

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos

Estudio numérico sobre la influencia fluvial y marina
en la formarción de barras en desembocaduras de
ríos andaluces

Autor: Francisco Javier Moreno Hidalgo

Tutor: Antonio Ruiz Reina

**Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de
Fluidos**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio numérico sobre la influencia fluvial y marina en la formarción de barras en desembocaduras de ríos andaluces

Autor:

Francisco Javier Moreno Hidalgo

Tutor:

Antonio Ruiz Reina

Profesor asociado

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Estudio numérico sobre la influencia fluvial y marina en la formación de barras en desembocaduras de ríos andaluces

Autor: Francisco Javier Moreno Hidalgo

Tutor: Antonio Ruiz Reina

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia y Belén

A mis profesores y compañeros

Agradecimientos

Agradecer, en primer lugar, a mi familia y a Belén por el apoyo durante estos años. También a mis amigos y compañeros de promoción, por haber hecho más ameno el trabajo diario. Y, por supuesto, a mi tutor, Antonio Ruiz, por darme la oportunidad de involucrarme en este estudio, por su gran aporte, ayuda y disponibilidad.

Francisco Javier Moreno Hidalgo

Sevilla, 2019

Las desembocaduras de los ríos son zonas donde confluyen una serie de agentes fluviales y marinos que tienen gran influencia sobre la morfología de éstas. Este estudio se centra en caracterizar el comportamiento de las desembocaduras de cauces frente a las interacciones de una avenida fluvial con el viento y las mareas. Para ello, se ha realizado un análisis mediante un modelo numérico a partir de datos de los principales cauces que desembocan en la costa andaluza. En el modelo se ha introducido una geometría fija y acciones variables, dando lugar a diferentes casos a simular en los que varía el caudal de descarga, las condiciones de marea y la posición en el tiempo de la descarga fluvial respecto al ciclo de marea.

Los resultados obtenidos muestran que la combinación de los agentes implicados en el análisis tiene influencia en la morfología de la desembocadura, variando notablemente según el momento en el que ocurra la avenida respecto al ciclo de marea.

Abstract

A series of fluvial and marine phenomena converge in river mouths. Their interaction has a great influence in their morphology. This study is focused on the characterization of the river mouth's response after a river flooding with the presence of wind and tides. To this extent, an analysis through a numeric model has been carried out using dates of the principal river mouths of the Andalusian coast. The variations of the fluvial discharge, tidal conditions and the time position between the peak flow and the tidal cycles give rise to a list of simulations.

The obtained results show that the combination of these variable actions has influence on the formation of mouth bars, mostly when the time position between the peak flow and the tidal cycles changes.

Índice

| | |
|---|-------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Abstract | xiii |
| Índice | xiv |
| Índice de Tablas | xvi |
| Índice de Figuras | xvii |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>OBJETIVO</i> | 1 |
| 1.2 <i>ANTECEDENTES</i> | 1 |
| 1.3 <i>METODOLOGÍA</i> | 2 |
| 1.4 <i>PROBLEMÁTICA ACTUAL</i> | 2 |
| 2 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ESTUDIO | 3 |
| 2.1 <i>DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</i> | 3 |
| 2.2 <i>DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA</i> | 3 |
| 2.2.1 Zona de cauce | 3 |
| 2.2.2 Zona marina | 4 |
| 2.3 <i>DEFINICIÓN DE LAS ACCIONES</i> | 8 |
| 2.3.1 Marea astronómica | 8 |
| 2.3.2 Marea meteorológica | 9 |
| 2.3.3 Viento | 10 |
| 2.3.4 Avenida del cauce | 10 |
| 2.4 <i>RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO. GEOMETRÍA Y ACCIONES</i> | 11 |
| 3 GENERACIÓN DEL MODELO | 13 |
| 3.1 <i>ECUACIONES DEL MODELO</i> | 13 |
| 3.2 <i>GEOMETRÍA DEL MODELO</i> | 15 |
| 3.3 <i>CONDICIONES DE CONTORNO Y ACCIONES DEL MODELO</i> | 16 |
| 3.4 <i>MALLA DEL MODELO</i> | 18 |
| 3.5 <i>PARÁMETROS DEL MODELO</i> | 18 |
| 3.6 <i>SIMULACIONES</i> | 20 |
| 4 RESULTADOS DEL MODELO | 21 |
| 4.1 <i>RESULTADOS HIDRODINÁMICOS</i> | 21 |
| 4.2 <i>RESULTADOS MORFODINÁMICOS</i> | 27 |
| 4.2.1 Evolución de la forma transversal de la barra | 28 |
| 4.2.2 Evolución de la forma longitudinal de la barra | 31 |
| 4.2.3 Volumen de la barra | 32 |
| 4.2.4 Área en planta de la barra | 33 |
| 4.2.5 Avance longitudinal de la barra | 35 |
| 4.2.6 Avance vertical de la barra | 35 |
| 4.2.7 Avance transversal de la barra | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | DISCUSIÓN | 38 |
| 5.1.1 | Velocidades | 38 |
| 5.1.2 | Volumen de la barra | 43 |
| 5.1.3 | Área en planta de la barra | 43 |
| 5.1.4 | Forma transversal de la barra | 44 |
| 5.1.5 | Alcance longitudinal de la barra | 45 |
| 5.1.6 | Alcance vertical de la barra | 46 |
| 5.1.7 | Alcance transversal de la barra | 47 |
| 5.1.8 | Tipo de avance: vertical o longitudinal | 53 |
| 6 | CONCLUSIONES | 54 |
| | Referencias | 55 |
| | ANEXO I. DATOS DE LOS CAUCES ESTUDIADOS | 56 |
| | ANEXO II. DATOS PARA ESTIMAR LA PROFUNDIDAD DE CIERRE | 59 |
| | ANEXO III. DATOS PARA CARACTERIZAR LA MAREA ASTRONÓMICA | 61 |
| | ANEXO IV. DATOS PARA CARACTERIZAR LA MAREA METEOROLÓGICA | 65 |
| | ANEXO V. DATOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO | 66 |
| | ANEXO VI. ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE LA AVENIDA | 67 |
| | ANEXO VII. ANÁLISIS SENSIBILIDAD DE LA MALLA | 69 |
| | ANEXO VIII. CALIBRACIÓN PARÁMETROS DEL MODELO | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2-1. Valores obtenidos para la profundidad de cierre | 5 |
| Tabla 3-1. Parámetros físicos | 18 |
| Tabla 3-2. Parámetros del sedimento | 19 |
| Tabla 3-3. Simulaciones llevadas a cabo en el estudio | 20 |
| Tabla 4-1. Duración de formación de barras en horas para cada simulación | 28 |
| Tabla 5-1. Condiciones bajo las que se produce la bifurcación de la barra | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1. Desembocadura del Guadiaro. Fuente: Google Maps | 2 |
| Figura 2-1. Desembocadura de los principales cauces andaluces considerados | 4 |
| Figura 2-2. Ubicación de los puntos SIMAR y Boyas empleados en el cálculo de la profundidad de cierre (h^*) | 5 |
| Figura 2-3. Profundidad de cierre estimada a partir de la ROM 0.3-91 | 5 |
| Figura 2-4. Relación $A - D_{50}$ [11] | 6 |
| Figura 2-5. Perfil de estudio: zona del cauce y zona marina | 7 |
| Figura 2-6. Comparación de la batimetría del modelo con la batimetría de la desembocadura del Andarax (izquierda) y Guadiaro (derecha) | 7 |
| Figura 2-7. Geometría del modelo | 8 |
| Figura 2-8. Red de mareógrafos de Puertos del Estado | 8 |
| Figura 2-9. Red de medida de presión atmosférica de Puertos del Estado | 9 |
| Figura 2-10. Red de medida de viento de Puertos del Estado | 10 |
| Figura 2-11. Modelo de hidrograma de entrada con caudal punta de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ | 11 |
| Figura 2-12. Representación de las tres condiciones de marea y la avenida de entrada al cauce posicionada respecto al ciclo de marea | 12 |
| Figura 3-1. Geometría del modelo | 16 |
| Figura 3-2. Perfil $x=0$ de la geometría | 16 |
| Figura 3-3. Condiciones de contorno | 17 |
| Figura 3-4. Distintas direcciones del viento consideradas | 17 |
| Figura 3-5. Malla en la desembocadura | 18 |
| Figura 3-6. Número de Manning (rugosidad) | 19 |
| Figura 4-1. Simulaciones con avenida próxima a pleamar. Velocidades en la desembocadura y condición de contorno de marea | 22 |
| Figura 4-2. Simulaciones con avenida próxima a bajamar y transición pleamar – bajamar. Velocidades en la desembocadura y condición de conotrno de marea | 22 |
| Figura 4-3. Condición de contorno de marea, velocidad punta y caudal punta en las situaciones de punta de avenida próxima a pleamar | 23 |
| Figura 4-4. Condición de contorno de marea, velocidad punta y caudal punta en las situaciones de punta de avenida próxima a bajamar y en la transición pleamar-bajamar | 23 |
| Figura 4-5. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P; $Q_p500;A_t1.75$ y B; $Q_p500;A_t1.75$ | 24 |
| Figura 4-6. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P; $Q_p500;A_t0.70$ y B; $Q_p500;A_t0.70$ | 25 |
| Figura 4-7. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P; $Q_p500;A_t0.25$ y B; $Q_p500;A_t0.25$ | 25 |
| Figura 4-8. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P; $Q_p500;A_t1.00$ | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-9. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P;Q _p 700;A _t 1.75 y B;Q _p 700;A _t 1.75 | 26 |
| Figura 4-10. Terreno inicial y velocidades para la simulación P;Q _p 500;A _t 1.75 al variar el ángulo de incidencia del viento a las 19:48:54 del segundo día de simulación | 27 |
| Figura 4-11. Duración de formación de barras con referencia de mareas | 28 |
| Figura 4-12. Evolución de la sección transversal de cada una de las simulaciones realizadas (sin incluir las que introducen la desviación del viento). Cada una indica una referencia con el tiempo de formación de la barra | 30 |
| Figura 4-13. Posición final de la sección transversal de la barra en su punto de máxima sedimentación para cada simulación (sin incluir efecto del viento) | 30 |
| Figura 4-14. Evolución longitudinal de cada una de las simulaciones realizadas (sin incluir las que introducen la desviación del viento). Cada una indica una barra de referencia con tiempo | 32 |
| Figura 4-15. Volumen acumulado mientras dura la formación de la barra | 33 |
| Figura 4-16. Volumen en cada instante de tiempo mientras dura la formación de la barra | 33 |
| Figura 4-17. Área acumulada en planta mientras dura la formación de la barra | 34 |
| Figura 4-18. Área en planta de la barra mientras dura la formación de la barra | 34 |
| Figura 4-19. Avance longitudinal de la barra en cada simulación | 35 |
| Figura 4-20. Avance vertical de la barra en cada simulación | 36 |
| Figura 4-21. Avance transversal del centro de gravedad de la barra en cada simulación | 37 |
| Figura 5-1. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P;Q _p 500;A _t 1.75 | 39 |
| Figura 5-2. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P;Q _p 500;A _t 0.70 | 39 |
| Figura 5-3. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P;Q _p 500;A _t 0.25 | 40 |
| Figura 5-4. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B;Q _p 500;A _t 1.75 | 40 |
| Figura 5-5. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B;Q _p 500;A _t 0.70 | 41 |
| Figura 5-6. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B;Q _p 500;A _t 0.25 | 41 |
| Figura 5-7. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P;Q _p 700;A _t 1.75 | 42 |
| Figura 5-8. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B;Q _p 700;A _t 1.75 | 42 |
| Figura 5-9. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P-B;Q _p 500;A _t 1.75 | 43 |
| Figura 5-10. Análisis de la forma transversal de la barra | 45 |
| Figura 5-11. Posición final de las barras en cada simulación en el perfil x=0 m | 46 |
| Figura 5-12. Velocidad de la simulación (P;Q _p 500;A _t 1.75;θ60) en los primeros minutos al llegar la avenida a la zona marina | 48 |
| Figura 5-13. Velocidad de la simulación (P;Q _p 500;A _t 1.75;θ60) en el instante de inicio de formación de la barra | 48 |
| Figura 5-14. Velocidad de la simulación (P;Q _p 500;A _t 1.75;θ60) a las tres horas del inicio de formación de la barra | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 5-15. Influencia del viento en la forma transversal de la barra | 51 |
| Figura 5-16. Evolución de la forma transversal de la barra en la simulación P;Q _p 500;A _t 1.75;60° para un tamaño de sedimento de 200 μm. A la izquierda sin actualizar la batimetría; a la derecha con la batimetría actualizada al tamaño de sedimento | 52 |
| Figura 5-17. Influencia del tamaño de sedimento sobre el avance transversal de la barra para la simulación P;Q _p 500;A _t 1.75;60° variando el tamaño de sedimento y actualizando y sin actualizar la batimetría al tamaño del material | 52 |
| Figura 5-18. Tipo de avance de la barra | 53 |

1 INTRODUCCIÓN

La desembocadura de los ríos es la zona donde confluye el agua procedente de los cauces y el agua procedente de mares y océanos. Es una zona influenciada por diversos agentes naturales entre los que se encuentran el caudal de descarga fluvial, oleaje, viento, mareas. Además de fenómenos naturales, están influenciadas por actividades humanas, como la construcción de presas y otros factores.

Una desembocadura puede tomar distintas formas según la interacción entre los agentes anteriores, teniendo influencia tanto sobre la zona adyacente, como sobre espacios más alejados. Además de la escala espacial, también tiene influencia la escala temporal en su comportamiento.

Este trabajo se centra en el estudio hidrodinámico y morfodinámico de desembocaduras de ríos, concretamente en la formación de barras como consecuencia del depósito de sedimentos en las mismas tras el paso de una avenida fluvial, mediante el empleo de un modelo numérico. Para ello, se han tomado como base para el estudio variables propias de desembocaduras de cauces andaluces.

1.1 OBJETIVO

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es el estudio de la influencia de diversos agentes presentes en las desembocaduras de ríos en la creación y evolución de las barras que se forman en las mismas durante el paso de una avenida fluvial, tomando como datos de partida variables y características propias de desembocaduras de cauces andaluces. Concretamente, se estudia la influencia de la marea, el viento, la magnitud de la avenida fluvial y la ubicación temporal de ésta respecto al ciclo de marea.

La magnitud de los agentes que interfieren en el estudio se han tomado para un periodo de retorno de 25 años, dada su mayor probabilidad de ocurrencia.

1.2 ANTECEDENTES

Numerosos autores han estudiado la afección a la hidrodinámica y morfodinámica de agentes naturales en las desembocaduras, y cómo afectan estos agentes a la morfología de las barras que se forman. La mayoría de estos estudios son referidos a tiempos de simulación mayores, incluyendo incluso factores de escala.

Existen estudios que explican el motivo de la formación y cómo evolucionan las barras en las desembocaduras (Edmonds y Slingerland, 2007) [1], otros que explican la influencia de distintos agentes como el oleaje con ángulo de incidencia (Nardin y Fagherazzi, 2012) [2] y las mareas (Leonardi et al, 2013) [3].

Algunos autores también han estudiado la influencia de la pendiente marina como cuenca receptora de la avenida en la formación de la barra (Jiménez-Robles, Ortega-Sánchez y Losada, 2016) [4].

Además de la diferencia en cuanto a la escala temporal, estos estudios citados caracterizan el lecho marino con pendiente constante, e incluyendo la mayoría de ellos pendientes horizontales o casi horizontales. Además, en ellos, la avenida fluvial aparece caracterizada por una velocidad que se mantiene constante durante la

simulación.

1.3 METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología seguida para la realización del estudio, en primer lugar, se han estudiado los agentes presentes en la desembocadura de los ríos, entre los que se encuentran:

- Caudal de descarga fluvial.
- Viento.
- Oleaje.
- Marea astronómica.
- Marea meteorológica.

De los agentes mencionados, todos ellos se han caracterizado para tenerlos en cuenta en el estudio, exceptuando el oleaje.

Una vez conocidos y definidos los agentes, se han realizado diferentes simulaciones haciendo uso del modelo hidrodinámico y morfodinámico Delft3D (Lesser et al, 2004) [5]. Se trata de un modelo numérico que integra una serie de módulos, de los cuales, se han usado el hidrodinámico y el de transporte de sedimentos.

Posteriormente, tras realizar las simulaciones, se han analizado y discutido los resultados obtenidos.

1.4 PROBLEMÁTICA ACTUAL

La motivación de la realización del estudio se encuentra en que en la actualidad se presentan casos en los que se ven implicadas las variables tomadas para el estudio.

Un ejemplo se da en la desembocadura del río Guadiaro (Figura 1-1), en Cádiz, donde cada cierto tiempo se genera una barra que cierra la desembocadura. Este fenómeno impide la renovación del agua, generando un proceso de eutrofización de la misma.



Figura 1-1. Desembocadura del Guadiaro. Fuente: Google Maps

2 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ESTUDIO

Para la definición del modelo de una desembocadura es necesario caracterizar dos tipos de parámetros:

- Geometría.
- Acciones.

Ambos tipos de parámetros han sido relacionados con un área de estudio, la desembocadura de ríos andaluces.

La geometría del modelo se va a tomar fija, manteniéndose constante en el estudio. Por otro lado, puesto que las acciones presentes en las desembocaduras andaluzas tienen gran variabilidad en función de la zona concreta a estudiar, se van a combinar estas acciones variando su magnitud, dando lugar a distintos casos a analizar.

2.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio que se ha empleado para la definición de las variables del modelo se corresponde con el territorio de Andalucía. Se han estudiado las principales desembocaduras pertenecientes a esta zona y se ha caracterizado su geometría y acciones para la definición del modelo.

2.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

La geometría de una desembocadura presenta dos zonas claramente diferenciadas:

- Zona de cauce.
- Zona marina.

2.2.1 Zona de cauce

Un cauce está caracterizado por un ancho, un calado y una pendiente, la cual se va a tomar constante en toda la longitud.

Al tratarse de un modelo teórico, para simplificarlo, la sección del cauce se ha tomado como rectangular, es por ello que esté determinada únicamente con el calado y el ancho.

Para la definición del ancho y del calado se han estudiado varias secciones de cauces en sus últimos metros, próximas a la desembocadura, mediante un modelo digital del terreno elaborado por el Instituto Geográfico Nacional con paso de malla de 5 m.

Los cauces seleccionados son aquellos cuya jerarquía es de 4 o 5 dentro del territorio andaluz, eliminando al río Guadalquivir (único de jerarquía 6) debido a que se trata de un caso excepcional dentro del ámbito

estudiado. Se han caracterizado los siguientes ríos: rambla de Albuñol, rambla de Morales, río Adra, río Almanzora, río Andarax, río Barbate, río de Aguas, río Guadalete, río Guadalhorce, río Guadarranque, río Gadiana, río Guadiaro, río Odiel, río Palmones, río Piedras y río Vélez (Figura 2-1).

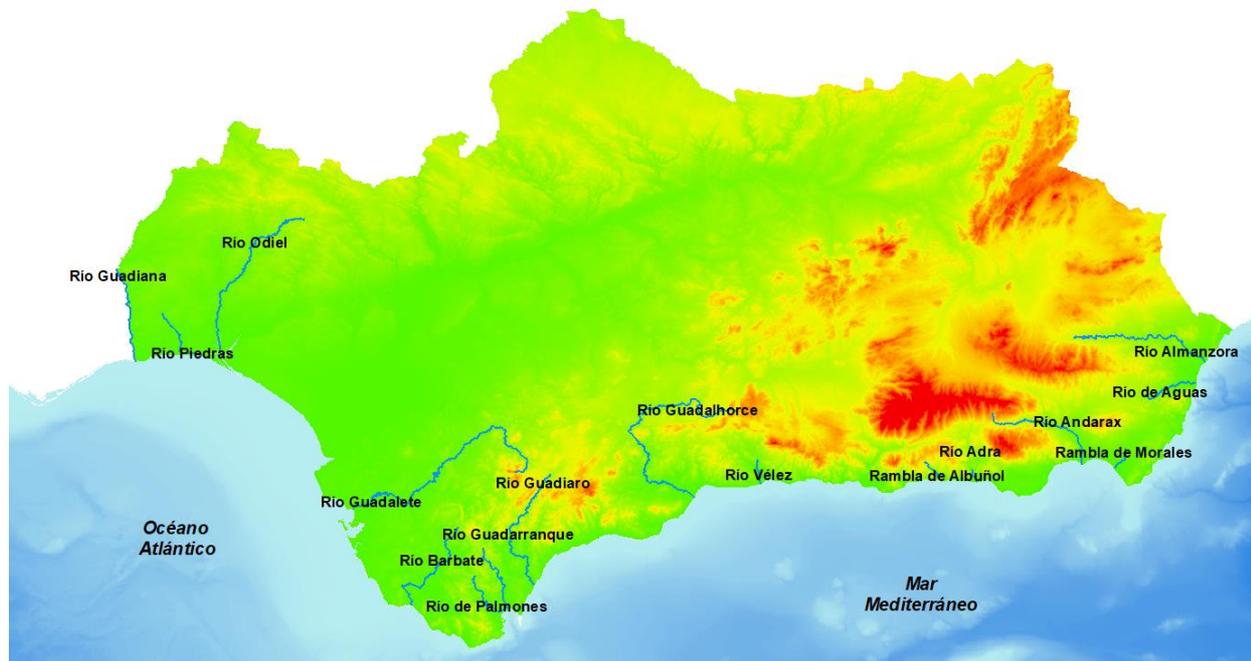


Figura 2-1. Desembocadura de los principales cauces andaluces considerados

En el Anexo I del presente documento se incluyen los datos tomados de cada uno de los cauces representados. Dada la gran variabilidad de los datos, se ha optado por tomar como mayor referencia el río Guadiaro y el río Andarax, puesto que se trata de dos ríos representativos y que no se encuentran regulados.

Las dimensiones finales de la sección elegida son:

- Ancho: 250 m.
- Calado: 3.5 m.

En cuanto a la pendiente, tomando como referencia un estudio actual en el mismo ámbito geográfico (Ruiz, Zarzuelo, López y López, 2018) [6] se consideran representativas de los cauces en estudio valores de la pendiente entre 0.2 y 0.7 %, tomando finalmente el valor de 0.2 %.

2.2.2 Zona marina

Se propone un perfil de la zona marina formado por dos tramos: tramo parabólico y tramo de pendiente constante.

El tramo parabólico se ha caracterizado como un perfil de playa en equilibrio, tomando para ello la formulación de perfil de equilibrio de Dean (1977). Un perfil de Dean es una forma de perfil de playa en equilibrio en la dirección perpendicular a la costa, que se extiende desde la línea de costa hasta la profundidad de cierre. Se entiende como profundidad de cierre, aquella profundidad a partir de la cual el oleaje no tiene influencia sobre la forma del perfil de playa. Existen distintas formulaciones para estimar la profundidad de cierre (h^*). Entre ellas, se propuso para la costa española tras analizar las distintas fachadas marítimas de la ROM [7] la siguiente expresión para la profundidad de cierre, la cual depende de la altura de ola significativa superada solo 12 horas al año ($H_{s,12}$) (Medina, 1995, cit. en Gómez, 2019) [8]:

$$h^* = 1.57H_{s,12} \quad (2-1)$$

El valor de $H_{s,12}$ ha sido calculado a partir de los datos de régimen medio de oleaje recogidos por Puertos del Estado en boyas o puntos SIMAR cercanos a la línea de costa de estudio.

En el Anexo II se muestran los datos empleados para el cálculo de la profundidad de cierre.

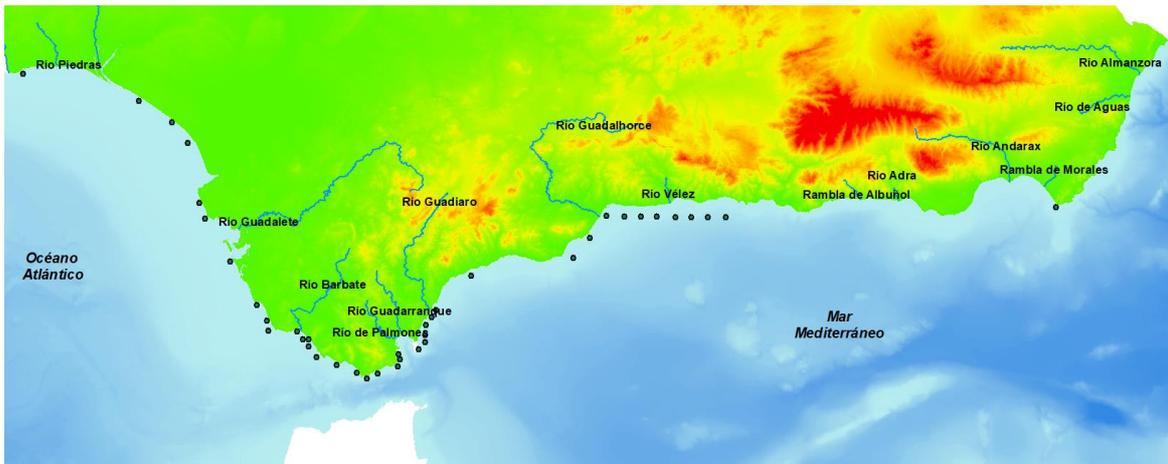


Figura 2-2. Ubicación de los puntos SIMAR y Boyas empleados en el cálculo de la profundidad de cierre (h^*)

En la Tabla 2-1 se incluye un resumen de la profundidad de cierre obtenida para distintas zonas dentro del ámbito de estudio.

Tabla 2-1. Valores obtenidos para la profundidad de cierre

| Zona | h^* (m) |
|---------|-----------|
| Huelva | 5 |
| Cádiz | 6 a 7 |
| Málaga | 4.5 a 5.5 |
| Granada | 4.5 a 5 |
| Almería | 5 |

Estos valores se han comparado con los calculados a partir de la ROM 0.3-91 (Figura 2-3), obteniendo valores similares.

| (ROM 03-91) | Boya | H_{S12} (m) | h^* (m) |
|-------------|----------|---------------|-----------|
| I | Gijón | 5.7 | 9 |
| II | Coruña | 7.0 | 11 |
| III | Silleiro | 7.0 | 11 |
| IV | Cádiz | 3.8 | 6.0 |
| V | Málaga | 2.8 | 4.5 |
| VI | Palos | 3.5 | 5.5 |
| VII | Valencia | 2.5 | 4.0 |
| VIII | Rosas | 3.8 | 6.0 |

Figura 2-3. Profundidad de cierre estimada a partir de la ROM 0.3-91

Finalmente, para la generación del modelo, se adopta una profundidad de cierre de 6.5 m.

El perfil de equilibrio de Dean viene dado por la siguiente expresión:

$$h = A x^{2/3} \quad (2-2)$$

Siendo:

- h : valor de la profundidad.
- x : distancia al origen.
- A : factor de escala que depende del tamaño de sedimento (D_{50}).

Por tanto, es necesario caracterizar el tamaño medio del sedimento (D_{50}) de la zona de estudio para generar la

batimetría mediante el perfil de Dean.

La caracterización de la granulometría de la zona marina del ámbito de estudio se trata de un proceso complejo, debido a la falta de datos libres de los que se dispone. Tomando recomendaciones y alguna referencia bibliográfica en la zona de estudio [9] [10], finalmente se ha optado por tomar un valor de 0.50 mm.

Para obtener el factor de escala A se puede emplear una expresión empírica:

$$A = 0.5 \omega_s^{0.44} \quad (2-3)$$

Siendo ω_s la velocidad de caída del sedimento:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{4 (\rho_s - \rho) g D_{50}}{3 \rho C_D}} \quad (2-4)$$

Donde:

- ρ_s : densidad del sedimento.
- ρ : densidad del agua.
- C_D : coeficiente de arrastre.

Otra forma de determinar A es mediante la siguiente tabla, obtenida del Coastal Engineering Manual [11]:

| d (mm) | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.1 | 0.063 | 0.0672 | 0.0714 | 0.0756 | 0.0798 | 0.084 | 0.0872 | 0.0904 | 0.0936 | 0.0968 |
| 0.2 | 0.100 | 0.103 | 0.106 | 0.109 | 0.112 | 0.115 | 0.117 | 0.119 | 0.121 | 0.123 |
| 0.3 | 0.125 | 0.127 | 0.129 | 0.131 | 0.133 | 0.135 | 0.137 | 0.139 | 0.141 | 0.143 |
| 0.4 | 0.145 | 0.1466 | 0.1482 | 0.1498 | 0.1514 | 0.153 | 0.1546 | 0.1562 | 0.1578 | 0.1594 |
| 0.5 | 0.161 | 0.1622 | 0.1634 | 0.1646 | 0.1658 | 0.167 | 0.1682 | 0.1694 | 0.1706 | 0.1718 |
| 0.6 | 0.173 | 0.1742 | 0.1754 | 0.1766 | 0.1778 | 0.179 | 0.1802 | 0.1814 | 0.1826 | 0.1838 |
| 0.7 | 0.185 | 0.1859 | 0.1868 | 0.1877 | 0.1886 | 0.1895 | 0.1904 | 0.1913 | 0.1922 | 0.1931 |
| 0.8 | 0.194 | 0.1948 | 0.1956 | 0.1964 | 0.1972 | 0.198 | 0.1988 | 0.1996 | 0.2004 | 0.2012 |
| 0.9 | 0.202 | 0.2028 | 0.2036 | 0.2044 | 0.2052 | 0.206 | 0.2068 | 0.2076 | 0.2084 | 0.2092 |
| 1.0 | 0.210 | 0.2108 | 0.2116 | 0.2124 | 0.2132 | 0.2140 | 0.2148 | 0.2156 | 0.2164 | 0.2172 |

Figura 2-4. Relación A – D_{50} [11]

Para el tamaño de sedimento elegido, el factor de escala tiene un valor de 0.161.

En cuanto al tramo de pendiente constante, se ha elegido una pendiente tal que produzca una transición suave entre ambos tramos sin un cambio brusco en el perfil, obteniendo un valor de 1.4 %.

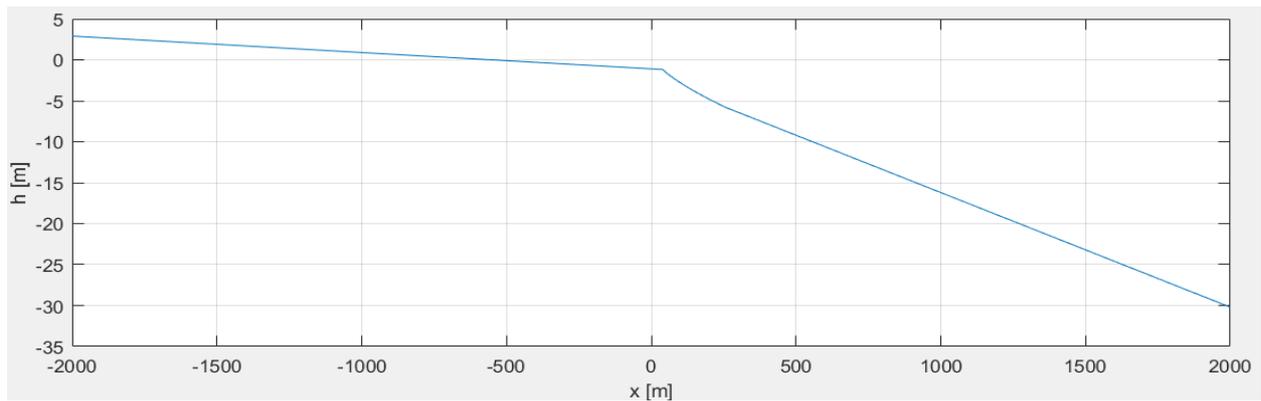


Figura 2-5. Perfil de estudio: zona del cauce y zona marina

El perfil de la zona marina final, se ha comparado con el perfil de las batimetrías de los cauces anteriormente mostrados, haciendo uso de datos batimétricos del Instituto Hidrográfico de la armada. En la Figura 2-6, se muestra la comparación con el río Andarax y el río Guadiaro.

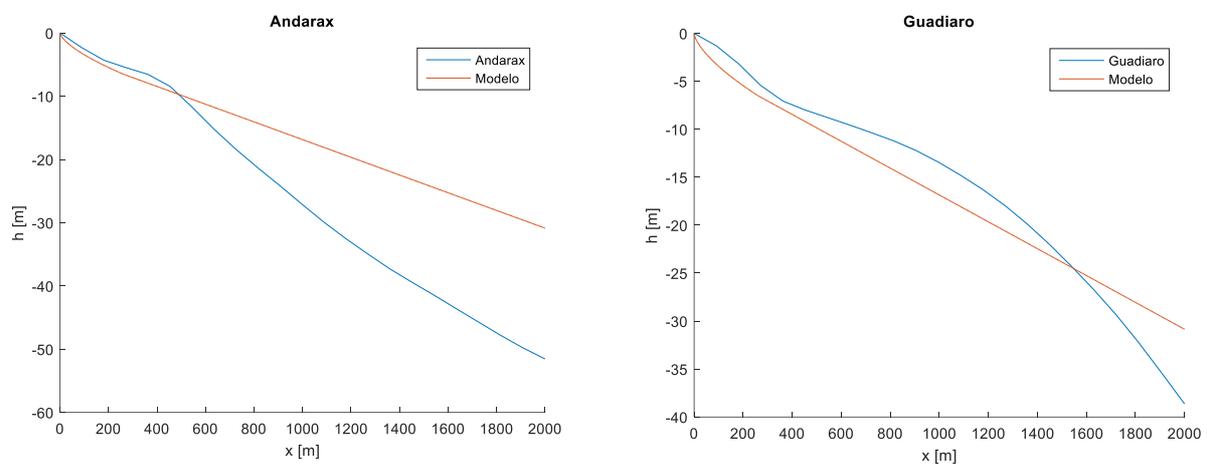


Figura 2-6. Comparación de la batimetría del modelo con la batimetría de la desembocadura del Andarax (izquierda) y Guadiaro (derecha)

En resumen, la geometría del modelo (Figura 2-7) queda caracterizada por los siguientes parámetros:

- Cauce de sección rectangular:
 - Calado: 3.5 m.
 - Ancho: 250 m.
- Pendiente del cauce de 0.2%.
- Batimetría formada por perfil de Dean con $D_{50}=0.50$ mm unido a un tramo de pendiente constante al 1.4 %.

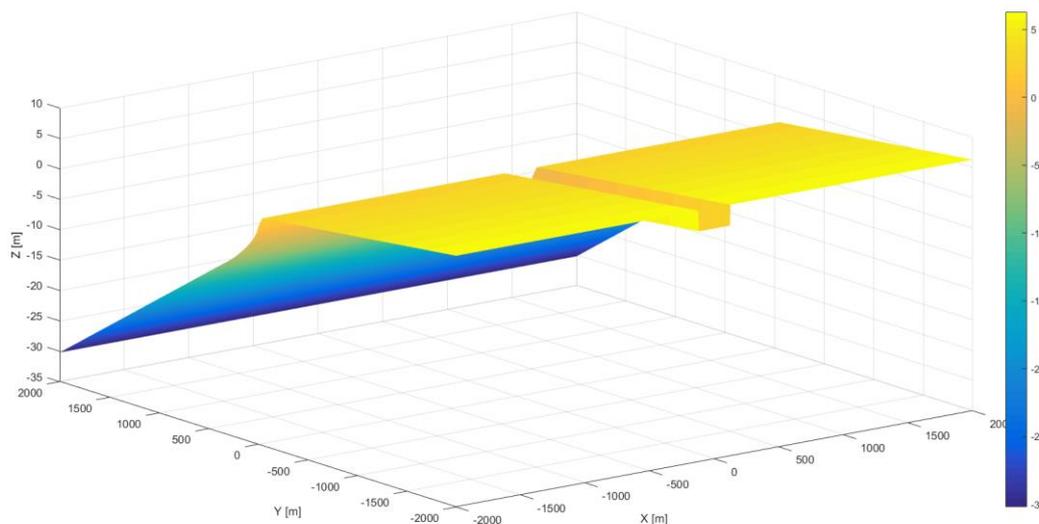


Figura 2-7. Geometría del modelo

2.3 DEFINICIÓN DE LAS ACCIONES

Las acciones son consideradas parámetros variables en el presente estudio, y se han caracterizado las siguientes:

- Marea astronómica.
- Marea meteorológica.
- Viento.
- Hidrograma o avenida fluvial.

En la definición de estas variables toma especial importancia la escala temporal, siendo la elegida para este estudio una escala a corto plazo, por lo que se va a utilizar un periodo de retorno de 25 años en la caracterización de variables que lo requieran.

2.3.1 Marea astronómica

Los datos de marea astronómica se han tomado de los registros históricos de Puertos del Estado.



Figura 2-8. Red de mareógrafos de Puertos del Estado

Dada la gran variabilidad en cuanto a la magnitud de la marea astronómica en la costa andaluza, se ha decidido tomar tres tipos de marea astronómica, cada una con las siguientes amplitudes de marea:

- Marea 1: amplitud de 1.75 m.
- Marea 2: amplitud de 0.70 m.
- Marea 3: amplitud de 0.25 m.

Cada una se ha caracterizado por 7 armónicos de marea, reconstruyendo la señal según la siguiente expresión:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2-5)$$

Donde:

- a_0 : nivel medio.
- a_i : amplitud de cada componente de marea i .
- ω_i : frecuencia de cada componente de marea i .
- φ_i : fase de cada componente de marea i .

La metodología seguida para la selección de los armónicos se presenta en el Anexo III.

2.3.2 Marea meteorológica

La marea meteorológica es un fenómeno con influencia en las desembocaduras, ya que producen sobreelevaciones y depresiones del nivel del mar, teniendo influencia sobre las velocidades que se producen.

Para la caracterización de la marea meteorológica de la zona de estudio se ha empleado los datos que ofrece Puertos del Estado.

Puertos del Estado cuenta con estaciones meteorológicas con series históricas de valores de presión atmosférica, situadas en puntos cercanos a la línea de costa. En la Figura 2-9 se muestra la red de medida de presión atmosférica de Puertos del Estado.



Figura 2-9. Red de medida de presión atmosférica de Puertos del Estado

Esta red muestra valores máximos y mínimos registrados y medias mensuales, obteniendo lo siguiente en el ámbito de estudio:

- Variación máxima sobre la presión normal: 30.6 mb.
- Variación máxima bajo la presión normal: 31 mb.
- Variación media sobre la presión normal: 20.12 mb.
- Variación media sobre bajo la presión normal de 7.5 mb.

Se ha tomado como valor característico una variación de presión de 25 mb sobre la presión normal, que se traduce en una variación de 25 cm respecto al nivel medio del mar.

En el Anexo IV se muestran los datos extraídos de esta red de medidas históricas de presiones atmosféricas.

2.3.3 Viento

La caracterización del viento se ha realizado a partir del análisis del régimen medio de los datos históricos que facilita Puertos del Estado. Se dispone de datos tanto en estaciones meteorológicas repartidas por la costa andaluza como en puntos de predicción.



Figura 2-10. Red de medida de viento de Puertos del Estado

Para el análisis del viento se han tomado únicamente los datos de las estaciones meteorológicas. En el Anexo V se muestran los datos extraídos y cómo se han tratado.

Para un periodo de retorno de 20 a 30 años, según el análisis de los datos, se obtiene una velocidad del viento de 10 m/s.

En cuanto a la dirección del viento, puesto que se trata de un modelo teórico sin una ubicación exacta, se han tomado tres direcciones posibles:

- Dirección normal a la línea de costa e inversa a la descarga fluvial.
- Dirección formando 30° con la normal a la línea de costa.
- Dirección formando 60° con la normal a la línea de costa.

2.3.4 Avenida del cauce

Para la definición de la avenida, se ha tomado un caudal punta a partir del cual se ha definido un hidrograma, con un tiempo base de 12 horas, siguiendo el método del SCS.

Los caudales punta propios de la zona de estudio se encuentran entre 100 y 1000 m³/s para un periodo de retorno entre 20 y 50 años (Ruiz, Zarzuelo, López y López, 2018) [6].

Para el estudio, se ha decidido tomar dos hidrogramas distintos, ambos con la punta dentro del intervalo anterior, de 500 y 700 m³/s.

La metodología para la creación del hidrograma se muestra en el Anexo VI.

En la Figura 2-11 se muestra un ejemplo de la avenida con punta de 500 m³/s.

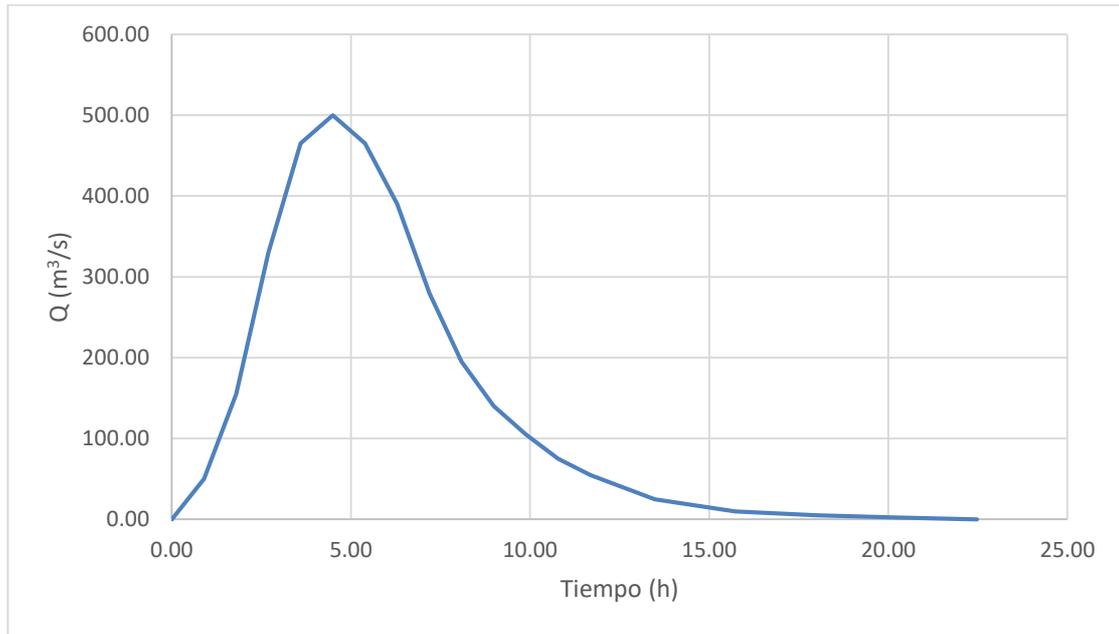


Figura 2-11. Modelo de hidrograma de entrada con caudal punta de 500 m³/s

La ubicación en el tiempo de la avenida va a variar según la simulación, teniendo los siguientes casos:

- Punta del hidrograma próxima a la pleamar.
- Punta del hidrograma próxima a la bajamar.
- Punta del hidrograma próxima al punto medio entre pleamar y bajamar.

2.4 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO. GEOMETRÍA Y ACCIONES

A continuación, se resumen los parámetros de geometría y acciones considerados en el modelo.

- Cauce de sección rectangular:
 - Calado: 3.5 m.
 - Ancho: 250 m.
- Cauce de pendiente constante de 0.2%.
- Batimetría caracterizada por perfil de equilibrio de Dean con $D_{50}=500 \mu\text{m}$.
- Marea astronómica: tres tipos de mareas.
 - Condición 1: amplitud de 1.75 m.
 - Condición 2: amplitud de 0.70 m.
 - Condición 3: amplitud de 0.25 m.
- Marea meteorológica: oscilaciones entre -0.25 m y 0.25 m.
- Viento: velocidad de 10 m/s en dirección contraria a la descarga fluvial y ángulo de incidencia variable de 0°, 30° y 60° respecto a la normal a la línea de costa.
- Hidrograma de la avenida:
 - Caudal punta: 500 m³/s y 700 m³/s.
 - Tiempo base: 12 h.
 - Ubicación de la punta de la avenida próxima a pleamar, próxima a bajamar y entre pleamar y bajamar.

La combinación de todas estas variables han dado lugar a las distintas simulaciones a analizar (Tabla 3-3).

De las variables anteriores, finalmente, se ha decidido eliminar la marea meteorológica de las simulaciones, ya que lo único que produce es aumentar o disminuir la amplitud de marea, y por tanto, del nivel del mar, efecto ya considerado mediante la marea astronómica.

En la Figura 2-12 se muestra la posición en el tiempo de la avenida respecto a los ciclos de marea de las tres condiciones de marea astronómica a estudiar. Cada marea se ha combinado con una situación de avenida en pleamar y en bajamar. Solamente la marea 1 se ha combinado con la avenida en la posición intermedia entre pleamar y bajamar (caso no mostrado en la figura).

Se habla de proximidad entre la punta de la avenida y la situación de pleamar y bajamar porque la punta de la avenida ocurre en el contorno del dominio cuando la pleamar o bajamar se encuentra en el contorno opuesto. Es decir, no se ha considerado el retardo de la avenida en recorrer los 2 km de cauce hasta la desembocadura ni el retardo de la onda de marea desde el contorno a la desembocadura.

A partir de las velocidades del hidrograma de entrada, se obtiene que la avenida tarda 1h 20 min en recorrer 2 km hasta la desembocadura. Por otro lado, el retardo de la marea desde el contorno a la desembocadura puede estimarse mediante la diferencia temporal de máximos y mínimos niveles entre el contorno y la desembocadura, obteniendo un retardo de 35 min para la amplitud de 1.75 m, de 20 min para la amplitud de 0.70 m y de 10 min para la amplitud de 0.25 m. De esta forma, el desfase entre la punta del hidrograma y la pleamar o bajamar se estima en 55 min, 60 min y 70 min, para las amplitudes 1.75 m, 0.70 m y 0.25 m, respectivamente.

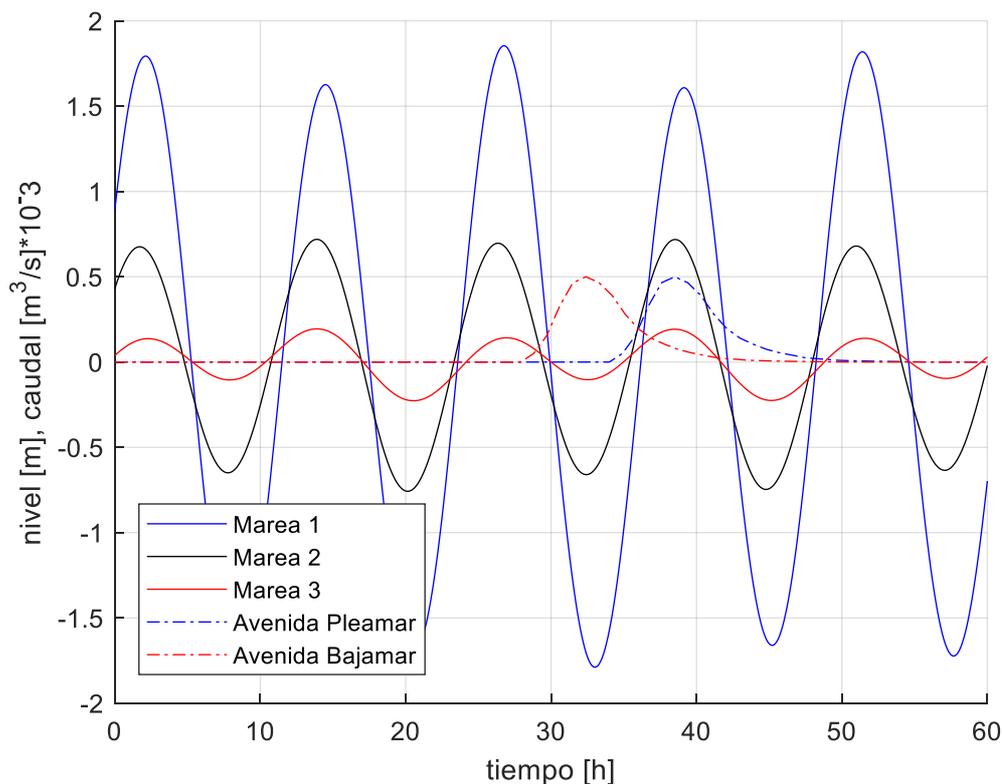


Figura 2-12. Representación de las tres condiciones de marea y la avenida de entrada al cauce posicionada respecto al ciclo de marea

3 GENERACIÓN DEL MODELO

El modelo hidrodinámico y morfodinámico empleado para llevar a cabo el estudio es Delft3D (Lesser et al, 2004) [5], ampliamente extendido en estudios de desembocaduras cuyas referencias han sido mostradas en el apartado de antecedentes. Este modelo está compuesto por varios módulos, de los cuales interesan la capacidad de resolución del flujo y el transporte de sedimentos, los cuales van a aportar la evolución del lecho derivada de la hidrodinámica y, como consecuencia, la evolución de la formación de la barra. Concretamente, se ha empleado el módulo Delft3D – Flow, que resuelve las ecuaciones de aguas someras (*shallow water equations*) mediante diferencias finitas para un flujo incompresible, no estacionario y turbulento.

El módulo hidrodinámico de Delft3D – Flow realiza las simulaciones en dos o tres dimensiones para fenómenos de flujo y transporte influidos por mareas u otros fenómenos naturales y meteorológicos. Se trata de un modelo ampliamente extendido para zonas costeras, estuarios, lagos, lagunas y ríos, permitiendo modelar problemas en los que la escala horizontal es más significativa que la vertical.

En este estudio se ha resuelto el modelo en dos dimensiones, en base a otros estudios similares tomados como referencia [4], [6].

3.1 ECUACIONES DEL MODELO

Delft3D resuelve las ecuaciones de aguas someras para un flujo incompresible, no estacionario y turbulento. Estas ecuaciones son la ecuación de continuidad o conservación de la masa y la de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 h} + \varepsilon_f \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 h} + \varepsilon_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3-3)$$

Donde η representa el nivel del agua, t es el tiempo, u es la velocidad media del flujo en la dirección x , v es la velocidad media del flujo en la dirección y , C_z es el coeficiente de fricción de Chezy, h es la profundidad de agua, g es la aceleración de la gravedad y ε_f representa el coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal.

En la simulaciones en dos dimensiones, la redistribución de cantidad de movimiento y materia debida a la

variación vertical de la velocidad horizontal es indicada como dispersión. Al no resolver las ecuaciones en el eje vertical, el efecto dispersivo es modelado como el producto del coeficiente de viscosidad y el gradiente de velocidad.

En Delft3D, el coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal puede determinarse de dos formas. Una de estas formas consiste en especificar un valor del término, constante o variable en el espacio, procedente de una calibración. La segunda consiste en emplear el modelo HLES (*Horizontal Large Eddy Simulation Model*), el cual añade un nuevo término sumado a un valor constante especificado por el usuario.

En las simulaciones se ha empleado el primer método. En estudios tomados como referencias para situaciones similares (Leonardi et al, 2013) [3] obtienen como conclusión que la influencia en las simulaciones entre el primer y segundo método no es significativa.

Es necesario añadir tanto el valor del coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal como el coeficiente de difusividad horizontal. Tomando como referencia el manual de usuario de Delft3D – Flow [12], el valor de ambos depende del flujo y del tamaño de la malla de la simulación. Para modelos detallados con malla de tamaño de decenas de metros o menos, el valor típico para ambos coeficientes es de 1 a 10 m²/s. Para simulaciones con tamaños de malla más gruesos, de cientos de metros o más, se recomiendan valores para ambos coeficientes de 10 a 100 m²/s. El mismo manual, también define ambos coeficientes como parámetros a calibrar, su valor ha de ser determinado con un proceso de calibración.

Tras las recomendaciones y varias pruebas realizadas, mostradas en el Anexo VIII, se obtiene 1 m²/s como valor apropiado para el coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal y para el de difusividad.

Además de estas ecuaciones, hay que añadir la ecuación de transporte de sedimentos. La formulación empleada por Delft3D para el transporte de sedimentos permite modelar tanto el transporte de fondo como el transporte en suspensión para material cohesivo (< 64 μm) y para material no cohesivo (> 64 μm). Sin embargo, en este estudio solamente se trata material no cohesivo.

El transporte de fondo del material no cohesivo se calcula usando la formula empírica propuesta por Van Rijn en 1984:

$$S_b = \begin{cases} 0.053 \sqrt{\Delta g D_{50}^3 D_*^{-0.3} T^{2.1}} & \text{si } T < 3 \\ 0.1 \sqrt{\Delta g D_{50}^3 D_*^{-0.3} T^{1.5}} & \text{si } T \geq 3 \end{cases} \quad (3-4)$$

Donde:

- S_b es el transporte de fondo.
- $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$
- ρ_s es la densidad del sedimento.
- ρ_w es la densidad del agua.
- D_{50} es el diámetro medio de las partículas de sedimento.
- $D_* = D_{50} \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3}$
- ν es la viscosidad cinemática del agua.
- $T = \frac{\mu_c \tau_b - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}}$
- $\mu_c \tau_b$ es la tensión tangencial efectiva asociada a la fricción sobre el grano de sedimento.
- $\tau_{b,cr}$ es la tensión tangencial de fondo crítica asociada al parámetro de Shields.

El transporte en suspensión del material cohesivo y no cohesivo se revuelve usando la ecuación de convección – difusión:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hvc}{\partial y} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + hS \quad (3-5)$$

Donde:

- ε_s es la difusividad turbulenta del sedimento.
- S es el término fuente de sedimento, resultado de la suma del material cohesivo (S_c) y no cohesivo (S_{nc}).

Para el material no cohesivo:

$$S_{nc} = \frac{c_{eq} - c}{T_s} \quad (3-6)$$

Donde:

- T_s es la escala de tiempo.
- c_{eq} es la concentración media de sedimento en equilibrio, derivado del transporte en suspensión (S_s).
- c es la concentración de sedimento.

$$c_{eq} = \frac{S_s}{h\sqrt{u^2 + v^2}} = f_{cs}c_a \quad (3-7)$$

Donde:

- f_{cs} es el factor de forma basado en la formulación de Rouse (*Van Rijn, 1984b*).
- c_a es la concentración de referencia en la altura de rugosidad sobre el lecho (ξ_c).

$$c_a = 0.015 \frac{D_{50}}{\xi_c} \frac{T^{1.5}}{D_*^{1.5}} \quad (3-8)$$

3.2 GEOMETRÍA DEL MODELO

La geometría del modelo (Figura 3-1) consta de un dominio cuadrado de 4x4 km, de los cuales, longitudinalmente, 2 km pertenecen a la zona de cauce y 2 km a la zona marina.

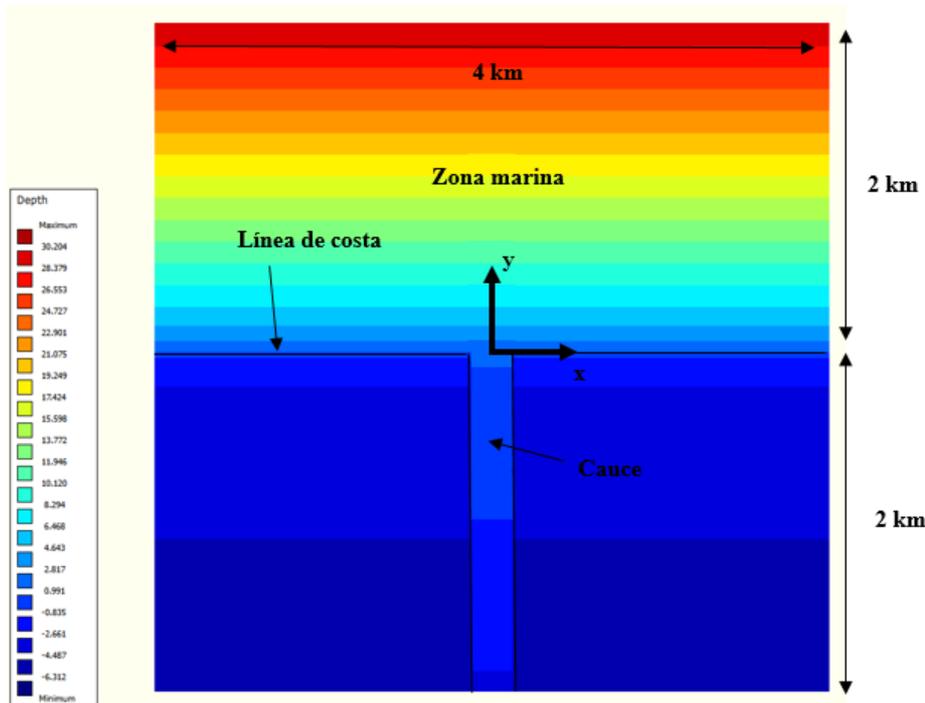
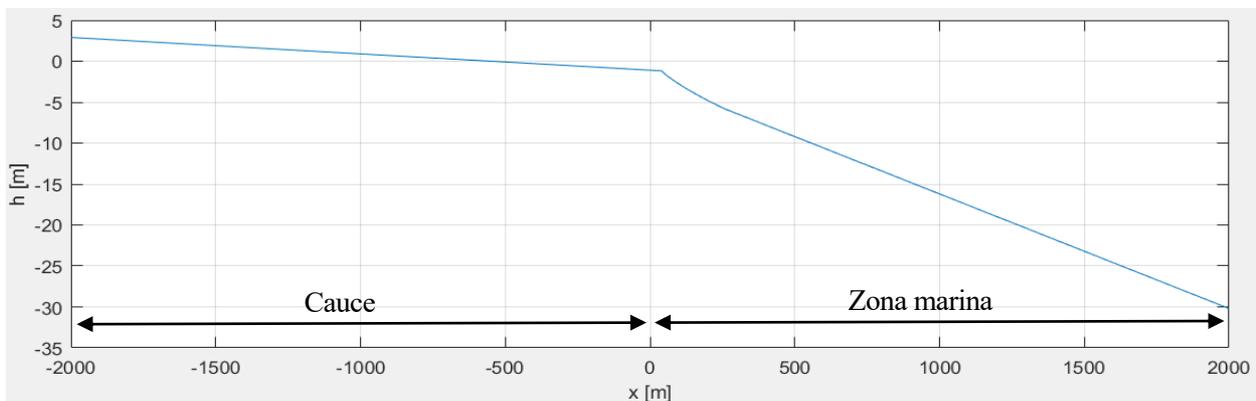


Figura 3-1. Geometría del modelo

Como se ha establecido anteriormente, la geometría se mantiene constante entre las distintas simulaciones realizadas. Caracterizada por un cauce de sección rectangular con ancho de 250 m y 3.5 m de calado y con una pendiente constante de 0.2%, y una zona marina formada por un perfil de equilibrio de Dean para un tamaño de sedimento de $490 \mu\text{m}$, con batimetría paralela a la línea de costa.

En la Figura 3-2 se muestra un corte de la geometría por el eje $x=0$.

Figura 3-2. Perfil $x=0$ de la geometría

3.3 CONDICIONES DE CONTORNO Y ACCIONES DEL MODELO

El modelo se completa con las siguientes condiciones de contorno (Figura 3-3), aplicadas sobre los bordes del dominio:

- Borde inferior: hidrograma de avenida, con caudal punta variable y tiempo base de 12 horas. Su ubicación en el tiempo varía en las simulaciones.
- Borde superior: nivel del mar a partir de armónico de marea.
- Bordos laterales: condiciones tipo Neumann para el nivel de agua, asegurando que no existen corrientes longitudinales espúreas paralelas a la línea de costa (Ruiz, Zarzuelo, López y López, 2018)

[6].

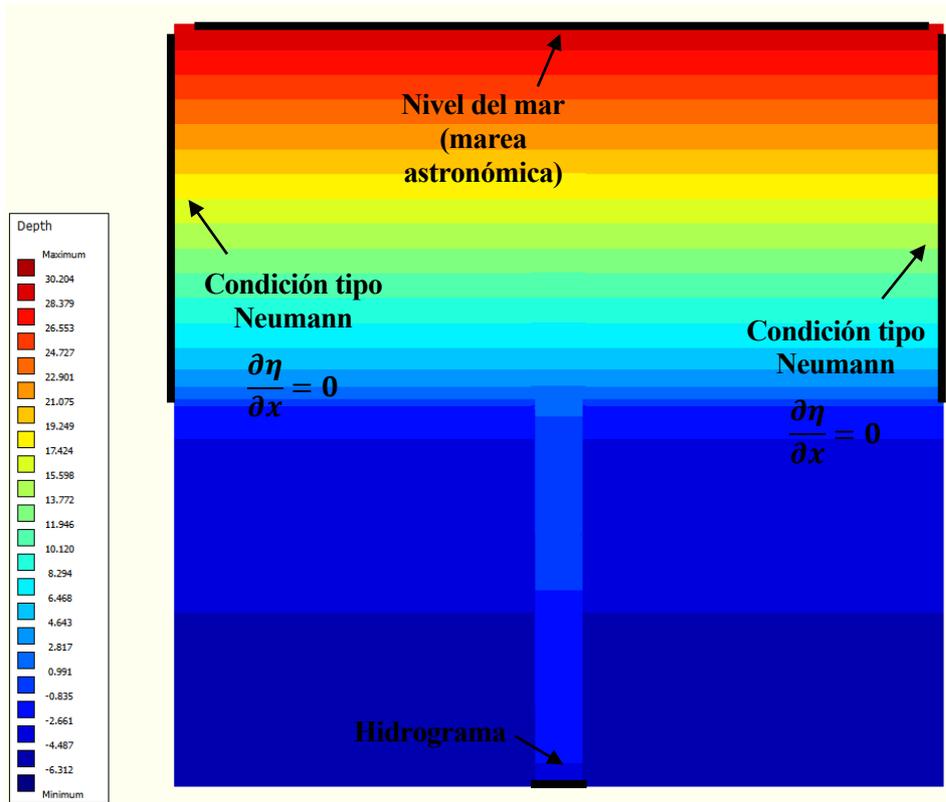


Figura 3-3. Condiciones de contorno

La única acción de las contempladas en este estudio que no se introduce como condición de contorno es el viento. Esta acción se ha introducido con valor (10 m/s) y dirección constante (0°, 30°, 60° en función de la simulación) durante el tiempo que dura la simulación.

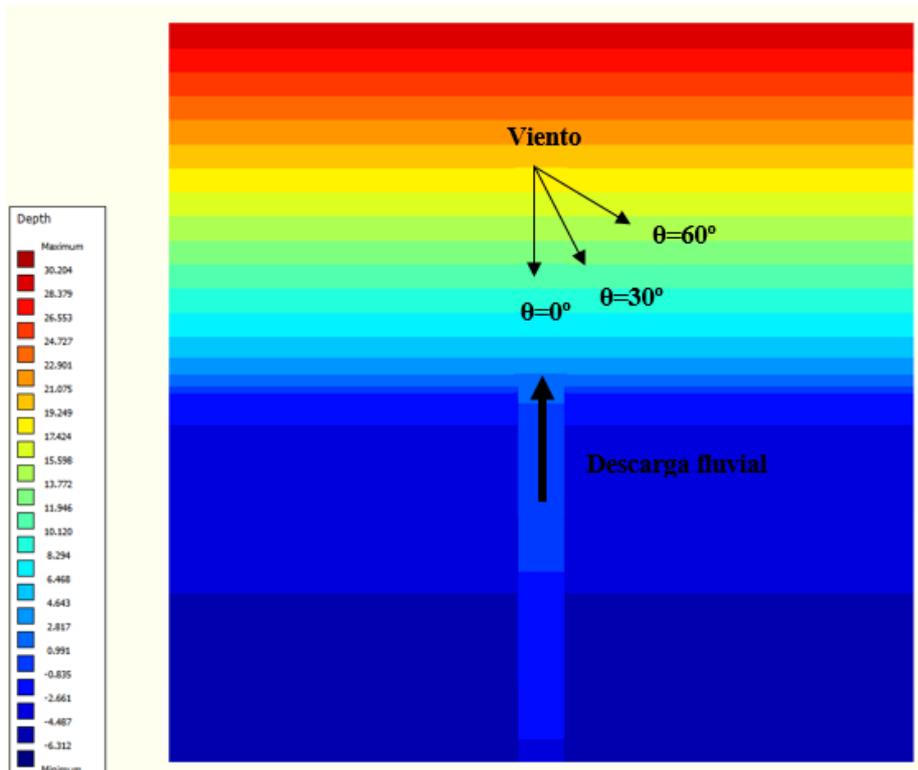


Figura 3-4. Distintas direcciones del viento consideradas

3.4 MALLA DEL MODELO

El dominio se ha discretizado empleando celdas rectangulares que forman una malla, la cual ha sido empleada en las simulaciones. Esta malla se ha obtenido a partir de un proceso de análisis de sensibilidad del mallado, mostrado en el Anexo VII.

Las celdas tienen un tamaño variable desde 20x20 m en la zona más alejada de la desembocadura hasta 5x5 m en la desembocadura.

En la Figura 3-5 se muestra la malla empleada.

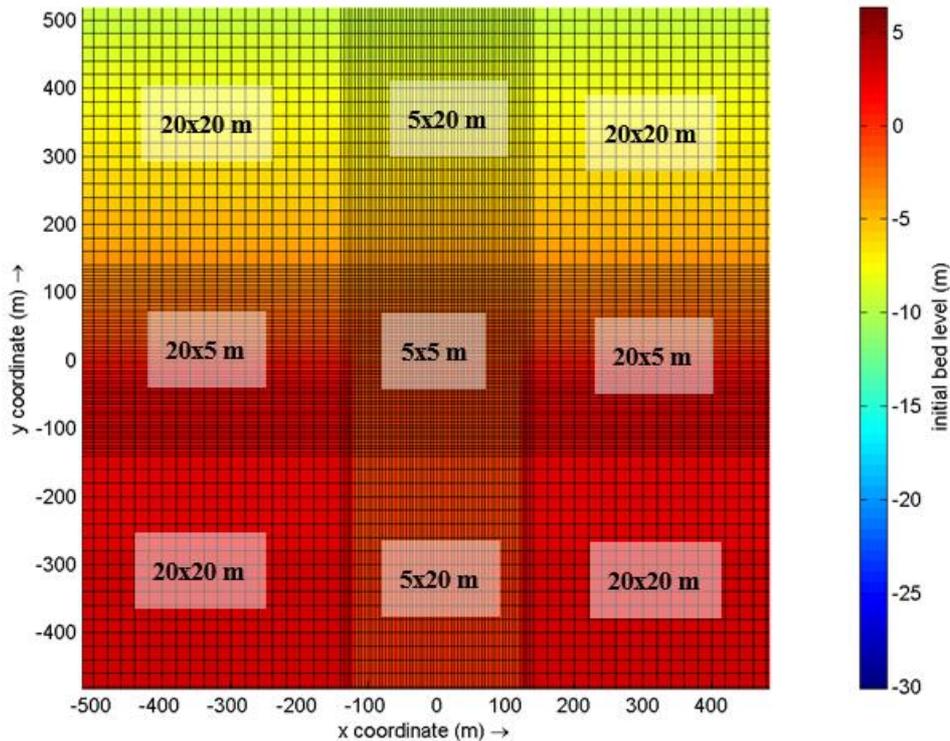


Figura 3-5. Malla en la desembocadura

3.5 PARÁMETROS DEL MODELO

Todas las simulaciones cuentan con un tiempo simulado de 36 horas (desde 00:00:00 01/01/2019 hasta 12:00:00 03/01/2019), de las cuales, las 24 primeras horas se han empleado como periodo de estabilización del modelo, por lo que durante este periodo no se ha incluido la resolución del transporte sedimentario. Durante estas primeras 24 horas, el modelo solamente cuenta con la marea astronómica y el viento como acciones.

La avenida se produce a partir de las 24 primeras horas, pero su inicio depende de la simulación, haciendo coincidir su punta con pleamar o bajamar según el caso.

Para asegurar la estabilidad y precisión del modelo numérico, se adopta un paso de tiempo de 0.045 min, cumpliendo con la condición de Courant – Frederichs – Levy (Lesser et al, 2004) [5].

Se han empleado, además de los ya establecidos, los parámetros físicos mostrados en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1. Parámetros físicos

| Parámetro | Valor | Unidades |
|-------------------|-------|-------------------|
| Gravedad | 9.81 | m/s ² |
| Densidad del agua | 1000 | kg/m ³ |
| Densidad del aire | 1 | kg/m ³ |

| Parámetro | Valor | Unidades |
|--|-------|----------|
| Rugosidad del cauce (número de manning) | 0.04 | - |
| Rugosidad del lecho marino (número de manning) | 0.02 | - |

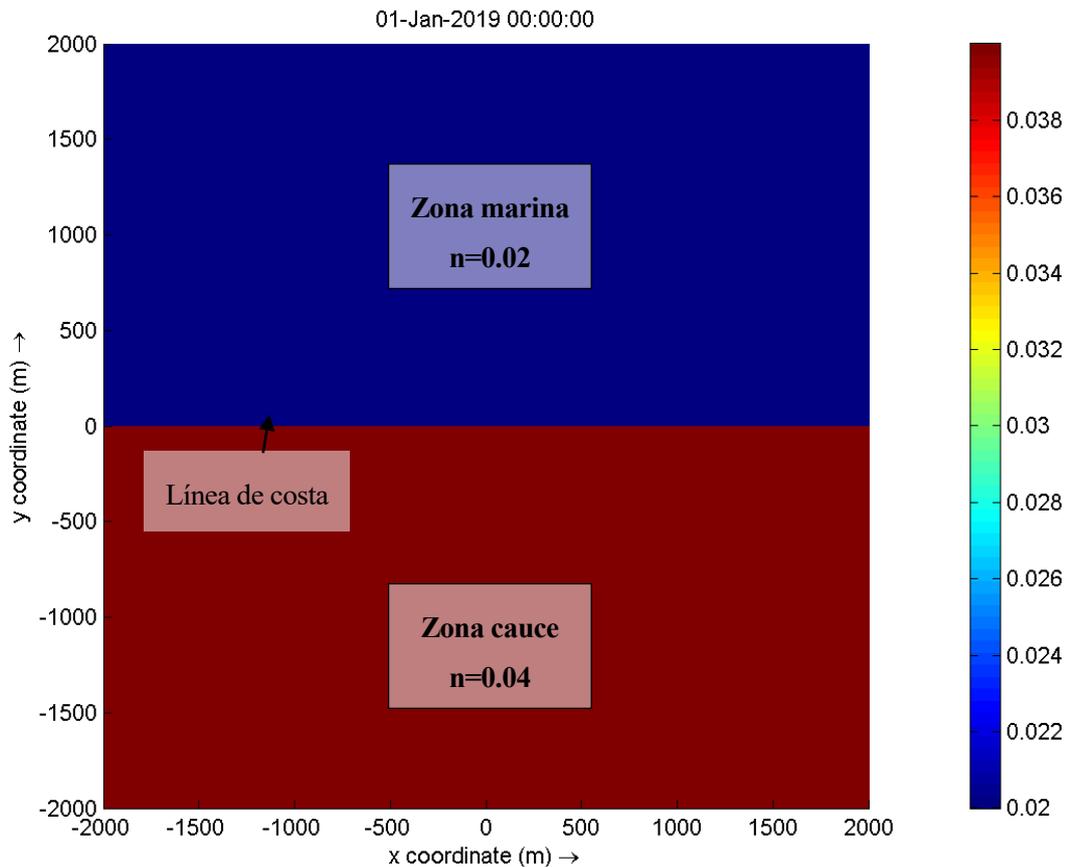


Figura 3-6. Número de Manning (rugosidad)

En cuanto al sedimento, no se introducen partículas junto a la avenida. El único material disponible para su movilización es el que se encuentra sobre el lecho, para lo que se ha establecido una capa de 5 m sobre todo el lecho marino y sobre el cauce como posible material a movilizar. Es necesario comprobar que ninguna simulación sobrepasa una erosión de 5 m, ya que se estaría limitando la capacidad de transporte.

En la siguiente tabla se incluyen las características del sedimento empleado en las simulaciones:

Tabla 3-2. Parámetros del sedimento

| Parámetro | Valor | Unidades |
|--|-------|------------------------|
| D50 | 500 | μm |
| Densidad específica | 2650 | kg/m^3 |
| Densidad seca | 1600 | kg/m^3 |
| Factor de escala morfológica | 1 | - |
| Tiempo de retardo para iniciar cálculo morfodinámico | 1440 | min |
| Factor de altura de referencia de Van Rijn | 1 | - |

3.6 SIMULACIONES

En la Tabla 3-3 se muestra la lista de simulaciones realizadas para llevar a cabo el estudio (exceptuando la realizadas para la calibración de la malla).

Tabla 3-3. Simulaciones llevadas a cabo en el estudio

| Nombre | Q_p (M ³ /s) | Tipo de marea | θ (°) | v (m/s) | a_0 (m) | Situación punta avenida |
|------------|---------------------------|---------------|--------------|-----------|-----------|-------------------------|
| 111 | 500 | 1 | 0 | 10 | 0 | Pleamar |
| 112 | 500 | 1 | 30 | 10 | 0 | Pleamar |
| 113 | 500 | 1 | 60 | 10 | 0 | Pleamar |
| 121 | 500 | 2 | 0 | 10 | 0 | Pleamar |
| 122 | 500 | 2 | 30 | 10 | 0 | Pleamar |
| 123 | 500 | 2 | 60 | 10 | 0 | Pleamar |
| 131 | 500 | 3 | 0 | 10 | 0 | Pleamar |
| 132 | 500 | 3 | 30 | 10 | 0 | Pleamar |
| 133 | 500 | 3 | 60 | 10 | 0 | Pleamar |
| 211 | 500 | 1 | 0 | 10 | 0 | Bajamar |
| 212 | 500 | 1 | 30 | 10 | 0 | Bajamar |
| 213 | 500 | 1 | 60 | 10 | 0 | Bajamar |
| 221 | 500 | 2 | 0 | 10 | 0 | Bajamar |
| 231 | 500 | 3 | 0 | 10 | 0 | Bajamar |
| 511 | 700 | 1 | 0 | 10 | 0 | Pleamar |
| 611 | 700 | 1 | 0 | 10 | 0 | Bajamar |
| 711 | 500 | 1 | 0 | 10 | 0 | Pleamar – Bajamar |

El significado de cada una de las columnas es el siguiente:

- Q_p : valor del caudal punta de la avenida.
- Tipo de marea astronómica:
 - Marea 1: amplitud de marea de 1.75 m.
 - Marea 2: amplitud de marea de 0.70 m.
 - Marea 3: amplitud de marea de 0.25 m.
- θ : ángulo de incidencia del viento respecto a la normal a la línea de costa.
- v : velocidad del viento.
- a_0 : amplitud debido a la marea meteorológica.
- Situación punta avenida:
 - Pleamar (P): punta de la avenida ocurre próxima a la pleamar.
 - Bajamar (B): punta de la avenida ocurre próxima a la bajamar.
 - Pleamar – bajamar: punta de la avenida ocurre próxima a la situación intermedia entre pleamar y bajamar.

4 RESULTADOS DEL MODELO

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones anteriormente caracterizadas. Los resultados que se muestran se dividen en dos bloques: resultados hidrodinámicos y resultados morfodinámicos. El primer bloque se refiere a velocidades y el segundo a variables características de la formación de la barra en la desembocadura. Ambos tienen influencia sobre el otro.

Los resultados obtenidos se caracterizan por tener una zona de erosión y de sedimentación en las inmediaciones de la desembocadura, de forma que, la avenida introducida genera la movilización de material desde una zona, la cual erosiona, hasta otra, en la que sedimenta en forma de barra.

La evolución y forma de la barra varía en función de las variables presentes en la simulación.

Cada una de las simulaciones se distinguen según las variables empleadas de la siguiente forma:

- (P) si la punta de avenida está próxima a la pleamar, (B) si la punta de la avenida está próxima a la bajamar, (P-B) si la punta de avenida está próxima al punto medio entre pleamar y bajamar.
- (Q_p500) para el caudal punta de avenida de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, (Q_p700) para el caudal punta de avenida de $700 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ($A_i1.75$) para la amplitud de marea de 1.75 m, ($A_i0.70$) para la amplitud de marea de 0.70 m, ($A_i0.25$) para la amplitud de marea de 0.25 m.
- (0°) para ángulo de incidencia del viento respecto a la normal a la línea de costa de 0° , (30°) para ángulo de incidencia del viento respecto a la normal a la línea de costa de 30° , (60°) para ángulo de incidencia del viento respecto a la normal a la línea de costa de 60° . En caso de no indicar ningún ángulo, se refiere a 0° .

4.1 RESULTADOS HIDRODINÁMICOS

En los resultados obtenidos (Figura 4-1 y Figura 4-2) puede observarse que la máxima velocidad desarrollada en la desembocadura durante la simulación no tiene por qué coincidir en el tiempo con la punta de la avenida, sino que están influenciados por otras variables, como es la amplitud de la marea. En el caso hipotético de una descarga fluvial sin mareas (situación próxima a las simulaciones con la amplitud de marea menor), la velocidad punta debería darse con la punta de la avenida.

Para la mayor amplitud de marea estudiada, en la situación de pleamar, la punta de velocidad se produce durante la vaciante, en los dos casos de caudal punta estudiados. Mientras que, para amplitudes de marea inferiores (0.70 m y 0.25 m), el instante en el que se produce la punta de velocidad sí coincide con el instante de la punta del hidrograma.

En los casos de bajamar, la velocidad punta tampoco coincide con la punta del hidrograma, sino que se produce antes de llegar al caudal máximo, durante la vaciante. Sin embargo, hay mayor similitud entre el instante de la punta de velocidad en la desembocadura y la punta de la avenida.

En la Figura 4-1 se incluye una nueva simulación, no mencionada anteriormente, con condición de marea de 1

m de amplitud. Esta simulación se incluye para buscar el límite entre las situaciones de avenida en pleamar que producen la punta de velocidades en la desembocadura durante la vaciante o durante la punta de la avenida. Para la amplitud de 1 m se obtiene la punta de velocidad durante la punta de avenida, pero se encuentra muy próxima a la velocidad máxima durante la vaciante. Por lo que el límite se encuentra entre una amplitud de 0.70 m y 1 m, más cercana a la segunda.

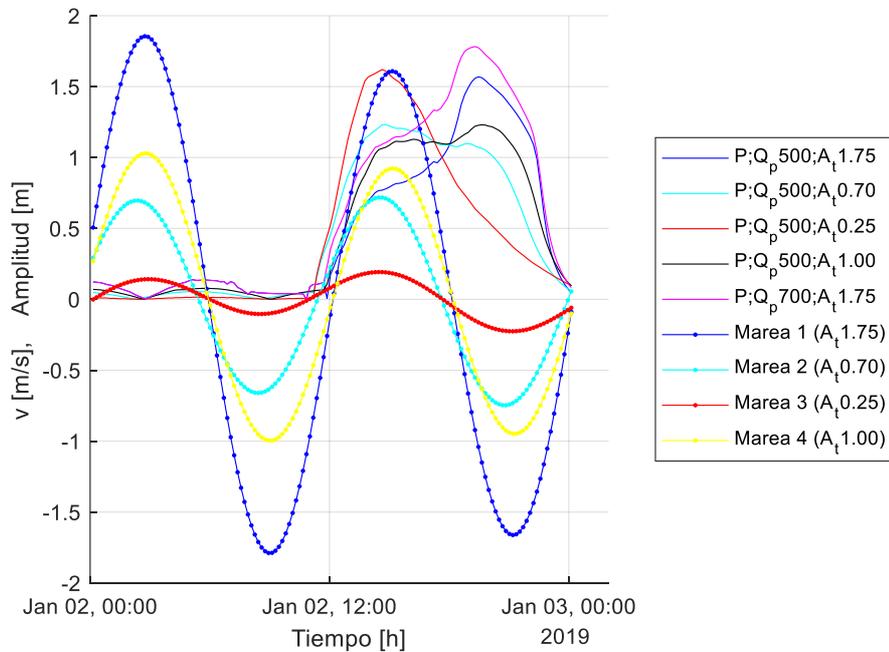


Figura 4-1. Simulaciones con avenida próxima a pleamar. Velocidades en la desembocadura y condición de contorno de marea

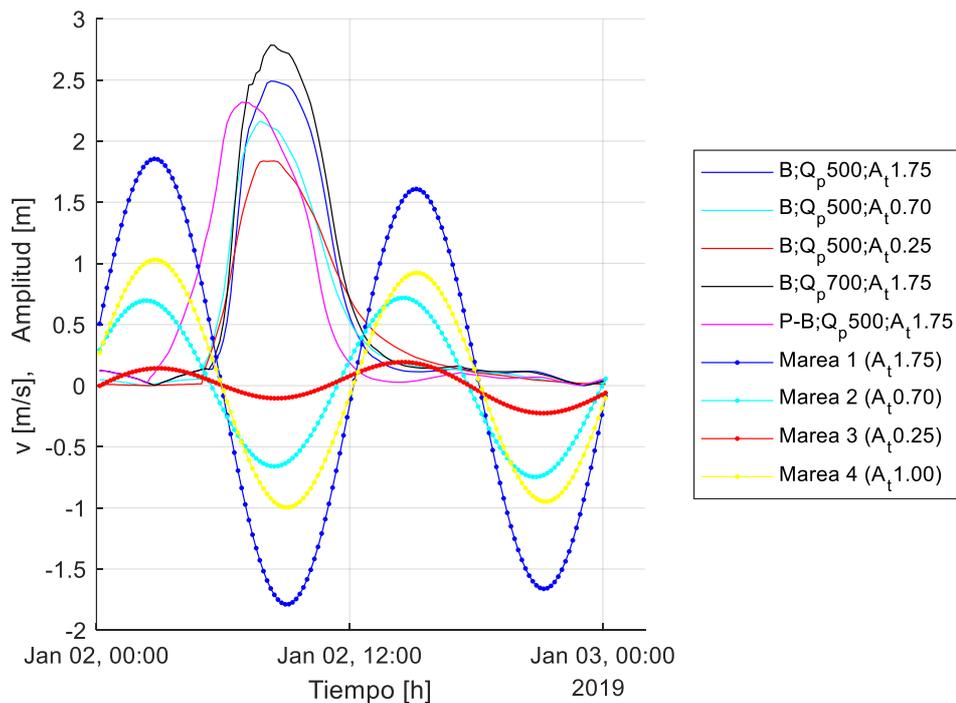


Figura 4-2. Simulaciones con avenida próxima a bajamar y transición pleamar – bajamar. Velocidades en la desembocadura y condición de conotrno de marea

Como complemento a las anteriores figuras, se añaden la Figura 4-3 y Figura 4-4, en las que se muestra la condición de contorno de marea junto con el valor de máxima velocidad en la desembocadura y del valor del caudal punta de cada simulación.

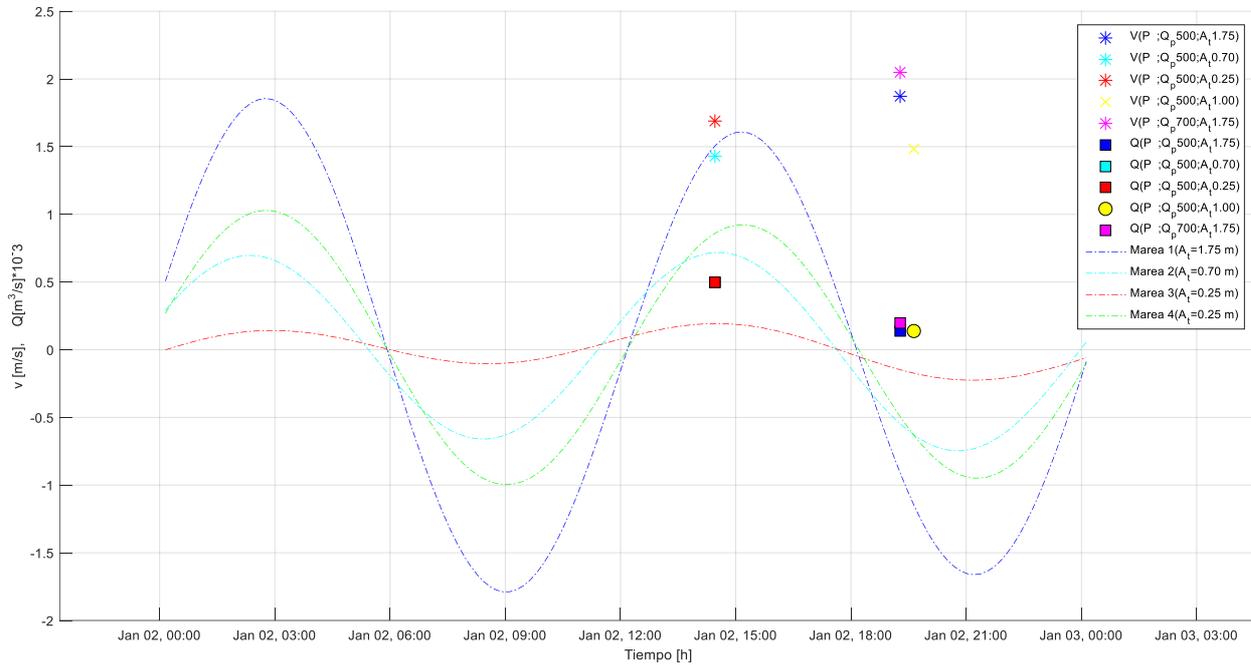


Figura 4-3. Condición de contorno de marea, velocidad punta y caudal punta en las situaciones de punta de avenida próxima a pleamar

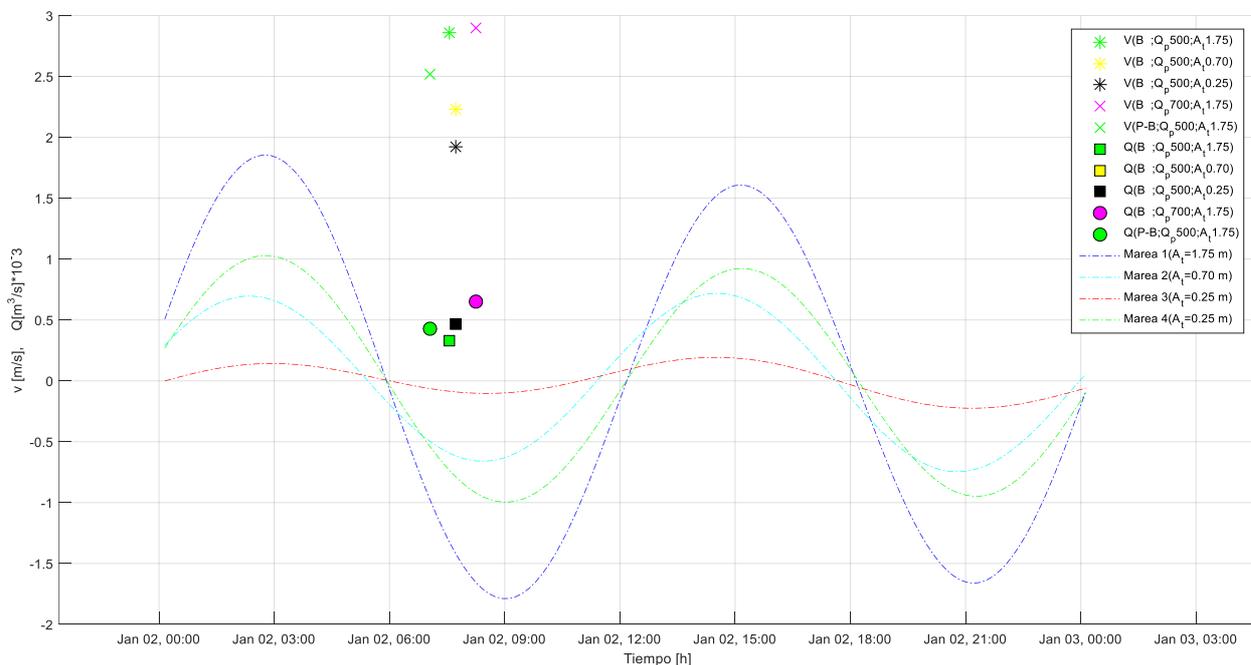


Figura 4-4. Condición de contorno de marea, velocidad punta y caudal punta en las situaciones de punta de avenida próxima a bajamar y en la transición pleamar-bajamar

En la Figura 4-3 se muestra el instante en el que se produce la velocidad punta en la desembocadura respecto al ciclo de marea cuando la punta de la avenida ocurre próxima a pleamar. Se observa que, para amplitudes de marea mayores a 1 m, la velocidad punta en la desembocadura se produce en un instante de tiempo alejado de la pleamar, mientras que para amplitudes menores a un 1 m, la situación de velocidad punta sí se produce en el entorno de la pleamar.

En la Figura 4-4 se muestra el instante en el que se produce la velocidad punta en la desembocadura respecto

al ciclo de marea cuando la punta de la avenida ocurre próxima a bajamar. En este caso, se observa que la nube de puntos de velocidad máxima se encuentra más cercana al momento en el que ocurre la punta de velocidad de la avenida y por tanto más próxima a bajamar.

Las velocidades que se producen en la desembocadura son consecuencia de la marea astronómica y de la descarga fluvial. Cuando la marea se encuentra en pleamar o en bajamar, la velocidad que produce la marea es 0, mientras que en la transición pleamar-bajamar y bajamar-pleamar se produce el máximo y su magnitud depende de la amplitud de marea. Por otro lado, la velocidad de la descarga fluvial viene determinada por el hidrograma de entrada. La combinación de ambas genera una velocidad en la desembocadura durante las horas que ocurre la avenida, mostradas en la Figura 4-5 hasta la Figura 4-9.

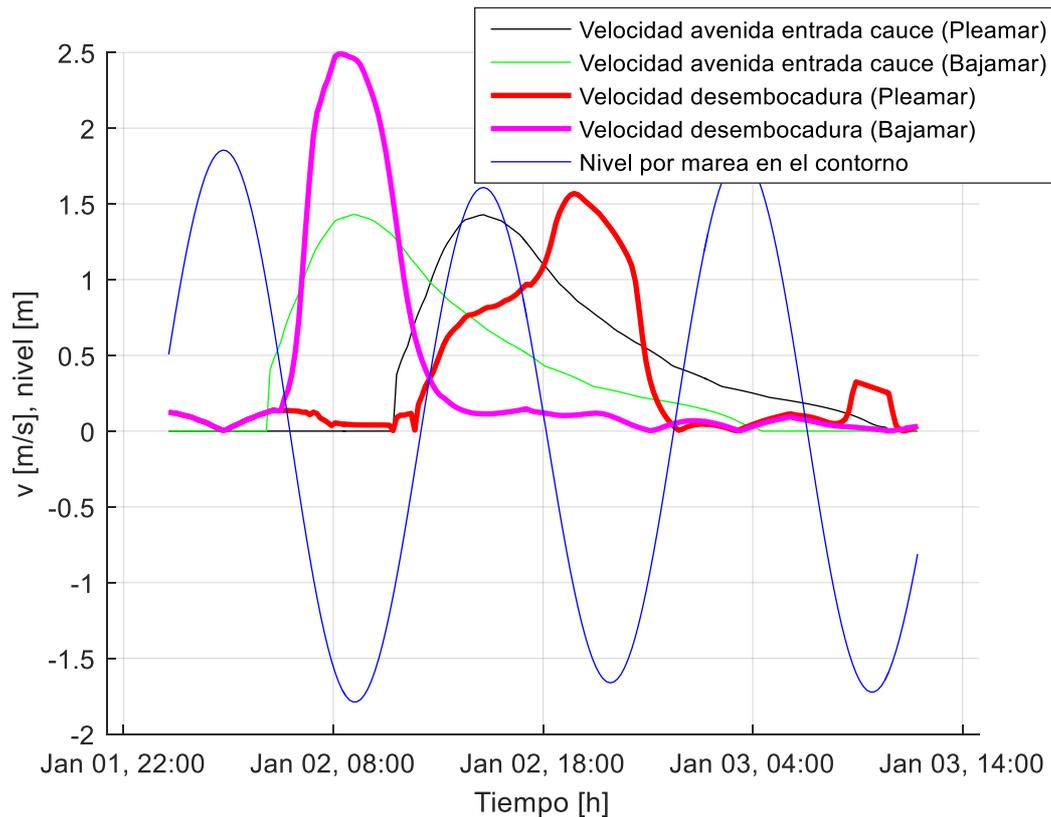


Figura 4-5. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P;Q_p500;A_t1.75 y B;Q_p500;A_t1.75

En la Figura 4-5 se observa que la velocidad en la desembocadura para el caso de pleamar empieza a crecer con una pendiente similar a la velocidad de la avenida en el contorno. Sin embargo, esta velocidad en la desembocadura se va frenando como consecuencia de la subida del nivel por la marea, y vuelve a crecer durante la vaciante, encontrando su máximo en esta fase. Por otro lado, en bajamar ocurre lo contrario, la velocidad aumenta su pendiente respecto a la avenida de entrada.

En la Figura 4-6 se observa que la velocidad en la desembocadura en pleamar para una amplitud de marea de 0.7 m no se ve frenada de la misma forma que en el caso anterior, mostrando una crecida durante la vaciante, pero no suficiente como para superar la velocidad durante la punta de la avenida.

En la Figura 4-7 la velocidad en la desembocadura crece tanto en pleamar como en bajamar sin verse frenada por la subida del nivel por la marea. La diferencia en este caso entre las velocidades producidas en bajamar y pleamar son escasas.

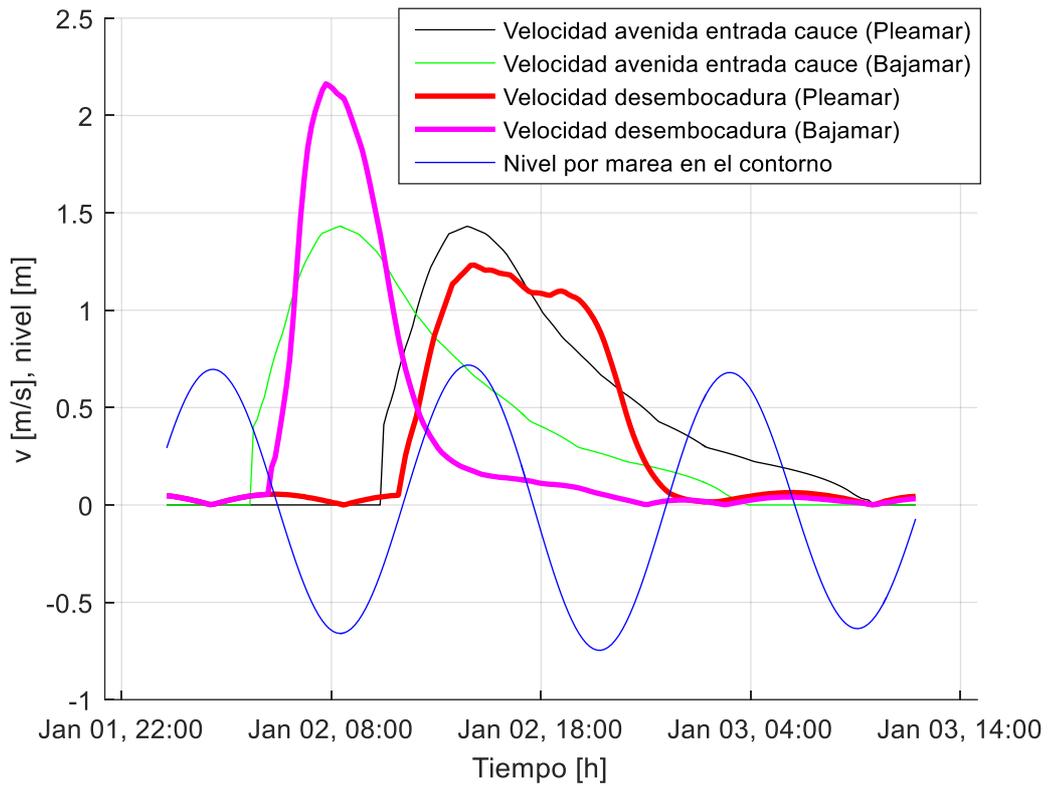


Figura 4-6. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P;Q_p500;A_t0.70 y B;Q_p500;A_t0.70

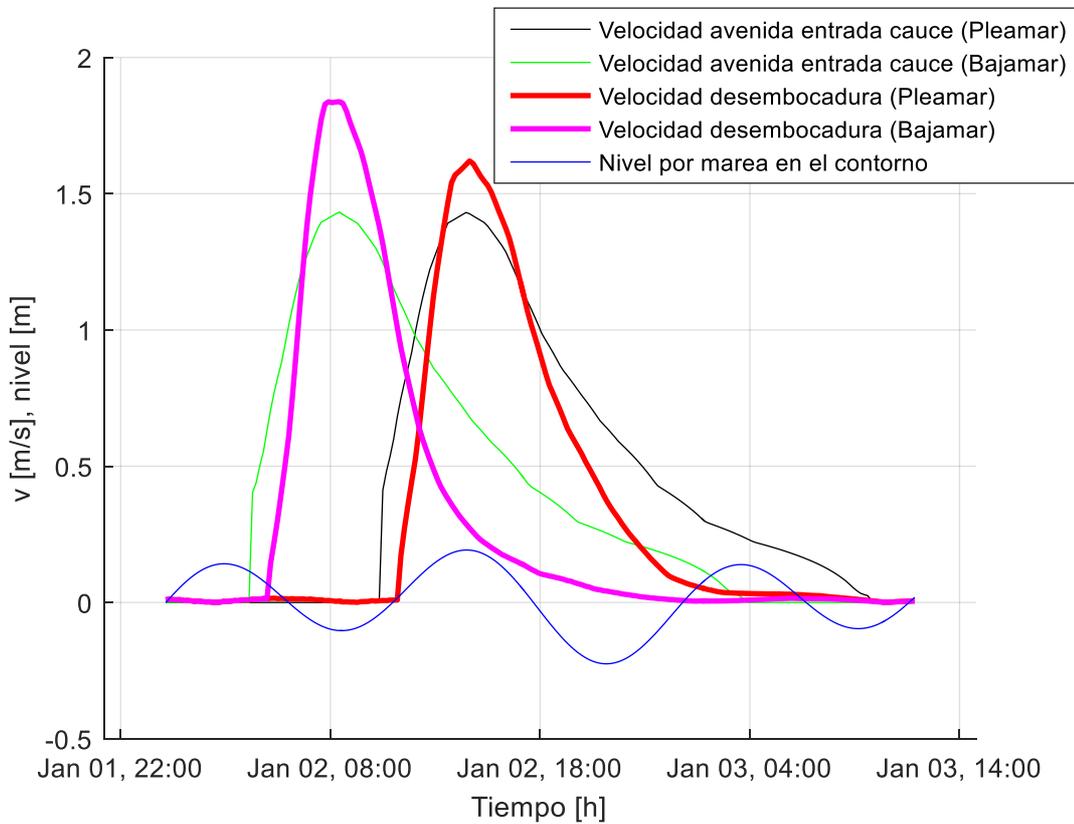


Figura 4-7. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P;Q_p500;A_t0.25 y B;Q_p500;A_t0.25

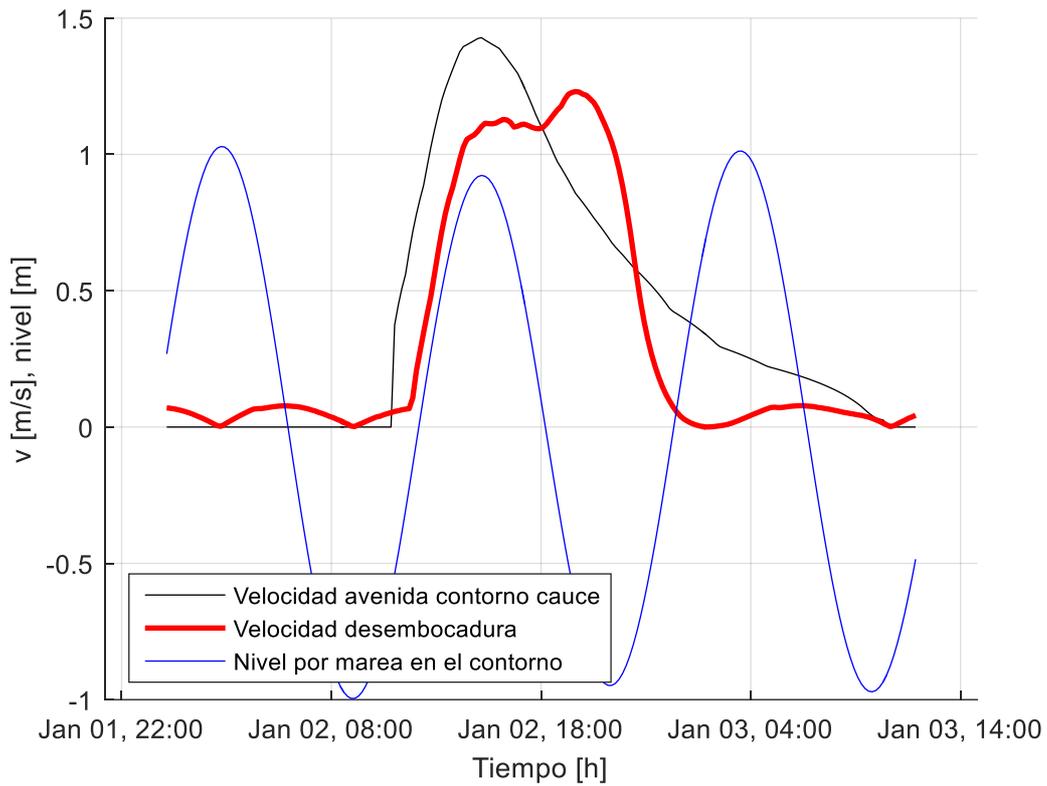


Figura 4-8. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P;Q_p500;A_t1.00

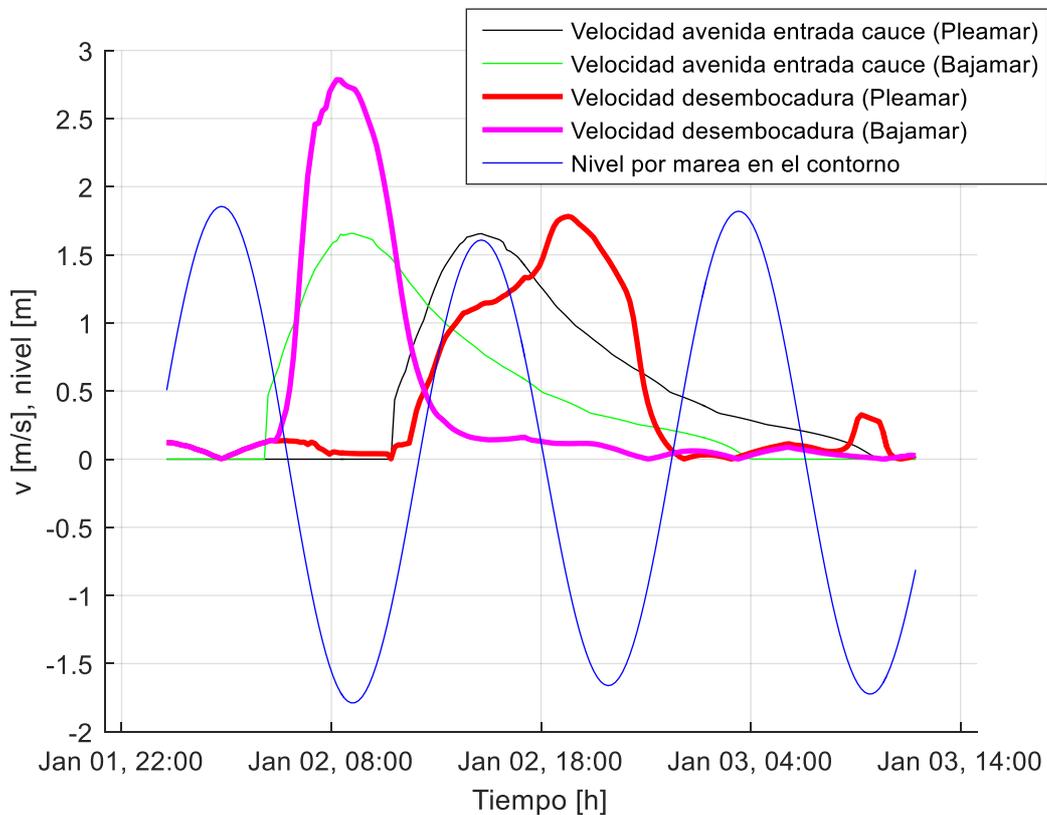


Figura 4-9. Velocidad en la desembocadura junto a nivel por marea en el contorno e hidrograma de entrada en términos de velocidad. Simulación P;Q_p700;A_t1.75 y B;Q_p700;A_t1.75

La influencia del ángulo de incidencia del viento en las velocidades se observa en la desviación de la descarga fluvial respecto al eje normal a la línea de costa, sin embargo, no tiene influencia respecto a las velocidades máximas que se generan y el momento en el que éstas se producen en la zona cercana a la desembocadura (Figura 4-10). A medida que se avanza en el eje x alejándose de la desembocadura sí se produce una variación en las velocidades como consecuencia de la desviación del chorro de descarga fluvial.

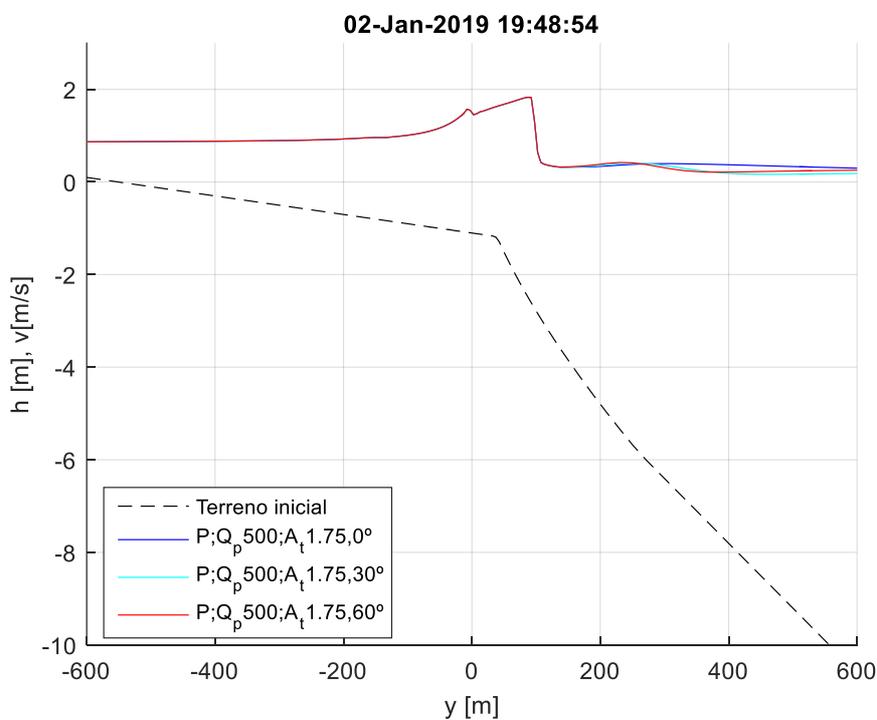


Figura 4-10. Terreno inicial y velocidades para la simulación $P;Q_p500;A_t1.75$ al variar el ángulo de incidencia del viento a las 19:48:54 del segundo día de simulación

4.2 RESULTADOS MORFODINÁMICOS

La hidrodinámica tiene clara influencia sobre la morfodinámica, lo que también ocurre al contrario. Los resultados referidos a la morfología de las barras que se han considerado de interés y representativos son los mostrados a continuación.

Los resultados que se van a mostrar en el apartado morfodinámico están referidos al tiempo de formación de la barra, es decir, el tiempo inicial se corresponde con el tiempo en el que comienza a formarse la barra, y el tiempo final se corresponde con el momento en el que la barra se estabiliza y se mantiene estática.

En la Figura 4-11, se muestra el tiempo en el que se inicia y finaliza la formación de la barra en cada una de las simulaciones realizadas, y en la Tabla 4-1 se muestra el tiempo que tarda en formarse cada una.

Los tiempos de formación de la barra más cortos se observan en los casos de bajamar. La avenida llega y moviliza. Estos tiempos se encuentran en el entorno de las 4 horas.

El tiempo de formación de la barra para el caso entre pleamar y bajamar aumenta a unas 5 horas.

El tiempo de formación de la barra para los casos de pleamar son los mayores. Concretamente para los casos de amplitud de marea superior o igual a 0.7 m. En estos casos, la barra comienza a formarse en un instante similar al resto, pero su formación se prolonga en el tiempo debido a la subida de velocidad durante la vaciante.

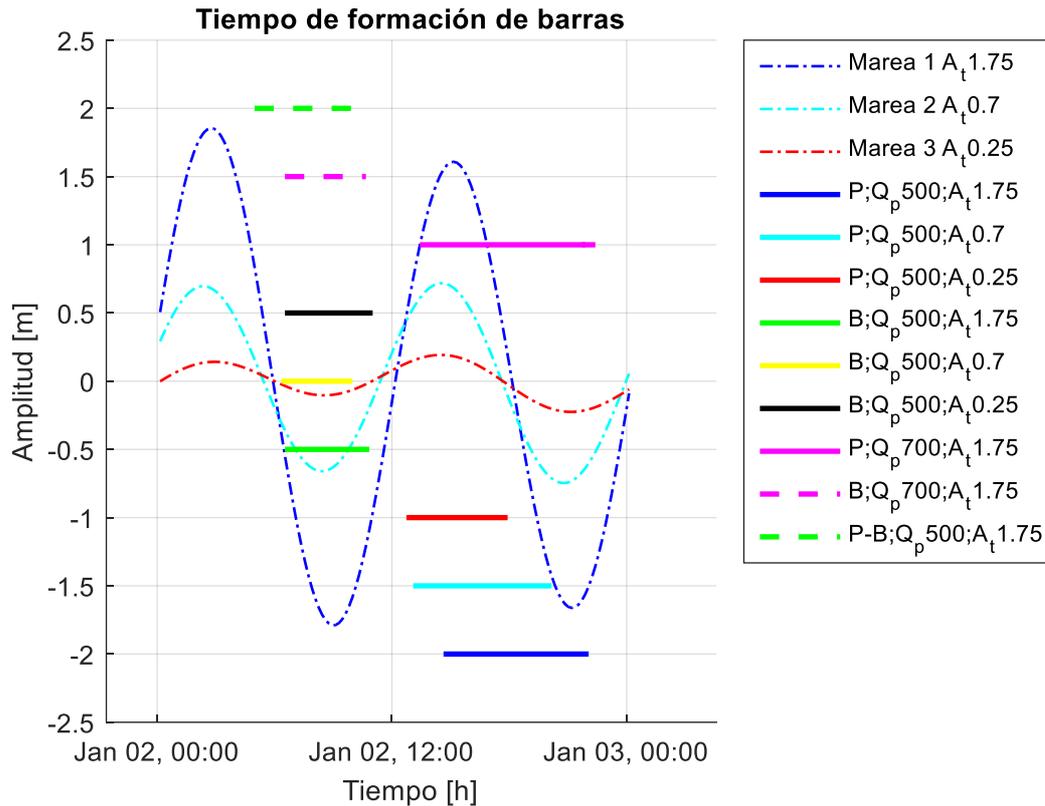


Figura 4-11. Duración de formación de barras con referencia de mareas

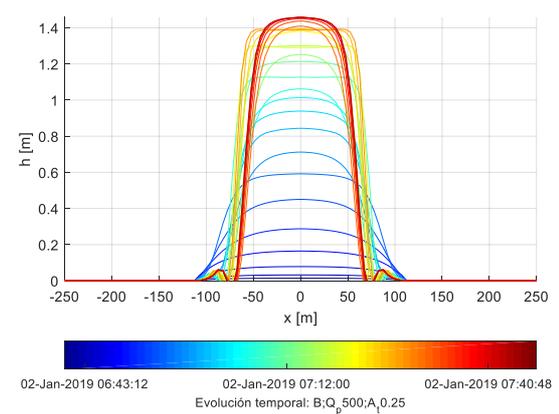
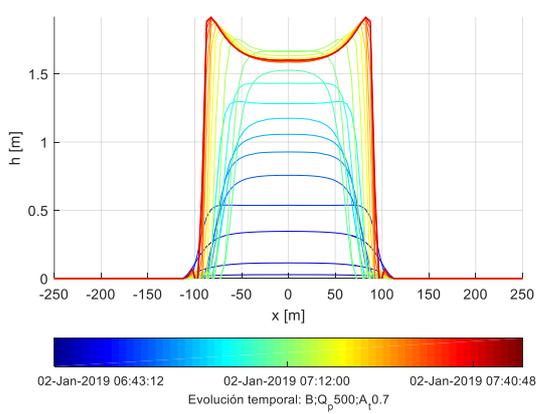
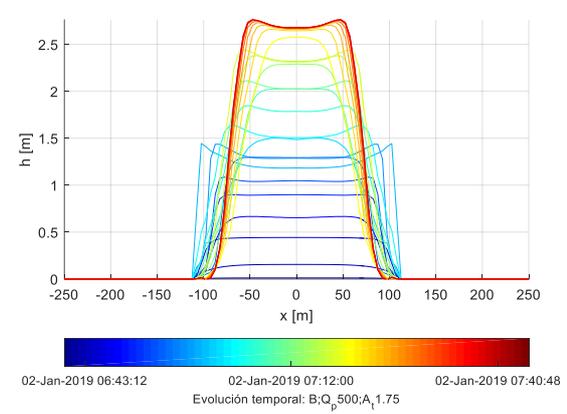
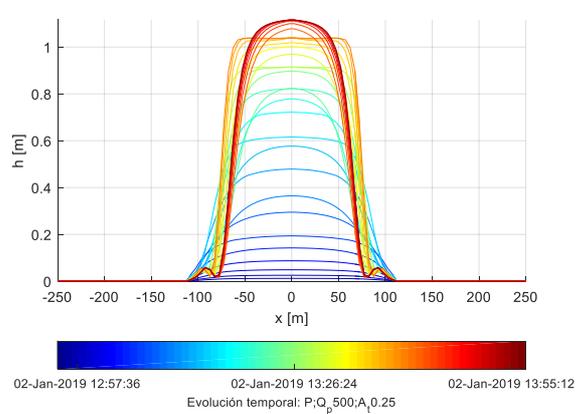
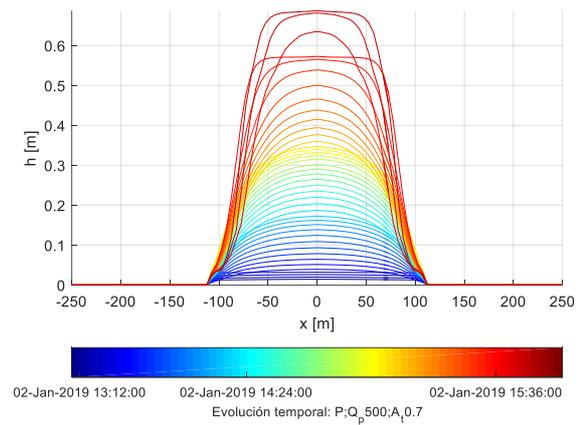
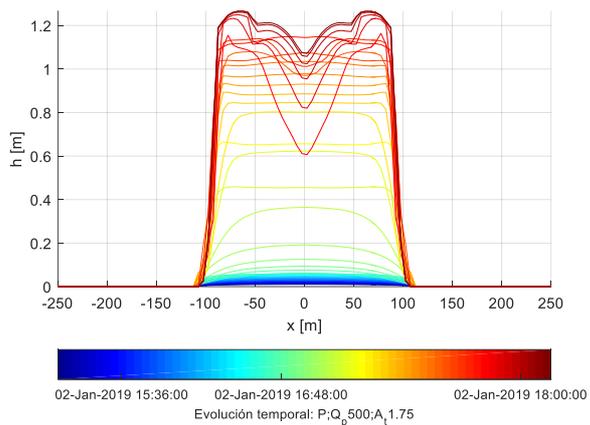
Tabla 4-1. Duración de formación de barras en horas para cada simulación

| Simulación | Duración (h) |
|--------------------------|--------------|
| P; $Q_p 500; A_t 1.75$ | 7:25:03 |
| P; $Q_p 500; A_t 0.70$ | 7:04:21 |
| P; $Q_p 500; A_t 0.25$ | 5:10:30 |
| B; $Q_p 500; A_t 1.75$ | 4:18:45 |
| B; $Q_p 500; A_t 0.70$ | 3:37:21 |
| B; $Q_p 500; A_t 0.25$ | 4:29:06 |
| P; $Q_p 700; A_t 1.75$ | 8:58:12 |
| B; $Q_p 700; A_t 1.75$ | 4:08:24 |
| P-B; $Q_p 500; A_t 1.75$ | 5:20:51 |

4.2.1 Evolución de la forma transversal de la barra

Se han observado patrones distintos en la forma de la sección transversal de la barra en las distintas simulaciones realizadas (Figura 4-12).

Durante los instantes iniciales, la sección transversal de la barra en todas las simulaciones presentan un único máximo de sedimentación centrado (casos sin influencia del viento), mientras que a medida que evolucionan, en la mayoría de las simulaciones se generan dos máximos. Esta situación se produce en todos los casos, salvo en la simulación de pleamar y bajamar con amplitud de marea de 0.25 m y la simulación de pleamar con amplitud de marea de 0.7 m.



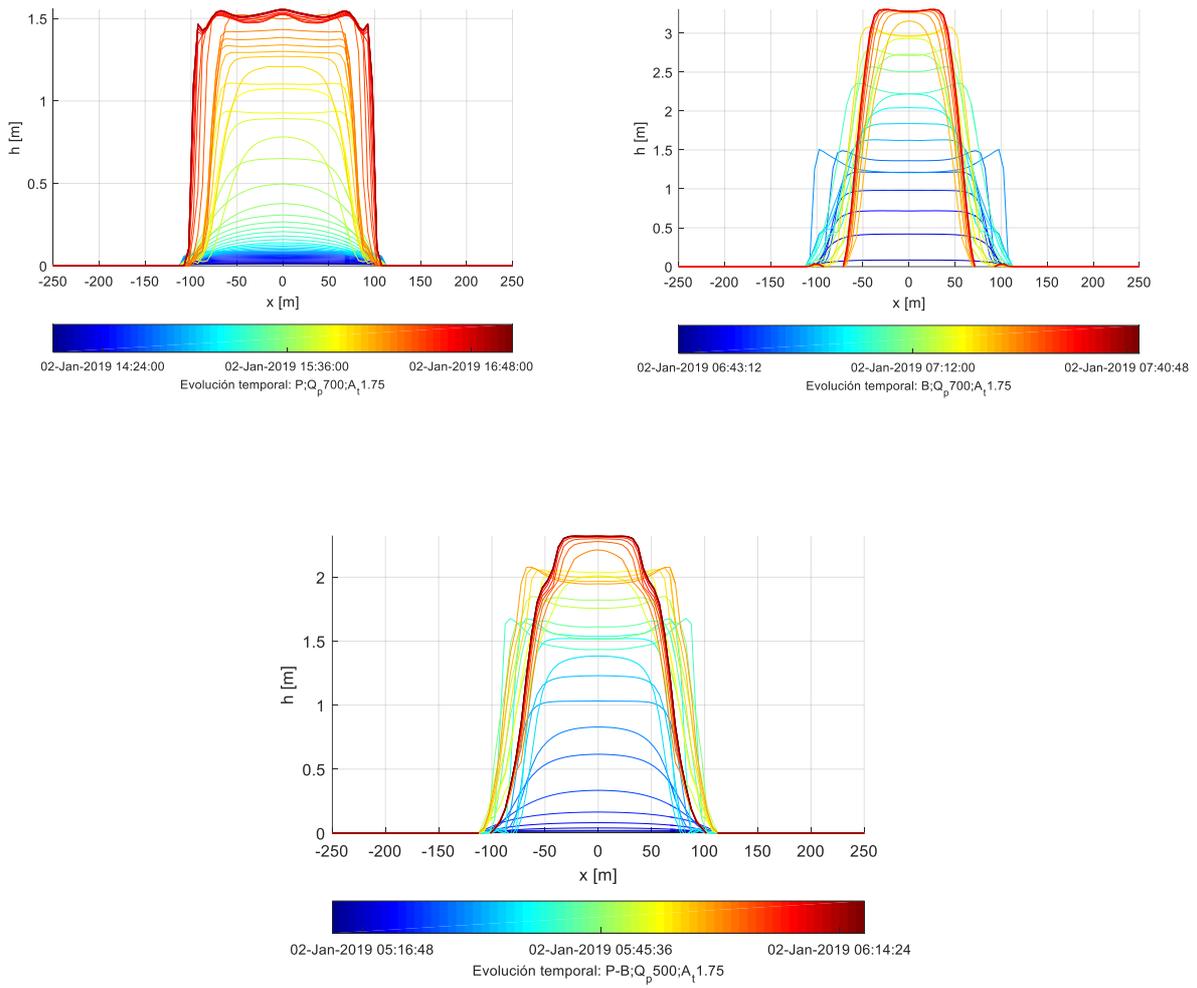


Figura 4-12. Evolución de la sección transversal de cada una de las simulaciones realizadas (sin incluir las que introducen la desviación del viento). Cada una indica una referencia con el tiempo de formación de la barra

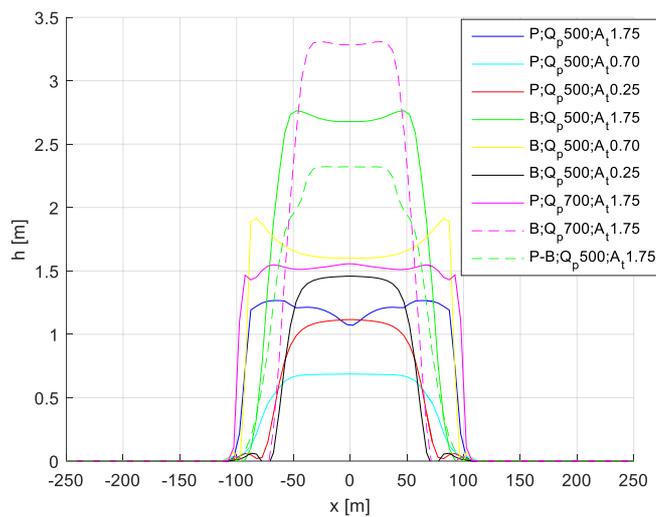
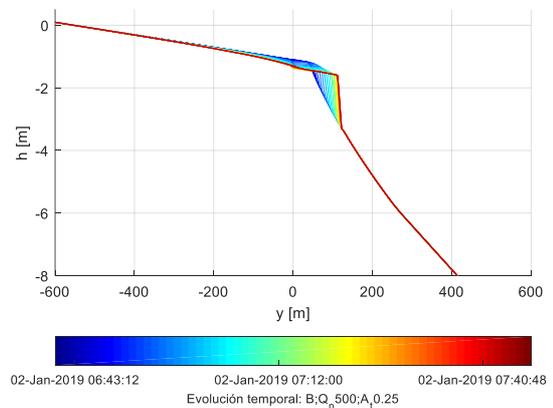
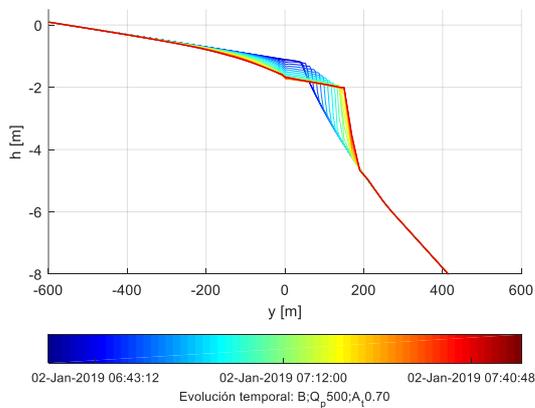
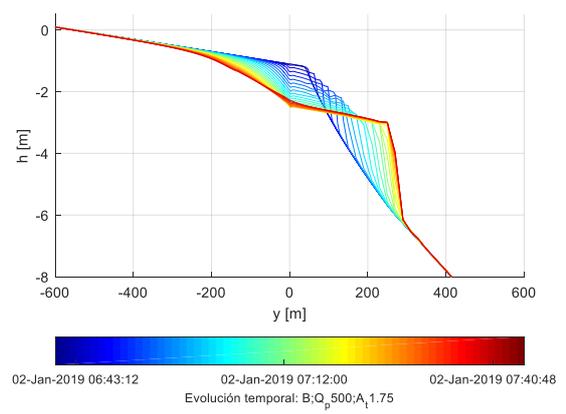
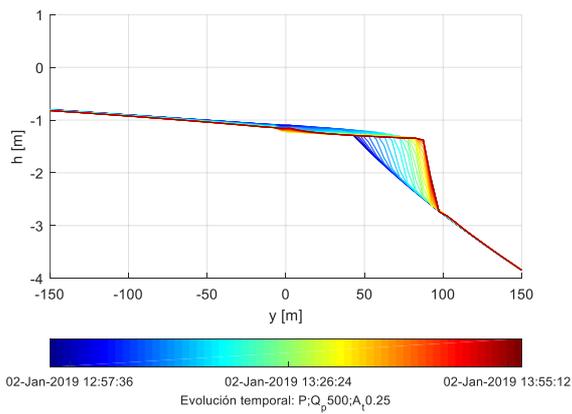
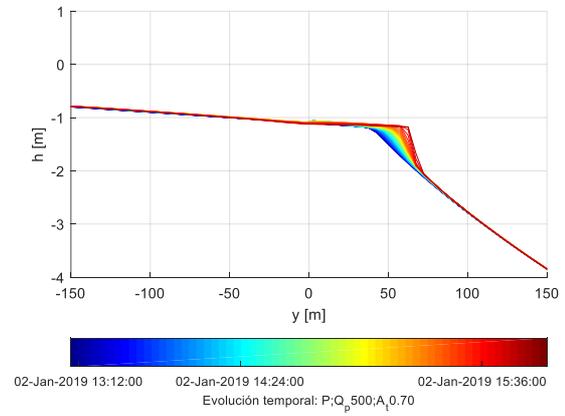
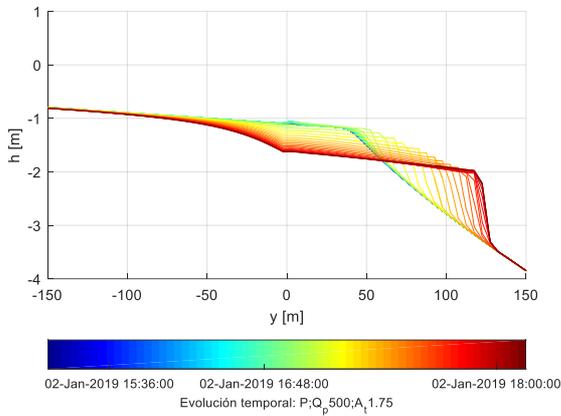


Figura 4-13. Posición final de la sección transversal de la barra en su punto de máxima sedimentación para cada simulación (sin incluir efecto del viento)

4.2.2 Evolución de la forma longitudinal de la barra

La forma de evolución longitudinal varía en función de la simulación variando la extensión de la zona de sedimentación y de erosión.



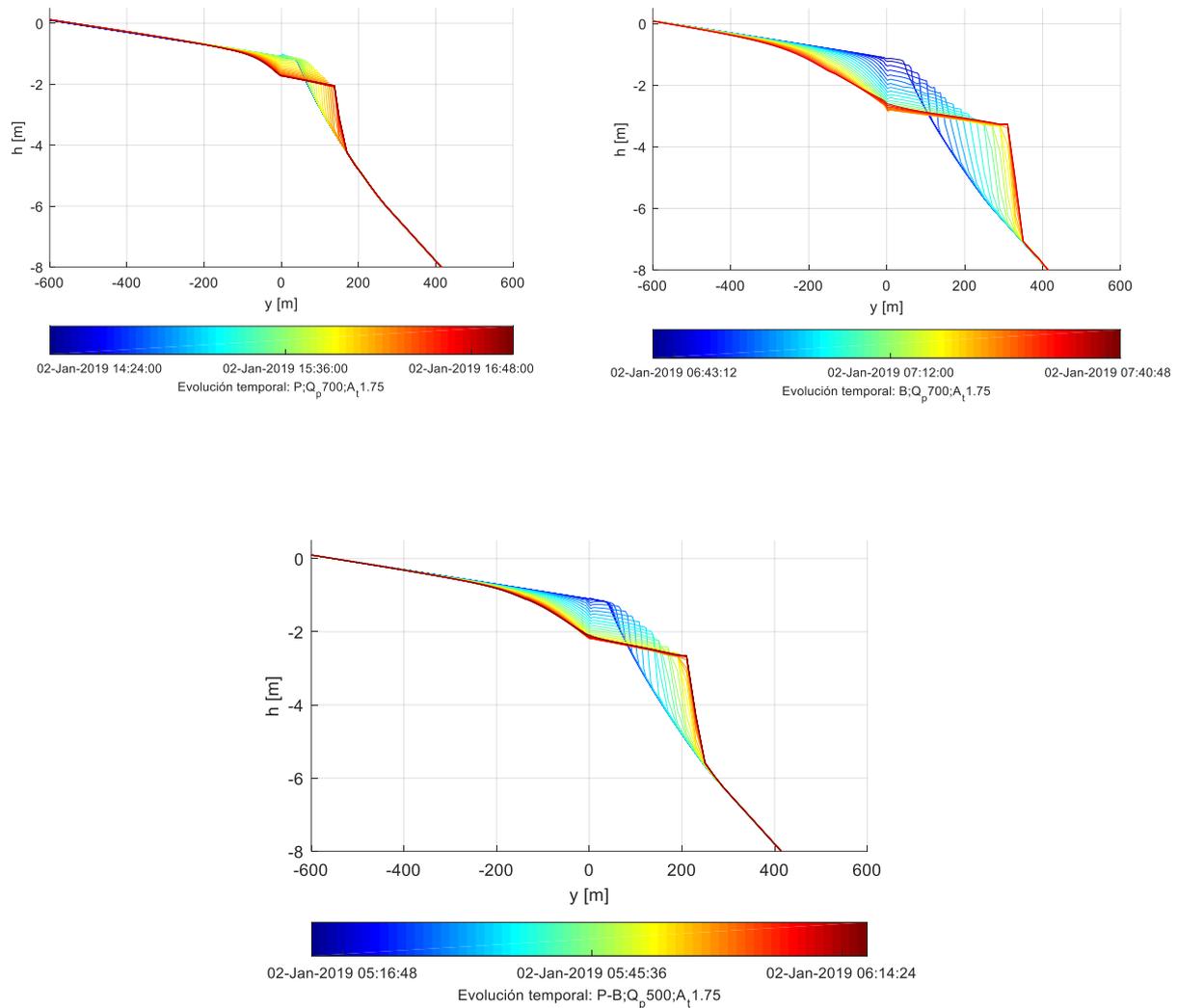


Figura 4-14. Evolución longitudinal de cada una de las simulaciones realizadas (sin incluir las que introducen la desviación del viento). Cada una indica una barra de referencia con tiempo

El alcance de la sedimentación y la erosión varían en función de las velocidades que se producen en la desembocadura.

4.2.3 Volumen de la barra

El análisis del volumen de la barra se ha presentado en dos formas: volumen acumulado y volumen en cada instante de tiempo.

El volumen acumulado mide la cantidad total de material movilizadopor la avenida; mientras que el volumen muestra lo que moviliza en cada instante de tiempo.

Se observa una clara diferencia entre la magnitud de los volúmenes movilizadopor las simulaciones en bajamar y en pleamar para la amplitud de marea de 1.75 m y 0.7 m, siendo mucho mayores para el caso de bajamar. La situación entre pleamar y bajamar arroja resultados más próximos a bajamar.

La diferencia es baja entre los resultados de amplitud marea de 0.25 m entre bajamar y pleamar.

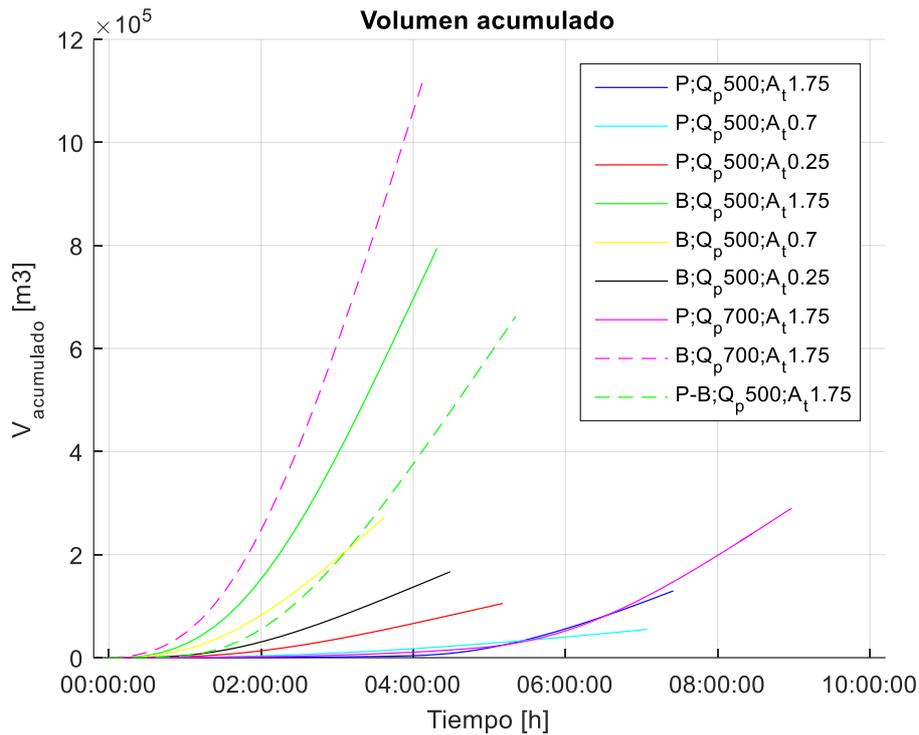


Figura 4-15. Volumen acumulado mientras dura la formación de la barra

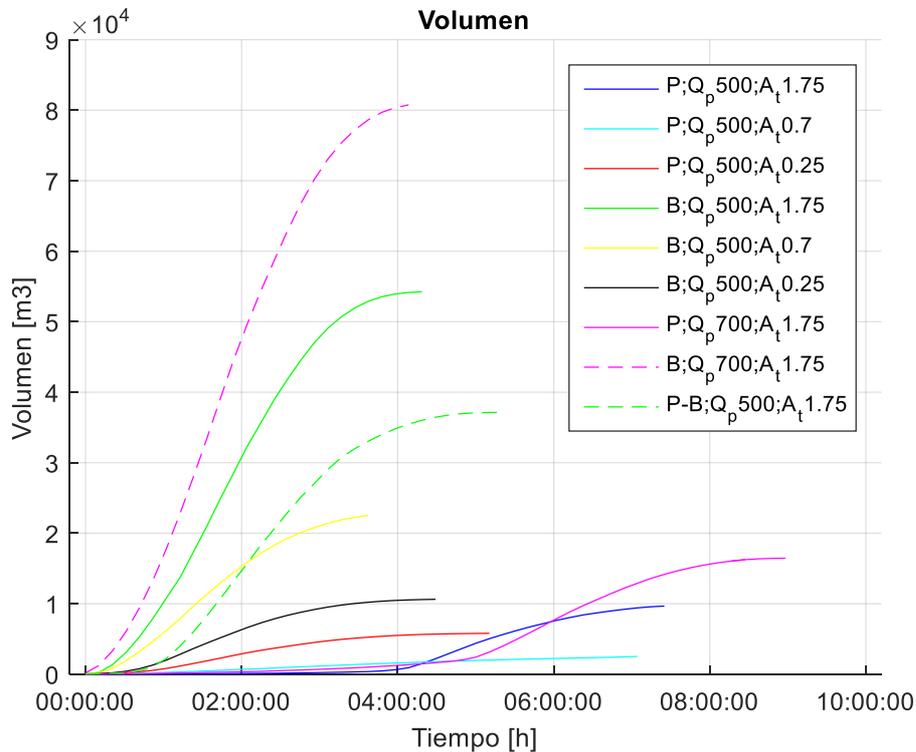


Figura 4-16. Volumen en cada instante de tiempo mientras dura la formación de la barra

4.2.4 Área en planta de la barra

El análisis del área en planta de la barra también se presenta como área acumulada y en cada instante de tiempo. Esta variable mide el área ocupada en planta por la barra.

Las simulaciones que presentaban un frenado de su velocidad como consecuencia de la subida del nivel en la

amplitud de marea de 1.75 m, manifiestan este efecto en el área en planta con el pico que se observa en las simulaciones P;Q_p500;A_t1.75 y P;Q_p700;A_t1.75 de la Figura 4-18. Durante un inicio se deposita material en planta, pero la crecida de la velocidad durante la vaciante produce el barrido de este material depositándolo a mayor distancia de la desembocadura.

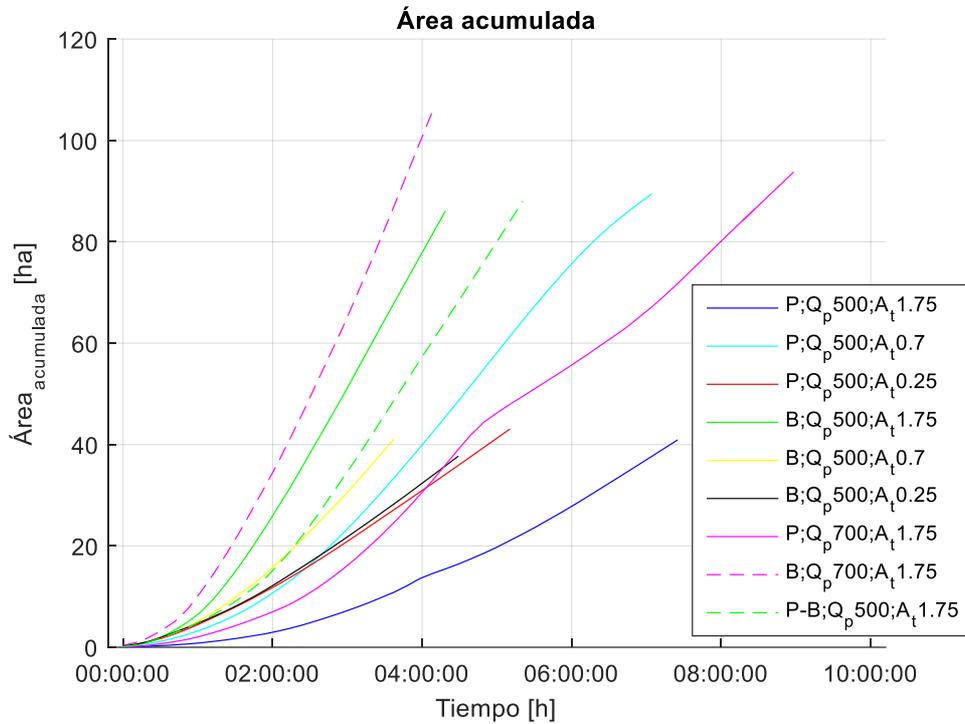


Figura 4-17. Área acumulada en planta mientras dura la formación de la barra

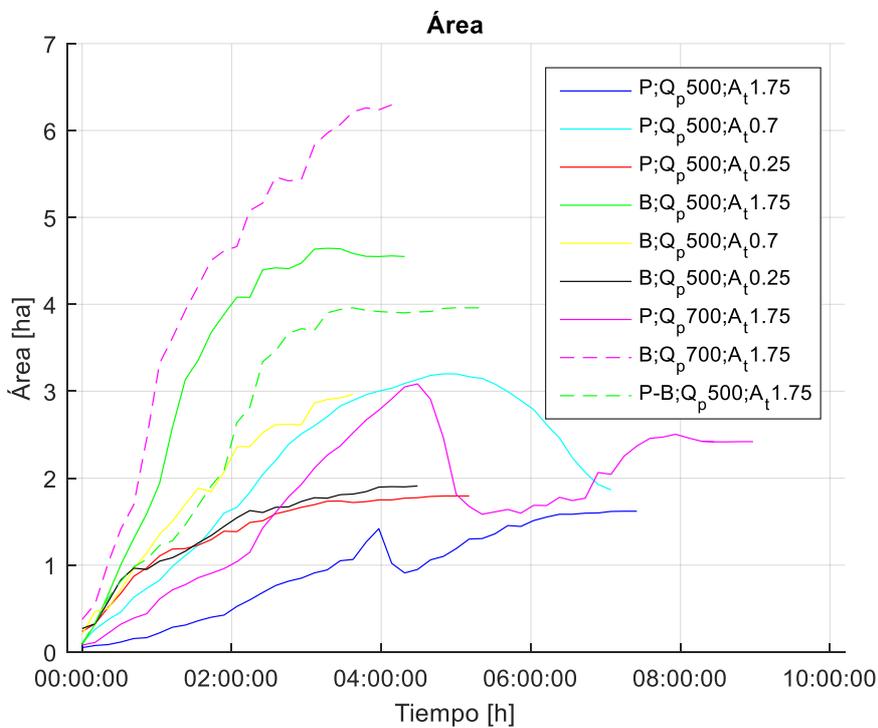


Figura 4-18. Área en planta de la barra mientras dura la formación de la barra

4.2.5 Avance longitudinal de la barra

El avance longitudinal de la barra indica la posición del punto de mayor altura de la barra en cada instante de tiempo (punto de máxima sedimentación).

Los resultados mostrados se refieren a la coordenada longitudinal (y) del modelo. El punto exacto de transición entre la zona marina y el cauce se encuentra en $y=37.5$ m, por lo que, si se quiere evaluar la situación respecto a la desembocadura, habrá que restar 37.5 m al resultado mostrado.

De nuevo se observan grandes diferencias para el avance longitudinal entre los pares pleamar – bajamar de una misma amplitud de marea, excepto para la marea de 0.25 m.

La pendiente de las curvas mostradas en la Figura 4-19 muestran la velocidad de avance longitudinal. Siendo éstas mucho mayores en los casos de bajamar. Esto indica que la velocidad de avance longitudinal es mayor en bajamar que en pleamar, siendo también menor el tiempo de formación de la barra..

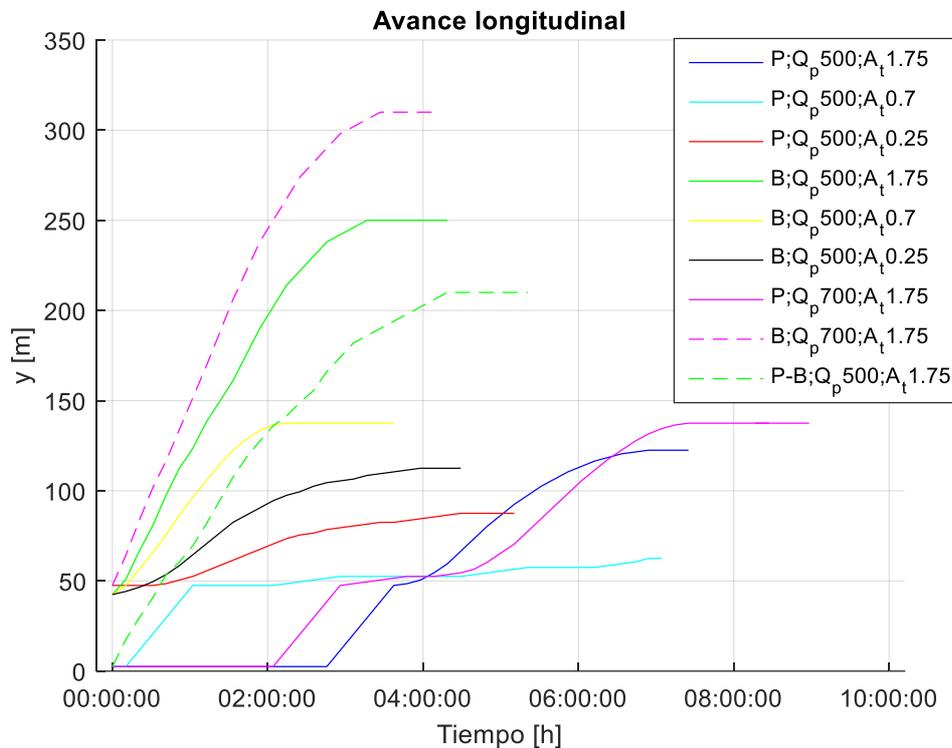


Figura 4-19. Avance longitudinal de la barra en cada simulación

4.2.6 Avance vertical de la barra

El avance vertical muestra la altura que alcanza la barra en su punto de máxima sedimentación en cada instante de tiempo.

También se observan grandes diferencias para el avance vertical entre los pares pleamar – bajamar de una misma amplitud de marea, excepto para la marea de 0.25 m.

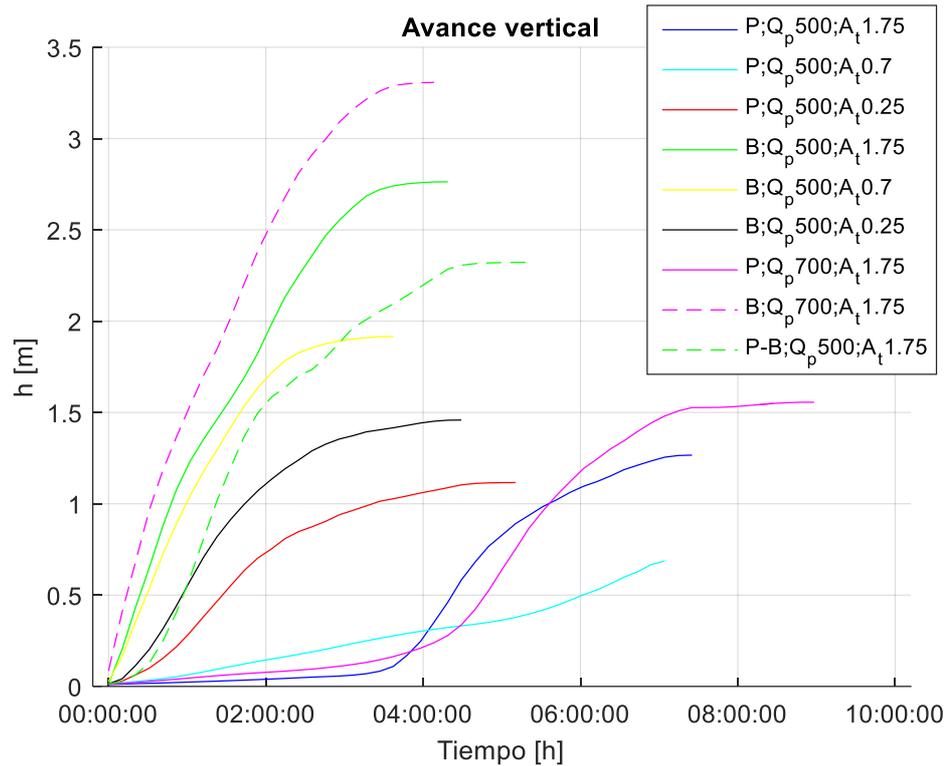


Figura 4-20. Avance vertical de la barra en cada simulación

4.2.7 Avance transversal de la barra

El avance transversal de la barra se trata de una magnitud más complicada de cuantificar. En este caso, se ha decidido mostrar la posición respecto al eje x (eje transversal) del centro de gravedad de la barra, con el objetivo de cuantificar la influencia del viento sobre las simulaciones.

El avance transversal experimentado en las simulaciones no es de gran magnitud como se observa en la siguiente figura, siendo mayor para los casos de menor amplitud de marea en pleamar, situación en la que las velocidades en la desembocadura son menores.

También se observa en la figura que las barras empiezan con una desviación elevada respecto al eje x durante los inicios de su formación, pero dicha desviación se corrige con el tiempo.

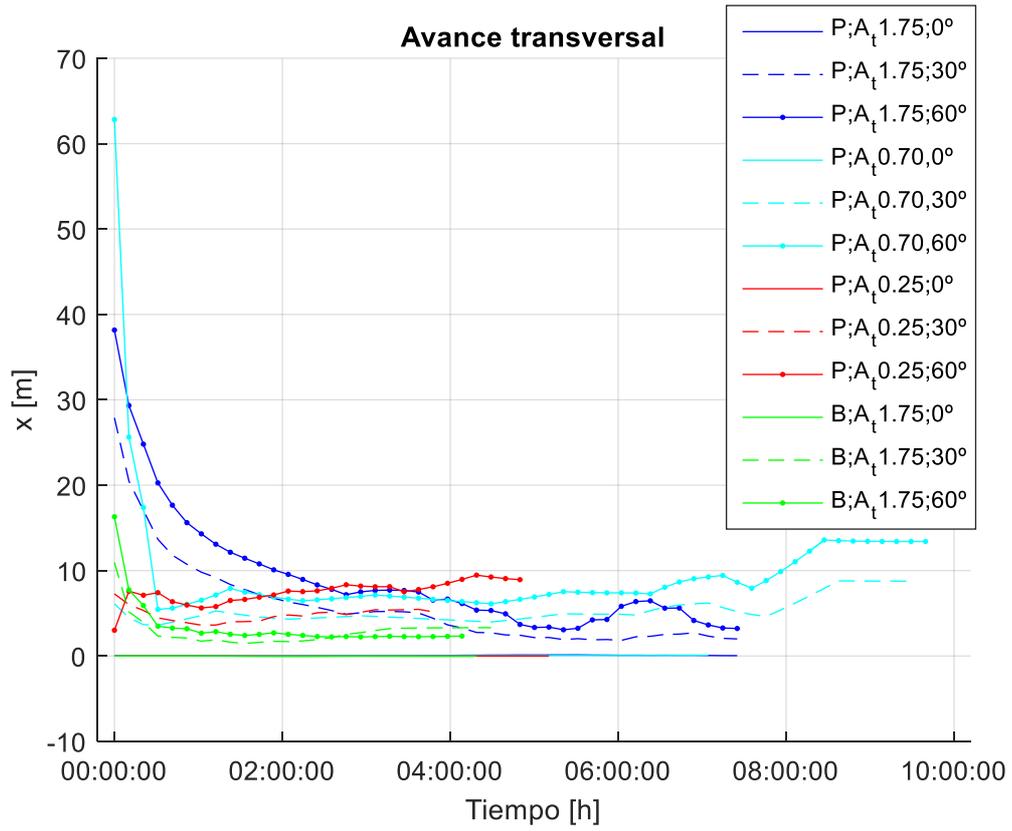


Figura 4-21. Avance transversal del centro de gravedad de la barra en cada simulación

5 DISCUSIÓN

Los resultados mostrados ponen claramente de manifiesto que existe influencia de las variables analizadas sobre la forma en la que se deposita el sedimento en las desembocaduras durante el paso de una avenida. En este apartado se analiza cada uno de los resultados mostrados en el capítulo anterior, comparando, siempre que sea posible, con estudios similares que se han tomado como referencia.

5.1.1 Velocidades

Algunos autores han establecido que la formación de las barras en las desembocaduras se debe a la caída de la velocidad que se produce al encontrarse un flujo de agua con otro de menor velocidad, generándose la deposición y sedimentación de partículas. Más específicamente, Edmonds y Slingerland (2007) [1] llegan a la conclusión de que la barra se forma debido a la caída de las velocidades en la región entre la desembocadura y la posición longitudinal igual a dos veces el ancho del cauce, es decir, entre $0 < y/W < 2$, siendo W el ancho del cauce.

Tomando este estudio como referencia, se muestra en la Figura 5-1 a la Figura 5-9, para cada simulación, una gráfica en la que se muestra la evolución temporal de la velocidad y de la altura de la barra (incluida la erosión) con el eje de abscisas adimensionalizado respecto al ancho del cauce (W).

Para todos los casos estudiados se cumple lo anteriormente mencionado, incluso se podría acotar el rango citado.

Al inicio de la formación de la barra (colores azules) solamente se produce un pico de velocidades y posteriormente la caída de la velocidad, pero al iniciarse la erosión y sedimentación esto varía, llegándose a producirse varios máximos en aquellos casos en los que la variación del lecho es mayor. La variación de la posición del pico de velocidades en el tiempo se debe a la modificación continua del lecho como consecuencia de la movilización de material.

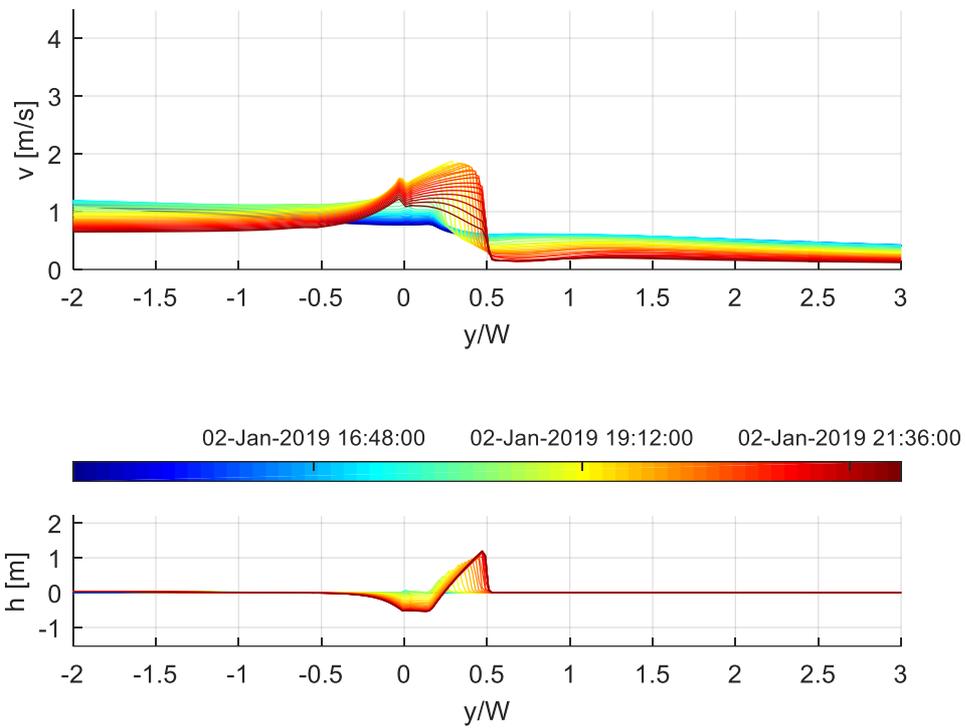


Figura 5-1. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación $P; Q_p,500; A,1.75$

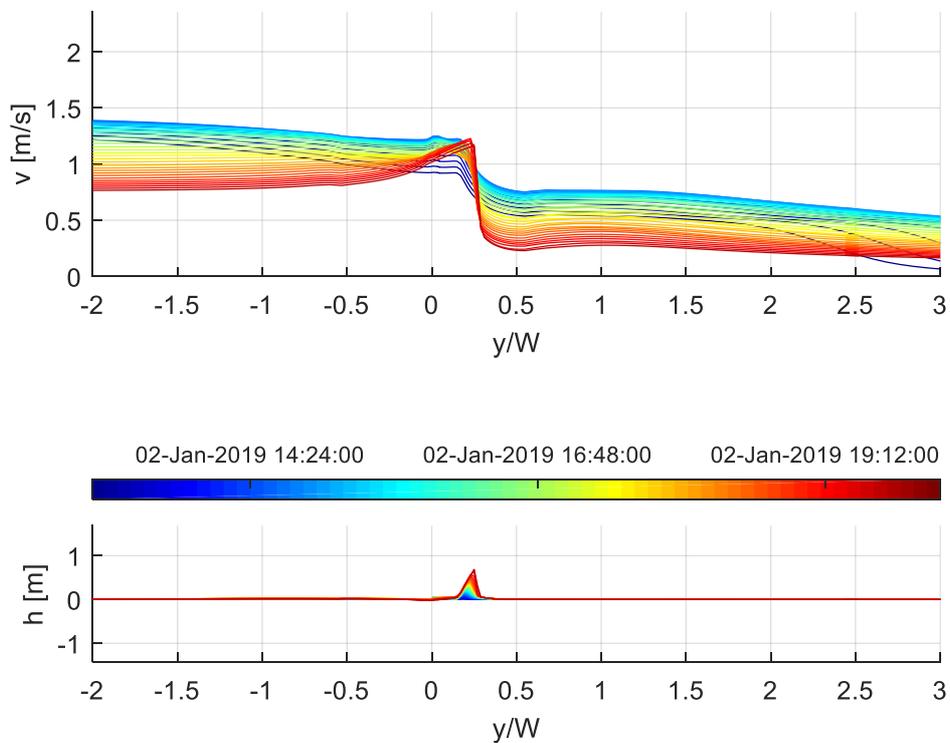


Figura 5-2. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación $P; Q_p,500; A,0.70$

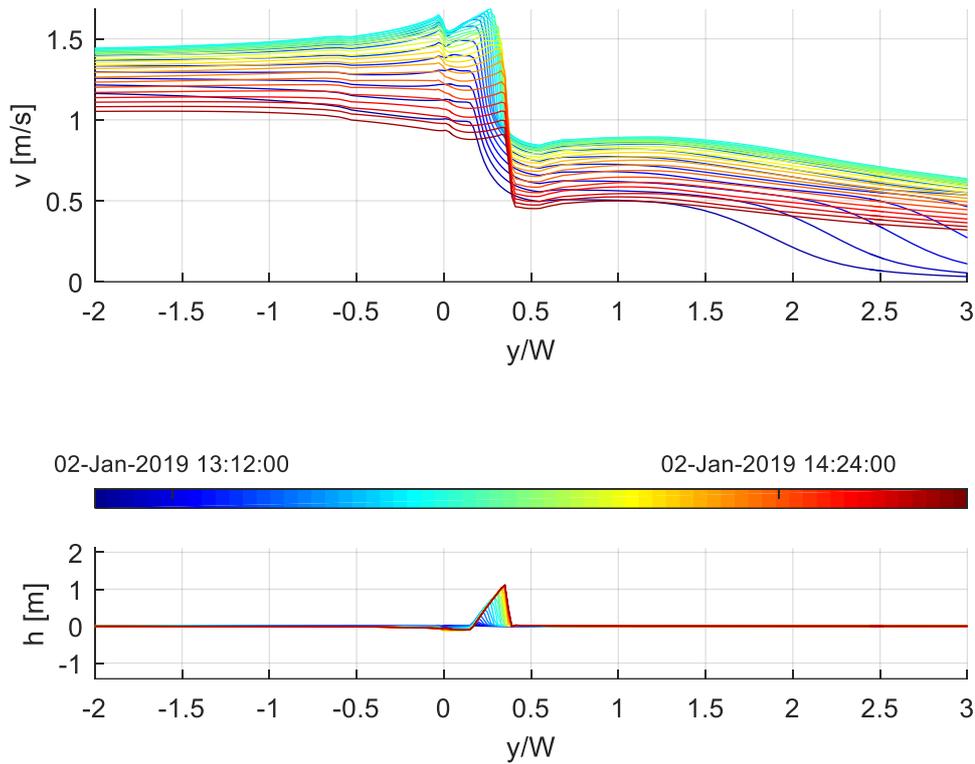


Figura 5-3. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P; $Q_p 500; A_t 0.25$

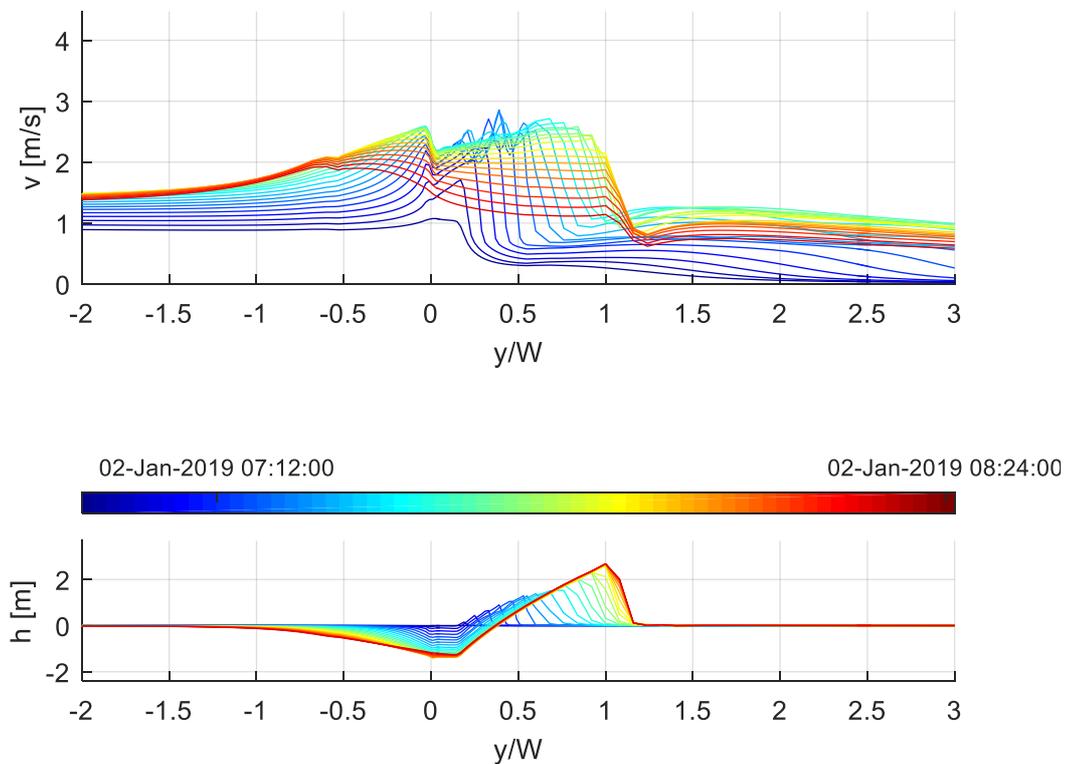


Figura 5-4. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B; $Q_p 500; A_t 1.75$

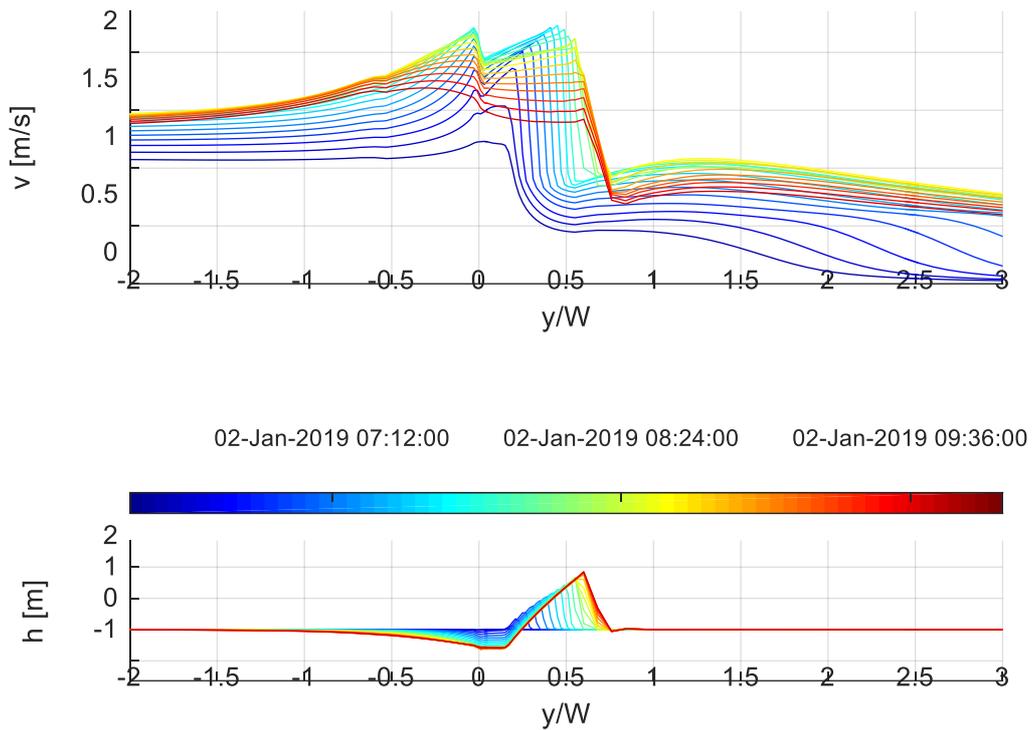


Figura 5-5. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B; $Q_p,500$; $A,0.70$

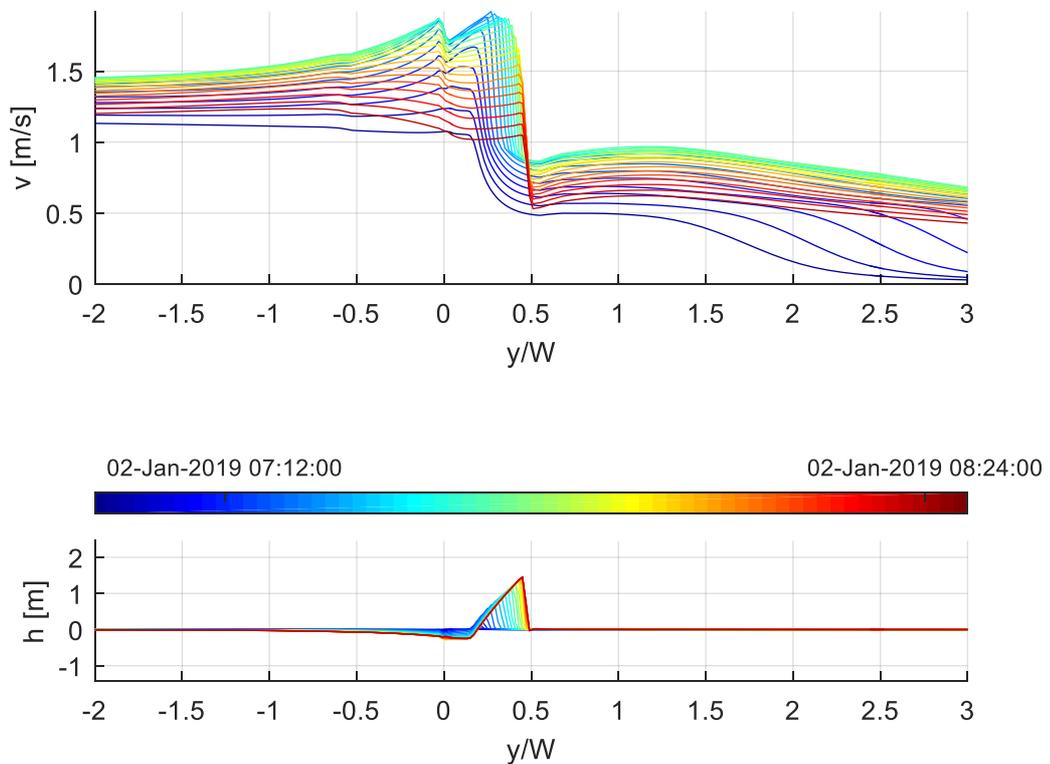


Figura 5-6. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B; $Q_p,500$; $A,0.25$

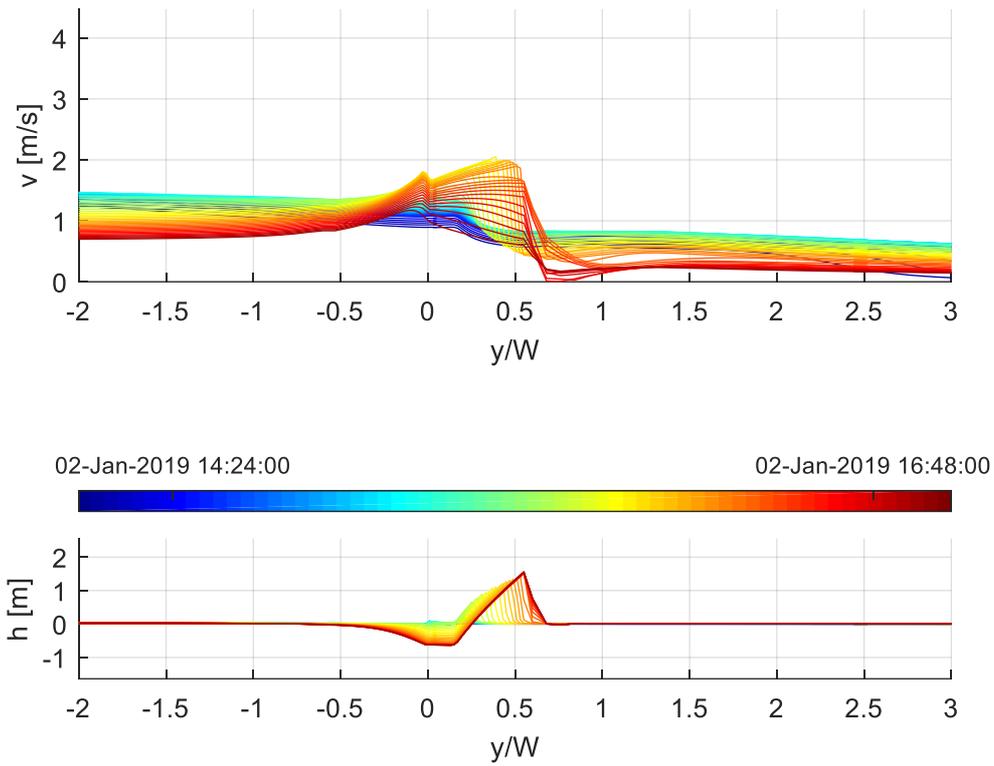


Figura 5-7. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P; $Q_p 700; A_t 1.75$

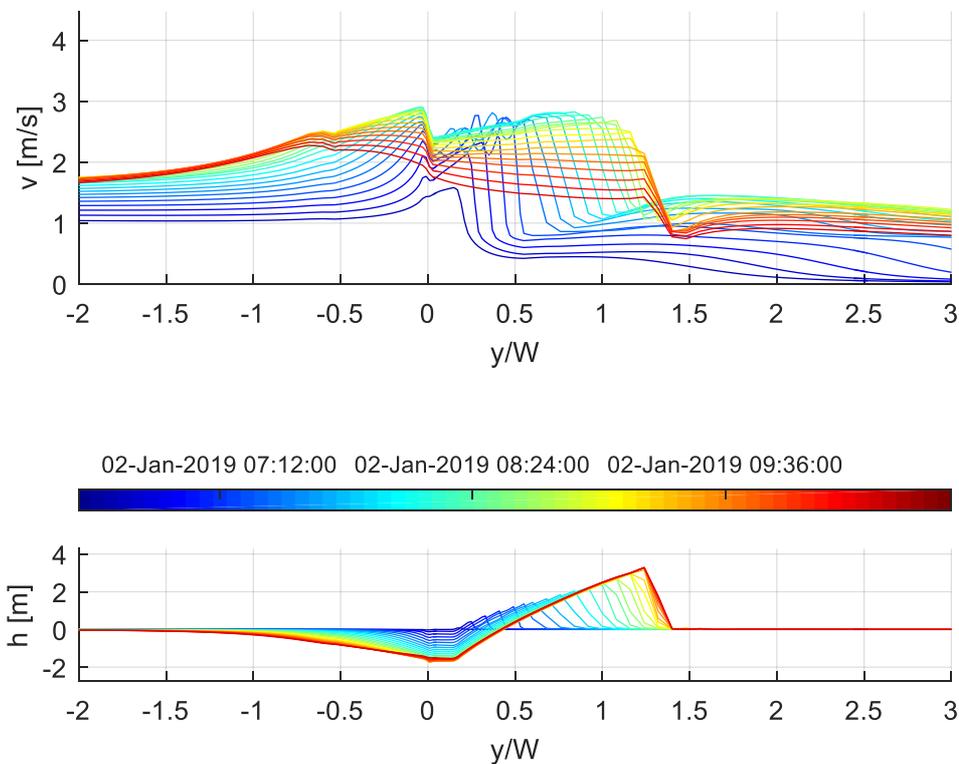


Figura 5-8. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación B; $Q_p 700; A_t 1.75$

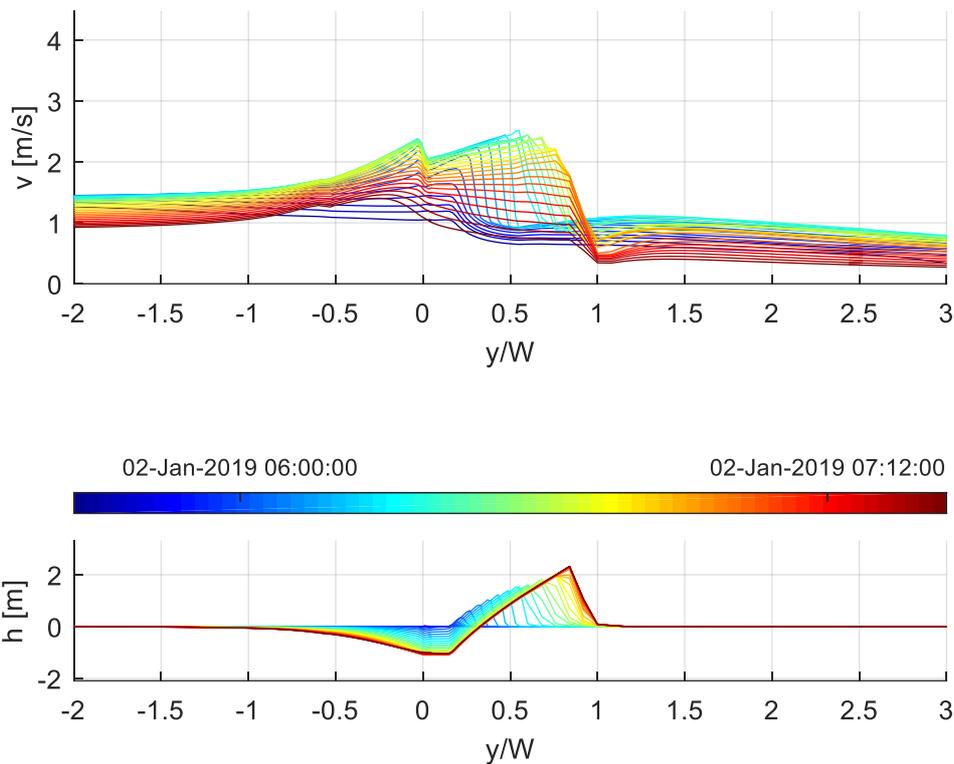


Figura 5-9. Evolución temporal de la velocidad y la sedimentación – erosión en función del parámetro adimensional y/W para la simulación P-B; Q_p500 ; $A_i1.75$

5.1.2 Volumen de la barra

El volumen acumulado (Figura 4-15) guarda relación con las velocidades que se producen. A mayor velocidad punta alcanzada, mayor volumen acumulado final. Esta relación se cumple en todos los casos, excepto entre las simulaciones B; Q_p500 ; $A_i0.70$ y P; Q_p700 ; $A_i1.75$. La velocidad punta alcanzada en la primera es mayor que en la segunda, sin embargo, el volumen acumulado final es mayor en la de menor velocidad punta. Esto se debe a que el volumen acumulado no solamente depende de la velocidad, sino también del tiempo que esté movilizándose sedimento. Aunque la velocidad punta sea mayor, la segunda simulación mantiene velocidades con capacidad de transporte durante más tiempo, ya que el caudal de la avenida es mayor. Para el resto de casos, en los que el hidrograma de la avenida tiene los mismos valores, sí se corresponde la relación de mayor volumen acumulado a mayor velocidad punta.

La diferencia entre pleamar y bajamar se va atenuando a medida que baja la amplitud de la marea.

En cuanto al volumen movilizado en cada instante de tiempo (Figura 4-16), la amplitud mediana de marea estudiada (0.70 m) moviliza menos sedimento que amplitudes menores, debido a que ni se produce una punta elevada en la vaciante ni se produce una punta elevada durante la punta de la avenida.

Las situaciones en las que la punta de velocidad se produce posterior a la punta de la avenida, movilizan sedimento durante más horas que las situaciones en las que la punta de velocidad se produce antes que la de la avenida.

En este caso, de nuevo se cumple que, a mayor velocidad punta alcanzada, para la misma avenida, mayor volumen final movilizado.

5.1.3 Área en planta de la barra

El área acumulada en planta (Figura 4-17) representa la suma de las áreas que han ido ocupando los barras en planta en todos los instantes de tiempo, por ello es normal ver casos en los que se moviliza menos sedimento, pero tienen un mayor tiempo de movilización, el área acumulada final sea comparable a los que movilizan más

sedimento en menor tiempo.

En cuanto al área en cada instante de tiempo (Figura 4-18), en la situación de pleamar en las que la punta de velocidad se produce durante la vaciante ($P; Q_p 500; A_t 1.75$ y $P; Q_p 700; A_t 1.75$), se observan dos picos de acumulación de área que posteriormente se reducen. Estos picos se corresponden con el momento en el que la marea está en su máxima amplitud y se deposita material antes de ser arrastrado con la corriente de vaciante. Esto ocurre para amplitudes de marea máxima y media estudiadas. En la marea mínima, la velocidad apenas nota la subida del nivel.

La relación en las situaciones de pleamar es más sencilla, a mayor carrera de marea y mayor caudal de descarga, mayor área en planta ocupada.

Existe poca diferencia entre la pleamar y bajamar del caso de amplitud de marea 0.25 m.

5.1.4 Forma transversal de la barra

En la forma transversal de la barra se observan dos tipologías (Figura 4-12): una tipología con un único punto máximo de sedimentación centrado en $x=0$, y otra tipología con dos puntos máximos de sedimentación.

También se observa que, inicialmente, todas las barras evolucionan de la misma forma, con un único máximo. Mientras que, llega un momento en algunos casos en los que se produce la segunda tipología con dos máximos.

Edmonds y Slingerland (2007) [1] establecen que para una relación h/h_0 (siendo h el nivel de agua sobre el punto de máxima altura de la barra y h_0 el nivel medio del agua tomado en la desembocadura sin modificación del lecho) menor a 0.4 se frena el avance longitudinal de la barra y se genera una bifurcación del flujo aumentando el ancho de sedimentación en planta, dotando a la deposición del sedimento de una forma triangular. Esto quiere decir que la altura de la barra se encuentra limitada a partir de una cierta profundidad, a partir de la cual el avance deja de ser longitudinal y tiende a producirse una expansión transversal.

Más tarde, Jiménez-Robles, Ortega-Sánchez y Losada (2016) [4] demostraron que la relación $h/h_0=0.4$ se cumplía para pendientes de la zona marina inferiores a 2.5 %. Para pendientes mayores, la barra puede desarrollar alturas mayores antes de que se produzca la bifurcación.

La forma transversal con dos puntos máximos de sedimentación es consecuencia de esta bifurcación del flujo. La barra presenta un único punto máximo de sedimentación antes de producirse este fenómeno. Una vez se produce, se generan las dos puntas de la forma transversal.

Las simulaciones y condiciones en las que ocurre este fenómeno descrito se muestran en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1. Condiciones bajo las que se produce la bifurcación de la barra

| Simulación | h_{bar} (m) | $h_{bar}/h_{bar,fb}$ | $v_{o,bar}$ (m/s) |
|---|---------------|----------------------|-------------------|
| P;Q_p500;A_t1.75 | 1.08 | 0.35 | 1.7 |
| B;Q_p500;A_t1.75 | 1.44 | 0.40 | 2.6 |
| P;Q_p500;A_t0.70 | 1.67 | 0.46 | 2 |
| P;Q_p700;A_t1.75 | 1.57 | 0.42 | 1.7 |
| B;Q_p700;A_t1.75 | 1.49 | 0.41 | 2.7 |
| P-B;Q_p500;A_t1.75 | 1.68 | 0.47 | 2.5 |

Siendo:

- h_{bar} : altura de la barra en el momento que ocurre la bifurcación.
- $h_{bar,fb}$: altura de la barra con la batimetría sin actualizar, es decir, la profundidad respecto al nivel

medio en el que se está formando la barra.

- $v_{o,bar}$: velocidad sobre la barra en el perfil $x=0$.

En la Figura 5-10 se muestra:

- Posición x de la máxima altura de la barra. Este valor va a ser distinto de 0 cuando se produzca la bifurcación de la barra.
- Relación $h_{bar}/h_{bar,fb}$. Varios autores establecen que, cuando este valor alcanza 0.6 se produce la bifurcación del flujo. Esto se evidencia con la caída de la velocidad sobre la barra. En este estudio, esta caída se debe al cese de la avenida. Todos los estudios analizados presentan una descarga constante.
- Valor de la velocidad sobre la barra.

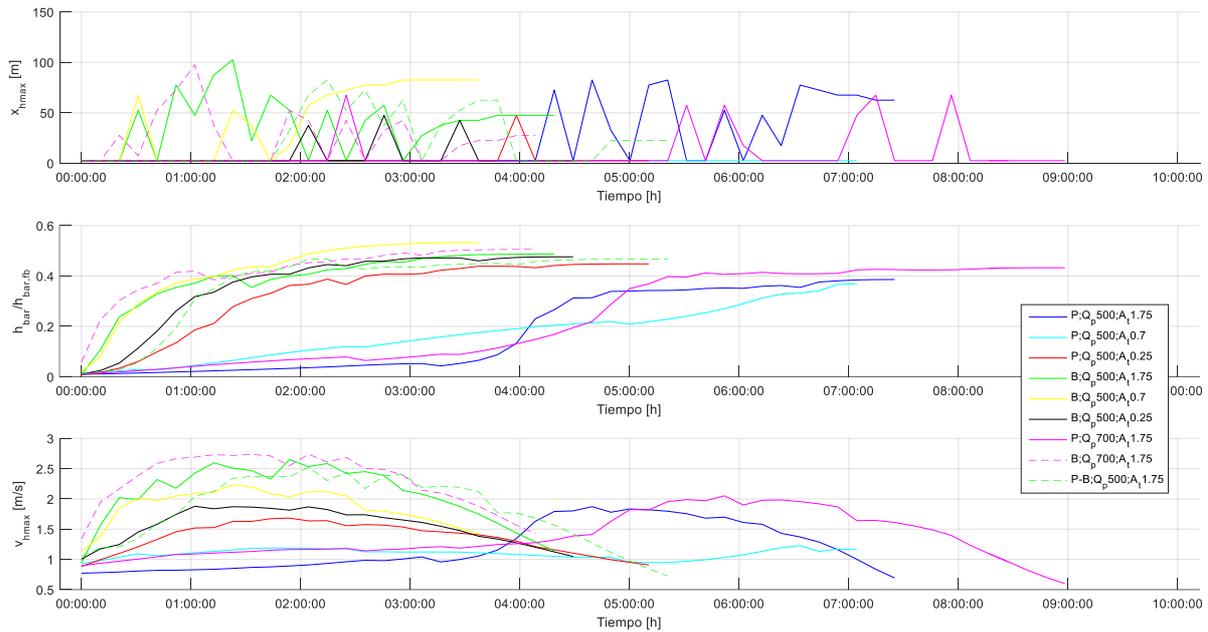


Figura 5-10. Análisis de la forma transversal de la barra

Se observa que, para velocidades superiores a 1.7 m/s, siempre se produce esta forma de la sección transversal de la barra con dos puntos de altura máxima en lugar de uno.

No se observa el mismo patrón que en estudios consultados, puesto que la avenida considerada no permite alcanzar las relaciones de altura de barra que se alcanzan en dichos estudios. En dichos estudios, las avenidas se suponen de velocidad constante e inferior a la que en este se produce, por lo que, en este caso, la forma transversal de la barra está condicionada por la velocidad que se produce sobre ella.

5.1.5 Alcance longitudinal de la barra

El factor que más influye sobre el alcance longitudinal de la barra es el momento en el que ocurre la avenida, generándose mucha diferencia cuando la avenida ocurre cerca de pleamar a cuando ocurre en la transición pleamar – bajamar o cerca de bajamar.

Para una amplitud de marea de 1.75 m y caudal punta de la avenida de 500 m³/s, el alcance longitudinal cuando la avenida coincide con pleamar es de 85 m, mientras que cuando la avenida coincide con bajamar el alcance es de 212.5 m. Esto muestra la diferencia entre el alcance longitudinal al variar la posición de la punta de la avenida con el ciclo de marea. El alcance cuando la avenida ocurre en bajamar es 2.5 veces mayor que cuando ocurre en pleamar.

Para esta misma amplitud de marea y caudal punta de la avenida de 700 m³/s, el alcance cuando la avenida coincide con pleamar es de 100 m, mientras que al coincidir la avenida con bajamar el alcance es de 272.5 m. Es decir, al aumentar el caudal de la avenida 1.4 veces (de 500 m³/s pasa a 700 m³/s), el alcance longitudinal en pleamar aumenta 1.2 veces (de 85 m pasa a 100 m) y en bajamar aumenta 1.3 veces (de 212.5 m pasa a

272.5 m).

En consecuencia, avenidas menores coincidentes con bajamar, pueden generar barras con el doble de avance longitudinal que avenidas mayores que ocurren en pleamar. Una avenida que ocurre en situación intermedia entre pleamar y bajamar genera unos resultados más próximos a la situación de bajamar (para esta amplitud de marea).

Para una amplitud de marea 0.70 m, cuando la avenida ocurre en pleamar el alcance longitudinal es de 25 m, mientras que si se produce la avenida en bajamar se alcanza 100 m. En este caso, el alcance cuando la avenida ocurre próxima a bajamar es 4 veces mayor a cuando está próxima a pleamar. En el caso anterior, la combinación de la vaciante con la avenida propiciaba un alcance mayor, de ahí que hubiera menos diferencia entre la situación de pleamar y bajamar.

Para una amplitud de marea de 0.25 m, cuando la avenida ocurre en pleamar el alcance longitudinal es de 50 m, mientras que en bajamar alcanza 75 m. En este caso, el aumento de calado al subir la marea no reduce tanto la velocidad como en los casos anteriores, ni produce una vaciante fuerte, dando lugar a un alcance 1.5 veces mayor cuando la avenida está próxima a bajamar. Por tanto, al disminuir la amplitud de varia, la diferencia entre pleamar y bajamar disminuye.

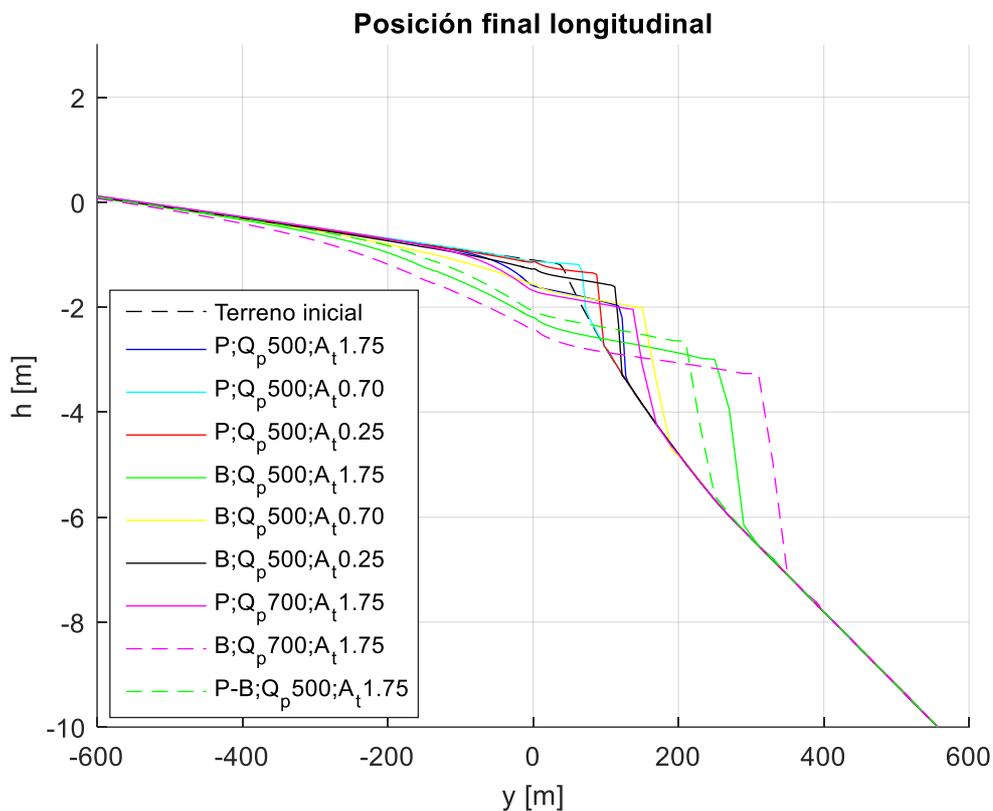


Figura 5-11. Posición final de las barras en cada simulación en el perfil $x=0$ m

En la Figura 5-11 se compara la posición final de cada una de las barras en cada simulación, poniendo de manifiesto lo anteriormente comentado. La forma longitudinal de las barras es similar de simulación a simulación, variando su alcance longitudinal y vertical en función de las variables presentes.

5.1.6 Alcance vertical de la barra

En el avance vertical, los factores estudiados influyen de la misma forma que en el caso del avance longitudinal.

Para una amplitud de marea de 1.75 m y un caudal punta de la avenida de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, cuando la avenida ocurre próxima a pleamar el alcance vertical es de 1.27 m, mientras que cuando ocurre próxima a bajamar se alcanza una altura de 2.76 m. Es decir, al variar la posición de la avenida respecto al ciclo de marea, la altura de la

barra es 2.2 veces mayor en bajamar que en pleamar.

Para la misma amplitud de marea y un caudal punta de la avenida de $700 \text{ m}^3/\text{s}$, el alcance vertical cuando la avenida ocurre en pleamar es de 1.56 m, mientras que cuando ocurre en bajamar es de 3.31 m. Es decir, al aumentar el caudal de la avenida 1.4 veces (pasa de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ a $700 \text{ m}^3/\text{s}$), se produce un alcance 1.2 veces mayor en pleamar (pasa de 1.27 m a 1.56 m) y 1.2 veces mayor también en bajamar (pasa de 2.76 m a 3.31 m).

De nuevo, hay mayor diferencia entre las alturas de las barras al variar la posición de la avenida respecto al ciclo de marea que al aumentar el caudal de la avenida.

Para una amplitud de marea 0.7 m, cuando la avenida ocurre en pleamar el alcance vertical llega a 0.69 m, mientras que cuando ocurre en bajamar se alcanza 1.92 m. En este caso, el alcance cuando la avenida está próxima a bajamar es 2.8 veces mayor a cuando está próxima a pleamar.

Para una amplitud de marea de 0.25 m, cuando la avenida ocurre en pleamar el alcance vertical llega a 1.12 m, mientras que cuando ocurre en bajamar alcanza 1.46 m. Dando lugar a un alcance vertical 1.3 veces mayor cuando la avenida está próxima a bajamar.

5.1.7 Alcance transversal de la barra

Mediante el alcance transversal de la barra se trata de comprobar el efecto del ángulo de incidencia del viento en la formación de las barras.

En los resultados (Figura 4-21) se observa, en primer lugar, que inicialmente algunas de las simulaciones parten ya de un desvío inicial cuando hay viento con ángulo. En segundo lugar, esta desviación se corrige en todas ellas, y posteriormente, en los casos de menor amplitud de marea, vuelve a generarse la desviación.

La posición final de la barra en los casos de amplitud de marea máxima, tanto en pleamar como en bajamar, es prácticamente la misma que en el caso sin marea. La desviación máxima se obtiene para la amplitud de 0.7 m, siendo de 13 m para el ángulo de 60° y de 8.8 m para 30° .

Se observa que el avance transversal se genera cuando las velocidades son menores. En aquellas simulaciones en las que la velocidad que se produce es muy elevada, apenas nota la influencia de viento, y casi no se desvía. Es por ello que, como inicialmente las velocidades son menores y van creciendo, el avance transversal va disminuyendo. Los casos de pleamar con amplitud 0.7 m y 0.25 m son los que menos velocidades desarrollan, y como consecuencia, los que mayor avance transversal experimentan. Para los otros dos casos estudiados, el avance transversal es casi nulo.

El motivo por el que se produce una desviación inicial en la deposición de sedimento es que, al inicio de la avenida, el viento tiene capacidad para desviar la descarga fluvial en la zona próxima a la desembocadura. Sin embargo, a medida que aumenta el caudal de descarga, la desviación se produce a mayor distancia de la desembocadura, llegando incluso a producirse a una distancia mayor que la del alcance longitudinal de la barra.

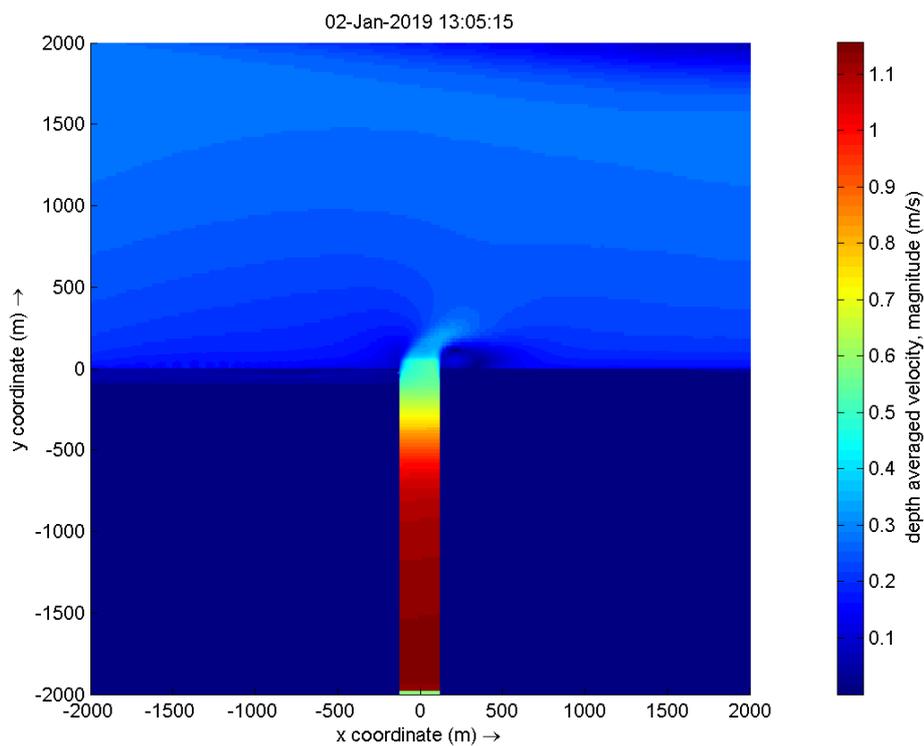


Figura 5-12. Velocidad de la simulación ($P; Q_p, 500; A_i, 1.75; \theta 60$) en los primeros minutos al llegar la avenida a la zona marina

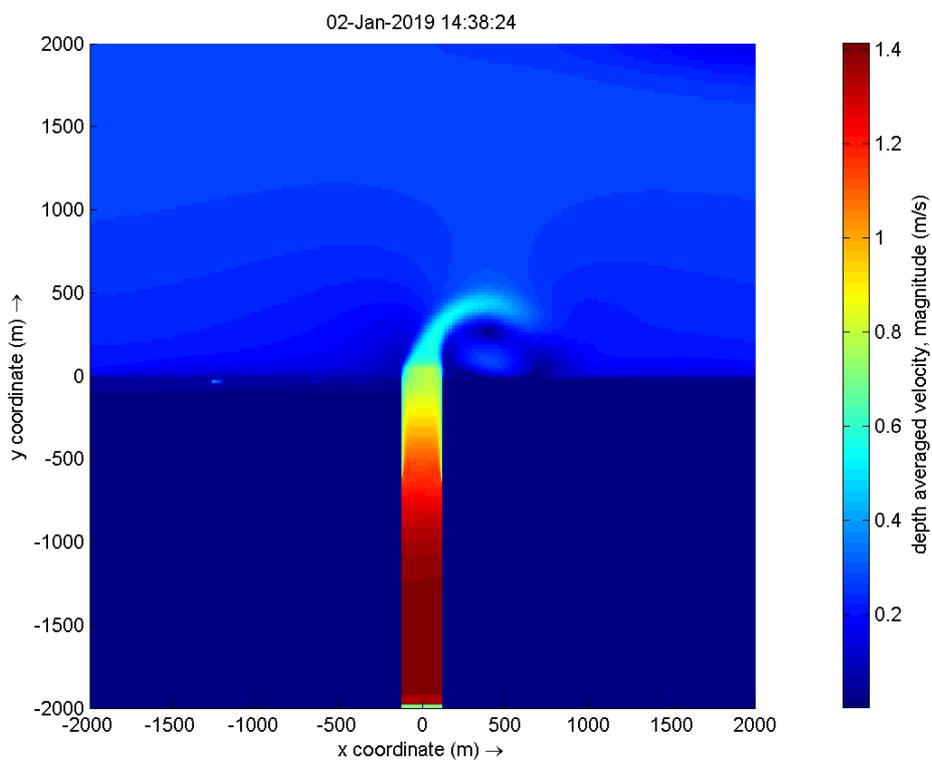


Figura 5-13. Velocidad de la simulación ($P; Q_p, 500; A_i, 1.75; \theta 60$) en el instante de inicio de formación de la barra

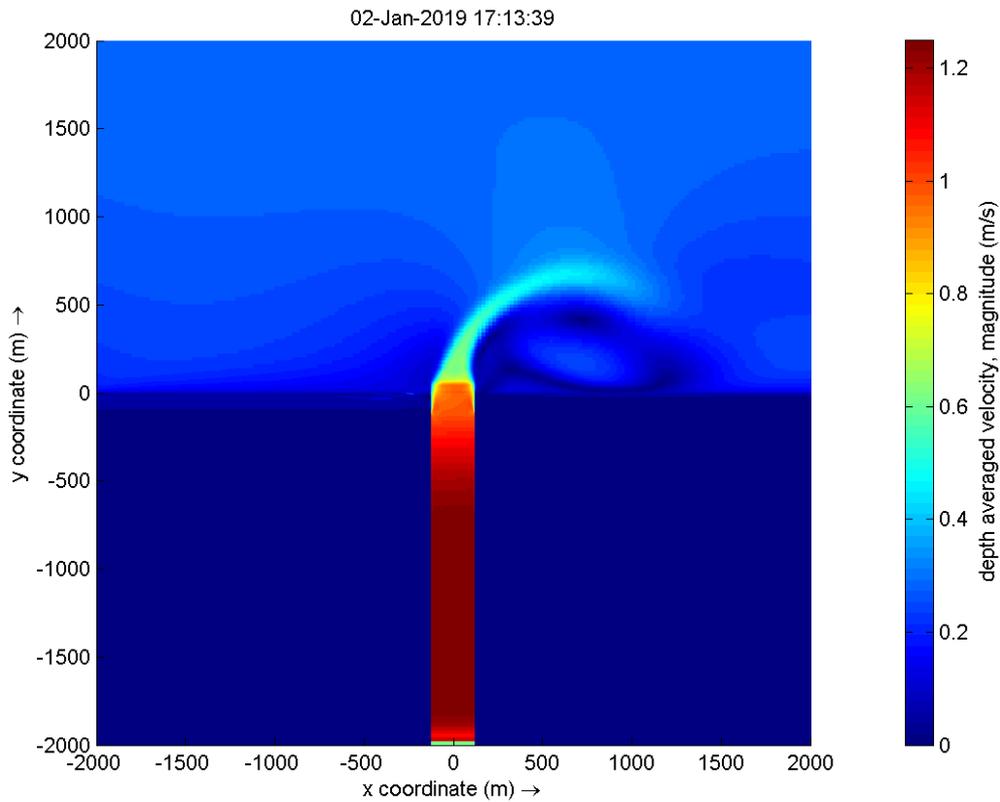
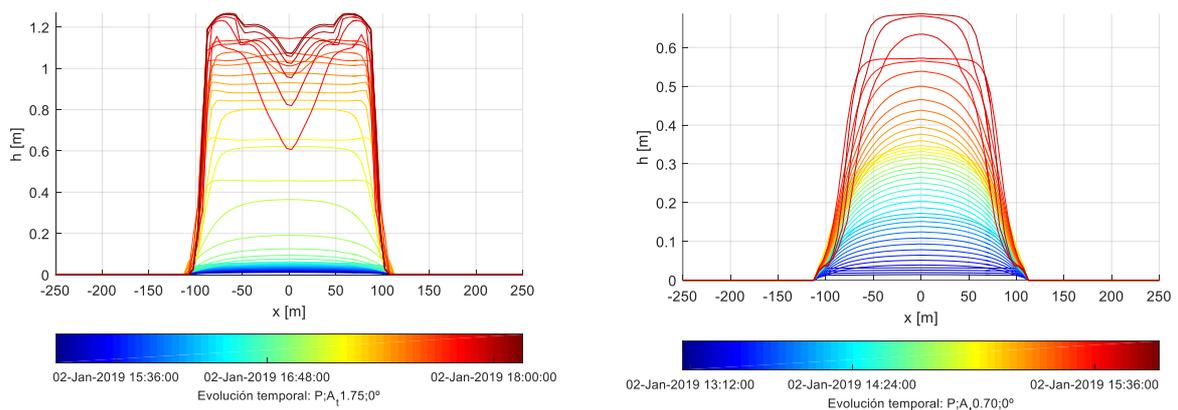
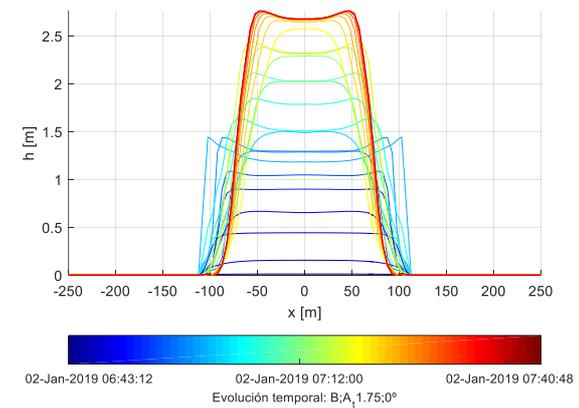
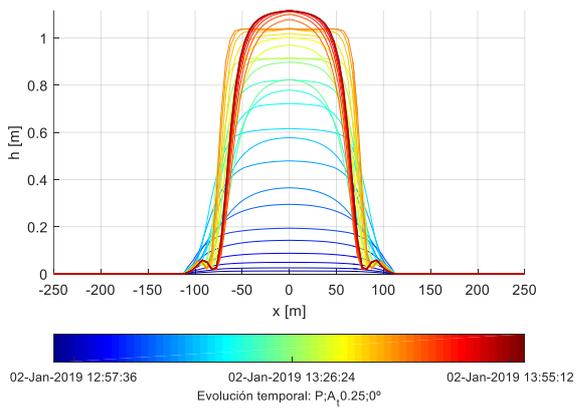
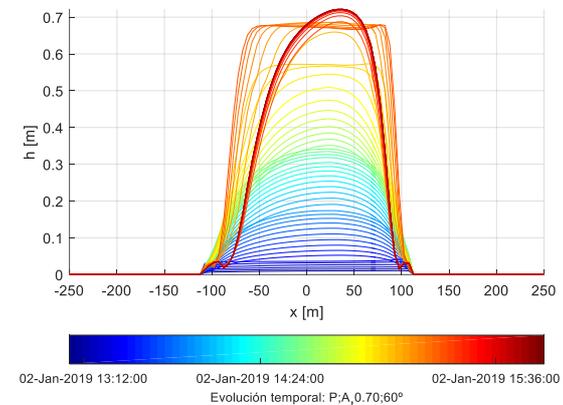
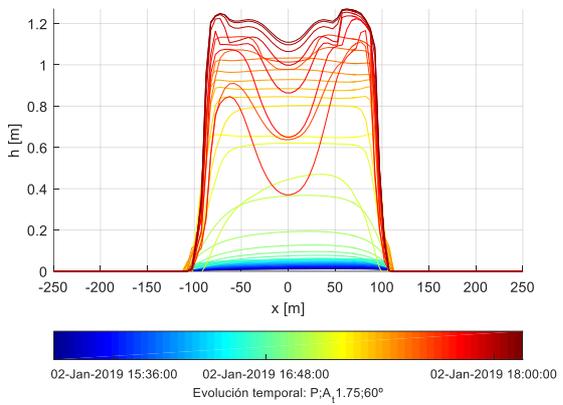
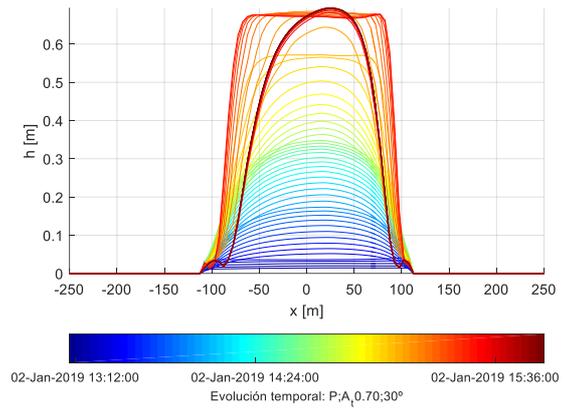
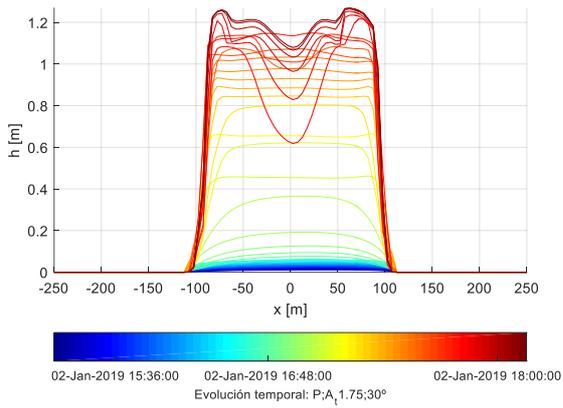


Figura 5-14. Velocidad de la simulación ($P; Q_p 500; A_t 1.75; 060$) a las tres horas del inicio de formación de la barra

En las imágenes anteriores (Figura 5-12 - Figura 5-14) se observa que, durante la avenida, el chorro de descarga fluvial nota la influencia del ángulo de incidencia del viento. A medida que aumenta el caudal de descarga, se aumenta distancia a la que el chorro comienza a desviarse.





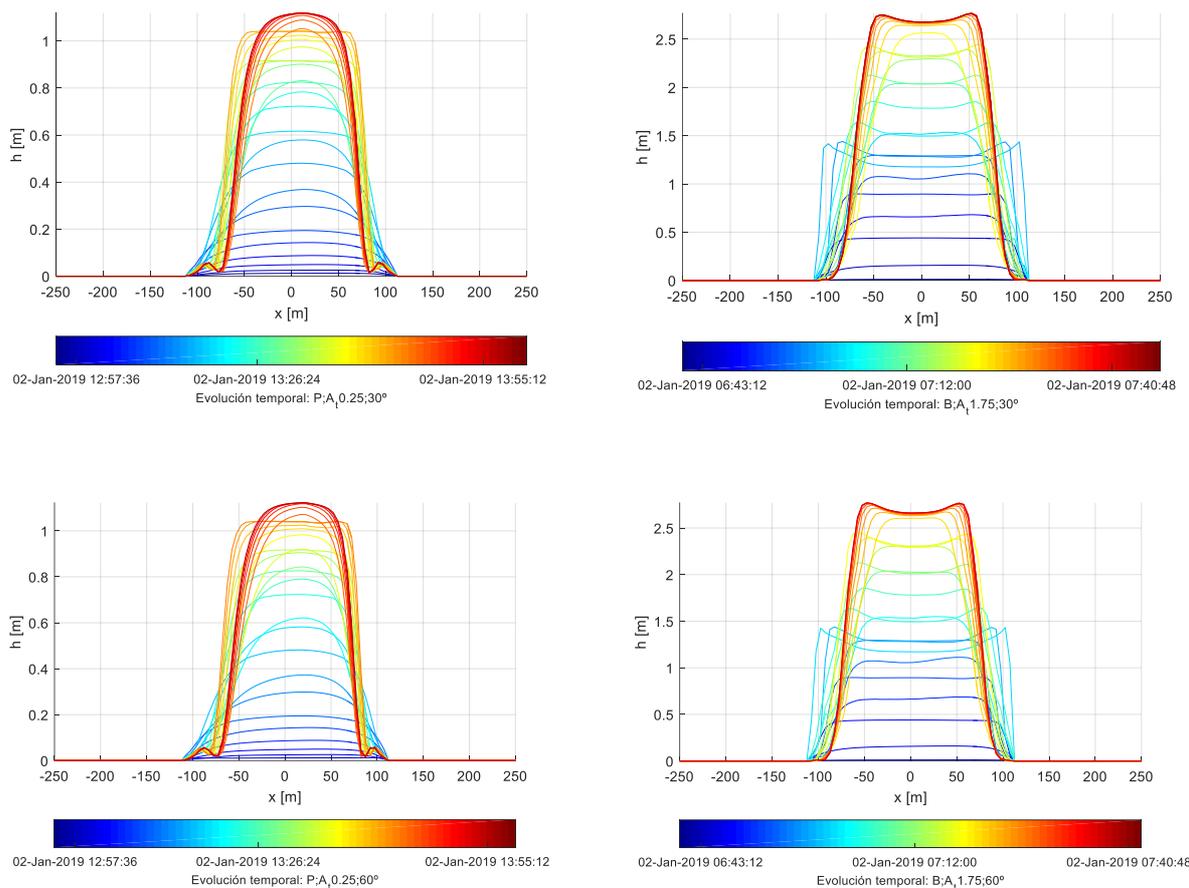


Figura 5-15. Influencia del viento en la forma transversal de la barra

En la Figura 5-15 se observa lo anteriormente expuesto. Durante los instantes iniciales de la formación de la barra se produce el depósito de material con desviación respecto al eje central del canal de descarga. Pero al ir aumentando el caudal de la avenida, la barra tiende a recuperar la forma en la que no hay desviación del viento de incidencia. En los casos de pleamar con amplitudes de marea de 0.7 y 0.25 m sí permanece desviada la barra hasta el instante final.

Se ha comprobado que, al disminuir el tamaño de sedimento, la influencia de la desviación del viento aumenta. Esto se debe a que, con menor tamaño de sedimento, el alcance longitudinal de la barra crece, recibiendo mayor influencia de la desviación de la descarga fluvial.

Como se ha mostrado en el Capítulo 2 del presente documento, la batimetría tomada para el modelo está relacionada con el tamaño de sedimento mediante el perfil de equilibrio de Dean. Modificar el valor de D_{50} supone la actualización de la batimetría del modelo a una con menor pendiente.

Esta comprobación se ha realizado para un tamaño de sedimento en el lecho de $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, sin actualizar la batimetría (manteniendo el perfil de equilibrio de Dean para $D_{50} = 500 \mu\text{m}$) y actualizando la batimetría, lo cual significa menor pendiente.

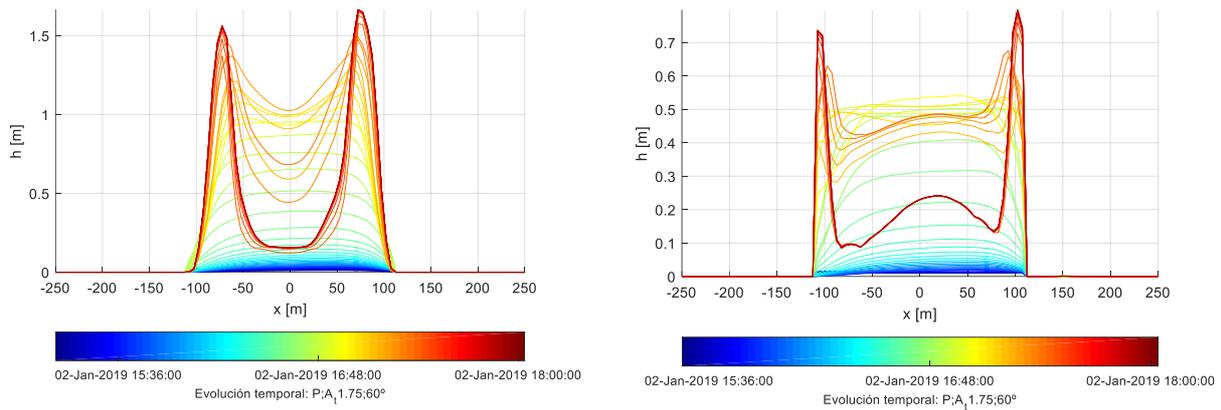


Figura 5-16. Evolución de la forma transversal de la barra en la simulación $P;Q_p500;A_t1.75;60^\circ$ para un tamaño de sedimento de $200\ \mu\text{m}$. A la izquierda sin actualizar la batimetría; a la derecha con la batimetría actualizada al tamaño de sedimento

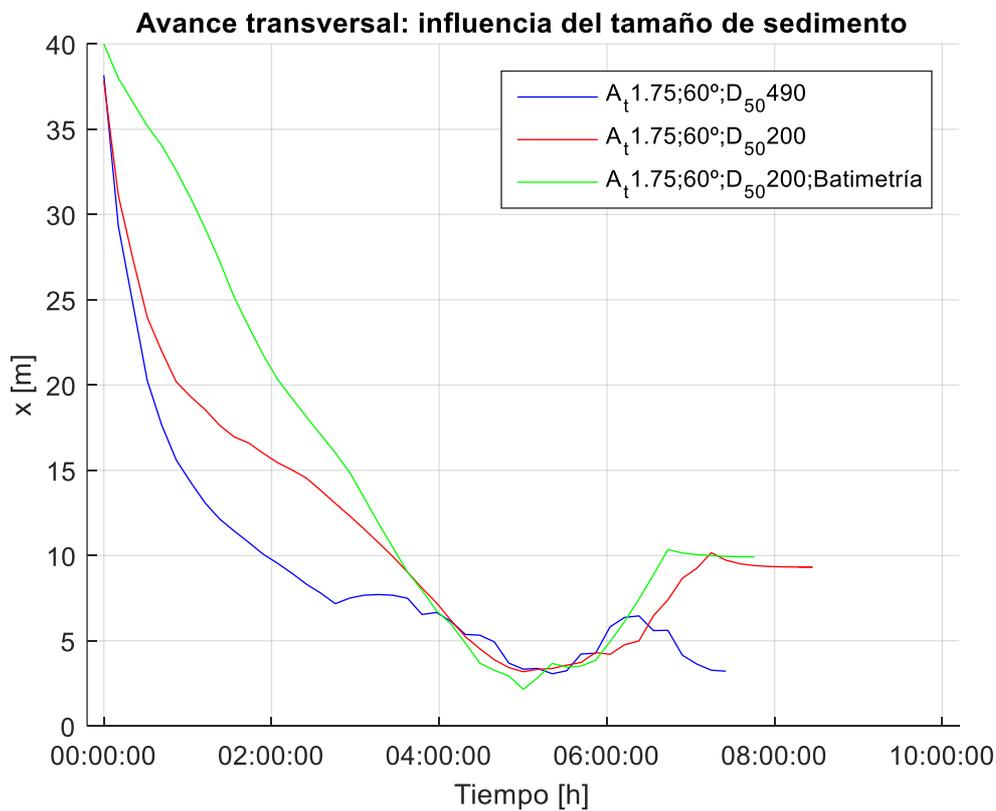


Figura 5-17. Influencia del tamaño de sedimento sobre el avance transversal de la barra para la simulación $P;Q_p500;A_t1.75;60^\circ$ variando el tamaño de sedimento y actualizando y sin actualizar la batimetría al tamaño del material

De la Figura 5-16 y Figura 5-17 puede extraerse que la influencia del viento al disminuir el tamaño de sedimento es mayor que en el caso anteriormente mostrado. En ambos casos se observa un basculamiento lateral de la barra mayor que para un sedimento de tamaño $500\ \mu\text{m}$. Al adaptar la batimetría al tamaño de sedimento adoptado, la influencia del viento también tiene mayor tendencia al avance lateral de la barra, aunque en la posición final la diferencia es de pocos metros. Por lo que, al disminuir tanto la pendiente como el tamaño de sedimento, la influencia del viento es mayor.

5.1.8 Tipo de avance: vertical o longitudinal

En la Figura 5-18 se representa el cociente RA/RP en el tiempo, siendo:

- RA: desarrollo vertical o tasa de crecimiento de la barra ($h_{bar,t}/h_{bar,max}$)
- RP: avance longitudinal ($y_{bar,t}/y_{bar,max}$)

Cuando el valor de RA/RP sea mayor que la unidad, la barra estará desarrollando un mayor avance vertical que longitudinal. Cuando sea menor, el desarrollo longitudinal será mayor.

En los casos de pleamar en los que la amplitud de marea es suficiente como para reducir la velocidad de la avenida, se experimenta un desarrollo vertical superior al longitudinal, como consecuencia de la sedimentación que se genera en las inmediaciones de la desembocadura. Una vez comienza la vaciante, el desarrollo es longitudinal.

En el resto de casos, prima el desarrollo longitudinal sobre el vertical.

Los casos que alcanzan antes el valor de RA/RP=1 son los que llegan antes a la configuración final de la barra, con tiempo de formación de la barra menores.

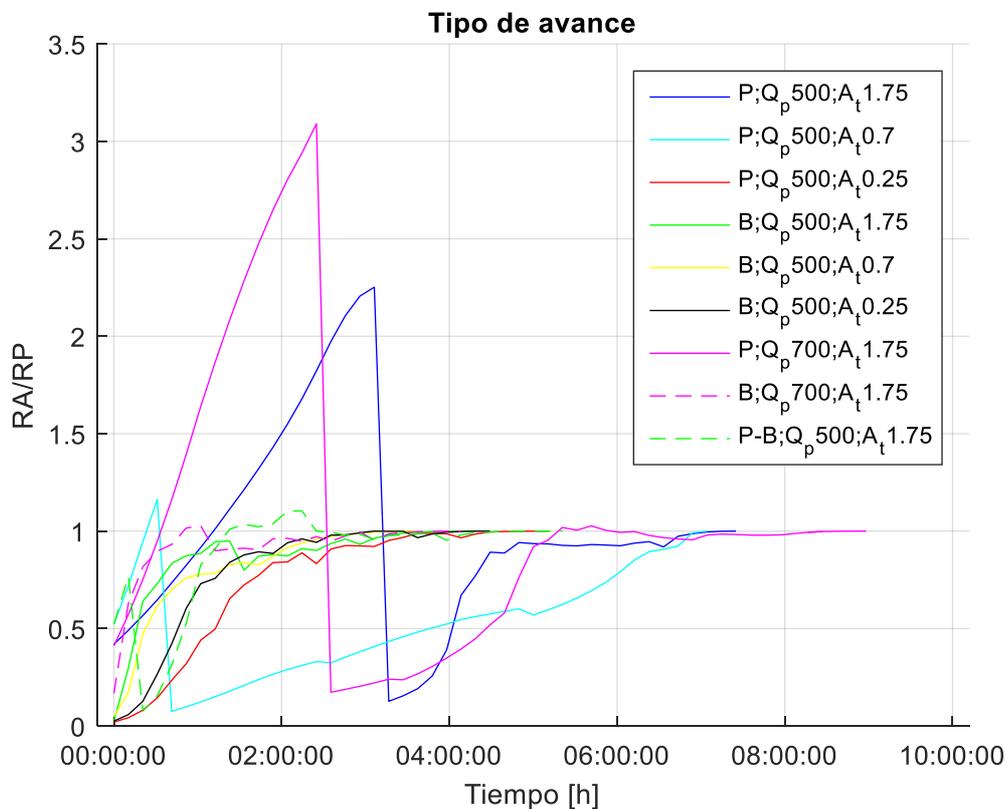


Figura 5-18. Tipo de avance de la barra

6 CONCLUSIONES

En este estudio, se ha tratado de caracterizar cómo influyen algunos agentes presentes en las desembocaduras de ríos en la formación de barras. Para ello, se ha modelado una desembocadura ideal, tomando datos reales de las características de desembocaduras en la costa andaluza. Los agentes implicados en el estudio son la marea astronómica, el ángulo de incidencia del viento y la descarga fluvial, variando tanto su magnitud (caudal) como su posición en el tiempo respecto al ciclo de marea.

Los agentes estudiados influyen de la misma forma en los distintos parámetros de formación de la barra que se han estudiado.

En las simulaciones, al no introducir material con la avenida, se está midiendo la capacidad erosiva sobre el lecho. Todo el material movilizado proviene de la erosión del lecho mientras dura la avenida.

En los resultados puede observarse una gran influencia de las velocidades en la caracterización de la formación de la barra. A mayor velocidad punta, mayor avance vertical y longitudinal de la barra. Esto pone de manifiesto que la formación y evolución de la barra está claramente influenciada por las velocidades que se generan en la desembocadura. Por lo tanto, la caracterización de la barra está sujeta a la caracterización de la hidrodinámica de la desembocadura.

Respecto a la hidrodinámica de la desembocadura, se ha determinado que la variable más influyente en las velocidades que se generan es la posición de la avenida respecto al ciclo de marea. Una avenida cuya punta de caudal ocurra cerca de la bajamar genera mayores velocidades que una avenida de mayor magnitud que ocurra próxima a la pleamar, y por tanto tiene mayor capacidad de movilizar material.

Los resultados de una avenida cuya punta se produce entre pleamar y bajamar se acercan más a la situación de bajamar que a la de pleamar.

Otra observación respecto a la morfología de las barras que se han obtenido, es que su evolución es eminentemente longitudinal, sin apenas expansión lateral. Los estudios consultados establecen que, previa a la expansión lateral, la evolución de la barra es longitudinal. Estos estudios se han realizado para avenidas cuya descarga es constante, por lo que la velocidad sobre la barra se mantiene en el tiempo, dando la posibilidad de que se genere la expansión lateral. La realidad es que las avenidas son eventos limitados en el tiempo, pero que pueden repetirse. Por tanto, de cara a futuros estudios, sería conveniente analizar qué ocurriría si con la morfología del lecho obtenida en este estudio tras la primera avenida sucede una segunda.

En cuanto a la influencia del ángulo de incidencia del viento, está también determinada por las velocidades que se generan en la desembocadura, ganando influencia en aquellos casos en los que las velocidades son menores. Además de las velocidades, en este caso también tiene repercusión el tamaño del sedimento y la pendiente marina, siendo mayor la influencia del viento a menor pendiente y menor tamaño de sedimento.

Una diferencia fundamental con otros estudios similares es el tamaño sedimento. Mientras que aquí se ha usado un D_{50} de 490 μm , en los estudios tomados como referencia se toma un valor de 200 μm , valor por defecto en *Delft3D*. Por lo que, en este caso, también queda abierto para posibles estudios una mejor caracterización del sedimento presente en la zona de estudio, y el análisis más detallado sobre la influencia del tamaño del sedimento en la morfodinámica de las desembocaduras.

REFERENCIAS

- [1] D. Edmonds y R. Slingerland, «Mechanics of river mouth bar formation: Implications for the morphodynamics of delta distributary networks,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 2007.
- [2] W. Nardin y S. Fagherazzi, «The effect of wind waves on the development of river mouth bars,» *Geophysical research letters*, vol. 39, 2012.
- [3] N. Leonardi, A. Canestrelli, T. Sun y S. Fagherazzi, «Effect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics,» *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 118, 2013.
- [4] A. Jiménez-Robles, M. Ortega-Sánchez y M. Losada, «Effects of basin bottom slope on jet hydrodynamics and river mouth bar formation,» *Journal of Geophysical: Earth Surface*, vol. 121, 2016.
- [5] G. Lesser, J. Roelvink, J. Van Kester y G. Stelling, «Development and validation of a three-dimensional morphological model,» *Coastal Engineering*, vol. 51, 2004.
- [6] A. Ruiz Reina, C. Zarzuelo, J. M. López Herrera y A. López Ruiz, «Estudio de la influencia marina en desembocaduras de ríos andaluces durante episodios para la determinación de áreas de peligrosidad,» *Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA)*, 2018.
- [7] Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), ROM 0.3-91 Oleaje. Anejo I. Clima Marítimo en el Litoral Español, 1992.
- [8] G. Gómez Pina, *Curso de Especialización Práctica en Ingeniería Marítima, Módulo C de Ingeniería de Costas*, 2019.
- [9] Ayuntamiento de Estepona, «Caracterización del sustrato marino mediante geofísica marina y muestreo con vibrosondeo en la playa de la Rada (Estepona),» 2014.
- [10] R. J. Bergillos Meca, «Trabajo Fin de Máster sobre Estudio de la evolución del delta del Guadalfeo,» 2014.
- [11] US Army Corps of Engineers, *Coastal Engineering Manual*, 2008.
- [12] Deltares, *Delft3D - Flow. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*, 2018.

ANEXO I. DATOS DE LOS CAUCES ESTUDIADOS

El estudio de la geometría de los cauces se ha realizado haciendo uso de un modelo de elevación del terreno elaborado por el Instituto Geográfico Nacional con un paso de malla de 5 m en coordenadas ETRS89.

Previo al estudio de la geometría, se han definido varios cauces de interés. Estos cauces seleccionados han sido aquellos con jerarquía 4 o 5 dentro del territorio de Andalucía, y con desembocadura en el Mar Mediterráneo o en el Océano Atlántico. Información obtenida a partir de los Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA) del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía de la Junta de Andalucía.

Se han tomado dos secciones en los cauces seleccionados, cercanas a la desembocadura.

Tabla Anexo I 1. Cauces cuya desembocadura ha sido estudiada

| NOMBRE | JERARQUÍA | DESEMBOCADURA | D.H. |
|-------------------|-----------|---------------|------------------------|
| RAMBLA DE ALBUÑOL | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RAMBLA DE MORALES | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO ADRA | 5 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO ALMANZORA | 5 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO ANDARAX | 5 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO BARBATE | 5 | Atlántico | Guadalete - Barbate |
| RÍO CARBONERAS | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO DE AGUAS | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO DE PALMONES | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO GUADALETE | 5 | Atlántico | Guadalete - Barbate |
| RÍO GUADALFEO | 5 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO GUADALHORCE | 5 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO GUADARRANQUE | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO GUADIANA | 5 | Atlántico | Tinto, Odiel y Piedras |
| RÍO GUADIARO | 5 | Mediterráneo | Mediterráneo |
| RÍO ODIEL | 5 | Atlántico | Tinto, Odiel y Piedras |
| RÍO PIEDRAS | 4 | Atlántico | Tinto, Odiel y Piedras |
| RÍO VÉLEZ | 4 | Mediterráneo | Mediterráneo |

Tabla Anexo I 2. Características geométricas de los cauces estudiados

| NOMBRE | SECCIÓN 1 | | | SECCIÓN 2 | | |
|-------------------|------------|-----------|---------------|------------|-----------|---------------|
| | ALTURA (M) | ANCHO (M) | DISTANCIA (M) | ALTURA (M) | ANCHO (M) | DISTANCIA (M) |
| RAMBLA DE ALBUÑOL | 1.1 | 55 | 175 | 2.5 | 60 | 1200 |
| RAMBLA DE MORALES | 0.85 | 130 | 200 | 1.5 | 40 | 600 |
| RÍO ADRA | 5 | 60 | 300 | 1.7 | 50 | 1300 |
| RÍO ALMANZORA | 2 | 150 | 200 | 6 | 140 | 1500 |
| RÍO ANDARAX | 4 | 160 | 350 | 4 | 150 | 1700 |
| RÍO BARBATE | - | - | - | - | - | - |

| NOMBRE | SECCIÓN 1 | | | SECCIÓN 2 | | |
|---------------------|---------------|--------------|------------------|---------------|--------------|------------------|
| | ALTURA (M) | ANCHO (M) | DISTANCIA (M) | ALTURA (M) | ANCHO (M) | DISTANCIA (M) |
| RÍO CARBONERAS | 1.8 | 110 | 300 | 3.9 | 130 | 1600 |
| RÍO DE AGUAS | 6.5 | 145 | 210 | 2.7 | 65 | 1400 |
| RÍO DE PALMONES | - | - | - | - | - | - |
| RÍO GUADALETE | - | - | - | - | - | - |
| RÍO GUADALFEO | 1.9 | 60 | 400 | 4 | 60 | 1400 |
| RÍO GUADALHORCE | 2.5 | 70 | - | - | - | - |
| RÍO GUADALQUIVIR | - | - | - | - | - | - |
| RÍO GUADARRANQUE | 1.5 | 95 | 270 | 1.5 | 95 | 1700 |
| RÍO GUADIANA | 1 | 760 | 2700 | | | |
| RÍO GUADIARO | 1.2 | 215 | 200 | 1.2 | 80 | 700 |
| RÍO ODIEL | - | - | - | - | - | - |
| RÍO PIEDRAS | - | - | - | - | - | - |
| RÍO VÉLEZ | 1.3 | 60 | 400 | 3.5 | 60 | 1500 |

Algunos de los cauces aparecen sin datos porque se han desechado durante el estudio debido a la escasa similitud con el estudio teórico que este documento contiene.

Además de la geometría del cauce, se ha estudiado la batimetría de la zona marina contigua a las desembocaduras de los cauces mostrados. En este caso, se ha empleado datos batimétricos procedentes del Instituto Geográfico de la Armada en coordenadas ETRS89. Se ha trazado un perfil normal a cada una de las desembocaduras y se ha extraído sus coordenadas, para compararlas con la batimetría propuesta para el estudio.

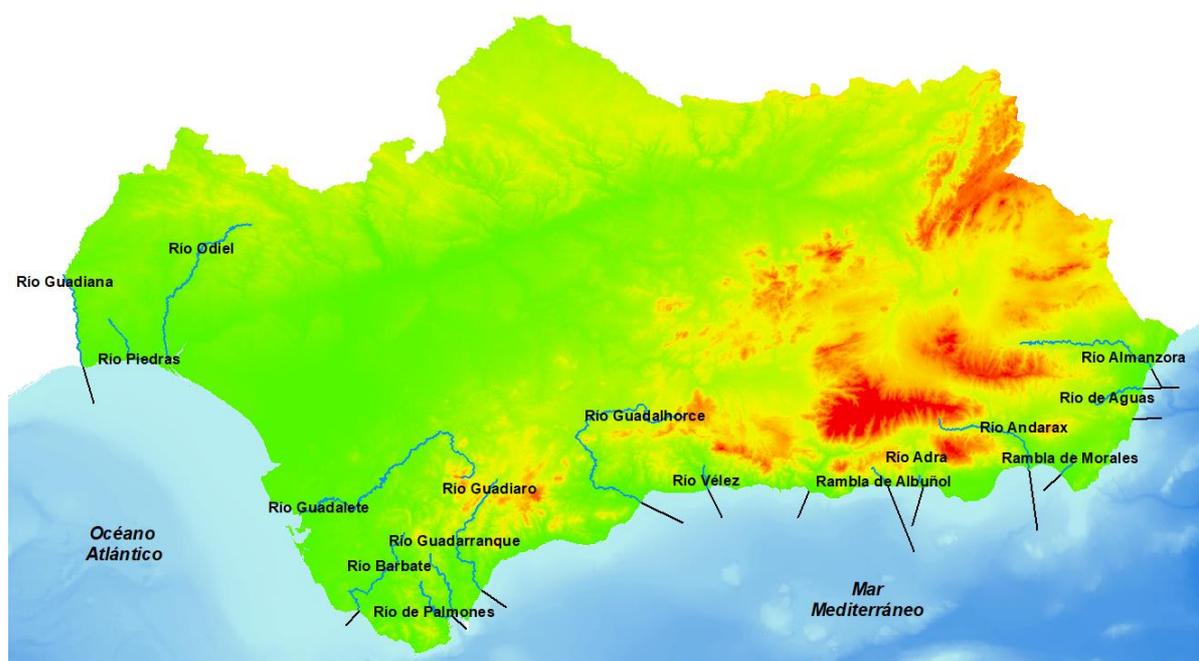


Figura Anexo I 1. Localización de los perfiles batimétricos

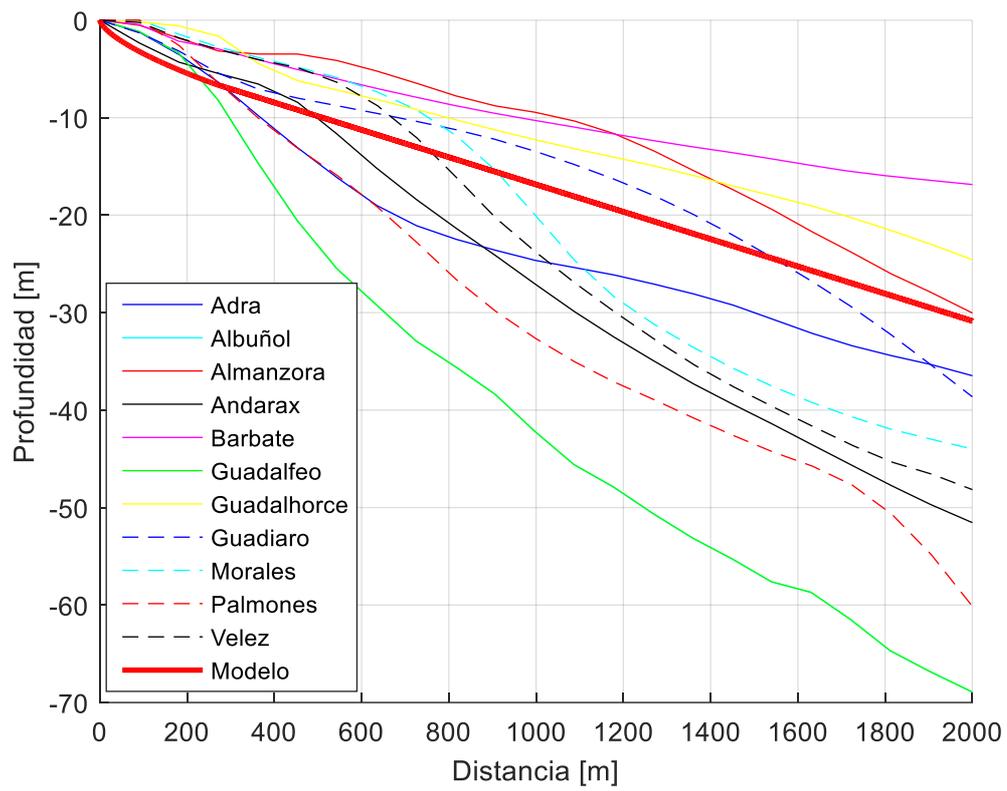


Figura Anexo I 2. Comparación de las distintas batimetrías

ANEXO II. DATOS PARA ESTIMAR LA PROFUNDIDAD DE CIERRE

Para el cálculo de la profundidad de cierre (h^*) según la formulación (2-1) mostrada, es necesaria la obtención de la altura de ola significativa excedida 12 horas al año ($H_{s,12}$).

Para el cálculo de $H_{s,12}$ se han empleado los datos de oleaje de los puntos SIMAR y boyas próximas a la línea de costa estudiada, obteniendo dichos datos de Puertos del Estado.

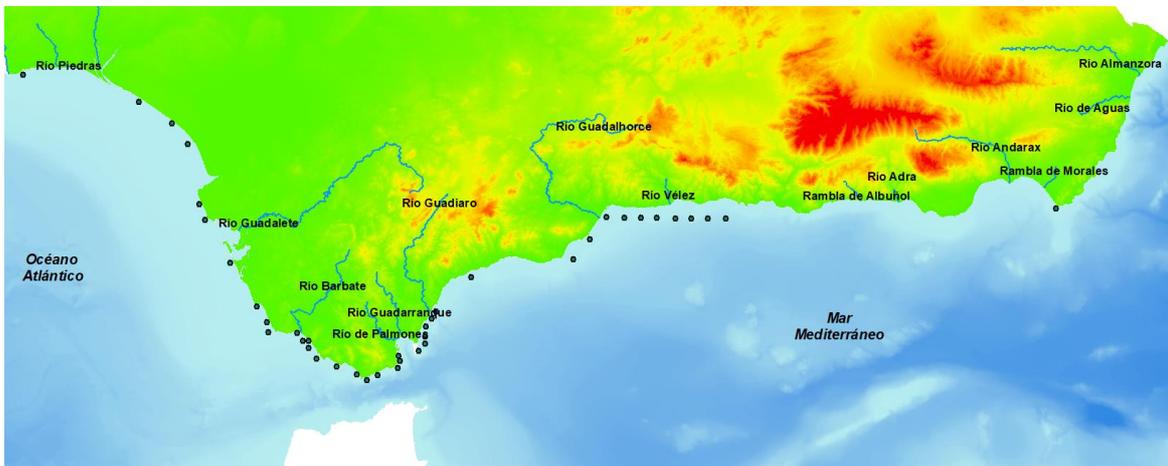


Figura Anexo II 1. Localización de los puntos SIMAR y boyas empleados.

Puertos del Estado ofrece datos históricos de oleaje, siendo útil en este caso el ajuste del régimen medio que ofrece.

La distribución elegida para describir el régimen medio de las series de oleaje es una distribución tipo Weibull cuya expresión es la siguiente:

$$F_e(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-B}{A}\right)^C\right) \quad (\text{A2-1})$$

Donde:

- A,B y C son parámetros de ajuste, ofrecido por las boyas y puntos SIMAR.
- x: altura de ola.
- $F_e(x)$: probabilidad de que una altura de ola de valor x no sea excedida.

En este caso, se conoce la probabilidad de no excedencia, ya que es aquella que se supera solamente 12 horas al año, por lo tanto, tendrá el siguiente valor:

$$F_e = Q = \text{Prob. no excedencia} = 1 - \frac{12 \frac{h}{\text{año}}}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}} 24 \frac{h}{\text{día}}} = 0.9986$$

Se obtiene lo siguiente para cada punto:

Tabla Anexo II 1. Cálculo de la profundidad de cierre

| TIPO | REFERENCIA | A | B | C | HS,12 (M) | H* | REGISTRO | RÍO PRÓXIMO |
|-------|--------------|------|-------|------|-----------|------|-----------|------------------|
| SIMAR | 5026023 | 0.57 | -0.26 | 1.31 | 2.15 | 3.37 | 1958-2017 | Guadiana |
| SIMAR | 5033022 | 0.55 | -0.18 | 1.17 | 2.58 | 4.05 | 1958-2017 | Odiel |
| SIMAR | 5035021 | 0.48 | -0.09 | 1.09 | 2.62 | 4.11 | 1958-2017 | Odiel |
| SIMAR | 5036020 | 0.42 | -0.01 | 1.01 | 2.71 | 4.25 | 1958-2017 | Guadalquivir |
| SIMAR | 6004056 | 0.61 | -0.01 | 0.98 | 4.17 | 6.55 | 2005-2017 | Guadalete |
| SIMAR | 6006052 | 0.63 | 0.07 | 1.05 | 3.87 | 6.07 | 2005-2017 | Guadalete |
| SIMAR | 6014042 | 0.67 | 0.01 | 1.03 | 4.19 | 6.58 | 2005-2017 | Guadalete |
| SIMAR | 6022032 | 0.59 | 0.01 | 0.99 | 3.97 | 6.24 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6026028 | 0.61 | 0.01 | 0.9 | 4.97 | 7.80 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6026026 | 0.72 | 0.17 | 1.04 | 4.58 | 7.20 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6034026 | 0.4 | 0.06 | 1 | 2.70 | 4.23 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6038024 | 0.56 | 0.03 | 1.07 | 3.29 | 5.17 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6036024 | 0.58 | 0.09 | 1.07 | 3.47 | 5.45 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6038022 | 0.7 | 0.04 | 1.14 | 3.70 | 5.81 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6040020 | 0.62 | 0.14 | 1.04 | 3.94 | 6.19 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6046018 | 0.68 | 0.05 | 1.14 | 3.61 | 5.66 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6052016 | 0.65 | 0.03 | 1.11 | 3.58 | 5.63 | 2005-2017 | Barbate |
| SIMAR | 6055015 | 0.8 | 0.04 | 1.22 | 3.79 | 5.96 | 2005-2017 | Palmones |
| SIMAR | 6058016 | 0.59 | -0.01 | 1.01 | 3.81 | 5.98 | 2005-2017 | Palmones |
| SIMAR | 6064018 | 0.66 | -0.1 | 1.03 | 4.02 | 6.31 | 2005-2017 | Palmones |
| SIMAR | 6065020 | 0.7 | -0.25 | 1.05 | 3.97 | 6.23 | 2005-2017 | Palmones |
| SIMAR | 6064021 | 0.55 | -0.23 | 1.01 | 3.33 | 5.23 | 2005-2017 | Palmones |
| SIMAR | 6070022 | 0.56 | -0.06 | 0.92 | 4.29 | 6.74 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 6072024 | 0.58 | -0.1 | 0.93 | 4.31 | 6.76 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 6072026 | 0.68 | -0.24 | 1.02 | 4.08 | 6.41 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 6072028 | 0.66 | -0.22 | 1.03 | 3.90 | 6.12 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 6074030 | 0.8 | -0.3 | 1.13 | 3.95 | 6.19 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 6074030 | 0.8 | -0.36 | 1.15 | 3.76 | 5.91 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 6074032 | 0.8 | -0.36 | 1.15 | 3.76 | 5.91 | 2005-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 2023077 | 0.87 | -0.36 | 1.3 | 3.35 | 5.26 | 1958-2017 | Guadiaro |
| SIMAR | 2029078 | 0.79 | -0.28 | 1.2 | 3.52 | 5.53 | 1958-2017 | Guadalhorce |
| SIMAR | 2030079 | 0.7 | -0.23 | 1.17 | 3.28 | 5.15 | 1958-2017 | Guadalhorce |
| SIMAR | 2031080 | 0.62 | -0.17 | 1.15 | 3.03 | 4.75 | 1958-2017 | Guadalhorce |
| SIMAR | 2032080 | 0.6 | -0.13 | 1.14 | 3.01 | 4.72 | 1958-2017 | Vélez |
| SIMAR | 2033080 | 0.53 | -0.05 | 1.07 | 3.04 | 4.77 | 1958-2017 | Vélez |
| SIMAR | 2034080 | 0.55 | -0.05 | 1.09 | 3.05 | 4.79 | 1958-2017 | Vélez |
| SIMAR | 2035080 | 0.52 | -0.01 | 1.07 | 3.02 | 4.74 | 1958-2017 | Vélez |
| SIMAR | 2036080 | 0.44 | 0.08 | 1 | 2.98 | 4.68 | 1958-2017 | Vélez |
| SIMAR | 2037080 | 0.51 | 0.02 | 1.08 | 2.94 | 4.62 | 1958-2017 | Guadalfeo |
| SIMAR | 2038080 | 0.51 | 0.02 | 1.09 | 2.90 | 4.55 | 1958-2017 | Guadalfeo |
| BOYA | CABO DE GATA | 0.81 | -0.07 | 1.33 | 3.27 | 5.14 | 1991-2012 | Morales, Andarax |

ANEXO III. DATOS PARA CARACTERIZAR LA MAREA ASTRONÓMICA

Los datos de marea astronómica se han obtenido del registro de Puertos del Estado.

Para caracterizar bien la marea astronómica se necesitan al menos 19 años de registro. Puesto que se trata de obtener una marea característica de la costa andaluza, y no un valor exacto de una ubicación concreta, se han empleado únicamente los datos del último año de registro (2017).

En la Tabla Anexo III 1 se muestran los datos empleados para la caracterización de la marea astronómica.

Tabla Anexo III 1. Datos de amplitud y fase de varios armónicos en distintos mareógrafos de la costa andaluza

| Mareógrafo | Ubicación | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (°) | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (°) |
|------------|-----------|----------|---------------|----------|----------|---------------|----------|
| Huelva 5 | Atlántico | Z0 | 202.8 | 0 | NU2 | 4.19 | 44.05 |
| | | SSA | 5.71 | 73.17 | M2 | 104.05 | 56.96 |
| | | MM | 2.38 | 282.32 | L2 | 2.66 | 65.61 |
| | | Q1 | 1.92 | 266.07 | S2 | 37.45 | 83.73 |
| | | O1 | 5.87 | 311.03 | K2 | 10.44 | 81.27 |
| | | P1 | 2.05 | 38.96 | MN4 | 1.19 | 125.99 |
| | | K1 | 6.56 | 46.4 | M4 | 2.93 | 168.35 |
| | | 2N2 | 3.19 | 28.01 | MS4 | 1.55 | 240.95 |
| | | MU2 | 4.02 | 22.28 | | | |
| | | N2 | 22.26 | 41.11 | | | |
| Bonanza 2 | Atlántico | Z0 | 175.14 | 0 | M2 | 89.07 | 63.5 |
| | | SA | 6.91 | 242.87 | LDA2 | 1.19 | 53.36 |
| | | SSA | 4.81 | 96.85 | L2 | 3.15 | 68.93 |
| | | MSM | 1.25 | 120.91 | T2 | 1.58 | 93.91 |
| | | MM | 1.78 | 25.34 | S2 | 30.74 | 90.23 |
| | | MSF | 4.1 | 40.48 | K2 | 8.66 | 87.05 |
| | | Q1 | 1.82 | 279.17 | MN4 | 2.39 | 72.98 |
| | | O1 | 6.16 | 323.64 | M4 | 4.76 | 88.21 |
| | | P1 | 2.23 | 50.56 | MS4 | 2.48 | 103.55 |
| | | K1 | 6.35 | 60.65 | 2MN6 | 1.01 | 281.69 |
| | | 2N2 | 2.41 | 32.56 | M6 | 1.79 | 285.87 |
| | | MU2 | 2.02 | 31.7 | 2MS6 | 1.78 | 304.17 |
| | | N2 | 18.35 | 48.02 | | | |
| | | NU2 | 3.45 | 51.13 | | | |
| | | Tarifa | Mediterráneo | Z0 | 68.65 | 0 | NU2 |
| SA | 7.11 | | | 254.87 | M2 | 41.61 | 41.8 |
| SSA | 4.07 | | | 104.31 | S2 | 15.83 | 69.79 |

| | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | | MSM | 1.56 | 173.98 | K2 | 4.44 | 66.35 |
| | | MF | 1.45 | 227.02 | MN4 | 1.84 | 93.74 |
| | | K1 | 2.39 | 128.03 | M4 | 3.66 | 115.85 |
| | | 2N2 | 1.22 | 22.57 | MS4 | 1.62 | 164.83 |
| | | MU2 | 1.93 | 14.49 | | | |
| | | N2 | 9.11 | 26.6 | | | |
| Algeciras | Mediterráneo | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) |
| | | Z0 | 68.74 | 0 | NU2 | 1.18 | 40.98 |
| | | SA | 7.26 | 256.17 | M2 | 32.39 | 47.92 |
| | | SSA | 3.64 | 100.5 | H2 | 1.46 | 267.15 |
| | | MSM | 1.51 | 218.19 | L2 | 1.1 | 8.84 |
| | | MM | 1.07 | 90.09 | S2 | 11.8 | 75.92 |
| | | MF | 2.14 | 237.08 | K2 | 3.66 | 72.43 |
| | | K1 | 2.3 | 128.12 | M4 | 1.88 | 164.77 |
| | | MU2 | 1.16 | 31.75 | MS4 | 1.28 | 229.97 |
| | | N2 | 6.62 | 36.31 | | | |
| Málaga 3 | Mediterráneo | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) |
| | | Z0 | 62.1 | 0 | N2 | 3.85 | 33.86 |
| | | SA | 8.56 | 241.1 | M2 | 18.81 | 49.02 |
| | | SSA | 5.31 | 102.52 | S2 | 7.22 | 74.58 |
| | | MM | 1.66 | 123.14 | K2 | 1.97 | 71.24 |
| | | MF | 2.18 | 239.18 | M4 | 1.84 | 162.22 |
| | | O1 | 1.69 | 123.08 | MS4 | 1.23 | 228.09 |
| | | P1 | 1.12 | 149.13 | | | |
| | | K1 | 3.04 | 152.17 | | | |
| Motril 2 | Mediterráneo | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) |
| | | Z0 | 58.8 | 0 | N2 | 3.12 | 32.51 |
| | | SA | 8.07 | 245.66 | M2 | 15.73 | 47.4 |
| | | SSA | 5.04 | 94.12 | S2 | 6.19 | 73.57 |
| | | MM | 1.5 | 107.48 | K2 | 1.41 | 68.33 |
| | | MF | 1.86 | 245.88 | M4 | 1.65 | 161.45 |
| | | O1 | 1.78 | 118.2 | MS4 | 1.12 | 227.16 |
| | | P1 | 1.29 | 150.13 | | | |
| | | K1 | 3.1 | 156.81 | | | |
| Almería | Mediterráneo | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) |
| | | Z0 | 38.29 | 0 | K1 | 3.5 | 156.32 |
| | | SA | 7.34 | 248.9 | N2 | 1.9 | 35.04 |
| | | SSA | 4.47 | 79.84 | M2 | 9.63 | 50.44 |
| | | MM | 1.4 | 86.55 | S2 | 3.83 | 75.22 |
| | | MSF | 1.26 | 146.65 | K2 | 1.19 | 74.37 |
| | | MF | 2 | 249.59 | M4 | 1.19 | 161.26 |
| | | o1 | 2.04 | 115.19 | | | |
| | | P1 | 1.2 | 152.87 | | | |
| Carboneras | Mediterráneo | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) | Armónico | Amplitud (cm) | Fase (º) |
| | | Z0 | 14.3 | 0 | P1 | 1.32 | 155.09 |
| | | SA | 6.37 | 254.44 | K1 | 3.63 | 158.18 |
| | | SSA | 5.06 | 76.97 | N2 | 1.12 | 42.49 |

| | | | | | |
|-----|------|--------|----|------|-------|
| MM | 1.35 | 76.92 | M2 | 5.82 | 55.69 |
| MSF | 1.15 | 140.91 | S2 | 2.41 | 79.97 |
| MF | 1.66 | 248.98 | | | |
| O1 | 2.24 | 108.94 | | | |

De todos los armónicos mostrados para cada mareógrafo se han seleccionado las siguientes 7 componentes:

- M2: periodo de 12.42 h.
- S2: periodo de 12 h.
- N2: periodo de 12.66 h.
- K2: periodo de 11.97 h.
- K1: periodo de 23.93 h.
- O1: periodo de 25.82 h.
- P1: periodo de 24.07 h.

La marea astronómica desde la costa de Huelva hasta Almería es muy variable, por lo que se ha decidido agrupar en tres grupos. En las simulaciones se han empleado las tres condiciones de marea, cada una de ellas con una amplitud. En la Tabla Anexo III 2 aparece caracterizada la marea astronómica considerada.

Tabla Anexo III 2. Amplitud y fase de los armónicos de los tres grupos de marea astronómica empleados en las simulaciones

| | | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 |
|-----------|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| M2 | Amplitud (cm) | 104.05 | 41.61 | 9.63 |
| | Fase (º) | 56.96 | 41.8 | 50.44 |
| S2 | Amplitud (cm) | 37.45 | 15.83 | 3.83 |
| | Fase (º) | 83.73 | 69.79 | 75.22 |
| N2 | Amplitud (cm) | 22.26 | 9.11 | 1.9 |
| | Fase (º) | 41.11 | 26.6 | 35.04 |
| K2 | Amplitud (cm) | 10.44 | 4.44 | 1.19 |
| | Fase (º) | 81.27 | 66.35 | 74.37 |
| K1 | Amplitud (cm) | 6.56 | 2.39 | 3.5 |
| | Fase (º) | 46.4 | 128.03 | 156.32 |
| O1 | Amplitud (cm) | 5.87 | 1.69 | 2.04 |
| | Fase (º) | 311.04 | 123.08 | 115.19 |
| P1 | Amplitud (cm) | 2.05 | 1.12 | 1.2 |
| | Fase (º) | 38.96 | 149.13 | 152.87 |

La señal de la marea se puede representar como un armónico a partir de la siguiente expresión:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{A3-1})$$

Donde:

- a_0 : nivel medio.
- a_i : amplitud de cada componente de marea i .

- ω_i : frecuencia de cada componente de marea i .
- φ_i : fase de cada componente de marea i .

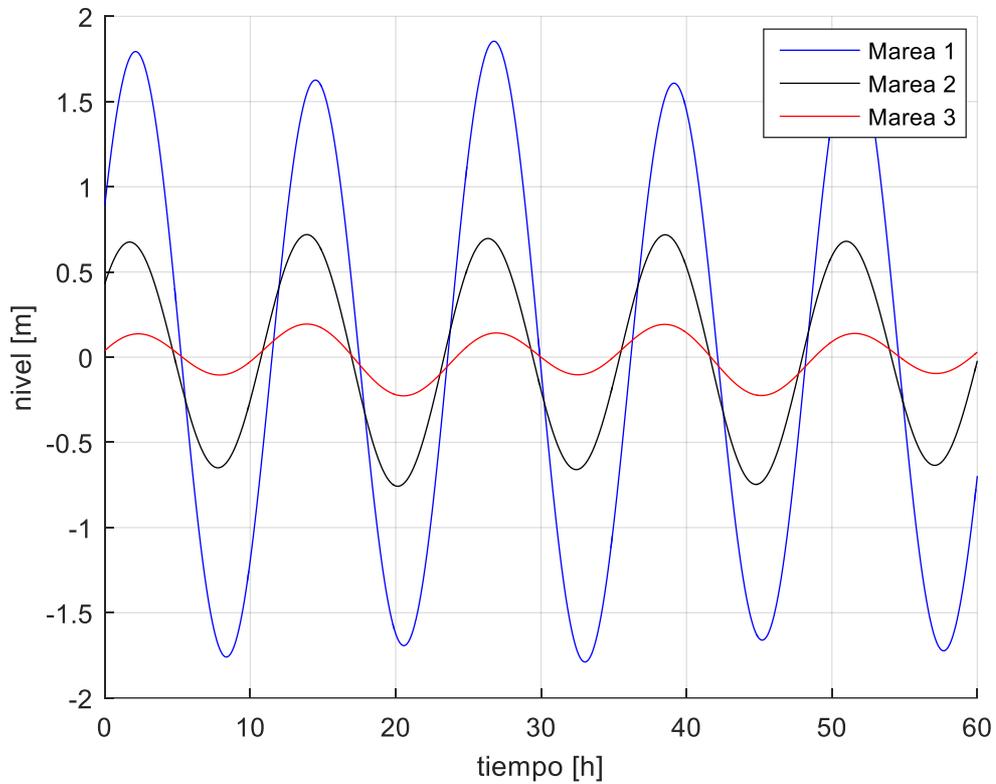


Figura Anexo III 1. Tipos de marea astronómica

Cada una de las condiciones de marea astronómica está caracterizada por una amplitud de marea:

- Marea 1: $A_r=1.75$ m.
- Marea 2: $A_r=0.70$ m.
- Marea 3: $A_r=0.25$ m.

ANEXO IV. DATOS PARA CARACTERIZAR LA MAREA METEOROLÓGICA

La caracterización de la marea meteorológica se ha realizado a partir de datos históricos de Puertos del Estado tomados en estaciones meteorológicas.

Esta fuente ofrece los siguientes datos:

- Medida mensual máxima de los años de registro.
- Media mensual mínima de los años de registro.
- Máximo valor registrado de los años de registro.
- Mínimo valor registrado de los años de registro.

En la Tabla Anexo IV 1, se incluyen estos datos. Además, se ha calculado, a partir de ellos, la variación de presión máxima y media.

Tabla Anexo IV 1. Datos para la caracterización de la marea meteorológica

| Estación | Ubicación | Años registro | Media mensual máx (mb) | Media mensual mín (mb) | Máx registrada (mb) | Mín registrada (mb) | ΔP med (mb) | ΔP max (mb) |
|--------------------------------|--------------|---------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Boya del Golfo de Cádiz | Atlántico | 1996 - 2019 | 1027.76 | 1006.37 | 1038.20 | 982.00 | 21.39 | 56.20 |
| Sevilla - Chipiona | Atlántico | 1997 - 2006 | 1028.63 | 1011.79 | 1042.00 | 987.00 | 16.84 | 55.00 |
| Bahía de Cádiz | Atlántico | 1998 - 2005 | 1028.63 | 1010.15 | 1039.00 | 989.00 | 18.48 | 50.00 |
| Tarifa | Mediterráneo | 2012 - 2019 | 1027.90 | 1007.24 | 1039.70 | 983.60 | 20.66 | 56.10 |
| Algeciras (EM) | Mediterráneo | 1996 - 2006 | 1033.12 | 1008.64 | 1040.00 | 991.00 | 24.48 | 49.00 |
| Algeciras (Mareógrafo) | Mediterráneo | 2012 - 2019 | 1029.31 | 1007.62 | 1041.80 | 984.40 | 21.69 | 57.40 |
| Alborán | Mediterráneo | 1997 - 2006 | 1028.49 | 1005.67 | 1038.00 | 989.00 | 22.82 | 49.00 |
| Málaga | Mediterráneo | 2015 - 2019 | 1029.20 | 1012.06 | 1038.30 | 991.80 | 17.14 | 46.50 |
| Boya de Cabo de Gata | Mediterráneo | 1998 - 2019 | 1029.29 | 1005.50 | 1043.60 | 987.40 | 23.79 | 56.20 |
| Almería (Mareógrafo) | Mediterráneo | 2013 - 2019 | 1028.92 | 1010.04 | 1043.00 | 986.20 | 18.88 | 56.80 |
| Almería (EM) | Mediterráneo | 1997 - 2006 | 1026.84 | 1008.13 | 1039.00 | 991.00 | 18.71 | 48.00 |
| Carboneras | Mediterráneo | 2013 - 2019 | 1029.05 | 1009.75 | 1043.30 | 986.40 | 19.30 | 56.90 |

ANEXO V. DATOS PARA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO

La caracterización del viento en la zona de estudio se ha realizado a partir del régimen medio de los datos históricos de Puertos del Estado, medido en estaciones meteorológicas.

La acción del viento se caracteriza por una magnitud y una dirección. En este caso, los datos se van a emplear para caracterizar la magnitud, puesto que la dirección depende de la ubicación, y en este caso, al tratarse de un modelo teórico e ideal se han empleado distintas posibles direcciones para comprobar su efecto.

El valor de la magnitud del viento se va a obtener del régimen medio de los datos registrados. El régimen medio del viento se caracteriza con la misma distribución que los datos de oleaje, mostrado en el Anexo II.

En este caso, la probabilidad de no excedencia se calcula a partir del periodo de retorno (T_r):

$$F_e = Q = \text{Prob. no excedencia} = 1 - \frac{1}{T_r} \quad (\text{A5-1})$$

En la Tabla Anexo V 1 se incluyen los parámetros para el ajuste del régimen medio (A,B y C) de cada estación utilizada y el valor de la magnitud del viento para un periodo de retorno a corto plazo de 20 y 30 años.

Tabla Anexo V 1. Estimación de la magnitud del viento para un determinado periodo de retorno

| Estación | A | B | C | Tr=20 años | | Tr=30 años | |
|---------------------------|------|-------|------|------------|---------|------------|---------|
| | | | | Q | v (m/s) | Q | v (m/s) |
| Sevilla - Chipiona | 5.07 | -0.13 | 1.92 | 0.9500 | 8.85 | 0.9667 | 9.46 |
| Bahía de Cádiz | 5.22 | -0.03 | 1.9 | 0.9500 | 9.27 | 0.9667 | 9.91 |
| Bahía de Algeciras | 5.2 | -0.63 | 1.79 | 0.9500 | 8.97 | 0.9667 | 9.67 |
| Alborán | 8.08 | -2.72 | 2.57 | 0.9500 | 9.66 | 0.9667 | 10.29 |
| Almería | 4.67 | -1.02 | 1.45 | 0.9500 | 8.93 | 0.9667 | 9.84 |
| Cabo de Gata | 9.2 | -3.56 | 2.47 | 0.9500 | 10.79 | 0.9667 | 11.54 |

Para un periodo de retorno entre 20 y 30 años, el viento toma un valor próximo a 10 m/s en todas las estaciones estudiadas, por lo que será el valor a utilizar para la caracterización del viento en las simulaciones.

ANEXO VI. ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE LA AVENIDA

El hidrograma de la avenida se ha caracterizado a partir de dos datos de entrada, usados para la generación de un hidrograma usando el método del SCS. Los datos son los siguientes:

- Caudal punta (Q_p): en la zona de estudio, para un periodo de retorno de 25 años, el caudal punta de las avenidas oscila entre 100 y 1000 m^3/s [6].
- Tiempo base (t_b): se ha estimado un tiempo base de la avenida de 12 h.

Estos datos dan el siguiente hidrograma triangular:

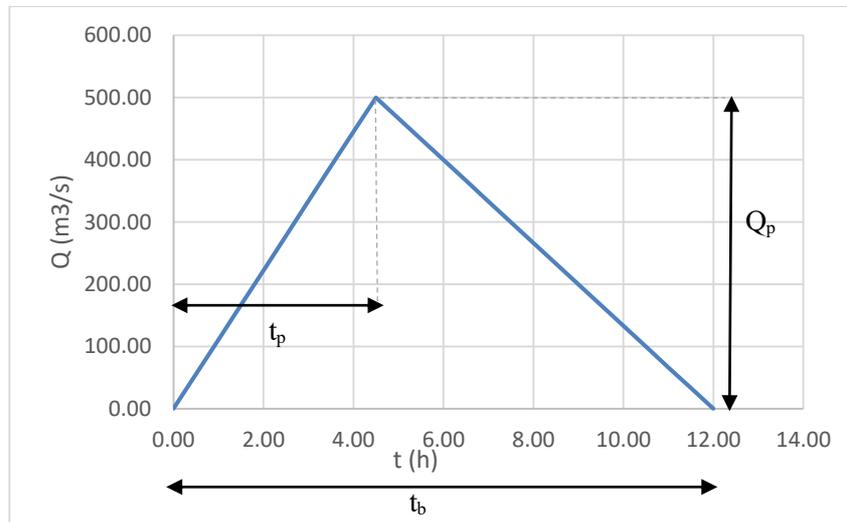


Figura Anexo VI 1. Hidrograma de entrada triangular

También se necesita conocer el tiempo a la punta (t_p). Entre el tiempo a la punta y el tiempo base se tiene la siguiente relación:

$$t_b = 2.67t_p \quad (A6-1)$$

Por lo que, $t_p=4.5$ h.

Con estos datos, según el método del SCS, se puede obtener el hidrograma a partir de la siguiente tabulación:

Tabla Anexo VI 1. Tabla para la obtención del hidrograma según el método del SCS

| t/t_p | Q/Q_p | t/t_p | Q/Q_p |
|---------|---------|---------|---------|
| 0.00 | 0.00 | 2.00 | 0.28 |
| 0.20 | 0.10 | 2.20 | 0.21 |
| 0.40 | 0.31 | 2.40 | 0.15 |
| 0.60 | 0.66 | 2.60 | 0.11 |
| 0.80 | 0.93 | 2.80 | 0.08 |
| 1.00 | 1.00 | 3.00 | 0.05 |
| 1.20 | 0.93 | 3.50 | 0.02 |

| t/t_p | Q/Q_p | t/t_p | Q/Q_p |
|---------|---------|---------|---------|
| 1.40 | 0.78 | 4.00 | 0.01 |
| 1.60 | 0.56 | 4.50 | 0.01 |
| 1.80 | 0.39 | 5.00 | 0.00 |

Se obtiene el siguiente hidrograma:

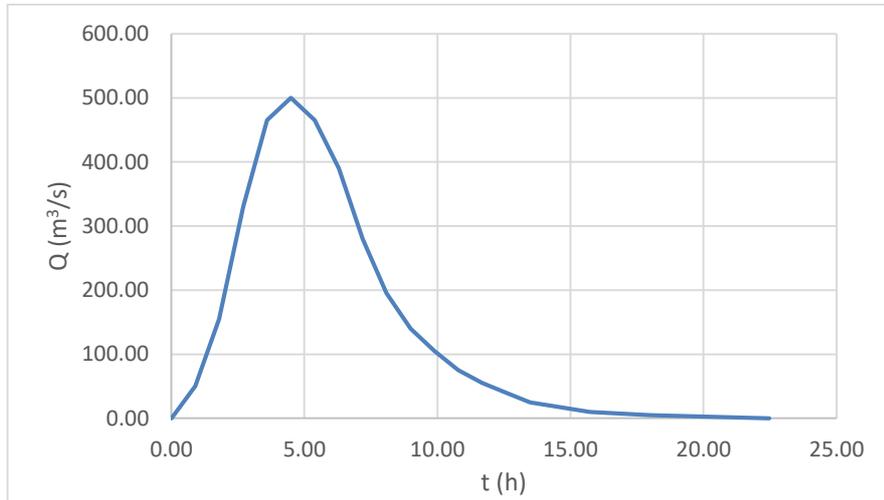


Figura Anexo VI 2. Hidrograma obtenido mediante el método SCS

Tabla Anexo VI 2. Valores del hidrograma

| t (h) | Q (m^3/s) | t (h) | Q (m^3/s) |
|---------|-----------------|---------|-----------------|
| 0.00 | 0.00 | 8.99 | 140.00 |
| 0.90 | 50.00 | 9.89 | 105.00 |
| 1.80 | 155.00 | 10.79 | 75.00 |
| 2.70 | 330.00 | 11.69 | 55.00 |
| 3.60 | 465.00 | 12.58 | 40.00 |
| 4.49 | 500.00 | 13.48 | 25.00 |
| 5.39 | 465.00 | 15.73 | 10.00 |
| 6.29 | 390.00 | 17.98 | 5.00 |
| 7.19 | 280.00 | 20.22 | 2.50 |
| 8.09 | 195.00 | 22.47 | 0.00 |

ANEXO VII. ANÁLISIS SENSIBILIDAD DE LA MALLA

Los modelos numéricos devuelven resultados aproximados cuya precisión depende de la discretización espacial y temporal.

Para garantizar unos resultados fiables se ha realizado, previamente a la batería de simulaciones que nos dan los resultados del estudio, un análisis de sensibilidad de la discretización espacial.

Se han analizado los siguientes tres tipos de malla, todas ellas con celdas rectangulares:

- Tamaño uniforme: todo el dominio se ha dividido en celdas con el mismo tamaño.

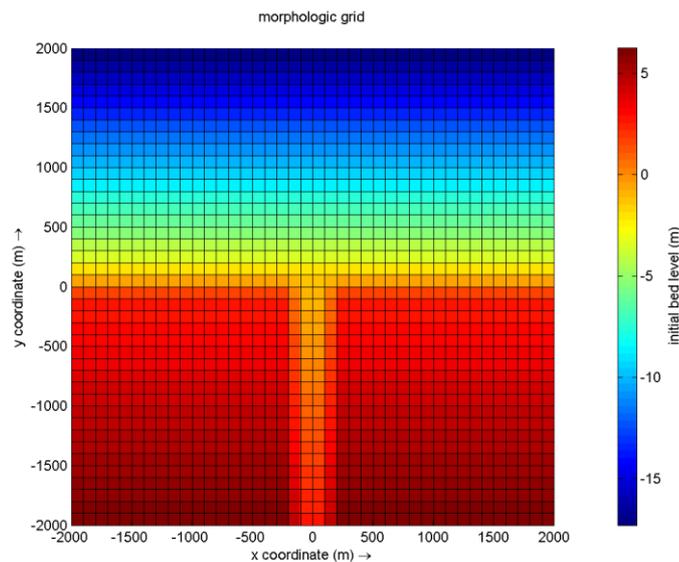


Figura Anexo VII 1. Malla uniforme

- Refinamiento en la dirección longitudinal: todo el dominio se ha dividido en celdas con el mismo tamaño, con un refinamiento en el eje x en la zona del cauce.

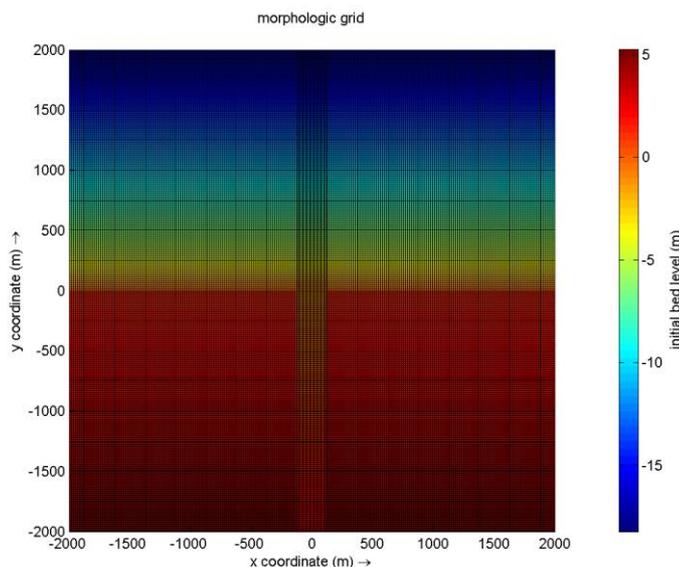


Figura Anexo VII 2. Malla con refinamiento en el eje x sobre el cauce

- Refinamiento en la dirección longitudinal y transversal: todo el dominio se ha dividido en celdas con el mismo tamaño, con un refinamiento en el eje x en la zona del cauce y en el eje y en la desembocadura.

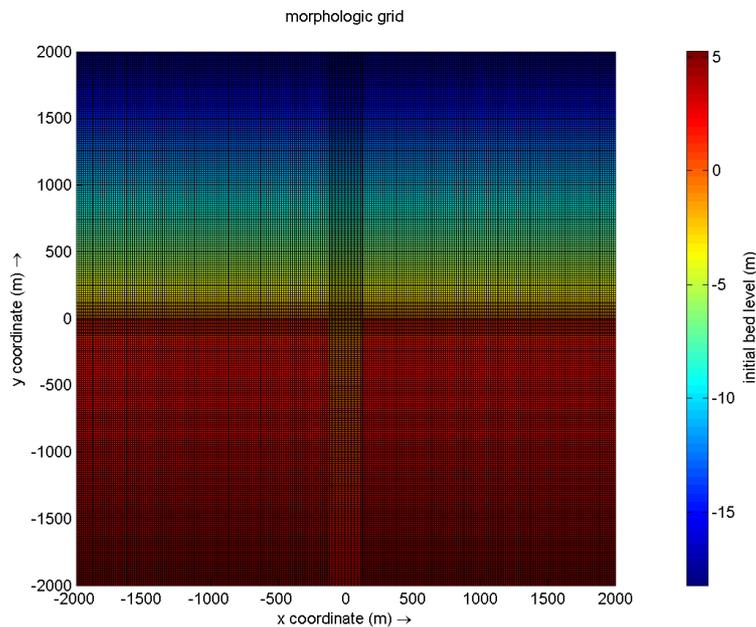


Figura Anexo VII 3. Malla con refinamiento en el eje x sobre el cauce y en el eje y en la desembocadura

En la Tabla Anexo VII 1 se muestran las distintas mallas que se han empleado en el análisis de sensibilidad del mallado, incluso el coste computacional de cada una de ellas y su tamaño. Para cada malla se ha adoptado un paso de tiempo que permita cumplir la condición de Courant-Frederichs-Levy (Lesser et al, 2004) [5].

Tabla Anexo VII 1. Distintas mallas estudiadas, mostrando la discretización en el eje x (dx) e y (dy) y el refinamiento en la zona del cauce (dx1) y en la desembocadura (dy1) en caso de haberlo

| | Malla | Coste computacional | Tamaño de malla | | | |
|---|-------|---------------------|-----------------|-------|--------|-------|
| | | | dx | dx1 | dy | dy1 |
| Malla uniforme | 1 | 40 s | 100.00 | - | 100.00 | - |
| | 2 | 3 min | 50.00 | - | 50.00 | - |
| | 3 | 6 min | 33.33 | - | 33.33 | - |
| | 4 | 20 min | 25.00 | - | 25.00 | - |
| | 5 | 30 min | 20.00 | - | 20.00 | - |
| | 6 | 53 min | 16.00 | - | 16.00 | - |
| | 7 | 2h 45 min | 12.50 | - | 12.50 | - |
| | 8 | 3h 20 min | 11.43 | - | 11.43 | - |
| Refinamiento del eje x en el cauce | 9 | 55 min | 16.00 | 10.67 | 16.00 | - |
| | 10 | 2h 30 min | 13.33 | 8.89 | 13.33 | - |
| | 11 | 1h 50 min | 16.00 | 8.00 | 16.00 | - |
| | 12 | 2h 40 min | 13.33 | 6.67 | 13.33 | - |
| | 13 | 2h | 16.00 | 5.33 | 16.00 | - |
| | 14 | 3h | 13.33 | 4.44 | 13.33 | - |
| Malla uniforme | 15 | 1 día 18 h | 5 | - | 5 | - |
| Refinamiento del eje y en la desembocadura | 16 | 55 min | 16.00 | 10.67 | 16.00 | 10.67 |
| | 17 | 2h 40 min | 13.33 | 8.89 | 13.33 | 8.89 |
| | 18 | 1h 50 min | 16.00 | 8.00 | 16.00 | 8.00 |

| | Malla | Coste computacional | Tamaño de malla | | | |
|--|-------|---------------------|-----------------|------|-------|------|
| | | | dx | dx1 | dy | dy1 |
| | 19 | 2h 35 min | 13.33 | 6.67 | 13.33 | 6.67 |
| | 20 | 2h 20 min | 16.00 | 5.33 | 16.00 | 5.33 |
| | 21 | 3h 30 min | 13.33 | 4.44 | 13.33 | 4.44 |
| Ampliación de la zona a refinar en la desembocadura | 22 | 3 h | 16.00 | 5.33 | 16.00 | 5.33 |
| | 23 | 4 h | 13.33 | 5.33 | 13.33 | 4.44 |

El análisis de sensibilidad se ha realizado para el módulo hidrodinámico únicamente, adoptando que para el módulo morfodinámico la sensibilidad va a ser similar. Por tanto, hay que tener en cuenta que el tiempo computacional mostrado no se corresponde con el real de las simulaciones del estudio, ya que éste aumenta al introducir el segundo módulo.

El análisis se ha realizado comparando los resultados con una malla base, la malla número 15, la cual tiene un tamaño de malla uniforme de 5 m en la dirección x e y, con un tiempo de computación de 1 día y 18 horas. Se han comparado velocidades y calados en el perfil x=0. Al no introducir el viento en estas simulaciones, el modelo es simétrico. Además, las velocidades más elevadas se dan en este eje.

En la Tabla Anexo VII 2 se muestran los resultados del análisis. En esta tabla se incluye el error absoluto y el relativo en velocidad y calado. El error absoluto se ha obtenido como la máxima diferencia entre una malla y la malla referencia (malla número 15). El error relativo se ha obtenido como el cociente entre el error absoluto y el valor de velocidad o calado de la malla referencia en el momento en el que ocurre el máximo error absoluto.

Tabla Anexo VII 2. Resultados del análisis de sensibilidad de la malla

| Malla 1 | Malla 2 | Error absoluto | | Error relativo | | Coste computacional |
|---------|---------|----------------|-----------|----------------|-----------|---------------------|
| | | v (m/s) | nivel (m) | v (%) | nivel (%) | |
| 1 | 15 | 1.06 | 0.38 | 26.00 | 28.56 | 40 s |
| 2 | 15 | 0.93 | 0.31 | 22.89 | 23.19 | 3 min |
| 3 | 15 | 0.91 | 0.27 | 22.51 | 20.29 | 6 min |
| 4 | 15 | 0.90 | 0.24 | 22.30 | 18.04 | 20 min |
| 5 | 15 | 0.77 | 0.26 | 19.09 | 19.54 | 30 min |
| 6 | 15 | 0.76 | 0.19 | 18.79 | 14.28 | 53 min |
| 7 | 15 | 0.74 | 0.22 | 18.31 | 16.33 | 2h 45 min |
| 8 | 15 | 0.61 | 0.18 | 15.07 | 13.59 | 3h 20 min |
| 9 | 15 | 0.62 | 0.20 | 15.36 | 15.27 | 55 min |
| 10 | 15 | 0.64 | 0.20 | 15.83 | 14.99 | 2h 30 min |
| 11 | 15 | 0.68 | 0.19 | 16.75 | 14.63 | 1h 50 min |
| 12 | 15 | 0.55 | 0.14 | 13.65 | 10.88 | 2h 40 min |
| 13 | 15 | 0.66 | 0.22 | 16.20 | 16.36 | 2h |
| 14 | 15 | 0.54 | 0.15 | 13.22 | 11.04 | 3h |
| 16 | 15 | 0.44 | 0.14 | 10.96 | 10.34 | 55 min |
| 17 | 15 | 0.55 | 0.18 | 13.66 | 13.89 | 2h 40 min |
| 18 | 15 | 0.39 | 0.16 | 9.52 | 11.88 | 1h 50 min |
| 19 | 15 | 0.33 | 0.12 | 8.17 | 9.02 | 2h 35 min |
| 20 | 15 | 0.14 | 0.10 | 3.48 | 7.61 | 2h 20 min |
| 21 | 15 | 0.11 | 0.05 | 2.71 | 3.83 | 3h 30 min |
| 22 | 15 | 0.14 | 0.08 | 3.46 | 5.88 | 3 h |
| 23 | 15 | 0.17 | 0.05 | 4.24 | 3.50 | 4 h |

De este análisis se extrae la malla número 20 como discretización espacial apropiada, con un tamaño de celda uniforme de 16 m y un refinamiento en el eje x en el cauce y en el eje y en la desembocadura con tamaño de 5.33 m. El error relativo en velocidades para esta malla es de 3.5% y en calado de 7.6%. Mientras que el coste computacional es de 2h 20 min para el módulo hidrodinámico.

Finalmente, se ha decidido emplear la malla mostrada en la Figura 3-5, con un tamaño uniforme de 20 m y un refinamiento de 5 m en el cauce y desembocadura (tamaños muy próximos a los obtenidos del estudio de sensibilidad de la malla). Este cambio se debe a que se ha buscado hacer coincidir la malla con las paredes verticales del cauce, tratando de evitar cualquier posible error numérico. El coste final de computación de cada simulación se ha situado próximo a las 10 horas al introducir el módulo morfodinámico.

ANEXO VIII. CALIBRACIÓN PARÁMETROS DEL MODELO

Entre los parámetros físicos del modelo, se encuentran la viscosidad turbulenta horizontal y la difusividad horizontal, los cuales recomienda el manual de usuario de Delft3D ajustar.

Según el manual, estos parámetros dependen del flujo y del tamaño de celda de la malla usada en el modelo. Para tamaños de malla entre 10 y 100 m, se recomienda usar valores de ambos parámetros entre 1 y 10 m^2/s , mientras que, para mallas con tamaño superior a 100 m se recomienda usar valores entre 10 y 100 m^2/s .

Las primeras simulaciones se realizaron con el valor de ambos parámetros de 10 m^2/s , por defecto en el modelo, y válido según la recomendación del manual. En el módulo hidrodinámico los resultados obtenidos eran válidos, sin embargo, al emplear el módulo morfodinámico se detectó una irregularidad en los resultados de erosión y sedimentación, que difícilmente se ajustaban a la realidad. En la zona próxima a las paredes del canal se generaba una erosión que se prolongaba desde la desembocadura hasta el inicio del cauce.

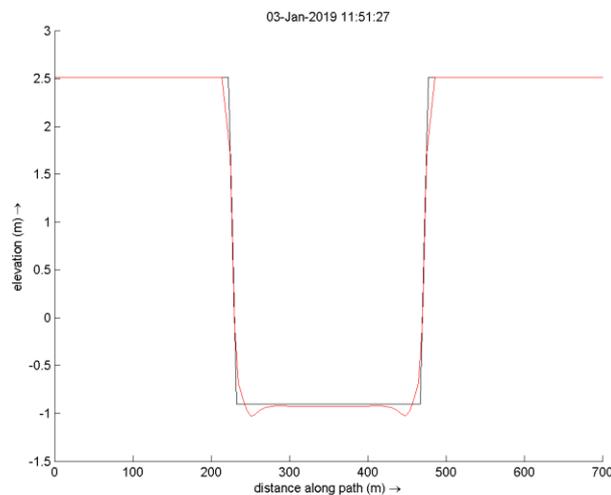


Figura Anexo VIII 1. Estado inicial (negro) y final (rojo) del lecho del cauce a 100 m de la desembocadura antes de ajustar los parámetros

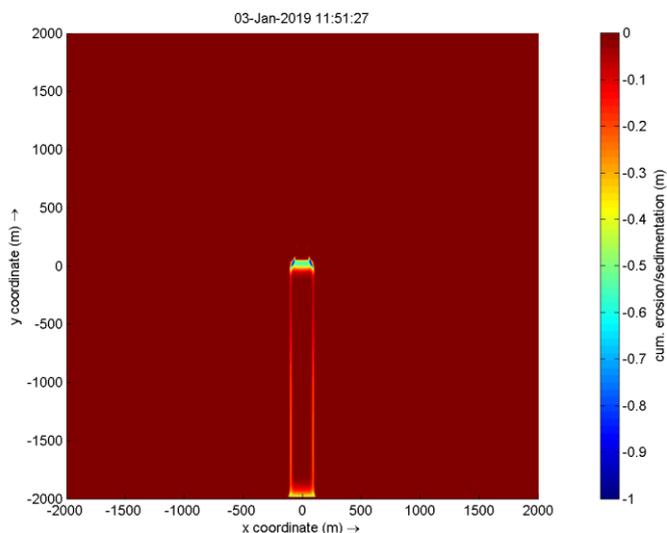


Figura Anexo VIII 2. Estado final de erosión del lecho antes de ajustar los parámetros

En la Figura Anexo VIII 1 se muestra una sección transversal del cauce con el estado inicial (negro) y final (rojo) del lecho. En los laterales de la sección se observa la erosión que se produce. En la Figura Anexo VIII 2, se representa únicamente la erosión de una de las simulaciones, la cual se extiende por todo el cauce desde la desembocadura hasta el inicio del mismo.

En la Figura Anexo VIII 3 y Figura Anexo VIII 4 se muestran los mismos resultados de la misma simulación tras ajustar los parámetros de viscosidad y difusividad. Finalmente, el valor empleado para ambos parámetros es de $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

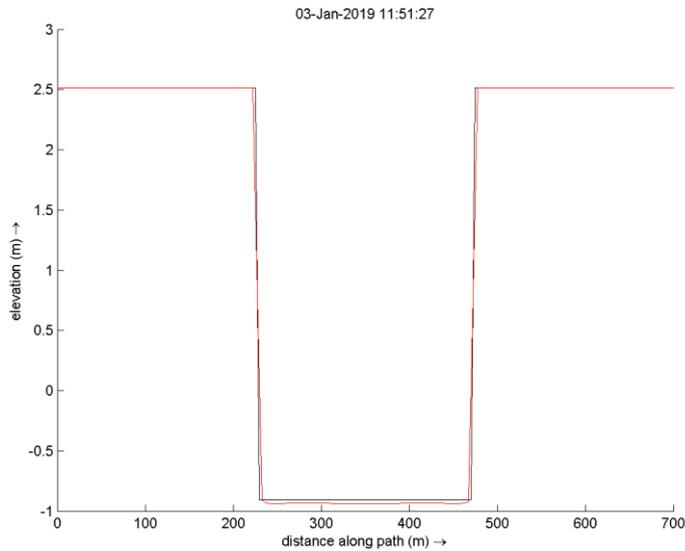


Figura Anexo VIII 3. Estado inicial (negro) y final (rojo) del lecho del cauce a 100 de la desembocadura después de ajustar los parámetros

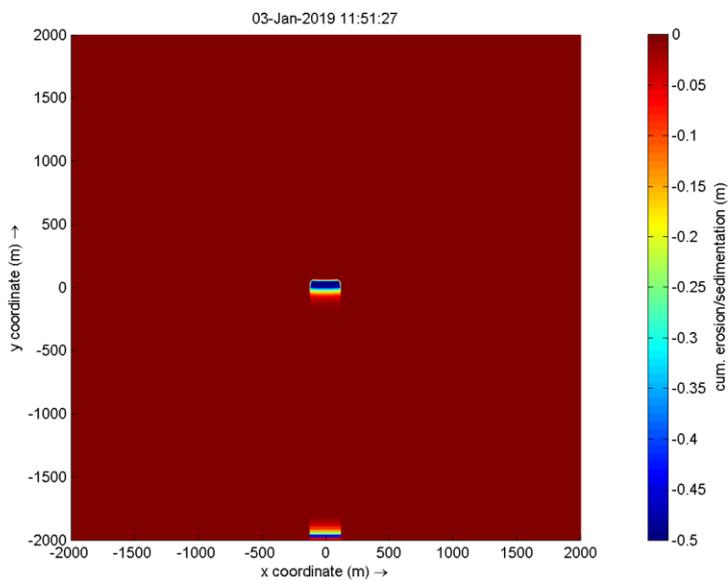


Figura Anexo VIII 4. Estado final de erosión del lecho después de ajustar los parámetros