El análisis concluyó que el punto 63 en la frontera oeste es el que tiene, en promedio, los valores de R^2 más altos con respecto al resto de los puntos. Como se ve en la figura 5.4, con respecto a los puntos 1-37 en la frontera norte, el valor de R^2 está entre 0.9975 y 0.998. Al entrar en la frontera oeste el valor de R^2 aumenta hasta llegar a 1 en el mismo punto 63 (marcado en rojo) mientras que en los puntos de la frontera sur desciende hasta aproximadamente 0.9975.

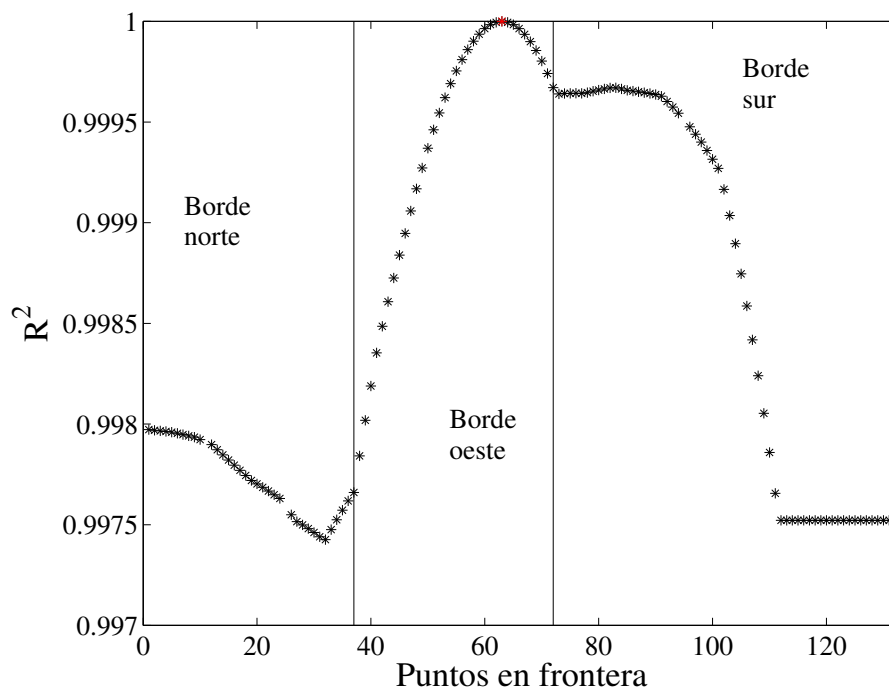


Figura 5.4: R^2 del punto 63 con respecto al resto de puntos

Estos resultados permiten decir que todo el borde puede ser considerado como una sola zona de marea homogénea, y que no es necesario incluir los datos de elevación de todos los 133 puntos en el modelo. El mismo análisis se realizó pero para cada uno de los bordes norte sur y oeste, es decir, se encontró el punto que muestre en promedio el mayor valor de R^2 con respecto al resto de puntos en su misma frontera. Se determinó que los puntos 26, 56 y 102 son los que mejor representan a su respectivo borde (figura 5.5)

Después de este análisis, se puede concluir que los datos del punto 63 pueden ser aplicados a toda la frontera; los datos del punto 26 pueden ser aplicados a la frontera norte, los del punto 56 a la frontera oeste y los del punto 102 a la frontera sur. En adelante, se trabajará con los datos

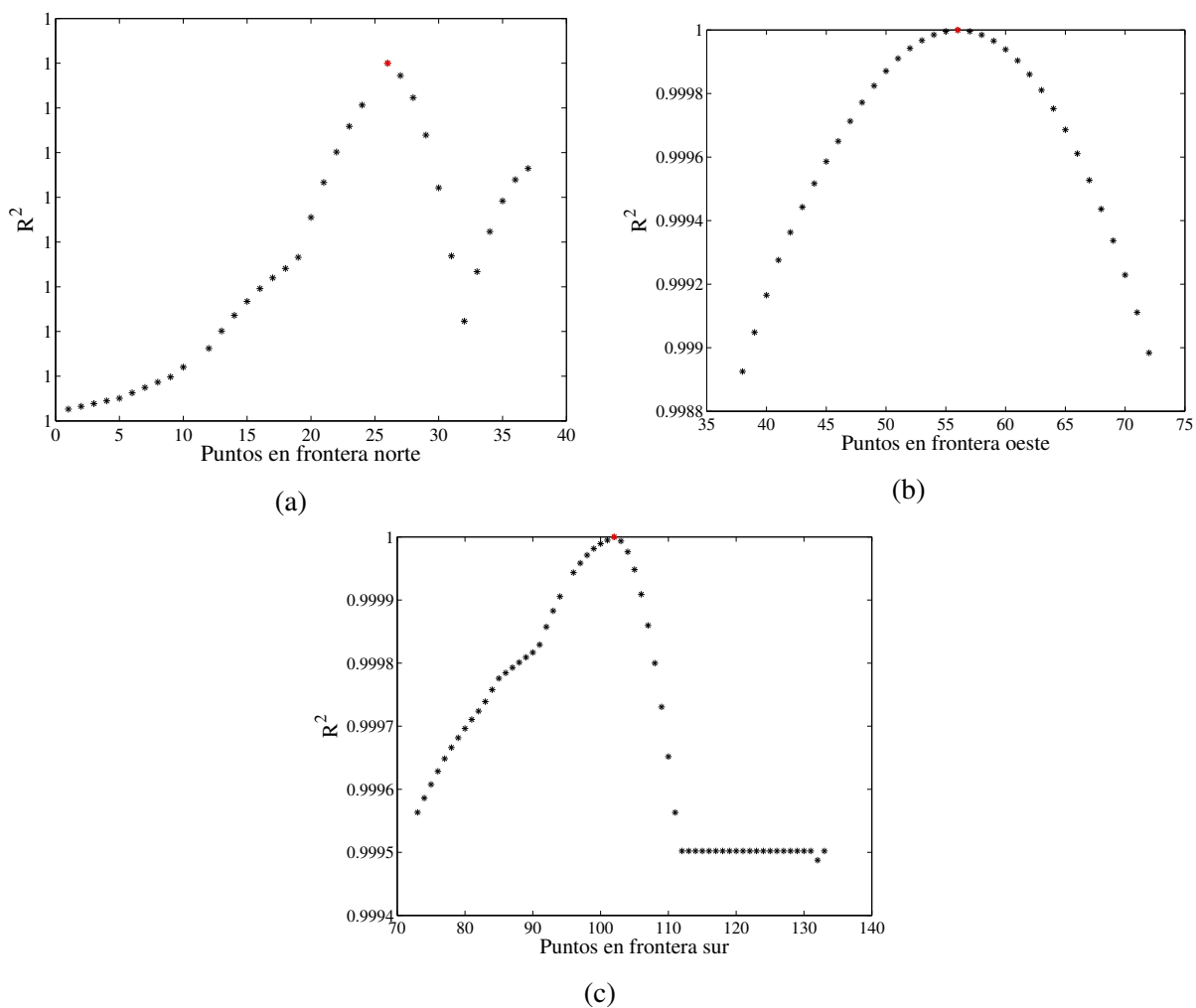


Figura 5.5: R^2 de los puntos representativos para cada frontera, con respecto al resto de puntos.

de estos cuatro puntos únicamente.

5.4. Análisis de series de tiempo usando FFT

En esta sección se utiliza la transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) para poder obtener datos de amplitudes, frecuencias y fases. Este proceso se realiza para los datos de los cuatro puntos escogidos en la sección anterior.

La transformada de Fourier permite llevar a una función periódica, sea $F(t)$, del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia; para que esta pueda ser descompuesta (figura 5.6) en las am-

plitudes y fases de las ondas sinusoidales que componen a $F(t)$ (James, 2011). La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo para calcular la transformada en un número reducido de cálculos (Weisstein, 2014) y es el algoritmo que utiliza MATLAB.

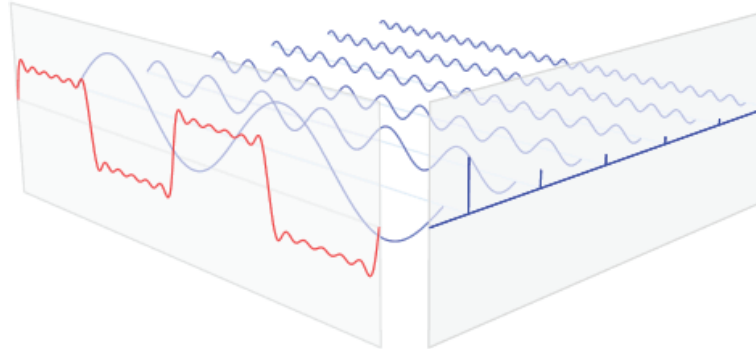


Figura 5.6: Descripción gráfica de la transformada de Fourier: La función periódica roja $F(t)$ es descompuesta en sus componentes sinusoidales. El plano de la derecha muestra las amplitudes y frecuencias de cada uno de los componentes de $F(t)$.

Se utiliza el comando `fft` para obtener la FFT de la serie de tiempo del punto 63. MATLAB devuelve un vector de valores complejos para cada valor de frecuencia. La magnitud y argumento de cada número complejo corresponde a un valor de amplitud y fase para una sinusoidal. La magnitud y el argumento se encuentran mediante los comandos `abs` y `angle` respectivamente.

La figura 5.7 muestra tanto la serie de tiempo como la transformada. Se puede ver claramente en la figura 5.7b que existen tres grupos de frecuencias con magnitudes altas. El primer grupo, desde la derecha, se encuentra entre 2.15×10^{-5} Hz y 2.32×10^{-5} Hz. Al transformar a horas se encuentran periodos de 11.5 a 13.5 horas, por lo que este grupo corresponde a los componentes semidiurnos de las mareas (cuadro 1.1, Kennish (1994); Kowalik y Luick (2013)). El segundo grupo está entre las frecuencias 1.06×10^{-5} Hz (26.2 horas) y 1.26×10^{-5} Hz (22.09 horas) y representa a los constituyentes diurnos. Finalmente, el tercer grupo presenta magnitudes muy bajas con frecuencias de 3×10^{-7} Hz (38 días) y 1×10^{-6} Hz (12 días); estos corresponden a los constituyentes de largo periodo.

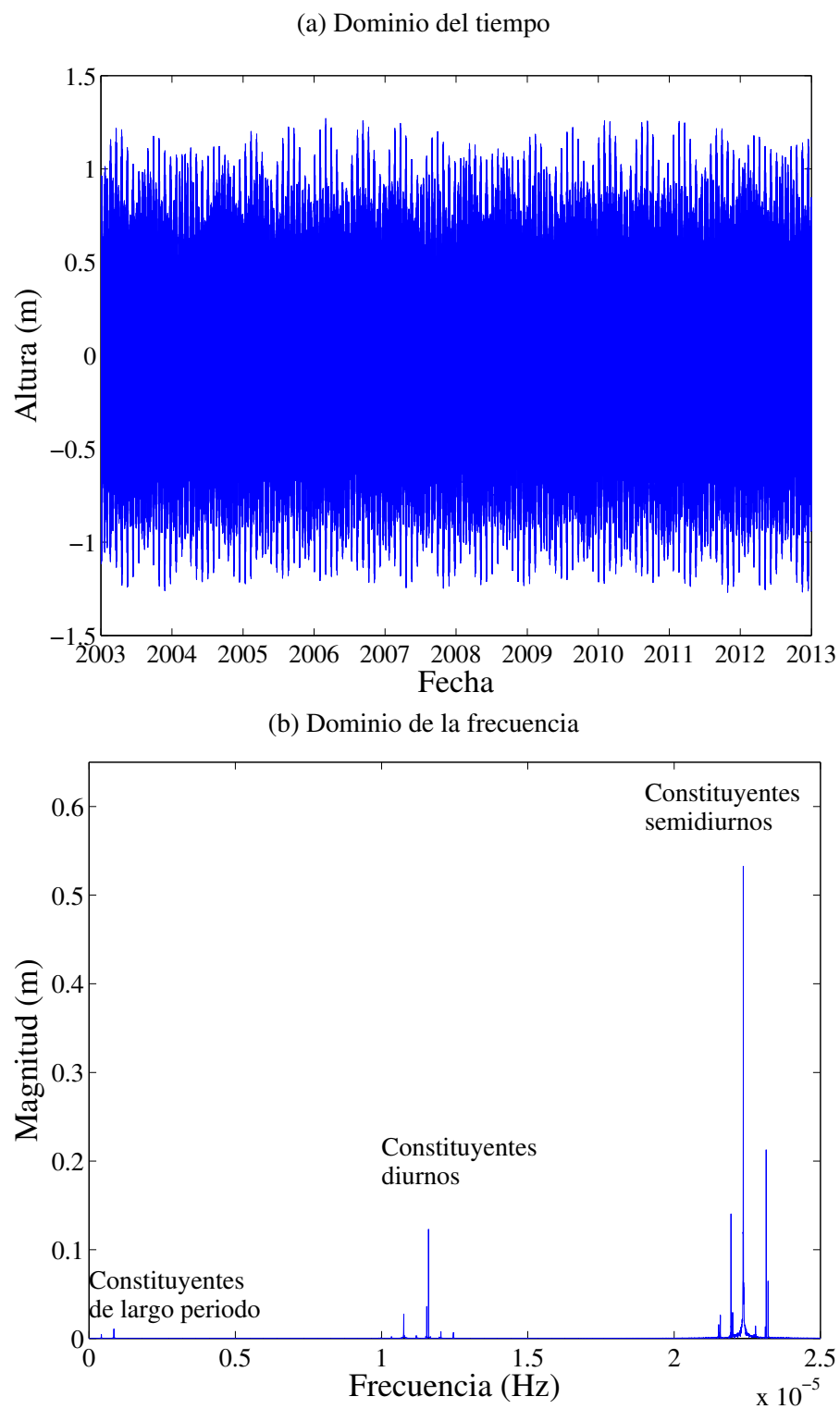


Figura 5.7: Datos del punto 63

Tabla 5.2: Constituyentes encontrados para el punto 63

Frecuencia (Hz)	Periodo (horas)	Amplitud (m)	Fase (grados)	Designación
2.2367E-05	12.42	0.533	91.107	M2
2.2363E-05	12.42	0.297	-86.974	M2
2.3150E-05	12.00	0.213	65.485	S2
2.1945E-05	12.66	0.140	149.758	N2
2.2370E-05	12.42	0.138	92.078	M2
1.1607E-05	23.93	0.123	-25.898	K1
2.2357E-05	12.42	0.120	-83.241	M2
2.2360E-05	12.42	0.118	-89.174	M2
2.2354E-05	12.43	0.066	-86.296	-
2.3213E-05	11.97	0.065	-88.996	K2

Para la simulación preliminar a realizarse se extrajeron únicamente las primeras diez frecuencias con mayor magnitud y se obtuvo su fase. A estos resultados (tabla 5.2) se les asignó un nombre de constituyente de marea basándose en la frecuencia y en el cuadro 1.1. Se encontraron constituyentes del tipo M2, S2, N2, K1 y K2. Cabe recalcar que se encontraron varios picos de amplitud con la frecuencia de un constituyente M2 (cuadro 5.2); sin embargo, se toma para el modelo el constituyente con la mayor amplitud. Además, la suma de las amplitudes de los constituyentes escogidos provee el valor de amplitud buscado.

Realizando el mismo tipo de análisis para los puntos 26, 56 y 103 se obtienen las gráficas de la figura 5.8 y los constituyentes mostrados en los cuadros 5.3, 5.4 y 5.5. De igual forma, para el modelo se toma en cuenta el constituyente M2 con la mayor amplitud.

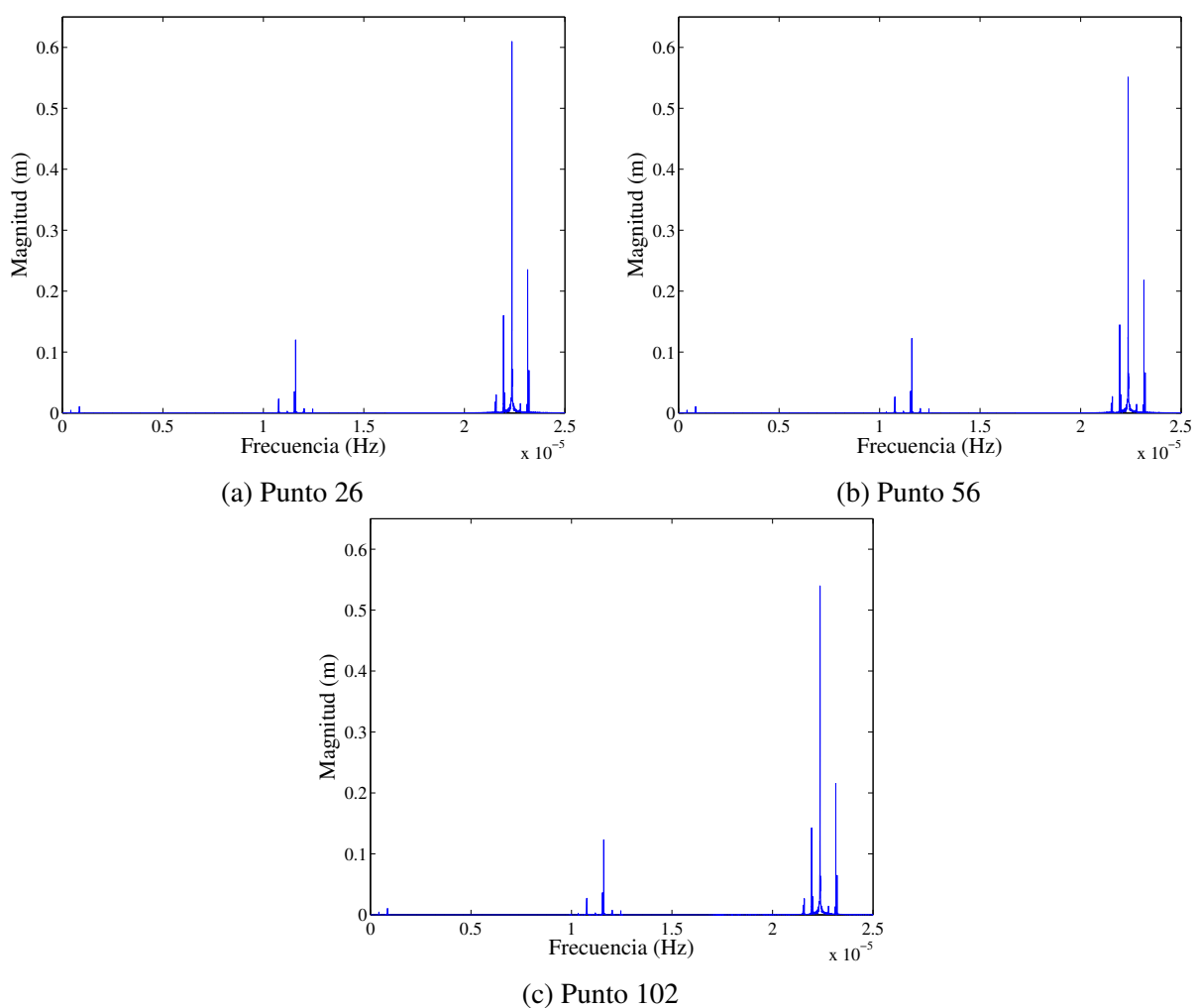


Figura 5.8: Datos de los puntos 26, 56 y 102 en el dominio del tiempo

Tabla 5.3: Constituyentes encontrados para el punto 26

Frecuencia (Hz)	Periodo (horas)	Amplitud (m)	Fase (grados)	Designación
2.2367E-05	12.42	0.610	93.294	M2
2.2363E-05	12.42	0.340	-84.787	M2
2.3150E-05	12.00	0.235	64.246	S2
2.1945E-05	12.66	0.160	153.057	N2
2.2370E-05	12.42	0.158	94.267	M2
2.2357E-05	12.42	0.137	-81.052	M2
2.2360E-05	12.42	0.135	-86.987	M2
1.1607E-05	23.93	0.120	-29.080	K1
2.2354E-05	12.43	0.075	-84.108	-
2.2351E-05	12.43	0.072	-78.626	-

Tabla 5.4: Constituyentes encontrados para el punto 56

Frecuencia (Hz)	Periodo (horas)	Amplitud (m)	Fase (grados)	Designación
2.2367E-05	12.42	0.551	91.762	M2
2.2363E-05	12.42	0.307	-86.320	M2
2.3150E-05	12.00	0.218	65.461	S2
2.1945E-05	12.66	0.145	150.682	N2
2.2370E-05	12.42	0.143	92.733	M2
2.2357E-05	12.42	0.124	-82.586	M2
1.1607E-05	23.93	0.123	-26.682	K1
2.2360E-05	12.42	0.122	-88.519	M2
2.2354E-05	12.43	0.068	-85.643	-
2.3213E-05	11.97	0.066	-88.868	K2

Tabla 5.5: Constituyentes encontrados para el punto 102

Frecuencia (Hz)	Periodo (horas)	Amplitud (m)	Fase (grados)	Designación
2.2367E-05	12.42	0.540	89.548	M2
2.2363E-05	12.42	0.301	-88.533	M2
2.3150E-05	12.00	0.215	63.189	S2
2.1945E-05	12.66	0.143	147.780	N2
2.2370E-05	12.42	0.140	90.519	M2
1.1607E-05	23.93	0.123	-25.369	K1
2.2357E-05	12.42	0.121	-84.801	M2
2.2360E-05	12.42	0.120	-90.733	M2
2.2354E-05	12.43	0.067	-87.857	-
2.3213E-05	11.97	0.065	-91.475	K2

5.5. Condiciones de contorno finales

Tras procesar las series de tiempo se han obtenido los datos de amplitud, frecuencia y fase de los constituyentes que se aplicarán en la frontera. Como se mencionó en la sección 5.1, se necesitan además valores de factores de reducción, factores nodales y argumentos de equilibrio. Kenny *et al.* (2012) proveen estos tres valores, además de la amplitud potencial TPK, para cada tipo de constituyente. Estos datos se muestran en el cuadro 5.6.

Tabla 5.6: Amplitud potencial, factor de reducción, factor nodal y argumento de equilibrio para cada constituyente.

Constituyente	Amp. potencial	Factor de reducción	Factor nodal	Arg. de equilibrio (°)
K1	0.141565	0.7360	1.0337	18.3864
M2	0.242334	0.6930	0.9941	101.3723
S2	0.112841	0.6930	1.0004	359.8745
N2	0.046398	0.6930	0.9900	348.9695
K2	0.030704	0.6930	1.0637	217.2271

Finalmente, en la tabla 5.7 se resumen las condiciones finales para las fronteras 1, 2 y 3, obtenidas a lo largo de este capítulo. Estas son introducidas al modelo mediante el archivo `fort.15`. Nótese que los valores de frecuencia han sido transformados a rad/seg.

Tabla 5.7: Condiciones de contorno finales

Fronteras 1, 2 y 3: Datos del punto 63						
Const.	Frec. (rad/sec)	Amp. (m)	Fase (°)	F. de reducción	F. nodal	Arg. de eq.
M2	1.4053E-04	0.533	91.107	0.6930	0.9941	101.3723
S2	1.4545E-04	0.213	65.485	0.6930	1.0004	359.8745
N2	1.3788E-04	0.140	149.758	0.6930	0.9900	348.9695
K1	7.2931E-05	0.123	-25.898	0.7360	1.0337	18.3864
K2	1.4585E-04	0.065	-88.996	0.6930	1.0637	217.2271
Frontera 1: Datos del punto 26						
Const.	Frec. (rad/sec)	Amp. (m)	Fase (°)	F. de reducción	F. nodal	Arg. de eq.
M2	1.4053E-04	0.610	93.294	0.6930	0.9941	101.3723
S2	1.4545E-04	0.235	64.246	0.6930	1.0004	359.8745
N2	1.3788E-04	0.160	153.057	0.6930	0.9900	348.9695
K1	7.2931E-05	0.12	-29.080	0.7360	1.0337	18.3864
Frontera 2: Datos del punto 56						
Const.	Frec. (rad/sec)	Amp. (m)	Fase (°)	F. de reducción	F. nodal	Arg. de eq.
M2	1.4053E-04	0.551	91.765	0.6930	0.9941	101.3723
S2	1.4545E-04	0.218	65.485	0.6930	1.0004	359.8745
N2	1.3788E-04	0.145	150.682	0.6930	0.9900	348.9695
K1	7.2931E-05	0.123	-26.682	0.7360	1.0337	18.3864
K2	1.4585E-04	0.066	-88.868	0.6930	1.0637	217.2271
Fronteras 3: Datos del punto 102						
Const.	Frec. (rad/sec)	Amp. (m)	Fase (°)	F. de reducción	F. nodal	Arg. de eq.
M2	1.4053E-04	0.540	89.548	0.6930	0.9941	101.3723
S2	1.4545E-04	0.215	63.189	0.6930	1.0004	359.8745
N2	1.3788E-04	0.143	147.780	0.6930	0.9900	348.9695
K1	7.2931E-05	0.123	-25.369	0.7360	1.0337	18.3864
K2	1.4585E-04	0.065	-91.475	0.6930	1.0637	217.2271

Capítulo 6

Implementación final y resultados

6.1. Implementación final

En este capítulo se detalla la implementación final del modelo, utilizando las mallas y condiciones especificadas en el capítulo 4 y las condiciones de contorno establecidas en los capítulos 4 y 5. Estas simulaciones incluyen cinco constituyentes principales, es decir, las condiciones de simulación son aproximaciones bastante cercanas a las condiciones reales. Se analizan los resultados en puntos específicos del área de estudio en los cuales se cuenta con observaciones históricas y se realiza una comparación.

Es de notar que estos resultados y comparación son hasta cierto punto preliminares, pues el objetivo del presente trabajo es la implementación inicial del modelo (incluyendo el diseño de las mallas computacionales, datos batimétricos y condiciones de contorno). La calibración y validación del modelo debe realizarse en condiciones más controladas a través de un análisis batimétrico, y la especificación más fiel de las condiciones de contorno. Estos aspectos no han sido verificados en el presente estudio por estar más allá de su alcance.

La malla utilizada en las simulaciones finales se explica en el capítulo 3 y se muestra en la figura 6.1. Se ve que se cuenta con una zona de mallado más denso que abarca toda la costa y toda el área del golfo con batimetría mayor que 10 metros, además de una zona de mallado

Tabla 6.1: Parámetros de fort . 15

Parámetro	Denominación ADCIRC	Valor
Paso de tiempo	DTDP	10 seg
Coefficiente de fricción cuadrático	FFACTOR	0.0025
Viscosidad de torbellino	ESLM	2 m ² /seg
Umbral de ángulo interno	ANGINN	110°

menos denso en aguas más profundas. El número total de nodos y elementos es de 67681 y 134786 respectivamente.

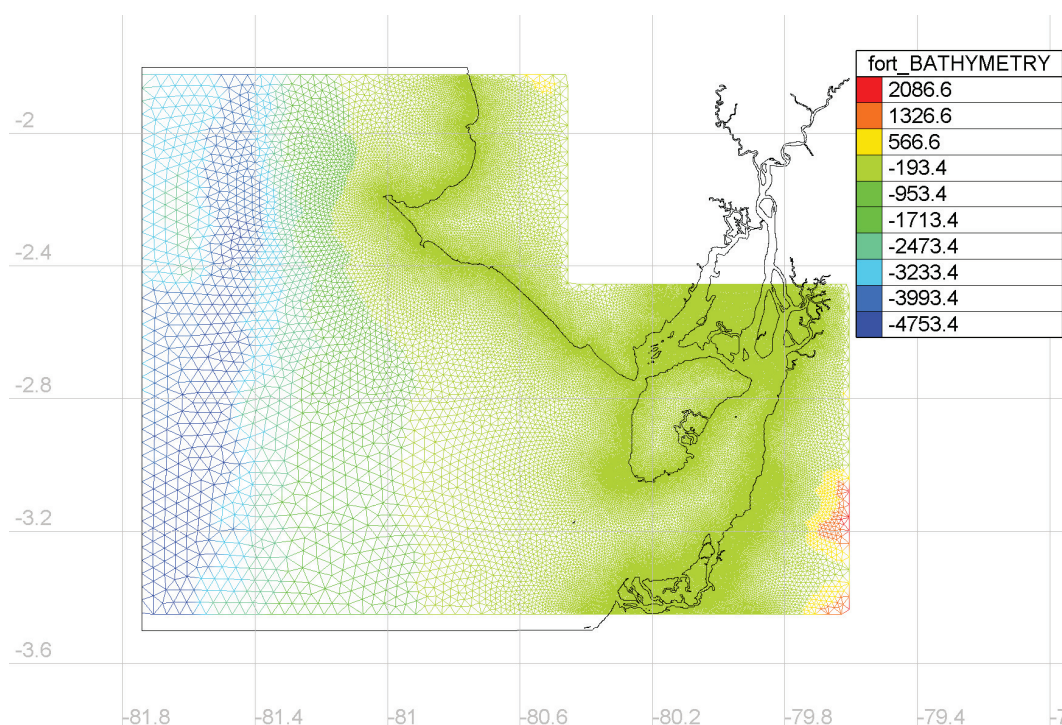


Figura 6.1: Malla final

Con el fin de garantizar la estabilidad del modelo y evaluar los efectos de cada constituyente en el total, estos se introdujeron progresivamente. Estos se describen en la figura 6.2 con fines de ilustrar el procedimiento completo y el efecto de cada constituyente en los datos de entrada. Las simulaciones se corrieron para un periodo de 30 días y utilizando los valores para los parámetros especificados en el archivo de entrada fort . 15. Estos se muestran en la tabla 6.1. La mayoría de estos valores son los recomendados por ADCIRC (2014) o Kenny *et al.* (2012).

Una vez comprobada la estabilidad del modelo con los cinco constituyentes, se realizó una

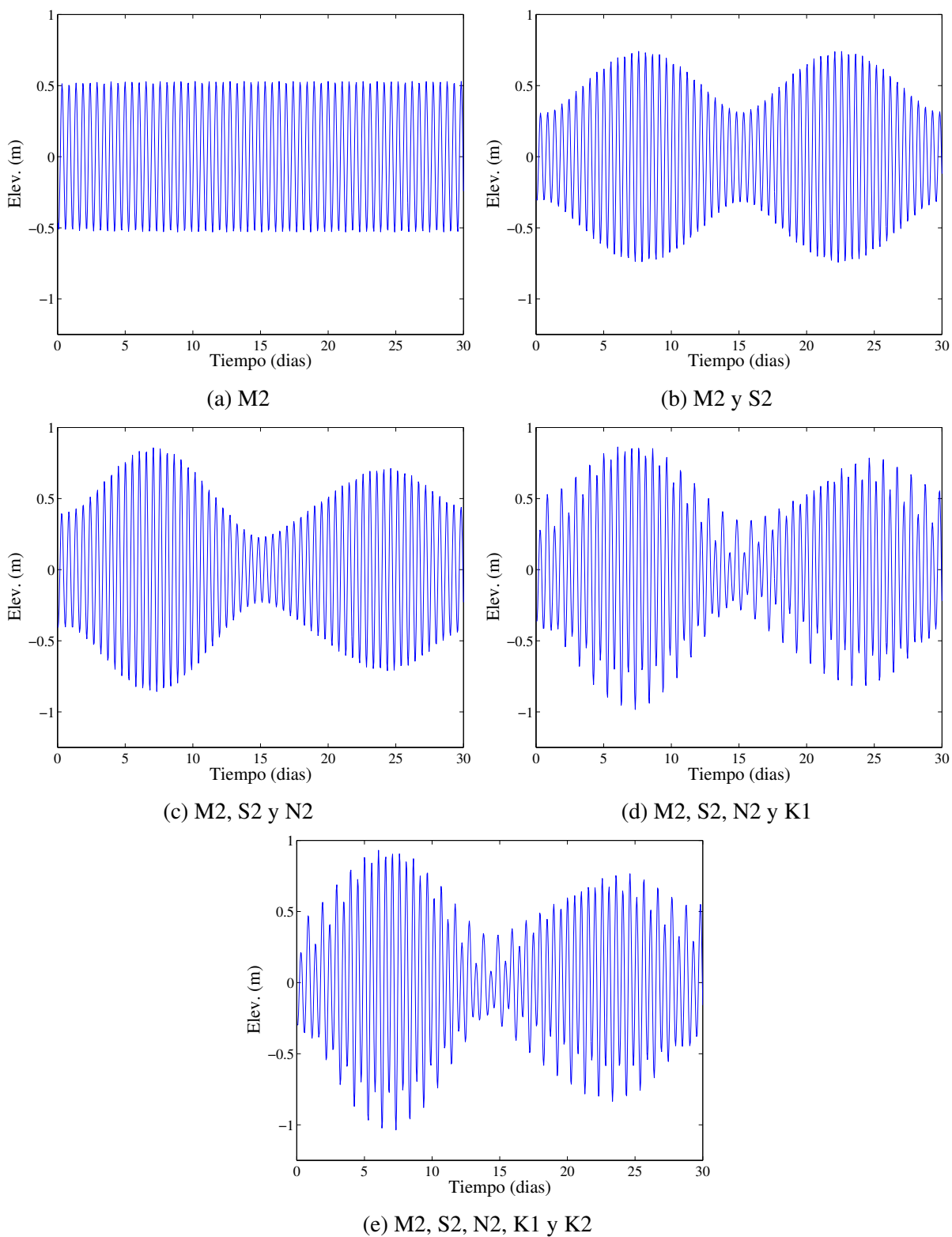


Figura 6.2: Curvas de elevación periódica en los bordes 1, 2 y 3, para cada constituyente añadido

simulación tomando en cuenta las tres zonas de marea homogénea encontradas anteriormente. En el capítulo 5.7 se determinó que se pueden aplicar las condiciones de un sólo punto en toda una frontera de entrada periódica (fronteras 1, 2 y 3, tabla 4.1). Estos puntos fueron el punto 26 para la frontera norte, el punto 56 para la frontera oeste y el punto 102 para la frontera sur, y cada una de estas fronteras se denominaron como zonas de marea homogénea.

Se utilizaron entonces los datos mostrados en el segundo, tercero y cuarto cuadro de la tabla 5.7. Sin embargo, esta implementación presentó problemas de estabilidad. Los resultados muestran zonas en las que la velocidad aumenta excesivamente justo antes de que el modelo se interrumpa. Estas zonas aparecen al noroeste y suroeste del modelo, es decir, en las zonas donde las condiciones de borde cambian (figura 6.3), siendo esta la razón aparente de estas inestabilidades. La conclusión por lo tanto es que la configuración actual de la malla (rectangular) no es la más adecuada numéricamente para la especificación de las condiciones de contorno. Es recomendable por lo tanto utilizar mejor la flexibilidad de las mallas no estructuradas y diseñar los bordes de las mallas curvos.

A pesar de que se intentó escalonar y suavizar el cambio de amplitud y fase se obtuvo el mismo error. Utilizando bordes curvos se evitarían ángulos cerrados que causan este tipo de grandes diferencias entre los puntos y, por lo tanto, inestabilidades.

Para resolver este problema utilizando la malla con la que se cuenta, se aplicó una solución más simplificada en la cual se considera toda la frontera como una sola zona de marea homogénea. Se aplican entonces las condiciones de un solo punto a todo el borde, dicho punto es el 63. Con estas condiciones el modelo se ejecutó sin problema, lo que confirma la suposición anterior. La figura 6.4 muestra capturas de pantalla para ζ y U, V para el tiempo de 15 días y 5 horas. Estos resultados serán los utilizados y descritos en adelante.

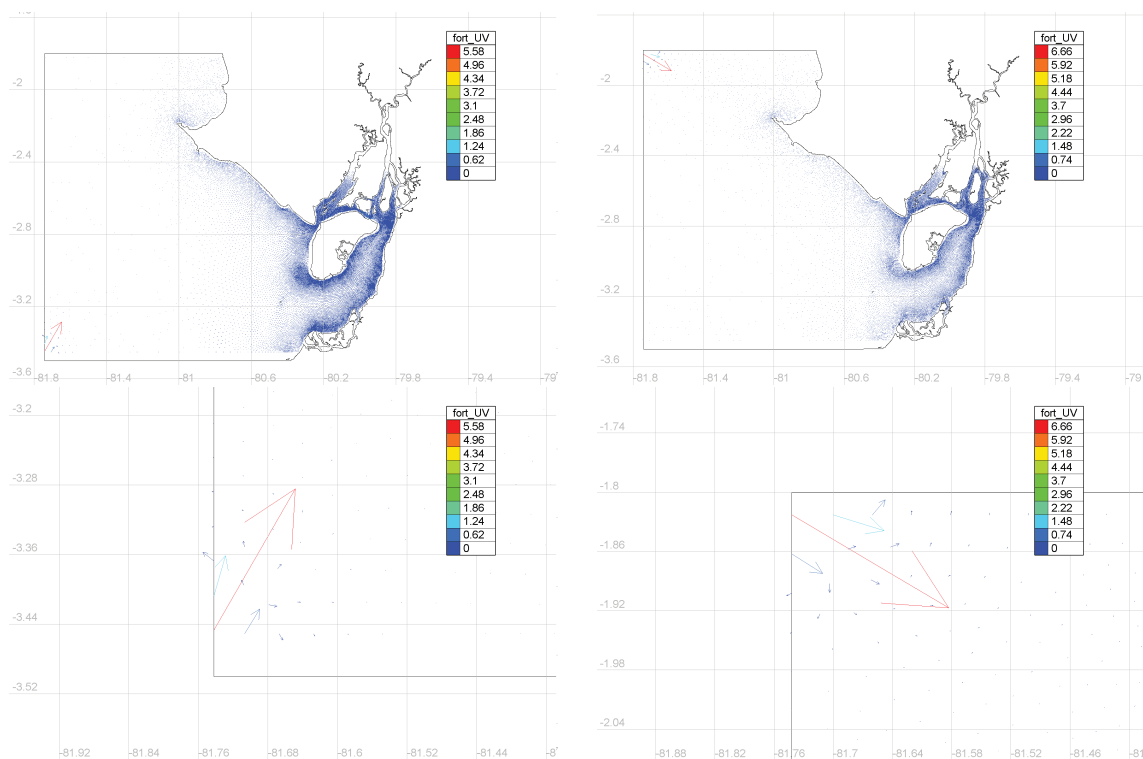


Figura 6.3: Captura de pantalla de U, V para el último paso del modelo 2, incluyendo detalle de las esquinas.

6.2. Comparación con datos históricos

En esta sección se comprueban los resultados del modelo con datos históricos obtenidos de la página web del INOCAR (2014). Esta comparación es de carácter cualitativa, pues lo principal en esta fase del desarrollo es obtener valores aceptables en términos del orden de magnitud.

La comparación se la realizará visualmente utilizando las series de tiempo obtenidas de los datos observados y las series de tiempo obtenidas de los resultados de la simulación. Se tomarán los cinco puntos mostrados en la figura 6.5 para los que se cuenta con los datos históricos.

Para esto, BlueKenueTM permite obtener fácilmente las series de tiempo a partir de los resultados de la simulación. La comparación para los cinco puntos se muestra en la figura 6.7.

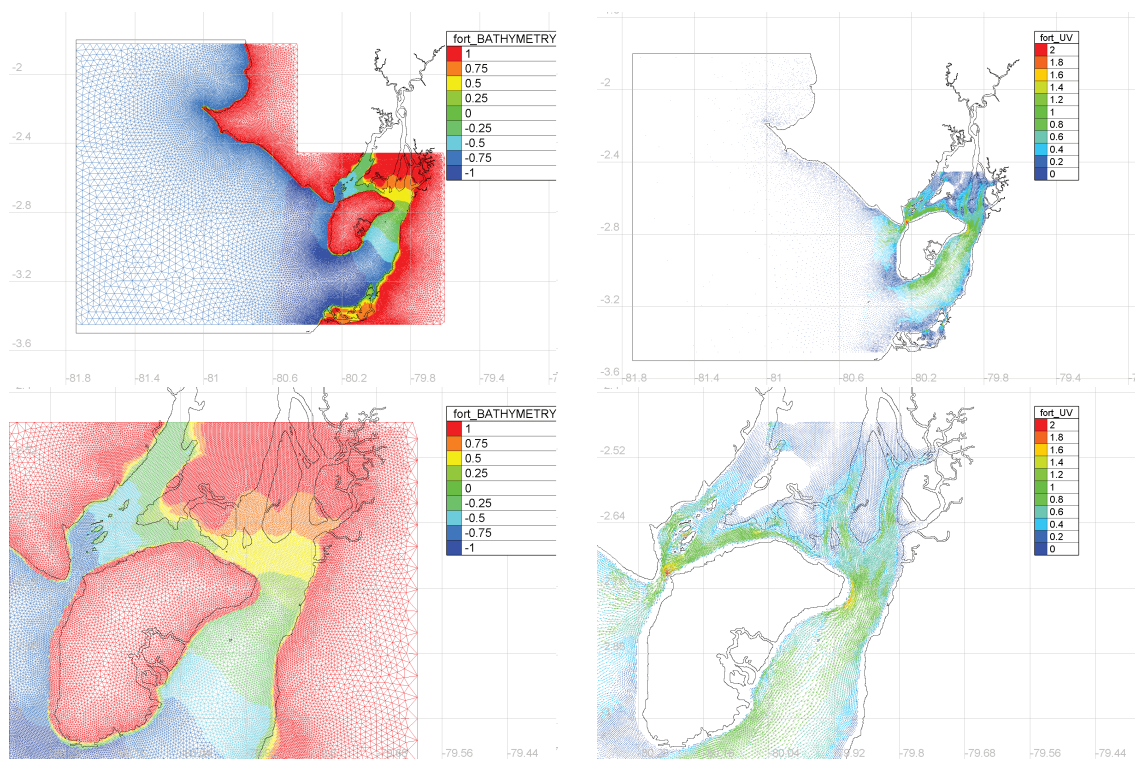


Figura 6.4: Captura de pantalla de ζ y U, V para $t = 15$ días y 5 horas para el modelo 1, incluyendo detalle dentro del golfo.

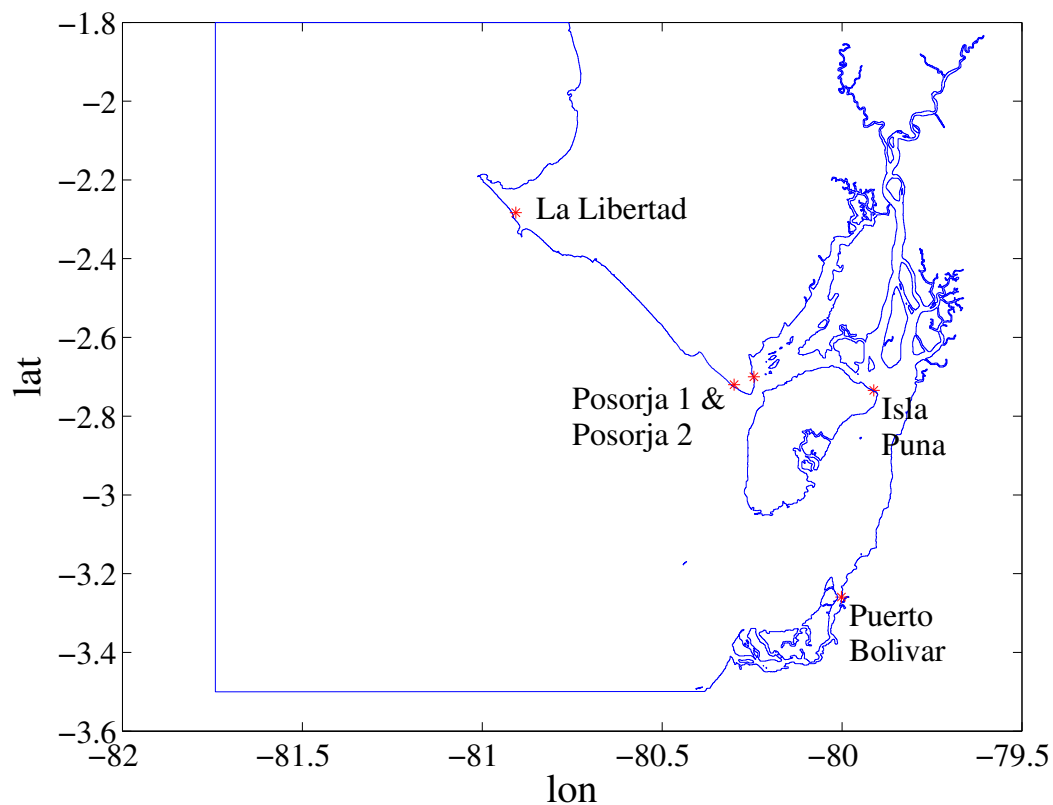
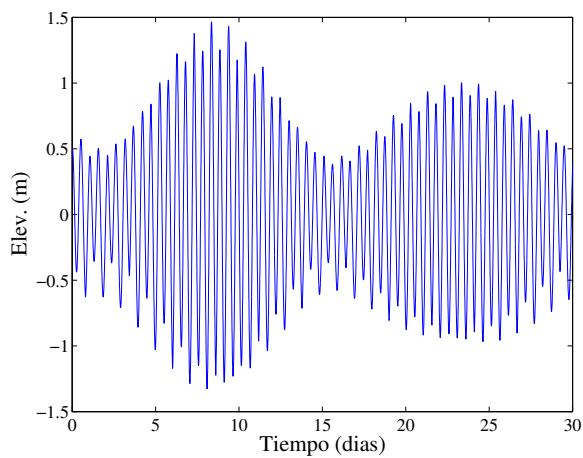
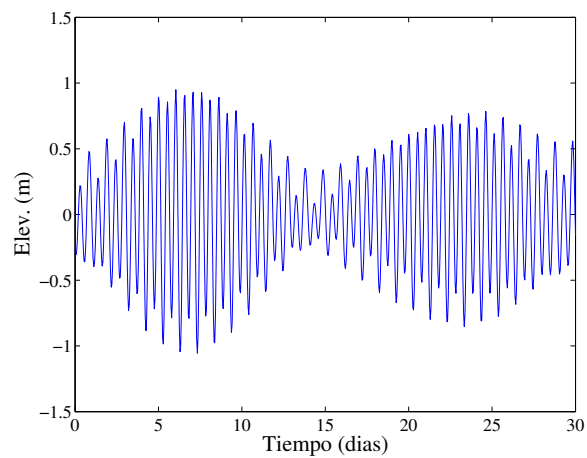


Figura 6.5: Puntos seleccionados para comparación

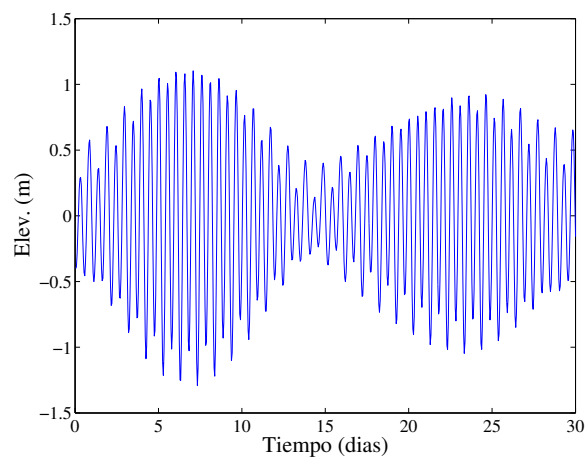
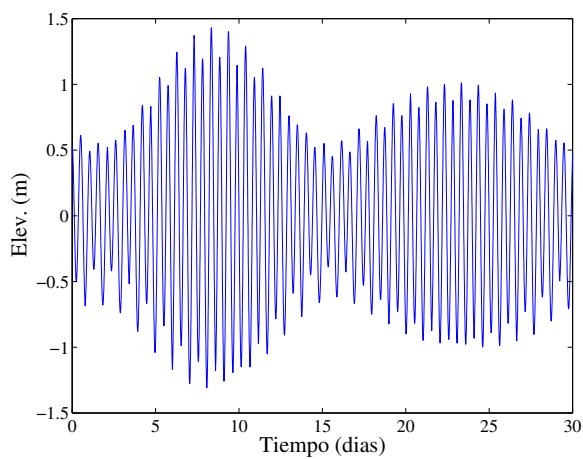
Datos observados



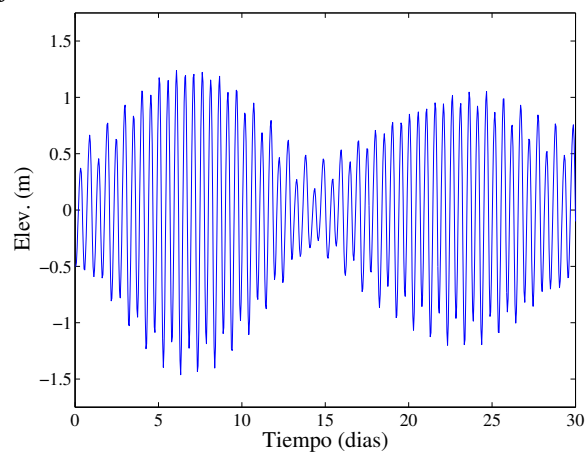
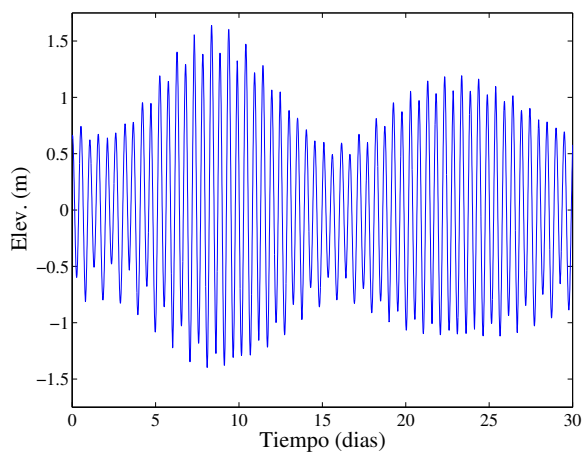
Datos del modelo



La Libertad



Posorja 1



Posorja 2

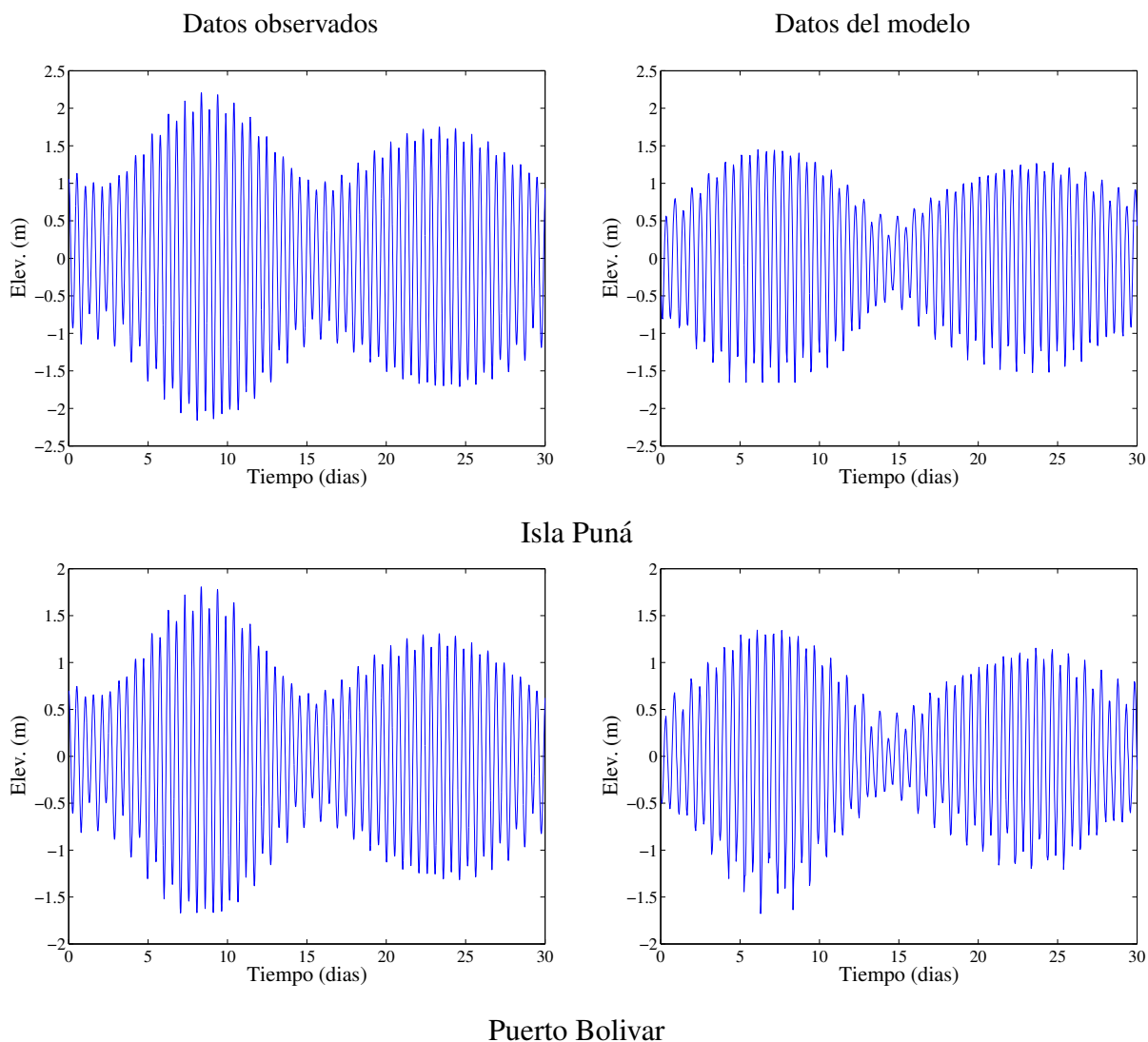


Figura 6.7: Series de tiempo de los datos observados y los datos del modelo para los puntos de la figura 5.2. (valores normalizados con respecto a un nivel de referencia)

En la figura 6.7 se pueden comparar varias características entre los datos observados y los datos obtenidos del modelo. Con respecto a las amplitudes, se ve que las de los datos provistos por el modelo son menores a las de los datos observados (una diferencia de aproximadamente 0.5 metros). Esto se debe a que se incluyeron únicamente 5 constituyentes en el modelo. Según Nielsen (2012), los modelos de precisión actuales usan hasta 40 constituyentes y, a pesar de que en el análisis FFT realizado en el capítulo 5 se vio que existen más constituyentes que los cinco obtenidos (figura 5.7), estos no fueron considerados para el análisis con el fin de mantener

la simplicidad del modelo. Cada uno de los constituyentes no incluidos aporta con un pequeño cambio de amplitud al modelo, sin embargo, su ausencia total causa una notable diferencia con los datos observados. Se recomienda para simulaciones posteriores trabajar con un mayor número de constituyentes de la marea.

Con respecto al periodo, se puede ver como este es prácticamente igual en ambos conjuntos de datos. Además, las curvas envolventes cuentan con la misma forma. Tanto los datos observados como los datos del modelo muestran los menores valores de elevación alrededor de los días 0, 15 y 30. Es decir, el modelo predice con exactitud los periodos diurnos, semidiurnos, de sicigia y cuadratura.

Finalmente, también se pueden comparar las magnitudes entre los diferentes puntos. Los datos observados muestran que el punto con menor valor de elevación es Posorja 1 (aprox. 1.4m), seguido por La Libertad, Posorja 2, Puerto Bolivar y, finalmente, Isla Puná con el mayor valor de elevación (aprox. 2.2m). Este mismo patrón se observa con los datos del modelo, es decir, el modelo es correcto al predecir en que zonas hay mayor y menor elevación de agua, a pesar que las amplitudes no sean las mismas.

Capítulo 7

Resumen, conclusiones y trabajo futuro

El objetivo del presente trabajo es implementar una herramienta para la simulación de mareas en el Golfo de Guayaquil. Para este efecto se utilizó el modelo ADCIRC pues es un modelo de amplia utilización entre la comunidad científica y, notablemente, es el modelo que utiliza la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en diversas aplicaciones. Este modelo además ha sido extensamente verificado en varias aplicaciones complementarias, como el transporte de sedimentos, nutrientes, entre otros, por lo que ofrece una amplia gama de posibilidades para trabajos futuros. Además es un modelo con licencia de distribución libre.

Para el diseño de las mallas computacionales se utilizó el software BluekenueTM, el cual es de gran versatilidad y cumple con las necesidades básicas requeridas para trabajar con ADCIRC. BluekenueTM permite no sólo el diseño de mallas computacionales sino también la generación de los archivos de entrada para la ejecución de ADCIRC, así como también el post-procesamiento de sus resultados. En el presente diseño de mallas, se tuvo que realizar algunas simplificaciones, principalmente con el objetivo de excluir las zonas complejas que pueden dar lugar a inestabilidades o uso excesivo de recursos computacionales, zonas que por el momento no son de gran interés (es de notar sin embargo, que de ser necesario estas zonas se pueden volver a incluir en la malla). Otras simplificaciones involucran el suavizado de la batimetría para

evitar inestabilidades puntuales y la especificación del río Guayas como un afluente uniforme y constante.

Para la simulación correcta de las mareas en zonas como la del Golfo de Guayaquil, que es una zona compleja con diversas irregularidades costeras y de relieve, es necesario disponer de una base de datos batimétricos precisa, pues las mareas en esas características están dominadas principalmente por efectos de batimetría. La base de datos con la que se cuenta actualmente permite realizar cálculos de forma aceptable, pero una comprobación en el campo es también importante.

Otro factor de gran importancia para la simulación correcta de las mareas en la zona costera es la especificación apropiada de las condiciones de contorno en aguas profundas. En estas zonas, las mareas están dominadas mayormente por efectos gravitacionales del sol y la luna y la configuración de los continentes (excluyendo fenómenos atmosféricos y de salinidad). Por lo tanto, se utilizaron datos del modelo TPXO (OSU Tidal inversion model) para las condiciones de contorno. En la implementación actual se utilizaron cinco componentes principales (M2, S2, N2, K2 y K1), obtenidos de las series de tiempo de la elevación de la marea aplicando un análisis FFT.

Los resultados obtenidos, que por el conjunto de todas las simplificaciones realizadas pueden considerarse preliminares en referencia a una implementación definitiva, son bastante prometedores. Se obtuvieron magnitudes en el orden correcto, tanto en amplitud, como en periodo de los componentes principales semidiurnos y de sicigia y cuadratura. Además, se obtuvo una consistencia espacial de las magnitudes de amplitud. Los valores actualmente obtenidos son ligeramente inferiores a los observados (aproximadamente 30%) principalmente porque no se han considerado todos los constituyentes presentes en el contorno. Para el desarrollo futuro es recomendable utilizar un mayor número de componentes y realizar la verificación de las variables críticas como batimetría y fase de la marea con datos de campo.

Se puede concluir entonces que se cumplieron los objetivos manifestados en el capítulo 1. En específico:

- Se implementó satisfactoriamente el modelo numérico ADCIRC en el Golfo de Guayaquil.
- Se obtuvieron resultados preliminares de elevación ζ y velocidad U, V , en forma gráfica y numérica (series de tiempo).
- Se realizó una comparación de carácter cualitativo con datos observados, en la que se determinó que los datos del modelo se asemejan principalmente en forma y frecuencia.

Estos resultados pudieron ser obtenidos gracias a que se realizaron con éxito las siguientes actividades:

- Se analizaron datos batimétricos para obtener siluetas del continente e islas.
- Se diseñaron mallas computacionales y se probó su eficacia tomando en cuenta diferentes formas y densidades.
- Se obtuvieron los constituyentes para las condiciones de contorno a partir de un análisis de frecuencias utilizando la transformada rápida de Fourier.
- Se aplicaron varias técnicas para simplificar el modelo, reduciendo así el tiempo computacional

Como trabajo futuro se recomienda

- Obtener condiciones de contorno más precisas para las fronteras, en especial un mayor número de constituyentes. Estas pueden ser obtenidas directamente de las series de tiempo procesadas en el capítulo 5.
- Realizar pruebas con mallas de bordes curvos, con el fin de evitar las inestabilidades descritas en el capítulo 6.
- Validar el modelo completamente con datos reales medidos por equipos propios en puntos específicos.

- Una vez validado del modelo, utilizar los resultados generales para implementar submodelos en áreas de interés (como las mostradas en la figura 4.1).
- Implementar las capacidades de ADCIRC para simular otros fenómenos, como por ejemplo transporte de sedimentos pues, según Tapia (2012), este es un grave problema en el golfo.

Apéndice A

Archivo fort.15

```
GUAYAS_RIVER      ! 32 CHARACTER ALPHANUMERIC RUN DESCRIPTION
SIM_1             ! 24 CHARACTER ALPHANUMERIC RUN IDENTIFICATION
0                ! NFOVER - NONFATAL ERROR OVERRIDE OPTION
1                ! NABOUT - ABREVIATED OUTPUT OPTION PARAMETER
-100             ! NSCREEN - UNIT 6 OUTPUT OPTION PARAMETER
0                ! IHOT - HOT START PARAMETER
2                ! ICS - COORDINATE SYSTEM SELECTION PARAMETER
111112          ! IM - MODEL SELECTION PARAMETER
1                ! NOLIBF - BOTTOM FRICTION TERM SELECTION PARAMETER
2                ! NOLIFA - FINITE AMPLITUDE TERM SELECTION PARAMETER
1                ! NOLICA - SPATIAL DERIVATIVE CONVECTIVE SELECTION PARAMETER
1                ! NOLICAT - TIME DERIVATIVE CONVECTIVE TERM SELECTION PARAMETER
0                ! NWP - VARIABLE BOTTOM FRICTION AND LATERAL VISCOSITY OPTION
                ! PARAMETER
1                ! NCOR - VARIABLE CORIOLIS IN SPACE OPTION PARAMETER
1                ! NTIP - TIDAL POTENTIAL OPTION PARAMETER
0                ! NWS - WIND STRESS AND BAROMETRIC PRESSURE OPTION PARAMETER
```

```

1          ! NRAMP - RAMP FUNCTION OPTION
9.81       ! G - ACCELERATION DUE TO GRAVITY - DETERMINES UNITS
-1        ! TAUO - WEIGHTING FACTOR IN GWCE
10        ! DT - TIME STEP (IN SECONDS)
0.00      ! STATIM - STARTING TIME (IN DAYS)
0.00      ! REFTIM - REFERENCE TIME (IN DAYS)
40        ! RNDAY - TOTAL LENGTH OF SIMULATION (IN DAYS)
10.0      ! DRAMP - DURATION OF RAMP FUNCTION (IN DAYS)
0 1 0     ! TIME WEIGHTING FACTORS FOR THE GWCE EQUATION
0.1 0 0 0.05 ! HO - MINIMUM CUTOFF DEPTH
-89 1.6963 ! SLAMO,SFEAO - CENTER OF CPP PROJECTION (NOT USED IF ICS=1,
          ! NTIP=0, NCOR=0)
0.0025    ! FFACTOR - HOMOGENEOUS LINEAR OR NONLINEAR BOTTOM FRICTION
          ! COEFFICIENT
2         ! ESLM - LATERAL EDDY VISCOSITY COEFFICIENT; IGNORED IF NWP =1
0.0       ! CORI - CORIOLIS PARAMETER - IGNORED IF NCOR = 1
5         ! NTIF - TOTAL NUMBER OF TIDAL POTENTIAL CONSTITUENTS BEING FORCED
M2        ! TIPOTAG - ALPHANUMERIC DESCRIPTION OF TIDAL POTENTIAL CONSTIT. 1
0.242334 1.405132186586160E-04 0.6930 0.9941 101.3723 ! TPK, AMIGT, ETRF, FFT, FACET
S2        ! TIPOTAG - ALPHANUMERIC DESCRIPTION OF TIDAL POTENTIAL CONSTIT. 2
0.112841 1.454543428312270E-04 0.6930 1.0004 359.8745 ! TPK, AMIGT, ETRF, FFT, FACET
N2        ! TIPOTAG - ALPHANUMERIC DESCRIPTION OF TIDAL POTENTIAL CONSTIT. 3
0.046398 1.378832654699680E-04 0.6930 0.9900 348.9695 ! TPK, AMIGT, ETRF, FFT, FACET
K1        ! TIPOTAG - ALPHANUMERIC DESCRIPTION OF TIDAL POTENTIAL CONSTIT. 4
0.141565 7.293139126548940E-05 0.7360 1.0337 18.3864 ! TPK, AMIGT, ETRF, FFT, FACET
K2        ! TIPOTAG - ALPHANUMERIC DESCRIPTION OF TIDAL POTENTIAL CONSTIT. 5
0.030704 1.458528205870830E-04 0.6930 1.0637 217.227 ! TPK, AMIGT, ETRF, FFT, FACET

```

```

5          ! NBFRR - TOTAL NUMBER OF FORCING FREQUENCIES ON OPEN BOUNDARIES
M2          ! CONSTITUENT. 1  ALPHA DESCRIPTOR
1.405132186586160E-04 0.9941 101.3723  ! CONST. 1  FREQ., NODAL FACTOR, EQUIL. ARG.
S2          ! CONSTITUENT. 2  ALPHA DESCRIPTOR
1.454543428312270E-04 1.0004 359.8745  ! CONST. 2  FREQ., NODAL FACTOR, EQUIL. ARG.
N2          ! CONSTITUENT. 3  ALPHA DESCRIPTOR
1.378832654699680E-04 0.9900 348.9695  ! CONST. 3  FREQ., NODAL FACTOR, EQUIL. ARG.
K1          ! CONSTITUENT. 4  ALPHA DESCRIPTOR
7.293139126548940E-05 1.0337 18.3864   ! CONST. 4  FREQ., NODAL FACTOR, EQUIL. ARG.
K2          ! CONSTITUENT. 5  ALPHA DESCRIPTOR
1.458528205870830E-04 1.0637 217.2271  ! CONST. 5  FREQ., NODAL FACTOR, EQUIL. ARG.
M2          ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.5330  91.1070 ! EMO, EFA (AMPLITUDE, PHASE)
0.5330  91.1070 !
...
S2          ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.2130  65.4850 !
0.2130  65.4850 ! EMO, EFA (AMPLITUDE, PHASE)
...
N2          ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.1400  149.7580 ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.1400  149.7580 ! EMO, EFA (AMPLITUDE, PHASE)
...
K1          ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.1230  -25.8980 ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.1230  -25.8980 ! EMO, EFA (AMPLITUDE, PHASE)
...

```

```

K2                ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.0650  -88.9960 ! ALPHA CONSTITUENT NAME
0.0650  -88.9960 ! EMO, EFA (AMPLITUDE, PHASE)
...
110.0           ! ANGINN : INNER ANGLE THRESHOLD
0              ! NFFR: NUMBER OF FREQUENCIES IN THE SPECIFIED NORMAL FLOW
              ! EXTERNAL BOUNDARY CONDITION
0 0 5 3        ! NOUVE,TOUTSE,TOUTFE,NSPOOLE:ELEV STATION OUTPUT INFO
0              ! TOTAL NUMBER OF ELEVATION RECORDING STATIONS
0 0 5 3        ! NOUTV,TOUTSV,TOUTFV,NSPOOLV:VEL STATION OUTPUT INFO
0              ! TOTAL NUMBER OF VELOCITY RECORDING STATIONS
1 0 40 360     ! NOUTGE,TOUTSGE,TOUTFGE,NSPOOLGE : GLOBAL ELEVATION OUTPUT INFO
1 0 40 360     ! NOUTGV,TOUTSGV,TOUTFGV,NSPOOLGV : GLOBAL VELOCITY  OUTPUT INFO
0              ! NHARFR - NUMBER OF CONSTITUENTS TO BE INCLUDED IN THE
              ! HARMONIC ANALYSIS
4 5 1 0        ! THAS,THAF,NHAINC,FMV - HARMONIC ANALYSIS PARAMETERS
1 1 1 1        ! NHASE,NHASV,NHAGE,NHAGV - CONTROL HARMONIC ANALYSIS AND OUTPUT TO
              ! UNITS 51,52,53,54
1 1236         ! NHSTAR,NHSINC - HOT START FILE GENERATION PARAMETERS
1 0 1.E-10 100 ! ITITER, ISLDIA, CONVCR, ITMAX - ALGEBRAIC SOLUTION PARAMETERS

```

Bibliografía

ADCIRC (2014). Adcirc Introduction. <http://adcirc.org/>.

Aquaveo, LLC (2013). SMS Introduction. <http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction>.

CAAM (1996). *Sistemas Biofísicos en el Golfo de Guayaquil*. Crearimagen.

CAMAE (2013). Problemas que afectan la Navegabilidad en el Río Guayas.

Cobos, L. E. y Montenegro, G. (2010). Estudio integrado del Golfo de Guayaquil del mioceno al reciente. Tesis de master, ESPOL.

cURL (2014). curl groks URLs. <http://curl.haxx.se/>.

Egbert, G. D. y Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:183–204.

Giardino, A. (2008). *Numerical Modelling of Sediment Transport in Shelf Seas and Estuaries. Case Studies: The Kwinte Bank and the IJzermonding*. Tesis doctoral, Katholieke Universiteit Leuven.

Government of Canada (2012). Blue Kenue™: Software tool for hydraulic modellers. http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue_kenue_index.html.

INOCAR (2014). Tabla de mareas puertos del ecuador. <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/tabla-de-mareas>.

- James, J. F. (2011). *A Student's Guide to Fourier Transforms with Applications in Physics and Engineering*. Cambridge University Press.
- Jiménez, R. (1983). Diatomeas y silicoflagelados del fitoplancton del Golfo de Guayaquil. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 2(2):193–281.
- Kantha, L. H. (1995). Barotropic tides in the global oceans from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tides 1. Model description and results. *Journal of Geophysical Research*, 100(C12):25283–25308.
- Kennish, M. J. (1994). *Practical Handbook of Marine Science*. Rutgers University.
- Kenny, Myers, y Hess (2012). *V DATUM Manual for Development and Support of NOAA's Vertical Datum Transportation Tool, V DATUM*. National Ocean Service.
- Kowalik, Z. y Luick, J. (2013). *The Oceanography of Tides*. University of Alaska Fairbanks.
- Luetlich, R., Westerink, J., y Scheffner, N. W. (1992). ADCIRC: Theory Report and Formulation. Technical report, US Army Corps of Engineers.
- Matsumoto, K., Takanezawa, T., y Ooe, M. (2000). Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56:567–581.
- Mazzege, P. y Bergé, M. (1994). Ocean tides in the Asian semienclosed seas from TOPEX/POSEIDON. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12):24867–24881.
- Montaño, M. y Sanfeliu, T. (2008). Ecosistema Guayas (Ecuador). Medio ambiente y Sostenibilidad. *Revista Tecnológica ESPOL*, 21(1):1–6.
- Nielsen, P. (2012). *Coastal and Estuarine Processes*, volumen 29 de *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific.

NOAA (2008). The Importance of Monitoring the Tides and Their Currents. http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/tides/tides09_monitor.html.

NOAA (2014). Why do we study tides? <http://oceanservice.noaa.gov/facts/tidestudy.html>.

Pugh, D. T. (1996). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons.

Stewart, R. W. (1975). *Oceanografía*, capítulo La Atmósfera y el Océano. Blume.

Tapia, J. C. (2012). Modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos. Tesis de m-ster, Universidad Nacional de La Plata.

Weisstein, E. W. (2014). Fast Fourier Transform. <http://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>.