

Trabajo de Fin de Grado Grado en Ingeniería Civil

Análisis del efecto de los dragados en la distribución de salinidad de estuarios aluviales

Autor: Ignacio Antequera Erro

Tutores: Alejandro López Ruiz

Guillermo Martín Llanes

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Civil

Análisis del efecto de los dragados en la distribución de salinidad de estuarios aluviales

Autor:

Ignacio Antequera Erro

Tutores:

Alejandro López Ruz

Profesor titular

Guillermo Martín Llanes

Profesor Ayudante

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto de Fin de Grado: Análisis del efecto de los dragados en la distribución de salinidad de estuarios aluviales

Autor: Ignacio Antequera Erro

Tutores: Alejandro López Ruiz

Guillermo Martín Llanes

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

La realización de este trabajo y la culminación de mis estudios de grado son testimonio del esfuerzo conjunto de todas las personas que me ayudaron en el camino. Mi espíritu y curiosidad científica tardó tiempo en despertar, hasta encontrarme con personas que fueron determinantes en estimular mi interés por los números, y posteriormente, por la física que vertebra las estructuras. Así, este trabajo y todo el conocimiento adquirido durante los últimos años se lo debo especialmente a ellos, que fueron clave en mi desarrollo académico, y, sobre todo, en la forma de pensar que me inculcaron.

Para empezar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres, que siempre estuvieron ahí para apoyarme y enderezarme cuando era necesario. Sin ellos no hubiera sido posible.

Mi estancia en Lima fue fundamental para llegar a mi posición actual, donde tuve la oportunidad de estar en el Colegio Markham, que, como yo digo ‘me enseñaron a pensar’, más allá de cualquier resultado o nota. Esta etapa de 3 años fue muy importante en mi crecimiento personal.

A todos mis profesores, a quienes les debo todo el conocimiento transmitido y me contagian su pasión por esta rama de la Ingeniería.

A mis amigos, tanto los de siempre como los que están por venir, que siempre han confiado en mí y aportan felicidad a mi vida.

Finalmente, me gustaría expresar mi profundo agradecimiento a mis tutores Alejandro y Guille, ya que les debo que este trabajo haya logrado materializarse. Siempre han estado dispuestos a ayudarme y me han guiado de la mejor manera posible, pudiendo dar mi mejor versión en todo momento. Les admiro enormemente y les considero grandes referentes en mi formación académica.

Resumen

Los estuarios aluviales son ecosistemas singulares donde se encuentran la desembocadura de un río y el mar, constituyendo la zona de transición entre el régimen litoral y fluvial donde se produce la mezcla entre el agua dulce y salada. Estas formaciones se caracterizan por su gran dinamismo hidrodinámico, ya que son influenciados por diversos agentes como las mareas, el oleaje, la descarga fluvial y el transporte de sedimentos proveniente de diferentes fuentes, entre otros. Así, la compleja interacción de todos los factores que intervienen en su equilibrio dinámico los convierte en medios altamente sensibles, con un tiempo de vida generalmente corto. No obstante, estas condiciones confieren a los estuarios el desarrollo de características propias de ambos cuerpos de agua (litoral y marino), lo que resulta en un hábitat único para una amplia diversidad de fauna y flora, ya que poseen una alta riqueza de nutrientes y variedad de recursos.

Al mismo tiempo, los estuarios desempeñan un papel estratégico en el desarrollo y realización del comercio internacional desde tiempos remotos, ya que son vías de navegación hacia los puertos interiores. De esta manera, son áreas de gran interés e importancia económica para la sociedad, por lo que se debe asegurar su mantenimiento regular para garantizar la navegabilidad de los barcos a través de las operaciones de dragado. Asimismo, la diversa circulación de nutrientes y sus características topográficas, siendo terrenos generalmente llanos y fértiles, los convierten en lugares ideales para la agricultura.

La coexistencia de diferentes intereses en los estuarios genera inevitablemente la confrontación entre diversos sectores de la sociedad. Ante estas presiones antrópicas, es crucial reconocer que estos ecosistemas requieren de una protección ambiental especial para su conservación, debido a la alta sensibilidad y valor ecológico que tienen. Para lograr esto, deben estudiarse detenidamente los procesos físicos que se llevan al cabo en estas formaciones, para su correcta gestión y promover el desarrollo sostenible de las actividades que se realizan en su dominio. En este sentido, este trabajo se dedica a analizar el efecto que tienen los dragados en la distribución de salinidad de los estuarios, que es uno de los aspectos más importantes en la salud ambiental de estos entornos, ya que puede tener un impacto considerable en la vida silvestre, así como en la producción de la agricultura local.

Para ello, la primera parte del trabajo se centrará en describir y clasificar el comportamiento general de los estuarios aluviales, así como los principales factores que intervienen en su dinámica, que son la marea astronómica y la descarga fluvial. Asimismo, se destaca cómo la forma de los estuarios aluviales influye significativamente en su respuesta hidrodinámica, y cómo muchos de estos estuarios comparten características geométricas similares en todo el mundo, lo que nos permite introducir el concepto de estuario idealizado. A grandes rasgos, un estuario idealizado se define como aquel que se encuentra en un régimen sincrónico, es decir, en equilibrio energético; donde la pérdida de energía por los efectos de la fricción es igual a la ganada por unidad de anchura debido a la convergencia de los márgenes. La geometría de los estuarios ideales que permite alcanzar este régimen se caracteriza por una convergencia exponencial de los márgenes y una profundidad del lecho aproximadamente constante.

En este trabajo, utilizaremos un modelo numérico tridimensional en el software Delft3D que ha sido previamente realizado y validado tras un análisis de sensibilidad (G. Martín Llanes, 2022). Este modelo se construye sobre la base de la definición geométrica de los estuarios ideales y ha sido desarrollado específicamente para evaluar los cambios en la salinidad en respuesta a modificaciones geométricas de la batimetría, lo que lo hace adecuado para nuestro estudio. Esto nos permite adentrarnos plenamente en el análisis hidrodinámico del modelo original, que se encuentra en condiciones razonablemente intermedias, para así pasar a estudiar las consecuencias que conllevan los cambios en el perfil longitudinal del estuario al simular los dragados.

Para cuantificar la evolución de la distribución de salinidad, utilizaremos varios parámetros de interés entre los que destacamos fundamentalmente la intrusión salina. Esta se define como la posición a lo largo del estuario donde los niveles de salinidad son de 3.6psu, que corresponde al 10% de la concentración del agua del mar. Por tanto, los resultados principales de la investigación se centran en el seguimiento espaciotemporal del frente salino, que estará estrechamente relacionado con el comportamiento hidrodinámico del sistema. De ahí la importancia de comprender adecuadamente el marco teórico de los estuarios, que nos permitirá la correcta interpretación y conclusión de los resultados obtenidos por el modelo.

Por último, se pretende ampliar el alcance del trabajo analizando el efecto que tiene el incremento de la descarga fluvial en la distribución de la salinidad en los estuarios. Esto nos permitirá evaluar valores de descarga asociados a eventos extremos, como avenidas provocadas por regímenes de lluvias intensas, así como posibles descargas puntuales provenientes de cauces regulados aguas arriba con la presencia de una presa. Esto último podría considerarse una medida interesante para contrarrestar el avance del frente salino, y explorar posibles estrategias de gestión para mitigar los impactos negativos que tienen las operaciones de dragado.

Abstract

Alluvial estuaries are unique ecosystems where a freshwater river or stream meets the ocean, so they constitute the transition zone between the coastal and fluvial regime where the mixture between fresh and salt water occurs. These formations are characterized by a high hydrodynamic activity, since they are influenced by various external drivers such as tides, waves, fluvial discharge, and sediment transport from different sources, among others. Thus, the complex interaction between all these factors makes them highly sensitive systems, resulting in their generally short lifetime. However, these conditions provide estuaries with a unique habitat for a wide diversity of fauna and flora, since the influence of both bodies of water (coastal and marine) result in a high concentration of nutrients and a variety of natural resources.

At the same time, estuaries play a strategic role in the development of international trade since ancient times, as they are the only navigation channels to reach inland ports. In this way, these areas are of great interest for the economic wealth of society, so their optimum conditions must be ensured through periodic dredging operations for their maintenance. In addition, the diverse circulation of nutrients that occurs as well as their natural topography makes them ideal places for agriculture, since they generally consist of flat and fertile land.

The coexistence of different activities that take place in estuaries inevitably generates confrontation between different sectors of society. However, it is crucial to recognize that these ecosystems require special environmental protection due to their high sensitivity and ecological value, which can be threaten by these anthropogenic pressures. To achieve this, a detailed study of the behaviour and physical processes of estuaries must be carried out, so that their sustainable management is possible. In this way, this report aims to contribute to the sustainable development by analysing the effect that dredging has on the distribution of salinity in estuaries, which is a strong indicator of environmental health in these environments. As a result, the potential negative impact affecting wildlife and local agricultural production could be mitigated.

The first part of the work will focus on describing and classifying the general behaviour of alluvial estuaries, as well as the main factors affecting their fluid dynamics. Out of these agents, astronomical tide and river floods are the two most important. Furthermore, this essay focuses on the importance of the shape of alluvial estuaries in their hydrodynamic response, observing similar geometric characteristics among a wide range of estuaries all over the world. This allows us to introduce the concept of ideal estuary, which is defined by approximately constant depth and exponentially varying width. In an ideal estuary (according to Langbein, 1963) the convergence of the estuary banks is just sufficient to balance the damping of the tidal range due to friction, reaching an energetic equilibrium.

We will use a three-dimensional numerical model through the Delft3D software that was previously carried out by G. Martín Llanes in 2022, where a sensitivity analysis was also made. The implementation of the model was based on the geometric definition of ideal estuaries and was specifically developed for the study of salinity changes in response to geometric modifications, which makes it suitable for our study. This allows us to deepen the hydrodynamic analysis of the original model, which reasonably represents intermediate conditions, for the correct study of the effects of dredging operations.

To quantify the evolution of the salinity distribution, we will use several parameters of interest, among which we highlight the saline intrusion. It is defined as the position along the estuary where salinity levels are 3.6psu, which corresponds to 10% of the seawater concentration. Therefore, the main results of the research focus on the spatiotemporal monitoring of saline levels, which will be closely related to the hydrodynamic behaviour of the system. Hence the importance of a correct understanding of the theoretical framework of estuaries necessary to interpret and conclude the results obtained by the model.

Finally, it is intended to broaden the scope of the research by analysing the effect that an increase in river flow discharge on the distribution of salinity in estuaries. Hereby we can evaluate discharge values associated with extreme events, such as floods caused by heavy rains, as well as possible controlled discharges from an upstream dam. This could be an interesting measure to counteract the advance of saline intrusion and improve management strategies to mitigate the negative impacts of the dredging operation.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de figuras	xvii
Índice de tablas	xix
1 Introducción y contexto del trabajo	21
2 Hidrodinámica y salinidad en estuarios aluviales	23
2.1 Definición	23
2.2 Factores que afectan la forma del estuario	23
2.3 Clasificación general de Davies, 1964. Tipos de estuario basados en la marea.	25
2.4 Forma de los estuarios aluviales	25
2.5 Estuario idealizado	26
2.6 Salinidad en estuarios aluviales	28
2.6.1 Mecanismo de mezcla	28
2.6.2 Parámetros importantes. Números de estuario	29
2.6.3 Mecanismos de intrusión salina	30
3 Metodología	33
3.1 Delft3D	33
3.2 Implementación de la zona de estudio	35
3.2.1 Modelo de estuario ‘quasi-idealizado’. Forma en planta y aspectos generales.	35
3.2.1 Mallado y tiempo de cálculo	37
3.2.2 Batimetría inicial	39
3.2.3 Condiciones de contorno	40
3.2.4 Condiciones iniciales	41
3.2.5 Parámetros físicos	41
3.3 Modelado de los dragados y estructura del trabajo	42
4 Resultados	47
4.1 Puntos de observación	47
4.2 Escenario original	48
4.2.1 Hidrodinámica	48
4.2.2 Salinidad	52
4.3 Análisis del dragado	56

4.4	Análisis del pulso de descarga	61
4.4.1	Hidrograma de descarga con ramas de transición.	63
4.4.2	Hidrograma de descarga sin ramas de transición	66
5	Conclusiones	69
	Bibliografía	73

Índice de figuras

Figura 2.1. Forma en planta de un estuario aluvial tipo. (Hubert H.G. Savenije, 2012)	26
Figura 2.2 Perfil longitudinal de un estuario ideal tipo. (Hubert H.G. Savenije, 2012)	28
Figura 2.3 Esquemas de la definición del prisma de marea: (a) como el producto de B, h y E; y (b) como el producto del área O y H', la carrera de marea entre las estoas. (Hubert H.G. Savenije, 2012)	30
Figura 2.4 Perfil de salinidad tipo de un estuario estratificado. (Hubert H.G. Savenije, 2012)	31
Figura 2.5 Perfil de salinidad tipo de un estuario parcialmente estratificado. (Hubert H.G. Savenije, 2012)	31
Figura 2.6 Perfil de salinidad tipo de un estuario verticalmente homogéneo o bien mezclado. (Hubert H.G. Savenije, 2012)	32
Figura 3.1 Vista en planta de los márgenes del estuario	36
Figura 3.2 Dominio espacial: malla de cálculo del modelo	37
Figura 3.3 Esquema representativo de los sistemas de coordenadas sigma-layer (a) y z-layer (b). Tal Ezer, George L. Mellor (2003)	38
Figura 3.4 Batimetría del estuario en planta	39
Figura 3.5 Sección transversal del estuario en la desembocadura (izquierda) y superficie escalada del estuario en la desembocadura (derecha)	40
Figura 3.6 Relación entre calado y capacidad de transporte en TEU de contenedores desde 1964	42
Figura 3.7 Sección transversal del estuario en la desembocadura (izquierda) y superficie escalada del estuario en la desembocadura (derecha) en escenarios de dragado	43
Figura 3.8 Representación del talud de transición del dragado	44
Figura 3.9 Perfil de la batimetría del modelo de dragado hasta 5000 metros	44
Figura 3.10 Perfil de la batimetría del modelo de dragado hasta 20000 metros	45
Figura 3.11 Evolución del área transversal de los distintos escenarios de dragado con la distancia del thalweg	45
Figura 3.12 Esquema representativo del perfil de salinidad de estuarios frente a las descargas fluviales. Xiang Pu, John Z. Shi (2015)	46
Figura 4.1 Localización de los puntos de control a lo largo del thalweg	47
Figura 4.2 Evolución espaciotemporal del nivel medio del estuario. Escenario original	48
Figura 4.3 Variación de las amplitudes y fases de las constituyentes M2 y M4. Escenario original	49
Figura 4.4 Variación de la asimetría de marea y el desequilibrio llenante-vaciante. Escenario original	50
Figura 4.5 Evolución de la amplitud de la velocidad y área de sección transversal con la distancia (arriba), y variación del prisma de marea y volumen de agua dulce en el estuario (abajo). Escenario original	51
Figura 4.6 Evolución espaciotemporal de la velocidad (izquierda) y de la salinidad (derecha) del estuario. Escenario original	52

Figura 4.7 Evolución del nivel y la velocidad con la intrusión salina en la boca del estuario. Escenario original	53
Figura 4.8 Vista ampliada de la evolución del nivel y la velocidad con la intrusión salina en la boca del estuario. Escenario original	53
Figura 4.9 Distribución de salinidad del perfil del thalweg y la sección transversal de la desembocadura en el instante de máxima intrusión. Escenario original	54
Figura 4.10 Evolución espaciotemporal de la estratificación con el parámetro ΔS . Escenario original	55
Figura 4.11 Evolución temporal de la intrusión salina de los diferentes escenarios de dragado	56
Figura 4.12 Relación entre las variaciones espaciales del área transversal, amplitud de la velocidad y prisma de marea con los dragados	58
Figura 4.13 Relación entre la variación espacial del área transversal, amplitud de la velocidad y prisma de marea del dragado 20000m	59
Figura 4.14 Evolución de la amplitud del nivel con el dragado	60
Figura 4.15 Perfil de salinidad del thalweg en el instante que se produce la máxima intrusión, para el dragado 10000m (izquierda) y el dragado 20000m (derecha)	61
Figura 4.16 Hidrogramas de descarga con ramas de transición	63
Figura 4.17 Evolución temporal de la intrusión salina con los pulsos de descarga en el escenario original (izquierda) y el dragado 20000m (derecha). Hidrograma con ramas de transición.	63
Figura 4.18 Tiempos de ajuste y recuperación de salinidad de los diferentes dragados. Hidrograma con ramas de transición	65
Figura 4.19 Hidrogramas de descarga sin ramas de transición	66
Figura 4.20 Evolución temporal de la intrusión salina con los pulsos de descarga en el escenario original (izquierda) y el dragado 20000m (derecha). Hidrograma sin ramas de transición.	66
Figura 4.21 Tiempos de ajuste y recuperación de salinidad de los diferentes dragados. Hidrograma sin ramas de transición	67
Figura 4.22 Evolución espaciotemporal de la estratificación con el parámetro ΔX con pulso de descarga 1500 m ³ /s. Escenario original (izquierda), Dragado hasta 20000m (derecha).	68

Índice de tablas

Tabla 1 Constituyentes armónicas de la marea astronómica	40
Tabla 2 Máxima y mínima intrusión salina de cada escenario de dragado	57

1 Introducción y contexto del trabajo

Durante nuestra existencia como especie, hemos reconocido diferentes cuerpos de agua en la corteza terrestre sobre los que hemos asentado poblaciones para subsistir y satisfacer nuestras necesidades básicas. Con el tiempo, tras estudiarlos para su correcta explotación y sostenibilidad, evidenciamos cómo todos los recursos hídricos están interconectados en una compleja red de procesos hidrogeológicos, donde el agua fluye constantemente sobre el sustrato en el que se encuentra que, aun siendo consolidadamente rocoso, es inherentemente permeable.

Esto da lugar a regiones intermedias entre medios acuáticos de diferente naturaleza y características, como son el mar, de agua salada, y los ríos, de agua dulce. Aquí nos encontramos con los estuarios y los deltas, normalmente localizados en la desembocadura de los ríos en el medio marino. Estas formaciones son claro ejemplo de zonas de transición entre dos masas de agua de mayor magnitud, las cuales regulan su hidrodinámica y las dotan con un ecosistema singular. Al verse influenciados de características propias de ambos medios, son entornos que se distinguen por tener una gran actividad morfodinámica y biológica, lo que los hace de gran interés de estudio de cara a estudios ambientales.

Con la continua interacción entre el ambiente fluvial y marino, impulsados por la descarga fluvial y la variabilidad de la marea respectivamente, se obtiene una diversa circulación e intercambio de sedimentos y nutrientes. Estos procesos son clave para la biodiversidad; proporcionando un hábitat único para muchas especies adaptadas a vivir en ambientes de transición. Asimismo, se destaca la configuración de una distribución de salinidad particular y exclusiva de estas formaciones como resultado de la confrontación de flujos opuestos de agua dulce y agua salada. Este fenómeno será de vital importancia para las condiciones ambientales del ecosistema, como analizaremos más adelante. Igualmente, los estuarios y deltas también pueden tener una gran importancia económica y social para los humanos, ya que a menudo se utilizan como vías naturales para la navegación y como zonas de pesca y agricultura.

En este estudio nos centraremos exclusivamente en el análisis de los estuarios debido a su mayor repercusión antropogénica en comparación con los deltas. Los deltas son estructuras geomorfológicas deposicionales con una alta concentración de sedimentos, formándose una red de canales trenzados de calado reducido que suele dificultar la navegación y la construcción de infraestructuras. Este comportamiento dificulta mucho el estudio de los deltas desde el punto de vista hidrodinámico, ya que la gran diversidad de procesos biogeoquímicos involucrados hace necesario enfoque multidisciplinar para entenderlo en su totalidad. Por otro lado, los estuarios son generalmente más accesibles para la actividad humana debido a su mayor profundidad y navegabilidad, siendo estructuras más favorables en el campo de la Ingeniería Civil.

En este sentido, los estuarios se han utilizado como zonas de abrigo contra tormentas y puntos de acceso a puertos interiores en numerosos países desarrollados, dada su mayor accesibilidad en comparación con los deltas. Sin embargo, suelen ser necesarias operaciones de dragado para remover la acumulación de sedimento y asegurar el calado suficiente de los barcos que se introducen, evitando así el encallamiento en caso de que la sedimentación predomine a la erosión en el cauce. A su vez, la capacidad de transporte de mercancía de estas embarcaciones suele ser proporcional a su calado, por lo que es frecuente realizar dragados para aumentar el calado máximo de los buques mercantes que se introducen en el estuario. De esta manera se optimiza la operatividad y la competitividad de puertos interiores como el Puerto de Sevilla.

Ahora bien, el proyecto de dragado estará sujeto a un estudio socioeconómico y medioambiental, de manera que su realización dependerá de si los beneficios económicos que conlleve son superiores al impacto ambiental generado, con la pertinente aprobación por parte del organismo de la cuenca. Para evaluar este balance, será de vital importancia entender el comportamiento hidro- y morfodinámico que se desarrolla en el estuario, al ser medios susceptibles a variaciones morfológicas ante intervenciones antrópicas, dada la compleja interacción entre los distintos agentes que intervienen en su equilibrio morfodinámico. Los dragados suponen cambios directos de la geometría del estuario, lo que conlleva cambios en sus condiciones hidráulicas y afecta su equilibrio dinámico. Esta alteración conlleva un tiempo de estabilización por parte del estuario en adaptarse al nuevo estado de equilibrio, en busca de la mínima energía del sistema, lo cual puede tener consecuencias ambientales negativas. Existen abundantes estudios, entre los que encontramos en la bibliografía (R. Siles-Ajamil, M. Díez-Minguito, & M.Á. Losada, 2019) , (P. Hoagland, y otros, 2020) que demuestran que el aumento de la sección de un estuario provoca un incremento de la intrusión salina, lo que afectaría a diversas especies y plantas que dependen de niveles específicos de salinidad para sobrevivir.

Asimismo, debido a la interconexión entre aguas superficiales y subterráneas, una mayor intrusión salina aguas arriba supone el contacto de estos niveles de sal con los acuíferos circundantes. Estos terrenos, caracterizados por su elevada fertilidad, topografía llana y la alta disponibilidad de agua dulce, presentan normalmente un gran potencial agrícola. De esta manera, el aumento de salinidad podría llegar a contaminar el agua dulce de los acuíferos de los cuales se nutren los cultivos cercanos, que suelen localizarse en los márgenes de los ríos. Este impacto podría agravarse si existe un descenso previo del nivel freático, como es el caso del Parque Natural de Doñana por la explotación exhaustiva de pozos ilegales (Ecologistas en acción, 2023).

Estos ejemplos, entre otros muchos, exponen la gran riqueza ambiental y la relevancia socioeconómica que caracterizan a los estuarios como ecosistemas, siendo también medios fuertemente sensibles ante intervenciones antrópicas. En efecto, resulta claro que su repercusión va más allá de la preocupación ambiental, al ser lugar de interés para diversas actividades y sectores de la sociedad, como se ha expuesto; donde los intereses del puerto en aumentar su actividad confrontan con los de la agricultura. Por consiguiente, este estudio pretende contemplar la variedad de aspectos que intervienen en el dragado del estuario, adoptando enfoque multidisciplinar necesario para lograr un alcance realista, tomando una perspectiva económica, técnica, ambiental e hidráulicamente favorable.

2 Hidrodinámica y salinidad en estuarios aluviales

2.1 Definición

Se define el estuario como un cuerpo de agua parcialmente encerrado que se forma cuando las aguas dulces provenientes de ríos y quebradas fluyen hacia el océano y se mezclan con el agua salada del mar (EPA, 2023). Como se ha comentado, la singularidad de estos cuerpos de agua recae en su carácter mixto de los regímenes fluvial y litoral, dotándolos con una riqueza en nutrientes y sedimentos que da lugar a una amplia diversidad de fauna y flora, con un comportamiento hidrodinámico único y distinto al de los dos anteriores.

Ahora bien, al ser los estuarios una combinación de distintos entornos, y pudiendo estar afectados por intervenciones antrópicas o modificaciones de la cuenca hidrográfica, son sistemas muy sensibles y susceptibles a variaciones morfodinámicas por cualquier cambio en sus condiciones ambientales. De este modo, no es sorprendente la existencia de distintas tipologías de estuarios, de acuerdo con sus características topográficas, geológicas, geométricas, mareales, ... En primera instancia, este documento se desarrolla en torno al estudio de estuarios aluviales. El término 'aluvial' hace referencia al depósito de materiales transportados por corrientes de agua, siendo un tipo de estuario generalmente de relieve llano con abundancia de depósitos aluviales, que son normalmente material granular.

Según Savenije (2012), un estuario aluvial es aquel que presenta un lecho formado por material depositado tanto por el río como por el mar y en el que existe posibilidad de transporte debido al movimiento del agua, que podrá erosionar el lecho (profundizando o ensanchando la sección) o depositar sedimentos en él, lo cual demuestra una clara relación entre la geometría y el comportamiento hidráulico. La mayor o menor medida en la que ocurre la erosión y la sedimentación revela la existencia de un perfil de equilibrio dinámico observable a tres escalas distintas: en un ciclo de marea (distinguiéndose la variación de velocidad entre pleamar y bajamar), cada quince días (que es el tiempo que permite apreciar la variación de amplitud entre una marea viva y una muerta) y estacional o anual (con elevada descarga fluvial en tiempo húmedo y reducida en tiempo seco).

2.2 Factores que afectan la forma del estuario

Según se evidencia, es importante destacar la fuerte interdependencia que existe entre los procesos morfodinámicos del estuario con su geometría y condiciones de contorno, como son las mareas, la descarga fluvial y el oleaje. Todos estos factores determinarán su comportamiento hidráulico, así como sus condiciones ambientales, dando lugar a diferentes tipologías de estuario que presentaremos más adelante. Primero es conveniente entender los factores que afectan su evolución y comportamiento, que como se ha anticipado, incluye la influencia de la marea y la descarga fluvial. Pese a que participan una gran multitud de factores puede establecerse que, a grandes rasgos, son los siguientes:

- La marea astronómica, generada por la rotación de la Tierra y su interacción gravitatoria con la Luna y el Sol, que provoca el ascenso y descenso del nivel de un cuerpo de agua. Esta variación actúa como una función periódica, que puede expresarse matemáticamente como la suma de 390 armónicos identificados, los cuales representan las interacciones existentes entre los cuerpos celestes. Los armónicos más representativos son los de periodos semidiurnos y diurnos, con periodos del orden de 12.3 y 24 horas respectivamente. Se trata del principal agente responsable de la importación de sal al estuario, así como uno de los componentes de mayor energía responsables de la entrada y salida del agua en la desembocadura. Esta onda se propaga aguas arriba en el río y tiene un gran poder erosivo, que se va atenuando o amplificando según el balance entre la geometría del estuario y la fricción a lo largo del cauce.

- La descarga fluvial, siendo la fuente de sedimento y agua dulce del sistema estuarino. Al igual que la propagación de la onda de marea, su influencia es condicionada por la forma del estuario. Los estuarios presentan generalmente una sección transversal creciente por la divergencia de sus márgenes a medida que avanzamos hacia la desembocadura, con una forma de embudo. Por lo tanto, la velocidad de la descarga fluvial disminuye aguas abajo por la conservación del caudal, y el transporte de sedimento dependerá de la energía de las corrientes residuales. Por otro lado, podemos encontrarnos también con estuarios de márgenes paralelos, denominados estuarios prismáticos, donde el transporte se produce de forma rápida dotando al estuario mayor carácter fluvial. No obstante, este tipo de estuarios es morfológicamente inestable y requiere de operaciones para la estabilización de los márgenes y dragado, por lo que suelen tratarse de canales artificiales de navegación. La ausencia de una descarga fluvial significativa puede ocasionar la formación de barras que pueden cerrar al estuario de la interacción marina.
- El oleaje, de naturaleza estocástica, que es fruto de las condiciones meteorológicas. A diferencia de las mareas que se propagan a lo largo del río, la disipación de energía del oleaje se concentra en las inmediaciones de la desembocadura. Por ello, este factor está estrechamente relacionado con cuestiones morfológicas en la boca del estuario, determinando la configuración y forma de esta. En cualquier caso, las simulaciones a realizar en este trabajo no tendrán en cuenta el efecto del oleaje y no se incluirá en el análisis.
- El transporte lateral de sedimentos a lo largo de la línea de costa puede ser también responsable de la formación de barras o flechas litorales, que pueden llegar a cerrar temporalmente la desembocadura. En tal caso, impediría la entrada de agua salada en el estuario y, por ende, un fuerte retroceso de la intrusión salina. La magnitud de este efecto dependerá de si el transporte de sedimentos es mayor en relación con el poder erosivo de la acción conjunta de la descarga fluvial y la marea. De ahí que los estuarios sean medios muy sensibles a la contaminación y a la acumulación de sedimentos, teniendo un tiempo de vida relativamente corto.
- Por otro lado, cabe mencionar el gradiente de densidad, o gradiente de salinidad, que indica la variación espacial de salinidad en el estuario. Debido a la diferencia de densidades entre el agua dulce y salada, se genera el proceso de mezcla y de corrientes residuales del fondo, las cuales posibilitan el transporte de sedimentos. En concreto, se permite el transporte del sedimento marino aguas arriba, ya que el material transportado por el río suele depositar una vez que entra en contacto con el agua salina por floculación. Además, la turbulencia creada por el complejo mecanismo de mezcla permite la deposición de carga en suspensión, que por su turbidez puede identificarse visualmente en el estuario como una referencia aproximada de la intrusión salina. Estos son algunos fenómenos importantes que ocurren en el proceso de mezcla que, en realidad, se compone de 4 procesos de mezcla distintos que desglosaremos más adelante.
- Por último, es importante considerar la acción del clima, que es el principal agente regulador de la mayoría de los aspectos indicados. El clima determina los regímenes de lluvia que originan la respuesta hidráulica de la cuenca y, por consiguiente, el caudal de descarga fluvial. También es responsable de la temperatura del agua, el nivel de evaporación y el nivel de salinidad del agua, así como de las variaciones del nivel del mar a largo plazo e incontables procesos biogeológicos que condicionan la morfodinámica del sistema. Por ello, se debe prestar especial atención en proteger estos ecosistemas frente al cambio climático.

2.3 Clasificación general de Davies, 1964. Tipos de estuario basados en la marea.

De todos estos factores, la marea astronómica y la descarga fluvial son considerados los más determinantes en la evolución de la forma del estuario, y por lo tanto serán los más relevantes en nuestro análisis. No obstante, es importante considerar que la combinación de la totalidad de agentes involucrados dará lugar a multitud de formas de estuario con diferente comportamiento hidráulico. Podemos distinguir distintas tipologías atendiendo a su forma, mareas, geología, etc., donde se comentarán las más relevantes, empezando por la influencia de la marea, encontramos los siguientes tipos (Clasificación de Davies, 1964):

- **Estuarios micromareales.** En este tipo de estuarios la carrera de marea es inferior a los dos metros. La influencia de la marea no es muy significativa y por lo general la hidrodinámica viene marcada por la descarga fluvial aguas arriba, la acción del oleaje y las posibles tormentas aguas abajo.
- **Estuarios mesomareales.** En estos la carrera de marea oscila entre los dos y cuatro metros de altura. A diferencia del anterior, la influencia de la marea cobra una mayor importancia.
- **Estuarios macromareales.** En este caso, la carrera de marea supera los cuatro metros. De esta manera, la hidrodinámica se encuentra gobernada fundamentalmente por la marea, que puede tener influencia en el estuario hasta los 100 kilómetros, siendo apenas significativo el aporte de la descarga fluvial

Donde la carrera de marea es la diferencia altimétrica de la lámina de agua en situaciones de pleamar y bajamar, siendo uno de los parámetros más importantes que definen la marea. De esta clasificación se puede concluir que, cuanto mayor sea la influencia de la marea, como es el caso de estuarios macromareales, mayor será la intrusión salina en el estuario. Para nuestro estudio, partiremos de un estuario tipo mesomareal para así estar en una situación intermedia y poder ver su potencial evolución con el dragado, dado que supone un cambio en la geometría del estuario y, por tanto, en sus condiciones hidrodinámicas afectando la intrusión salina.

2.4 Forma de los estuarios aluviales

Hasta ahora, se ha destacado la importancia de la topografía y geometría del estuario en su comportamiento hidráulico y evolución morfológica, ya que el hecho de que el agua fluya de cierta manera está fuertemente influenciado por el medio a través del cual fluye. En hidráulica de canales, la modelación del flujo puede resolverse con las ecuaciones de Saint Venant, que constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que en ocasiones conllevan un comportamiento impredecible o difícilmente convergente con apoyo del poder computacional. Más aun, la resolución de estas ecuaciones se dificulta notoriamente si se considera el transporte de sedimentos. No obstante, en los estuarios aluviales nos encontramos con numerosas simplificaciones en su geometría y comportamiento hidráulico sorprendentemente simples y realistas.

Los estuarios con márgenes convergentes (no prismáticos) pueden describirse con una función exponencial, de forma que su anchura y sección transversal aumentan exponencialmente al aproximarse a la desembocadura. Esta relación se ha comprobado en numerosos estuarios de todo el mundo, donde se observa que todos tienen una forma en planta similar y consistente con la siguiente formulación geométrica, que deriva del principio energético de los estuarios ideales, como veremos en el siguiente apartado. De tal manera, cuando se verifican las hipótesis de estuario ideal (igualdad entre fricción y convergencia), podemos aproximar la forma en planta del estuario con la expresión:

$$B(x) = B_0 \exp\left(-\frac{x}{b}\right)$$

Donde $B(x)$ es la evolución espacial de la anchura del estuario, x la distancia al origen, y B_0 el ancho de la sección transversal en la boca del estuario (B en $x=0$). b es longitud de convergencia de anchura, que marca el ratio de convergencia del estuario, y es la distancia (siguiendo el eje) desde la boca hasta el punto donde se produce la intersección entre la tangente al margen en el punto $(0, B/2)$ y el eje longitudinal (siendo infinito en estuarios prismáticos).

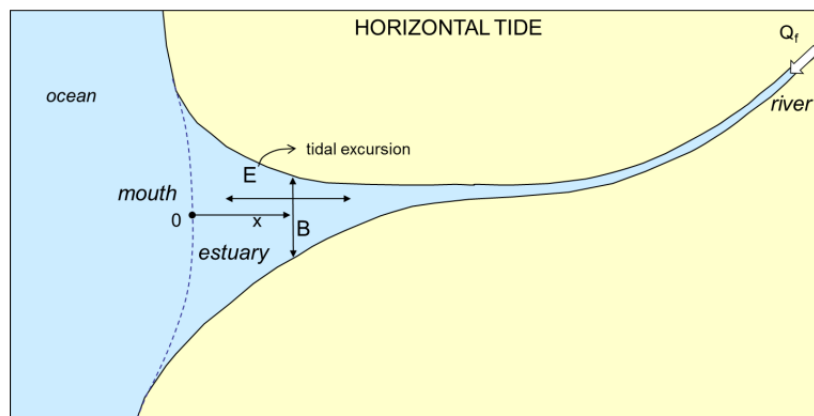


Figura 2.1. Forma en planta de un estuario aluvial tipo. (Hubert H.G. Savenije, 2012)

Es preciso indicar que la boca del estuario es un punto difícil de precisar, sobre todo haciendo mediciones in situ. Se entiende por este el punto donde se produce el cambio de flujo bidimensional a unidimensional, determinando el origen del eje longitudinal (x), cuyos valores crecen conforme avanza de forma ascendente en el estuario.

Los estuarios aluviales se caracterizan por ser zonas llanas y de sedimentación de depósitos aluviales. Por ello, se considera que tienen una profundidad aproximadamente constante h , siendo h una variable independiente de los cambios de forma en planta y de la variable espacial x , bajo esta premisa. De esta manera, se obtiene de forma análoga la evolución del área de la sección transversal:

$$A(x) = A_0 \exp\left(-\frac{x}{a}\right)$$

Siendo a la longitud de convergencia del área, y se obtiene de la misma manera que b en la expresión anterior. Nótese que si h se considera constante, como es el caso de estuarios aluviales, como $A \approx Bh$ entonces $a = b$.

Aunque existe evidencia empírica y consistencia matemática en estas relaciones, muchos autores no aceptan este fenómeno, en especial cuando trabajamos con diferentes planteamientos en la topografía, donde conviene asumir cierta pendiente del lecho o incluso anchura del cauce constante. No obstante, estas simplificaciones son aceptables para el modelo de estuario que se analiza en este ensayo.

2.5 Estuario idealizado

Retomando la clasificación de Davies (1964), la cual diferencia entre los estuarios micro-, meso- y macromareales en función de la amplitud de la marea, se trata de la clasificación de uso más extendido debido a que considera que la carrera de la marea es un indicador fiable de la energía de marea disipada en el estuario. Esta componente energética es la que tiene el mayor poder erosivo y desempeña un papel fundamental en la configuración geométrica del estuario.

Tras la observación de múltiples estuarios reales por diversos investigadores, se destaca en la mayoría de ellos la notoria influencia de la marea a lo largo de varios kilómetros aguas arriba de su desembocadura. Ese es el caso del estuario del Guadalquivir, donde la onda de marea se propaga hasta la presa de Alcalá del Río, ubicada aguas arriba de la ciudad de Sevilla. Este fenómeno es resultado del balance energético que regula la evolución de la perturbación de acuerdo a las características físicas del estuario. En concreto, dependerá de la disipación de la energía de marea causada por la fricción, condicionado por el sedimento que constituye el lecho y de la intensidad de la descarga fluvial. Se ha comprobado según varios estudios que la presencia de la descarga fluvial en estuarios produce un efecto similar a la fricción en términos energéticos de la onda de marea. En contraste, esta pérdida es compensada por la energía ganada a través de la convergencia de los márgenes del río, en consonancia con lo visto en el apartado anterior, dado que al reducirse la sección la energía por unidad de ancho aumenta, y por tanto los niveles. El resultado de estos dos factores determinará la evolución de la onda de marea propagándose aguas arriba del estuario, lo que nos permite introducir el concepto de estuario idealizado.

Se define estuario idealizado como aquel que, a medida que la onda de marea se propaga aguas arriba, la cantidad de energía por unidad de volumen disipada por fricción en la erosión del medio es igual a la energía ganada por la sedimentación y convergencia de los márgenes, conservando el equilibrio dinámico total (Hubert H.G. Savenije, 2012). En este sentido, se observa que en un estuario ideal la amplitud y la carrera de marea son constantes a lo largo de su eje longitudinal, siendo independientes de la variable espacial. Un estuario se denomina sincrónico cuando cumple estas condiciones.

Este concepto nos conduce a la clasificación de dos tipos de estuario según la relación entre la geometría y la carrera de marea. El primero de ellos son los estuarios amortiguados o hiposíncronos, donde el efecto de la fricción supera la contribución de la convergencia de la sección transversal, resultando en la disipación de energía y disminución de la amplitud de la onda de marea. Y, por el contrario, los estuarios amplificadores o hipersíncronos, donde la amplitud de marea aumenta en dirección aguas arriba por la fuerte convergencia de sus márgenes en comparación con el efecto sumidero de la fricción. Evidentemente, este último proceso es inestable y dejará de producirse eventualmente cuando se alcance el punto donde la fricción es mayor que la ganancia de energía derivada de la convergencia del estuario. Asimismo, se constata que el efecto de la descarga fluvial es mayor en las zonas aguas arriba debido a la reducción exponencial de la sección transversal, de manera que nos encontramos velocidades mayores y el efecto de la fricción y atenuación de marea es mayor. Un estuario puede ser de una u otra tipología en diferentes tramos de su longitud total, dependiendo de sus condiciones hidráulicas y geométricas, ya que su longitud de convergencia b no es necesariamente constante a lo largo de su desarrollo.

La geometría del estuario idealizado responde a las mismas relaciones geométricas que las descritas en el apartado anterior, con un incremento exponencial de los márgenes y la sección transversal aguas abajo. De hecho, esta forma exponencial es la única solución geométrica, matemáticamente posible, que permite que se desarrolle el comportamiento de los estuarios idealizados descrito anteriormente ($\frac{\partial E}{\partial x} = 0$), y además implica la asunción de un coeficiente de rugosidad constante. Esto último limita el rango de aplicación de los estuarios ideales, ya que el material del lecho deberá ser suficientemente homogéneo para tomar esta simplificación.

Del mismo modo, se considera una profundidad del lecho sensiblemente constante a lo largo del estuario idealizado. Ahora bien, aunque esta suposición sea aceptable por la observación de numerosos estuarios aluviales, que presentan un relieve normalmente llano, en realidad la profundidad del estuario fluctúa de la misma manera que lo hace la forma meandriforme del curso bajo del río según las leyes de Fargue. No obstante, en estuarios relativamente largos no suele considerarse la pendiente de forma global, en términos generales. En general, el comienzo de la pendiente del talweg empieza a notarse una vez que la descarga del río es dominante a las corrientes de marea, de modo que este punto se encuentra razonablemente en régimen fluvial, quedando fuera de la zona del estuario.

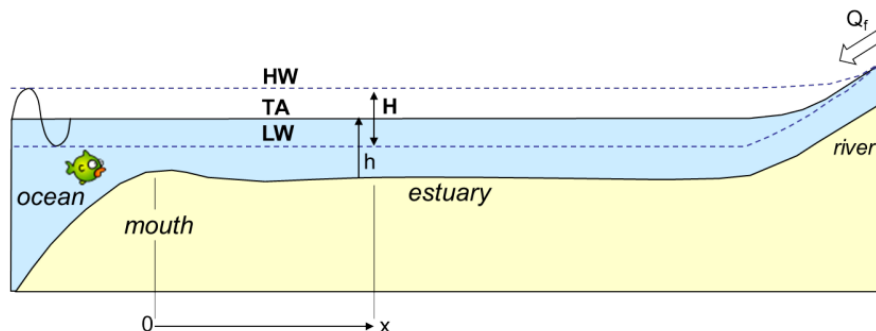


Figura 2.2 Perfil longitudinal de un estuario ideal tipo. (Hubert H.G. Savenije, 2012)

En relación a este estudio, donde analizaremos el efecto de los dragados en el estuario, efectivamente no se tratará de un modelo idealizado, ya que trabajaremos con cambios abruptos en su geometría; dragando hasta distintos puntos y evaluando la respuesta hidrodinámica y ambiental del estuario, fijándonos en avance de la intrusión salina. De esta manera, nuestro caso estará lejos de encontrarse en condiciones ideales y la profundidad del lecho no será constante. En cualquier caso, como veremos más adelante, la geometría inicial del modelo utilizado en este trabajo tampoco se trata de un estuario ideal, dado que no tiene un comportamiento sincrónico basado en el equilibrio energético, que es la condición que permite definir el concepto.

Sin embargo, es necesario entender el concepto de estuario ideal y los procesos hidrodinámicos involucrados en el equilibrio de los estuarios aluviales. Esto nos ayudará para el correcto entendimiento y análisis de los resultados, además de servir como referencia para trabajar con formas en planta realistas que se aproximan a las de un estuario idealizado. Como consecuencia de un cambio de calado, podemos esperar un tiempo de respuesta del sistema en alcanzar el nuevo equilibrio morfodinámico, donde se prevé, que para un estuario 'infinitamente' largo, la profundidad del lecho tienda asintóticamente al 'calado ideal'; aquel donde no se produce amplificación ni disipación de la amplitud de marea, en busca de la mínima energía del sistema.

2.6 Salinidad en estuarios aluviales

2.6.1 Mecanismo de mezcla

En este estadio del trabajo, se deduce que la distribución de salinidad a lo largo del estuario no es un proceso estático, dado que resulta de la interacción de las fuentes de energía externas del sistema, siendo la más relevante de ellas las mareas, que es un fenómeno oscilatorio. La variabilidad de la descarga fluvial dependerá de si existe regulación del caudal aguas arriba con la presencia de presas. De ser así, estará sujeto a las decisiones de la gestión hidrográfica de la cuenca, o de lo contrario, de a las avenidas provocadas por los episodios de lluvia. En definitiva, la fluctuación de la salinidad podrá ser estudiada siempre que modelemos estos factores externos adecuadamente, así como el proceso de mezcla de aguas desde un punto de vista teórico.

De acuerdo con Savenije (2012), el mecanismo de mezcla en el estuario se produce por dos agentes principales: la energía potencial resultante del gradiente de densidad del agua, y la energía cinética y potencial proporcionada por las mareas. Esto genera cuatro diferentes procesos de mezcla dominantes, que son los siguientes:

- La turbulencia, que se produce por el esfuerzo cortante sobre el fluido viscoso debido a la rugosidad del fondo. Este el proceso de menor eficacia.
- La circulación gravitacional, que se basa en el principio de desequilibrio de presión hidrostática que existe a ambos lados de la sección transversal debido a la diferencia de densidad entre agua dulce y salada, que produce una circulación residual por fondo de agua salada hacia aguas arriba

y otra por superficie de agua dulce hacia aguas abajo. Existe además una cierta circulación lateral, causada por la diferencia de salinidad en la propia sección.

- Existe otro mecanismo, conocido como “trapping”, que se basa en la retención de agua en espacios confinados por barras de sedimento y en la diferencia de fase que existe entre los ciclos de marea y la descarga fluvial. De esta forma, en periodo de pleamar la marea ascenderá por el estuario hasta alcanzar un cierto límite, provocando el llenado de estos espacios con agua salada. Cuando descienda el nivel en la bajamar puede ocurrir que el agua salada quede ‘atrapada’ en estos espacios, provocando una diferencia de densidad y un gradiente de presión con el agua dulce que comienza a entrar en contacto con ella, favoreciendo de la misma forma que en el caso anterior, una serie de corrientes residuales.

Este fenómeno cobra mayor importancia, por tanto, en estuarios aluviales de geometría irregular, y es más intenso cuanto mayor sea la excursión de marea y el gradiente de salinidad. En un estuario idealizado como el que se utilizará en este trabajo, se trata de un proceso que carece de importancia.

- Por último, cabe mencionar el proceso de mezcla por corrientes residuales, que es el cambio de la estructura del flujo impulsado por la marea al pasar de mareas vivas a muertas. Este mecanismo es especialmente importante en la zona de la boca del estuario. A diferencia de los dos anteriores, no depende del gradiente de salinidad, sino que es directamente proporcional a la anchura del estuario

2.6.2 Parámetros importantes. Números de estuario

Dentro de la caracterización hidrodinámica de los estuarios aluviales son muchos los factores que podemos desglosar, aunque en términos generales se hace uso de una serie de parámetros o números adimensionales que nos sirven para establecer de forma rápida su relación entre la descarga fluvial y la intrusión salina, que son los agentes más importantes. Comentaremos los más significantes para no perder el enfoque del estudio.

En primer lugar, tenemos el número de estuario, o de Canter-Cremers según la literatura holandesa. En vistas a la expresión que se muestra a continuación, es el cociente entre el volumen de agua dulce y de agua salina, también llamado prisma de marea P_t , que entra en el estuario durante un ciclo de marea T .

$$N = \frac{Q_f T}{P_t}$$

El volumen de agua dulce que entra a través de la descarga fluvial puede obtenerse si se conoce el caudal de descarga Q_f . El prisma de marea P_t puede calcularse de diferentes maneras, una de ellas como el volumen de agua salada que se introduce en el estuario entre las envolventes del LWS y HWS, que son las estoa de vaciante y llenante, respectivamente. Esto se refiere al nivel de agua cuando la velocidad de corriente de marea es nula y el sentido del flujo se invierte; el LWS dando paso a la marea llenante y, tras alcanzar el HWS, se da la marea vaciante. Se ha comprobado que producto de la carrera de marea y la sección transversal en la boca del estuario es también una buena aproximación de P_t .

$$P_t = \int_{LWS}^{HWS} Q(0, t) dt \approx A_0 E_0$$

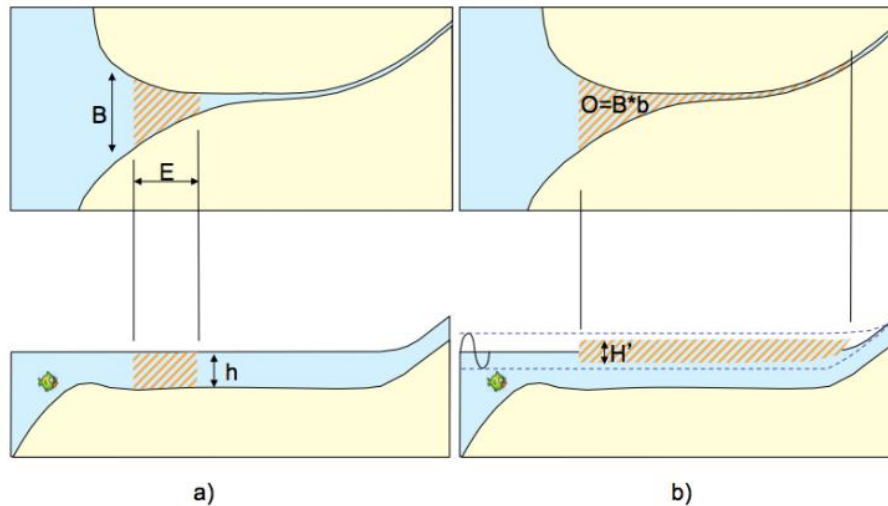


Figura 2.3 Esquemas de la definición del prisma de marea: (a) como el producto de B , h y E ; y (b) como el producto del área O y H' , la carrera de marea entre las estoas. (Hubert H.G. Savenije, 2012)

Otro parámetro frecuentemente utilizado para caracterizar estuarios es el número de Richardson N_R . Se define como el ratio de la energía potencial de la descarga fluvial y la energía cinética de la marea durante un ciclo de marea. Es considerado un parámetro más relevante que el anterior, dado que tiene en cuenta un mayor número de factores que definen el estado del estuario, como son el gradiente de densidad del agua y el número de Froude. Haremos uso de la ecuación propuesta por Savenije (2012):

$$N_R = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{gh}{v^2} \frac{Q_f T}{P_t}$$

Nótese que N_R incluye la expresión del número de Canter-Cremers, multiplicado por el gradiente de densidad y la inversa de F al cuadrado. Donde v es la velocidad de la onda de marea en la boca del estuario, ρ la densidad del agua salada, g la constante de la gravedad y h la profundidad de la sección.

2.6.3 Mecanismos de intrusión salina

Atendiendo a la distribución de salinidad del estuario, estos parámetros son de gran utilidad ya que proporcionan información acerca de la estructura del flujo. Un N_R elevado indica la tendencia hacia la estratificación, que suele deberse a una elevada energía procedente de la descarga fluvial, lo que implica normalmente una menor intrusión salina. No obstante, existen estuarios dominados por gradientes de densidad (density driven estuaries) donde la descarga moderada puede acentuar la estratificación y propiciar un aumento en la intrusión. Por el contrario, valores de N_R reducidos señalan una baja estratificación con niveles de salinidad verticalmente homogéneos, que puede estar relacionado con una dominante componente energética de las mareas.

Así, la relación entre la descarga fluvial y el prisma de marea no solamente determinará en el avance de la intrusión salina, sino también la forma en la que el agua dulce y salada interaccionan en el proceso de mezcla y el gradiente de salinidad que se produce. En vista a este último aspecto, podemos distinguir tres tipos de estuario:

- **Estuarios estratificados (N_R elevado).** En este tipo de estuario se produce un cambio abrupto de densidad en la zona cercana a la desembocadura, como posible resultado de una elevada descarga fluvial que produce este retroceso de la interfase. El fuerte cizallamiento en la velocidad de la interfase genera un movimiento de rotación de la onda interna entre las dos capas, originando una isohalina bien definida con un importante gradiente de densidad vertical, como se contempla en la figura 2.4. De ahí que este perfil longitudinal de densidades se denomine estratificado. Cuando la estratificación es alta, a veces presenta una cuña salina, con el agua marina penetrando en el estuario en forma de cuña por la fuerte inclinación de las isolíneas de salinidad. En estos estuarios el flujo estará dominado por la mezcla gravitacional.

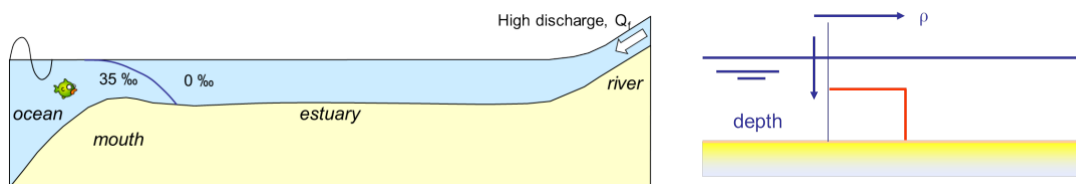


Figura 2.4 Perfil de salinidad tipo de un estuario estratificado. (Hubert H.G. Savenije, 2012)

- **Estuarios parcialmente estratificados (N_R moderado).** Aquí la influencia de la descarga fluvial es menor y la transición de mezcla se produce de manera más homogénea a lo largo del estuario. De este modo, se da una mayor intrusión salina y un perfil longitudinal en el que las isohalinas no son perpendiculares al lecho. No obstante, los valores de salinidad en una sección vertical son distintos dado que la mezcla no es completamente homogénea. Este régimen se asocia a descargas fluviales de mediana envergadura.

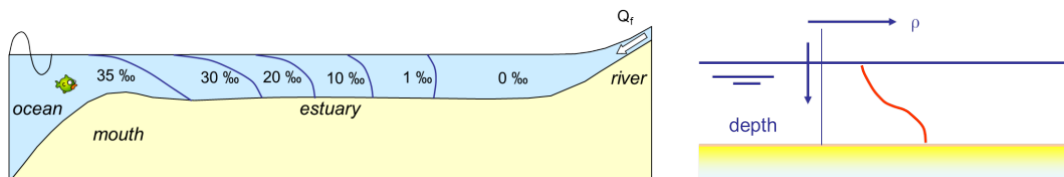


Figura 2.5 Perfil de salinidad tipo de un estuario parcialmente estratificado. (Hubert H.G. Savenije, 2012)

- **Estuarios verticalmente homogéneos (N_R bajo).** La descarga fluvial es notablemente menor a la de los casos anteriores, asociado a estaciones de sequía. Como consecuencia se produce un mayor avance del prisma de marea y el perfil de salinidad es prácticamente uniforme; con las isohalinas paralelas entre sí y aproximadamente perpendiculares al lecho, donde los flujos principales son unidireccionales con la profundidad. Esto favorece a la mezcla homogénea del agua dulce y agua salada, encontrándonos con un único nivel de salinidad en cada sección transversal. Aquí el flujo es dominado por los gradientes de densidad.

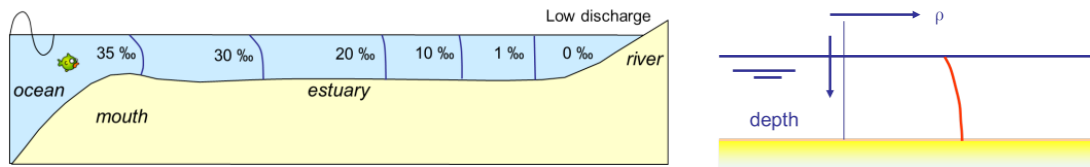


Figura 2.6 Perfil de salinidad tipo de un estuario verticalmente homogéneo o bien mezclado. (Hubert H.G. Savenije, 2012)

En este trabajo, definiremos la intrusión salina como la posición longitudinal en la que la concentración de sal es de 3.6 psu (unidades prácticas de salinidad), que es el 10% de la concentración salina del agua del mar abierto (36psu).

3 Metodología

Hasta este punto, hemos presentado de manera general el concepto de estuario aluvial, así como las diversas tipologías existentes, proporcionando el marco teórico necesario para el entender adecuadamente el posterior análisis que se llevará al cabo en este trabajo. Dicha contextualización nos ha permitido exponer la importancia de estas formaciones y la complejidad inherente a su estudio, dada la multitud de factores que influyen en su dinámica. Para abordar el estudio hidrodinámico, existen diferentes metodologías que nos permiten obtener información de los procesos físicos que tienen lugar en la naturaleza, estos generalmente son:

- Realización de campañas in-situ
- Ensayos de laboratorio
- Modelos numéricos

En el primer caso, los datos pueden obtenerse de manera precisa e inmediata, dependiendo de la calidad de la instrumentación utilizada. No obstante, esta metodología por sí sola resulta insuficiente debido a que no se puede extrapolar los resultados de un punto o de una sección al comportamiento dinámico de toda la zona de estudio, por lo que se emplean habitualmente en la calibración y validación de modelos numéricos. Respecto a los ensayos de laboratorio, son técnicas de gran exigencia tanto económica como material, aun no pudiendo garantizar el diseño de prototipos que reproduzcan los fenómenos a escala de manera fiable. Es por ello que cada vez resulta más habitual acudir a herramientas matemáticas que permiten simular, con mayor o menor resolución, y con un coste computacional que dependerá de dicha resolución, dichos procesos: los modelos numéricos.

Cabe señalar que el uso de estas tres técnicas no son necesariamente excluyentes, de hecho, suele ser beneficioso recurrir a más de una metodología para abordar el problema, apoyándonos de las distintas ventajas que cada técnica ofrece. Para este trabajo, dada la imposibilidad de realizar las primeras dos técnicas y siendo la última de ellas la más extendida, utilizaremos un modelo hidrodinámico para la resolución del problema. En este caso, hemos seleccionado el software comercial Delft3D, que es ampliamente utilizado en la comunidad científica por sus capacidades para el estudio hidro- y morfodinámico de ambientes fluviales, costeros y de estuarios.

3.1 Delft3D

Delft3D es una plataforma de modelado de alta resolución desarrollado por *Deltares* en estrecha colaboración con la *Technical University of Delft*, que consiste de los módulos Flujo (FLOW), Morfología (MOR) y Olas (WAVE). Como la mayoría de los modelos numéricos que suelen usarse en ámbitos costeros y fluviales, su operación se fundamenta en la resolución numérica en un dominio concreto de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento hidráulico; las ecuaciones de Navier Stokes. Estas son un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales vertebradas por las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento para fluidos newtonianos.

Para la modelización del estuario utilizaremos el módulo Delft3D-FLOW, que aprovecha la hipótesis de Boussinesq y la hipótesis de aguas someras de problemas en los que escala de longitud horizontal es significativamente mayor que la dimensión vertical, pudiendo desprestigiar las aceleraciones verticales en el modelo. Esto permite la integración vertical y promediado temporal de las ecuaciones anteriores, obteniendo las conocidas *Shallow-water equations*. A pesar de tomar esta hipótesis simplificativa que apunta a un enfoque bidimensional del problema, se elaborará un modelo tridimensional (3D), ya que nos interesa capturar ciertas características tridimensionales del flujo, como la interacción entre la corriente principal y los procesos de turbulencia o la influencia de la topografía del fondo. De este modo, podremos analizar ciertos fenómenos transitorios como la distribución de la salinidad, donde las variaciones verticales desempeñan un papel importante como se vio en el apartado 2.6.3. En consecuencia, la utilización de un

modelo numérico tridimensional conlleva un mayor coste computacional y tiempo de cálculo.

Las ecuaciones comentadas son las siguientes:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial |h\bar{u}|}{\partial x} + \frac{\partial |h\bar{v}|}{\partial y} = 0$$

Que es la ecuación de continuidad, despreciando los efectos meteorológicos de la precipitación y de la evaporación, donde \bar{u} y \bar{v} son las componentes de la velocidad (ms^{-1}) promediadas en la profundidad en las direcciones x y y , respectivamente; h (m) a profundidad y ξ (m) el nivel de la superficie libre.

Las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento de ambas direcciones promediadas también en la vertical, asumiendo una ley de fricción cuadrática, velocidad nula y condiciones de contorno de deslizamiento libre (esfuerzo tangencial nulo) en el terreno; despreciando el efecto de Coriolis y del viento, se escriben de la siguiente forma (Deltares):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0$$

donde g (ms^{-2}) es la aceleración de la gravedad, v (m^2s^{-1}) la velocidad de turbulencia y C ($m^{1/2}s^{-1}$) el coeficiente de Chézy, para caracterizar la rugosidad, el cual se define como:

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)$$

Siendo k_s la rugosidad geométrica de Nikuradse.

Otra ecuación fundamental en nuestro estudio será la ecuación de advección-difusión 3D, responsable del modelado del transporte de sustancias conservativas y por tanto de la distribución de salinidad de nuestro análisis. Dicha expresión incluye términos asociados a sumideros y fuentes, con el fin de simular, en este caso, las condiciones de la descarga fluvial y la marea astronómica del modelo que afectan a la dinámica de transporte. Esta ecuación viene dada por:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(d + \zeta)c}{\delta t} + \frac{\delta[(d + \zeta)\bar{u}c]}{\delta x} + \frac{\delta[(d + \zeta)\bar{v}c]}{\delta y} + \frac{\delta\omega c}{\delta \sigma} \\ & = (d + \zeta) \cdot \left(\frac{\delta}{\delta x} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta y} \right) \right) + \frac{\delta}{\delta \sigma (d + \zeta)} \left(D_V \frac{\delta c}{\delta \sigma} \right) - \lambda_d (d + \zeta)c + S \end{aligned}$$

Donde en este caso d representa la profundidad, ω la velocidad en dirección z , y c la concentración de la sustancia, que será la sal. Los términos D_H y D_V son los coeficientes de difusión turbulenta horizontal y vertical, λ_d las soluciones numéricas del proceso de caimiento exponencial de primer orden, y S los términos fuente y sumidero debidos a la descarga y retirada de caudal.

Nótese que en los términos advectivos de la ecuación la concentración de la sustancia c aparece multiplicada por la variación del nivel y la velocidad. Esto explica que el transporte de salinidad sea impulsado por las variaciones de nivel y velocidad del estuario. Como veremos, en este estudio trabajaremos con un tipo de estuario dominado por la influencia de la marea, por lo que será la principal responsable del comportamiento de la intrusión salina.

Para profundizar sobre la teoría de cálculo detrás de Delft3D-FLOW, se recomienda consultar el manual proporcionado por Deltares, la organización responsable del desarrollo del software.

3.2 Implementación de la zona de estudio

Para la implementación del modelo hidrodinámico será necesario definir el área de estudio, así como su discretización en un dominio acotado que se pueda tratar numéricamente. Una vez establecida la zona de estudio, se abordarán las condiciones de contorno e iniciales, seguido de un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros para su correcto ajuste y posterior validación del modelo. Tras la implantación del modelo inicial, se propone el forzamiento del modelo numérico a los distintos escenarios de estudio alterando sus condiciones de contorno, como por ejemplo, realizando cambios en la batimetría para simular el efecto de los dragados.

3.2.1 Modelo de estuario ‘quasi-idealizado’. Forma en planta y aspectos generales.

De acuerdo con la definición del concepto de estuario ideal, tal y como se abordó en el apartado 2.5, se trata de un modelo de estuario que se encuentra en condiciones ideales, y que nos sirve de referencia para el análisis de estuarios reales. Esto permite clasificar el comportamiento de los estuarios en función de sus características morfológicas y los tipos de forzamientos, de naturaleza variable, a lo que están sometidos, que los alejan de su equilibrio dinámico y un comportamiento síncrono.

Ahora bien, este trabajo se enfoca en un análisis general de los cambios en la distribución de salinidad derivados de cambios en el perfil longitudinal de estuarios aluviales, por lo que no nos centraremos en un estuario en concreto, sino en describir un comportamiento generalizado y aplicable. Para lograr esto, se recurre a la utilización de la geometría idealizada, que es una forma sencilla de modelar el estuario y nos permitirá identificar tendencias. De ahí la relevancia del entendimiento de un estuario ideal, dado que nos interesa apoyarnos en este concepto para partir de un modelo de estuario en condiciones razonablemente ‘intermedias’ que puedan adaptarse para el estudio de un caso específico mediante el ajuste de parámetros físicos. En base a este objetivo, partiremos de un modelo de estuario quasi-idealizado desarrollado anteriormente (G. Martín Llanes, 2022) que nos permitirá situarnos en este escenario de trabajo, ya que este estudio no se centrará en la implementación de un modelo de estuario, sino en identificar la respuesta de estuarios ante cambios en su profundidad.

Ahora bien, se entiende que la instauración de un estuario completamente ideal es intrínsecamente imposible. Por ello, la configuración del modelo inicial sobre el que se ha realizado este trabajo, así como sus parámetros físicos y condiciones iniciales, se han obtenido a partir de un análisis de sensibilidad realizado en dicho estudio previo para la validación del modelo, el cual representa un caso de estuario de convergencia intermedia. Habiendo aclarado este punto, será necesario describir la elaboración y características del modelo de partida sobre el que se han realizado los cambios geométricos y sustenta los resultados obtenidos en los próximos apartados.

Este estuario tiene una longitud de 80km, y unos valores de longitudes de convergencia de $b = 156609m$ y $a = 108952m$. Dentro de este espectro estaría comprendido el estuario del Guadalquivir y el del Guadiana. La dimensión media de la boca del estuario (anchura) se estima de 1000m y con una de sección transversal de 3821m² en la desembocadura. Observamos las expresiones resultantes de esta geometría:

$$B(x) = 1000 \exp\left(-\frac{x}{156609.2151}\right)$$

En caso de que la profundidad fuese constante a lo largo del estuario, se podría aproximar la evolución del área como el producto de la anchura $B(x)$ por la profundidad h . No obstante, al introducirse una ligera pendiente del thalweg, como veremos, se realiza un ajuste exponencial de los puntos $A(x)$ calculados en Matlab para obtener una expresión análoga a la anterior, que es la siguiente:

$$A(x) = 3820.976 \exp\left(-\frac{x}{108952.7580}\right)$$

Es importante subrayar que, en los estuarios reales, tanto la geometría en planta como la longitud de convergencia b serán variables a lo largo de su desarrollo y en el tiempo, lo que dificultaría notablemente su modelado. Asimismo, este modelo describe una forma en planta rectilínea, despreciando la morfología meandriforme que se da en la mayoría de los estuarios aluviales; donde la suave pendiente y poder erosivo no es suficiente para mantener una trayectoria recta, resultando en una marcada sinuosidad. Ignorando este fenómeno, podemos simplificar el problema adoptando la geometría recta que describen de los estuarios ideales, que no consideran tramos meandriformes. Se visualiza en la figura 3.1 la forma en planta de los márgenes del estuario según la expresión anterior, junto con los márgenes exteriores; aspecto que abordaremos más adelante en la descripción de la sección transversal.

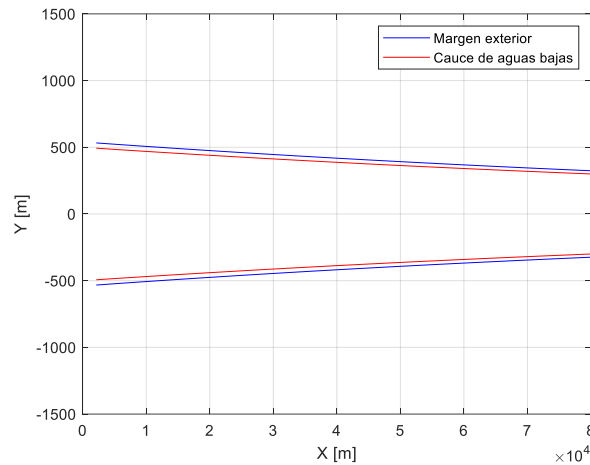


Figura 3.1 Vista en planta de los márgenes del estuario

Se ha visto en apartados anteriores que la profundidad del lecho es sensiblemente constante en estuarios aluviales, por lo que encontramos valores similares entre a y b . Sin embargo, se decide introducir una ligera pendiente del thalweg constante de 0,025 ‰ para simular de manera más realista la evolución del calado, considerando la presencia habitual de una suave pendiente en los estuarios reales. En efecto, la evolución real de la forma del perfil longitudinal de un estuario aluvial vendrá dado por las leyes de Fargue, que expone que la pendiente local del fondo del thalweg es directamente proporcional a la variación de la curvatura del eje. En cambio, al haberse establecido una geometría en planta recta, la ausencia de curvaturas no provocará fluctuaciones en la profundidad del fondo, y podemos asumir por lo tanto una profundidad constante o con pendiente muy reducida, variando linealmente de 8 a 10 metros a lo largo de los 80km del estuario.

Por otra parte, será necesario establecer la transición de la desembocadura del cauce del estuario en la zona marina, donde se localizarán las condiciones de contorno del régimen litoral (marea astronómica). Esto se modelará implementando un talud que simula la plataforma continental de la costa, con una pendiente del 2,5 ‰ y llegando a los 25m de profundidad. De tal forma, la batimetría de la zona litoral vendrá dada por la envolvente superior del plano de la plataforma continental y la superficie del cauce, tal y como se aprecia más adelante en la figura 3.5. Además, la inclusión de la plataforma continental supone un aumento en la dimensión transversal del dominio en planta, pasando de una anchura del cauce de 1km en la desembocadura (véase la figura 3.4) a unos 20km de extensión, reproduciendo así el estrechamiento que supone la presencia del cauce en comparación con el mar. Esta expansión del dominio puede contemplarse claramente a continuación en la figura 3.2.

3.2.1 Mallado y tiempo de cálculo

Habiendo establecido los aspectos generales de la forma en planta del estuario, se procede a definir el mallado para acotar las dimensiones del problema y discretizar los puntos de cálculo. Esto último se consigue con la subdivisión interna del dominio en un número de celdas adecuado, vertebrando la resolución del modelo.

La realización de la malla se desarrolló en el estudio antecedente al trabajo fue a través del propio programa de cálculo con la orden 'spline' del módulo Delft3D-RGFGRID, que permite definir los contornos del dominio con la intersección de secciones rectilíneas, y permitiendo su posterior refinamiento para aumentar la resolución. Cuanto más se refine la malla, resulta claro que obtendremos una mayor cantidad de resultados y con valores más precisos, lo que implica un aumento en el coste computacional del modelo y un mayor tiempo de cálculo. Por ello, será de vital importancia la adecuada disposición del mallado para optimizar el poder computacional en las zonas de interés donde se prevé mayor variación hidrodinámica, así como las zonas de estudio más relevantes como el tramo del cauce, donde se busca analizar la distribución de salinidad. Esto implica la posibilidad de anidar diferentes mallas con una discretización de celdas específica en cada una.

En base a estos criterios, se presenta la malla de la que partiremos en el desarrollo modelo, la cual fue inicialmente creada con un objetivo distinto al del presente trabajo, aunque se comporta adecuadamente para extrapolar el estudio al análisis de los cambios de profundidad. Esta se ilustra en la figura 3.2, donde efectivamente se aprecia un mayor refinamiento en la zona del cauce del estuario y su proyección longitudinal hacia la plataforma continental, que corresponde con el espacio donde se modelará el dragado y analizaremos la distribución de salinidad. El perímetro del dominio de la malla describe la forma en planta comentada en el apartado 3.2.1.

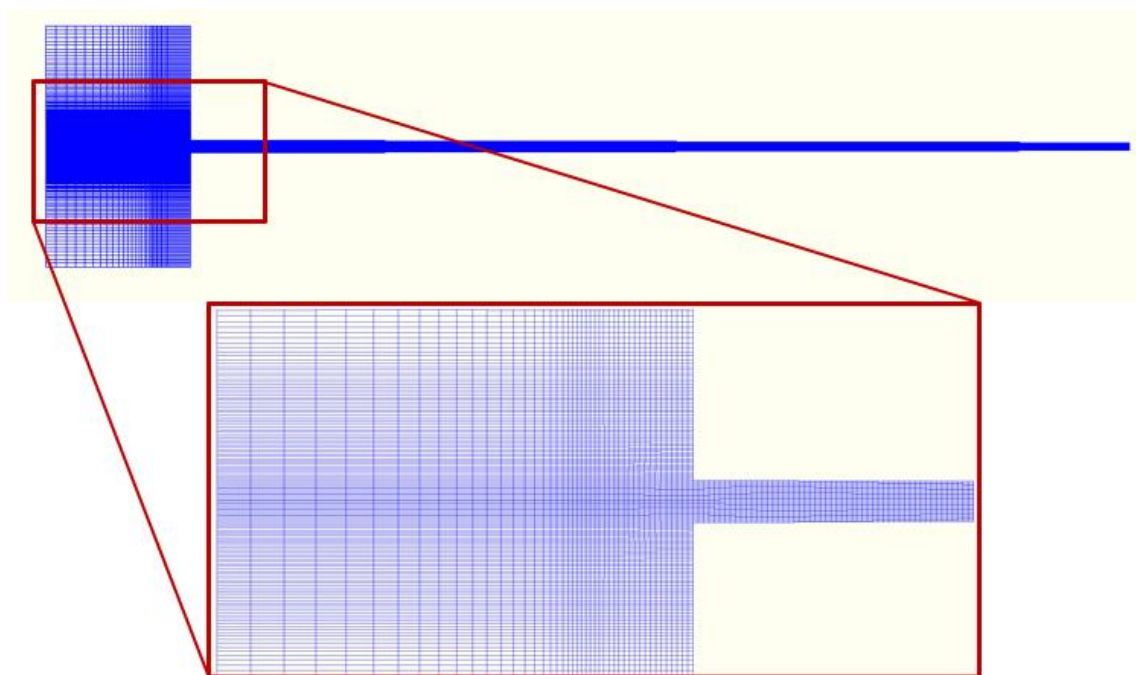


Figura 3.2 Dominio espacial: malla de cálculo del modelo

Resultando en un mallado con un total de 24300 celdas: 630 celdas en la dirección M y 189 celdas en la dirección N, reduciéndose esta última a 26 celdas en el tramo del cauce del estuario, que comprende desde la celda 83 a la 109.

Dado que trabajaremos con un modelo tridimensional, el mallado consta de 10 capas en la dirección vertical en todas las celdas del dominio, quedando definido el volumen de estudio. Delft3D realiza esta discretización vertical a través del esquema σ -layer, donde el mallado vertical se adapta a la batimetría del fondo con discretizaciones no uniformes de estas capas, que se extienden desde la superficie del agua hasta el fondo, como se expone en la figura 3.3. Normalmente, se aumenta la resolución del mallado en las proximidades de la lámina de agua y el fondo del lecho para modelar el movimiento de la superficie libre y los fenómenos de turbulencia del fondo con mayor precisión. Otro esquema comúnmente utilizado en los modelos hidrodinámicos es el z-layer. Este, resumidamente, utiliza una discretización regular en la profundidad, la cual no permite adaptarse a la topografía irregular del fondo y es en general menos preciso.

Ambos esquemas de modelado tridimensional se basan en la aplicación de las condiciones de continuidad entre las capas que definen cada plano 2D que conforman el dominio, además de asegurar el cumplimiento de las condiciones de frontera y forzamientos externos. Para la discretización de las capas se utiliza un enfoque basado en porcentajes de calado por cada celda.

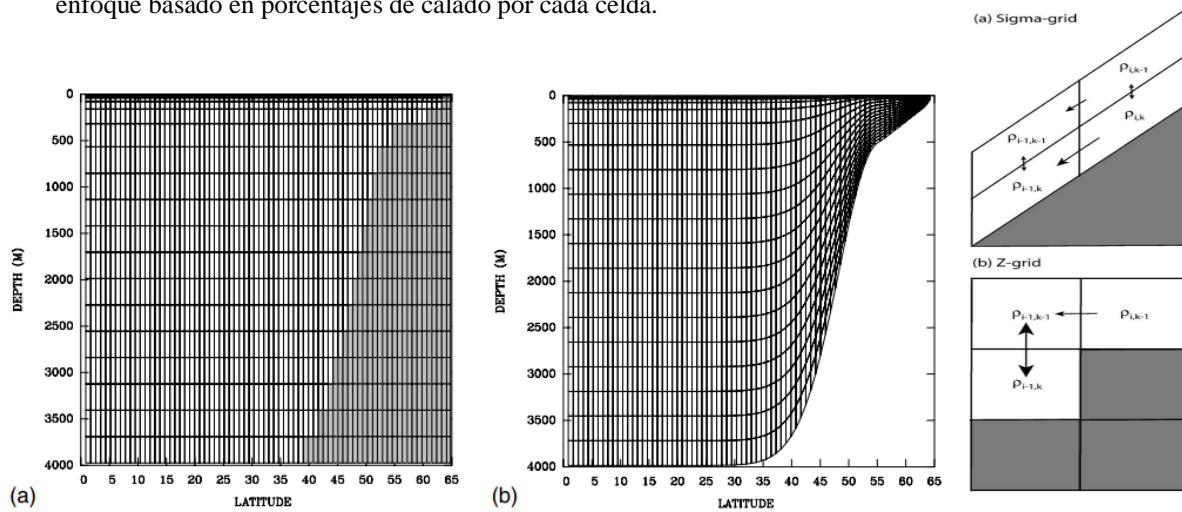


Figura 3.3 Esquema representativo de los sistemas de coordenadas sigma-layer (a) y z-layer (b).
Tal Ezer, George L. Mellor (2003)

Vertical grid structure and bottom shear stress for uniform channel flow, using (left) the σ -layer grid and (right) the z-layer grid.

De manera análoga con lo comentado sobre la resolución de la malla, el esfuerzo computacional dependerá a su vez del time step adoptado, que se refiere al intervalo de tiempo discreto en el que se realiza el sucesivo cálculo de soluciones en el dominio. Ahora bien, el tamaño del time step es un parámetro crítico en los modelos numéricos, debido a que la relación entre la discretización espacial y temporal del dominio influye en la precisión y estabilidad durante la convergencia de la solución. Por ello, se debe asegurar que el paso del tiempo o 'time step' tomado cumpla la condición de estabilidad de Courant, que se representa matemáticamente como:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|v \pm c|}$$

Donde Δt es el intercalo de tiempo, Δx el intervalo de espacio, o tamaño de celda, y v y c la velocidad y celeridad de onda respectivamente.

De este modo, número de Courant marca el límite superior del intervalo de tiempo interno que puede tomarse para asegurar la convergencia del modelo. En este caso, realizamos la comprobación mediante el módulo Delft3D-QUICKIN, donde puede verificarse el número de Courant de todas las celdas de la malla para un time step dado. En el software Delft3D, la experiencia demuestra que debe asegurarse un número de Courant menor a 10 para garantizar la estabilidad numérica. Esto nos lleva a la elección de un time step de 0.2min.

3.2.2 Batimetría inicial

La generación de la batimetría se desarrolló a través del software Matlab, donde podemos incorporar la malla previamente definida con la función 'wlgird', que permite importar las coordenadas del dominio en forma matricial. A partir de estos datos podemos asignar un valor de profundidad para cada una de las celdas generando así la batimetría del estuario.

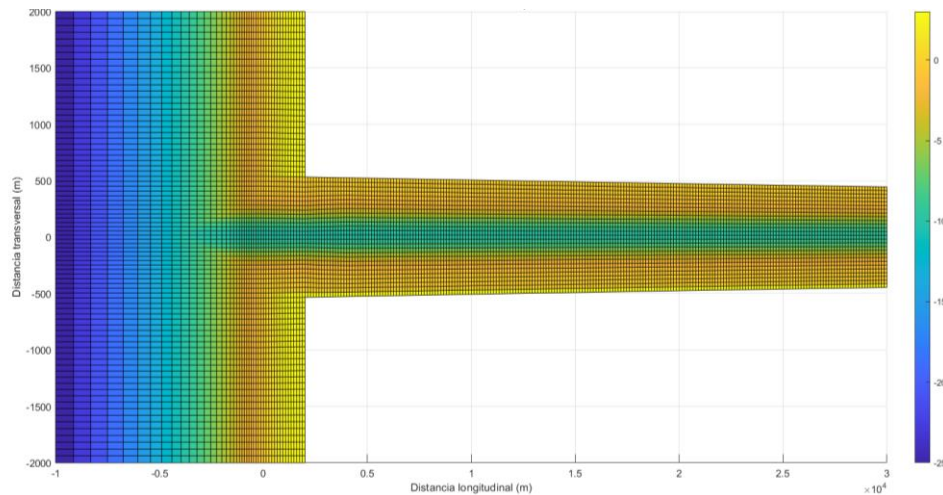


Figura 3.4 Batimetría del estuario en planta

La forma de la sección transversal del cauce se ha modelizado como una campana de Gauss, de manera que los puntos de la sección siguen una distribución normal. Esta curva será simétrica, con la máxima profundidad localizándose en el centro del cauce a lo largo del estuario siguiendo las leyes de Fargue, dado que se considera una forma en planta rectilínea. Las profundidades máximas representan el thalweg del estuario y aumentarán de forma lineal con una pendiente de 0,025 ‰ partiendo de una profundidad de 8m en la sección más aguas arriba. Estos valores corresponderán con la media de la distribución normal, donde la desviación estándar controla la amplitud del cauce. Debido a que el cauce contiene solamente 26 celdas en la dirección transversal, se ha decidido fraccionar esta parte del dominio en 5000 celdas para así minimizar el efecto de la interpolación lineal que realiza Matlab entre los puntos, aproximándonos mejor a la función real.

No obstante, esta interpolación de las profundidades del cauce conlleva que las celdas exteriores de las secciones del estuario tengan distintos valores, presentando márgenes discontinuos. Por ello, se han impuesto en estas celdas unos valores de profundidad fijos de -3m, asegurando así la continuidad del margen exterior con unos puntos secos (profundidad negativa). Observamos la sección transversal representativa del cauce a la izquierda de la figura 3.5.

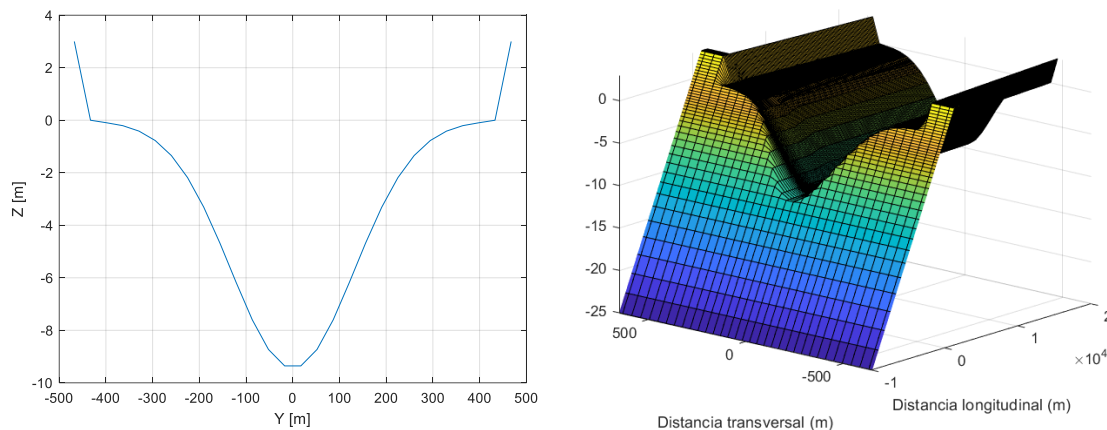


Figura 3.5 Sección transversal del estuario en la desembocadura (izquierda) y superficie escalada del estuario en la desembocadura (derecha)

La segunda parte del dominio será la implementación del talud que corresponde a la plataforma continental en el mar. Como se ha descrito, se modelará con un plano de pendiente 2.5 ‰ que parte de una profundidad de 25m en la sección más aguas abajo, hasta intersectar con el cauce del estuario. La batimetría resultante en esta zona vendrá definida por la envolvente superior de estas dos geometrías. Aunque las pendientes longitudinales son muy reducidas en ambas estructuras, se puede observar la marcada presencia del talud a la derecha de la figura 3.5, debido a la diferencia de escalas en su representación

Una vez definida la batimetría, se exporta esta matriz de profundidades como un archivo .dep para incorporarla a Delft3D, haciendo uso de la función 'wlddep' en Matlab.

3.2.3 Condiciones de contorno

Para establecer estas condiciones, primero será necesario indicar cada contorno en el dominio, los cuales serán sujetos a un forzamiento hidrodinámico. Se han introducido 4 contornos: uno en la sección más aguas arriba del estuario, otro en la sección más aguas abajo de la zona litoral, y otros dos en los contornos litorales que son perpendiculares a la alineación de la costa, situados en los exteriores de la plataforma continental.

En el contorno litoral correspondiente a la sección más aguas abajo del dominio introduciremos una marea astronómica. Esto supone el forzamiento del nivel medio del mar en este contorno, y su posterior propagación hacia el resto del dominio. Dado que nos encontramos en un caso generalizado, se introduce una marea semidiurna típica del Océano Atlántico, caracterizada por las siguientes constituyentes armónicas:

<i>Armónicos</i>	<i>Amplitudes (m)</i>	<i>Fases (°)</i>
M2	1	180
S2	0.25	90

Tabla 1 Constituyentes armónicas de la marea astronómica

Además, se mantiene una concentración de sal constante de 36psu en este contorno a lo largo de toda la simulación. Este es el nivel de salinidad común del agua del mar. Así, se analizarán las condiciones de transporte siguiendo la concentración de sal a lo largo del dominio en el tiempo.

En cuanto a los dos contornos laterales del litoral se introducirá una condición de contorno tipo Neumann, que consiste en la anulación de los gradientes de la superficie libre en la dimensión espacial transversal. En otras palabras, se impone unas condiciones hidrodinámicas constantes a lo largo de cada 'fila de celdas' perpendiculares a estos contornos, manteniéndose invariable cada sección transversal.

Por último, el contorno de carácter fluvial se verá forzado a un caudal de descarga que modela el régimen del río. En primera instancia, este hidrograma se mantendrá constante con un caudal fijo de 150 m³/s, representando el caudal ecológico habitual de un cauce regulado en cuencas hidrográficas de superficie elevada. En cuanto a las condiciones de transporte, imponemos una concentración de sal nula en este contorno, asumiendo que la intrusión salina no llegará al curso alto del estuario.

Como abordaremos más adelante, se evaluará la respuesta de los niveles de salinidad del estuario ante determinados pulsos de descarga fluvial. Esto simula el efecto de la posible descarga de una presa localizada aguas arriba del estuario, generando caudales mayores durante el vaciado del embalse. Esto se modelará modificando el hidrograma introducido en las condiciones de contorno aguas arriba.

3.2.4 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del modelo se introducen con un archivo .rst que corresponde a la situación final de una simulación anterior (G. Martín Llanes, 2022) que nos sirve como condición inicial *Hot Start*. Esta simulación piloto, de mayor duración, utiliza la batimetría inicial definida y permite alcanzar el régimen estacionario real partiendo de unas condiciones iniciales ficticias, manteniendo las condiciones de contorno y los parámetros físicos descritos en esta sección 3.2. Por lo tanto, nos aseguramos de partir de unas condiciones iniciales que se encuentran en equilibrio de acuerdo con la variabilidad temporal de las condiciones de contorno del sistema.

3.2.5 Parámetros físicos

Tras el análisis de sensibilidad que se llevó al cabo en la construcción del modelo empleado, se concluyeron los siguientes parámetros físicos para su validación. Estos parámetros reflejan las condiciones óptimas de acuerdo con discretización espacial descrita para obtener resultados que se ajustan al comportamiento esperable de este tipo de estuarios en un tiempo de computación razonable, además de representar valores medios dentro del rango de los estuarios aluviales.

Modelaremos la rugosidad a través del coeficiente de Chezy, introduciendo una fricción del fondo uniforme a lo largo del estuario con un valor de 75 en ambas direcciones (U y V), siendo consistentes con las hipótesis del estuario idealizado.

Las constantes hidrodinámicas incorporadas son la aceleración de la gravedad (9.81 m²/s), la densidad del agua dulce (1000 kg/m³), y la temperatura del agua (15°C).

Para el correcto modelado de los complejos mecanismos de mezcla responsables de la disolución y transporte de sustancias conservativas, será fundamental la definición de los parámetros de difusividad y viscosidad, que son términos de la ecuación de advección-difusión 3D. Estos parámetros indican la velocidad a la cual se propaga una determinada sustancia y por lo tanto disminuye su concentración debido a las reacciones que ocurren en el propio seno del fluido, siendo claves para nuestro estudio en la concentración de la salinidad.

Los valores de la viscosidad y difusividad vertical de remolino finalmente adoptados son de 0.0005 y 0.00025 m²/s respectivamente, siendo responsables de la turbulencia generada. Para los coeficientes de viscosidad y difusividad horizontales, se introduce un archivo .edy donde quedan recopilados todos los valores en el dominio, ya que estos son variables en el espacio siguiendo una aproximación lineal. En este estudio se emplea el modelo de turbulencia k-Epsilon, que es el modelo más común utilizado en dinámica de fluidos computacional.

Como se ha mencionado, la obtención de estos parámetros físicos es fruto del análisis de sensibilidad realizado en un estudio previo a este trabajo. Dicho estudio consistía en medir el efecto de la convergencia de los márgenes en la distribución de salinidad del estuario, persiguiendo así el mismo objetivo, pero con una modificación en la geometría distinta. Por ende, se concluye que los valores de difusividad y viscosidad son consistentes con el presente estudio.

3.3 Modelado de los dragados y estructura del trabajo

La estructura general que se adoptará a lo largo de la memoria consistirá en la evaluación de distintos casos de dragado, comparando los resultados de la intrusión salina entre los distintos escenarios planteados y con respecto a la batimetría original definida. Para ello, se procede a la descripción de la modelización del dragado en el estuario, partiendo de la geometría de la batimetría original.

La operación de dragado se llevará al cabo con el objetivo de asegurar la profundidad necesaria según el calado máximo de las embarcaciones que se pretenden introducir en el estuario hasta llegar al puerto (buque de diseño). La elección de este calado dependerá de la actividad del puerto y el alcance del proyecto de dragado. En la siguiente figura encontramos la relación general entre el calado de los navíos y la capacidad de transporte, expresada en número de contenedores TEU.

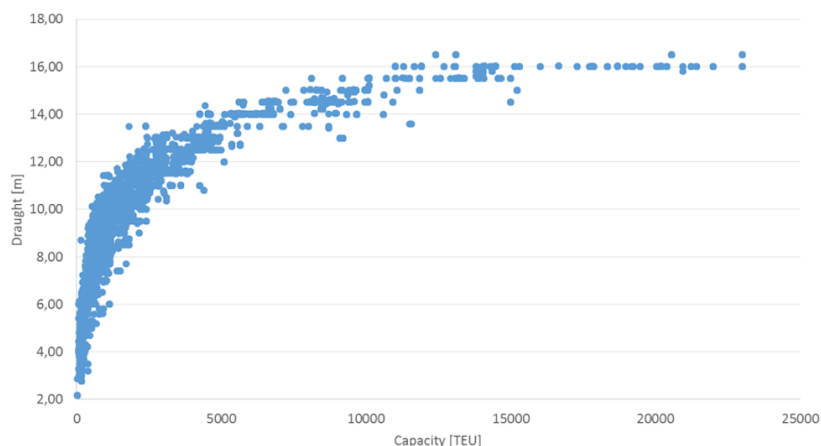


Figura 3.6 Relación entre calado y capacidad de transporte en TEU de contenedores desde 1964

La batimetría de origen se ha desarrollado con unas profundidades comprendidas entre 8m y 10m en el transcurso del thalweg, que corresponde con una capacidad de 750 TEU aproximadamente. Estas unidades nos brindan un orden de magnitud acerca de la capacidad de transporte del estuario, ya que también existen otros tipos de transporte aparte de la mercancía contenerizada. Por ejemplo, en el puerto de Sevilla la mercancía predominante son los graneles sólidos.

Para este trabajo, se decide realizar un dragado de proyecto que asegure un calado constante de 13 metros hasta la localización del puerto, lo que aumentaría la capacidad máxima de transporte alrededor 4000 TEU. Así, estableceremos diferentes casos de dragado con el mismo calado de proyecto entre ellos, pero llevándose al cabo desde la desembocadura hasta distintos puntos a lo largo del estuario, simulando los distintos emplazamientos del puerto interior. La elección de su ubicación será determinante en el cambio de la intrusión salina, ocasionando el impacto ambiental.

Los dragados se realizan normalmente con naves denominadas dragas, que pueden estar instaladas en embarcaciones o tierra firme, y dependiendo del tipo de material a remover podrán ser de distintos tipos: con pala, cuchara bivalva, cortadora, de succión en marcha... A pesar de ser depósitos aluviales, no hemos definido de manera explícita el material del lecho, dado que no consideraremos transporte de sedimentos en este estudio. A todos los efectos, se asume que las secciones dragadas del canal navegable quedarán definidas con un calado constante en aproximadamente los 100 metros de la sección central del cauce, como se expone en la figura 3.7.

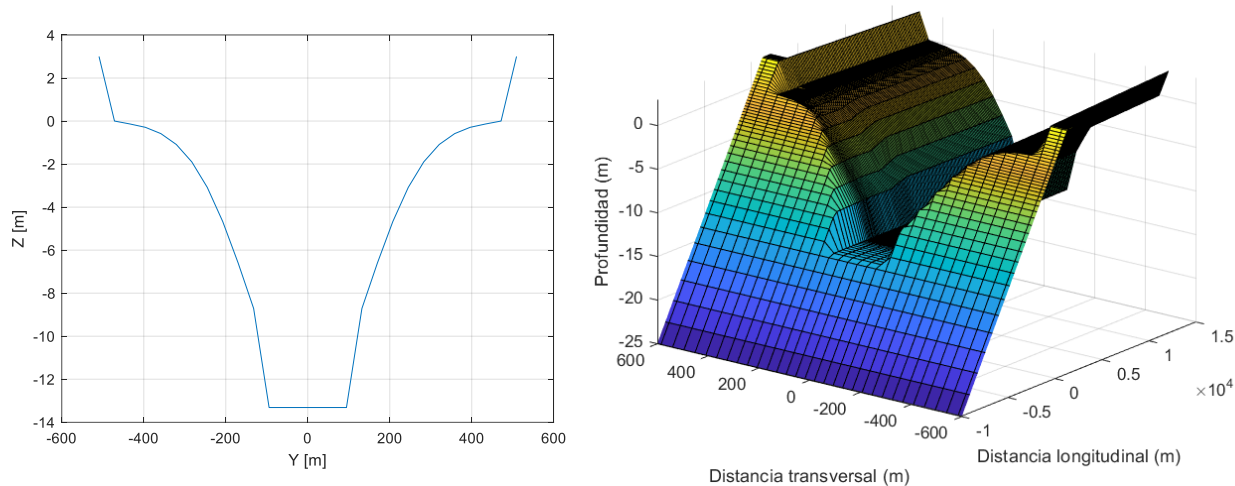


Figura 3.7 Sección transversal del estuario en la desembocadura (izquierda) y superficie escalada del estuario en la desembocadura (derecha) en escenarios de dragado

Esta simplificación será válida para el objeto de estudio de este trabajo, aunque es importante destacar la dificultad inherente de lograr una solera completamente plana del lecho durante la excavación. Esto se debe a la tendencia al deslizamiento de los materiales del fondo y los márgenes hacia la zona más profunda, debido al ángulo de rozamiento del material y la presencia de corrientes transversales.

La operación de dragado puede llevarse a cabo tanto desde la desembocadura del estuario como desde la ubicación del puerto. Dependiendo de cada caso, la elección dependerá de diversos factores logísticos, como la disponibilidad del buque, las condiciones de marea y el tipo de sedimento del fondo.

Una vez que se llega a la ubicación del puerto, se establece la transición entre la zona dragada y el resto del cauce inalterado aguas arriba. Para lograr esto, debemos garantizar la estabilidad del talud que implementaremos. El ángulo de rozamiento interno de los materiales granulares habituales en un estuario aluvial en condiciones saturadas oscila alrededor de los 30° . Por lo tanto, el ángulo del talud deberá ser inferior a 30° . En cualquier caso, el talud será considerablemente menor a este ángulo para poder minimizar las posibles variaciones hidrodinámicas en esta zona. Esto se debe a que la pendiente longitudinal del estuario es casi constante, por lo que un talud del 30% podría suponer una diferencia geométrica que obstaculice el flujo, ya que actúa como un escalón en el cauce produciendo la reflexión parcial de la onda de marea.

Como el calado de proyecto es de 13m, el desnivel buscado dependerá de la localización del talud (ya que existe pendiente del talweg), aunque será alrededor de los 3 metros. Debido a la discretización de la malla, el espaciamiento longitudinal de las celdas del dominio es en torno a 133m, por lo que se decide implementar el talud en 5 celdas de la dirección longitudinal del dominio, resultando en un talud de 1:200 aproximadamente para conseguir el calado de proyecto. Esto son unos 0.28 grados, garantizando la estabilidad y la correcta transición del dragado con el perfil natural del estuario durante unos 670 metros. Se ha realizado una interpolación lineal entre la última sección dragada y la primera sección trasversal del lecho inalterado a lo largo del talud de transición.

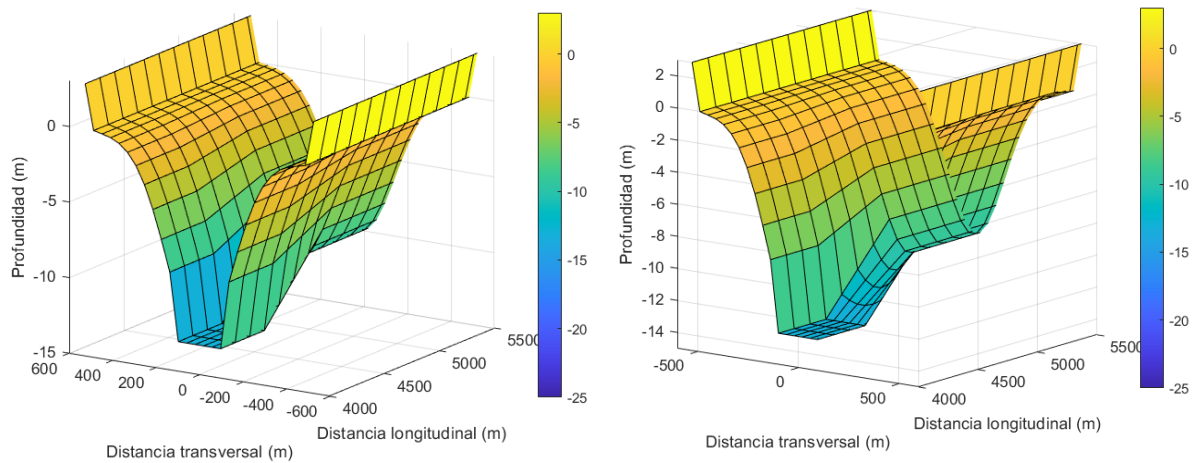


Figura 3.8 Representación del talud de transición del dragado

Quedando definida la modelización del dragado, se proponen distintos escenarios según la localización del puerto interior en el estuario. Estos serán 4 casos con unas distancias de 5000m, 10000m, 15000m y 20000m desde la coordenada longitudinal cero, que se ubica 2km aguas abajo de la desembocadura. El criterio tomado para elegir estas distancias ha sido en base a la máxima intrusión salina de la batimetría original, que, como se verá en el apartado de resultados, es de 13km aproximadamente. De esta manera, podemos analizar el efecto de dragar en puntos más aguas arriba o aguas abajo de la posición de la cuña salina.

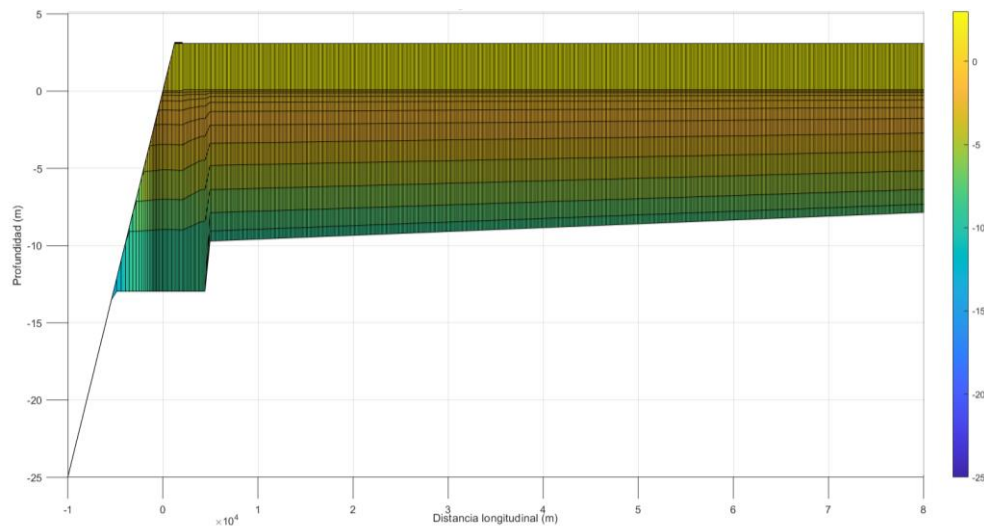


Figura 3.9 Perfil de la batimetría del modelo de dragado hasta 5000 metros

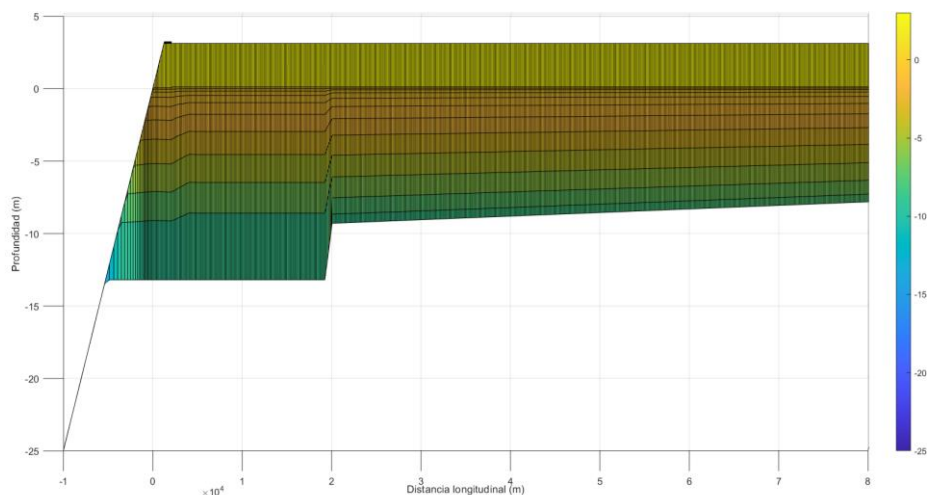


Figura 3.10 Perfil de la batimetría del modelo de dragado hasta 20000 metros

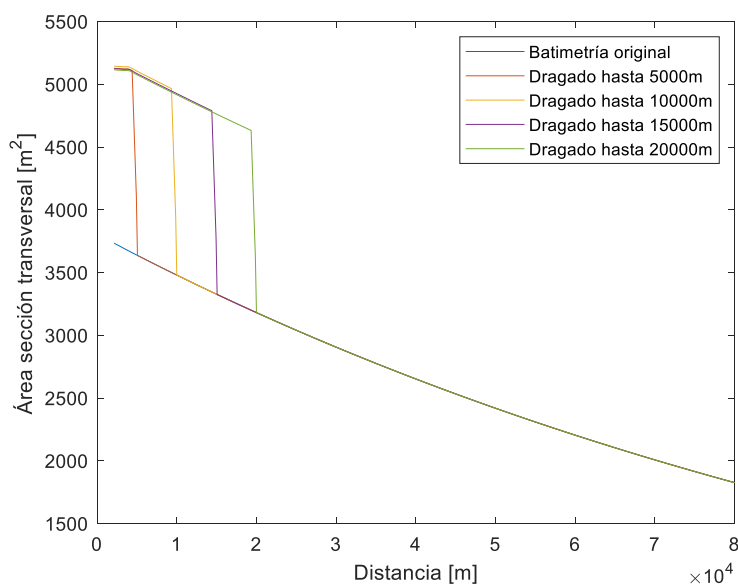


Figura 3.11 Evolución del área transversal de los distintos escenarios de dragado con la distancia del thalweg

Nótese en la figura 3.11 el crecimiento exponencial del área a lo largo del estuario, evidenciado por la expansión exponencial de los márgenes en consonancia con la forma que presentan los estuarios ideales. Debido a la configuración de la batimetría, la coordenada cero del eje longitudinal no corresponde exactamente con la desembocadura del estuario, la cual se considerará la primera sección transversal que no interseca con el plano de la plataforma continental, localizándose 2km aguas arriba del origen. Pese a esto, nos referiremos a cada caso de dragado según su distancia desde el origen o la desembocadura indistintamente, utilizando las distancias indicadas en la figura 3.11 como referencia. Con esto mantenemos la consistencia al abordar cada escenario de dragado durante la exposición.

Como se ha adelantado, se pretende complementar el estudio llevando al cabo un breve análisis del efecto que tendrán los pulsos de descarga en la distribución de salinidad. Esto se tomará como una medida para contrarrestar el posible aumento de la intrusión salina provocado por las operaciones de dragado, y al mismo tiempo pudiendo tener aprovechamiento hidroeléctrico. Sin embargo, esto no se considera realmente como una medida ambiental, ya que el equilibrio dinámico de la nueva geometría no se verá alterado por cambios temporales del caudal de descarga, y por lo tanto la posición de la intrusión salina volverá a su rango de equilibrio una vez que cese la curva del hidrograma.

En cambio, esta maniobra puede aprovecharse como una medida para mejorar las condiciones de la calidad del agua disponible para riego, así como para la gestión de las condiciones ambientales del estuario. En concordancia con el apartado 2.6.3, numerosos estudios (CITAR ALGUNO) respaldan que el pulso de descarga suele generar un retroceso temporal de la intrusión salina, como se sugiere en la figura 3.12. Este efecto haría posible la captación de agua dulce en aquellos puntos del estuario comprendidos en la longitud previamente salinizada. Por ello, será conveniente estudiar el tiempo de ajuste del sistema en alcanzar la mínima intrusión salina, como consecuencia del nuevo equilibrio hidrodinámico que resulta del cambio en las condiciones de contorno, así como el tiempo de recuperación para la resalinización asociado al caudal base, tras la atenuación del pulso de descarga. La determinación de estos tiempos permitirá definir las horas cuando se produce el retroceso de salinidad después de la descarga, y por tanto la reorganización de los horarios de captación de agua en las áreas que dependen de este entorno transitorio, con el objetivo de optimizar el uso de agua dulce. Esta operación puede automatizarse con el uso de compuertas automáticas que registren los tiempos de ajuste y estabilización.

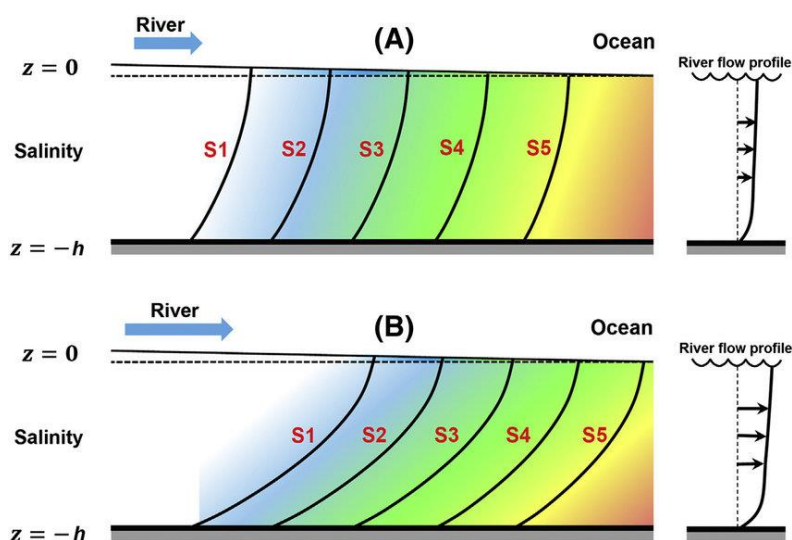


Figura 3.12 Esquema representativo del perfil de salinidad de estuarios frente a las descargas fluviales. Xiang Pu, John Z. Shi (2015)

Partiendo de un caudal base de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, estudiaremos la respuesta del estuario ante dos pulsos con una descarga constante de $750 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante un periodo de 5 días, siguiendo una forma de hidrograma rectangular.

El siguiente apartado tendrá por objeto presentar los resultados obtenidos en las simulaciones del programa Delft3D, acompañado del análisis de los resultados donde se profundizarán los aspectos comentados en esta sección.

4 Resultados

Inicialmente, analizaremos el efecto de los dragados introduciendo una descarga fluvial constante como condición de contorno aguas arriba, lo que conduce el comportamiento hidrodinámico del estuario a estar gobernado por la variabilidad de la marea astronómica. Debido a esto, se ha establecido un tiempo de simulación de 31 días en los modelos, de manera que podamos analizar un ciclo de marea completo, incluyendo dos mareas vivas y dos mareas muertas (que resultan de los armónicos M2 y S2). A su vez, se ha comprobado que este periodo de tiempo es suficiente para que la cuña salina alcance su posición de equilibrio conforme las nuevas condiciones geométricas, siendo menor al tiempo de ajuste del sistema definido anteriormente.

4.1 Puntos de observación

En Delft3D, los archivos de salida de los resultados generados en la simulación son fundamentalmente dos: los archivos “trim” y trih”. A modo resumen, el archivo “trim” (Trimmed NetCDF file) contiene toda información detallada sobre los resultados en cada punto de la malla y en cada instante de tiempo. Por el peso computacional que conllevan este tipo de archivos en simulaciones de gran escala, como es nuestro caso con 1 mes de simulación para una malla extensa, se puede consultar alternativamente el archivo “trih” (Trimmed Hydrodynamic file), que es una versión comprimida del archivo “trim” más manejable.

Mientras que el archivo “trim” contiene la información en todo el dominio, el “trih” muestra los resultados hidrodinámicos en puntos de observación específicos que se han definido en la malla. Esto permite aligerar considerablemente el peso del archivo, centrándonos únicamente en los puntos de interés o las estaciones de monitoreo seleccionadas. De este modo, se han definido puntos de observación a lo largo del talweg del dominio, uno por cada sección transversal en la celda central. Estos puntos de observación recogen los resultados de las 10 capas que contiene cada celda en la dimensión vertical, por lo que obtenemos la representación completa del perfil longitudinal del thalweg.

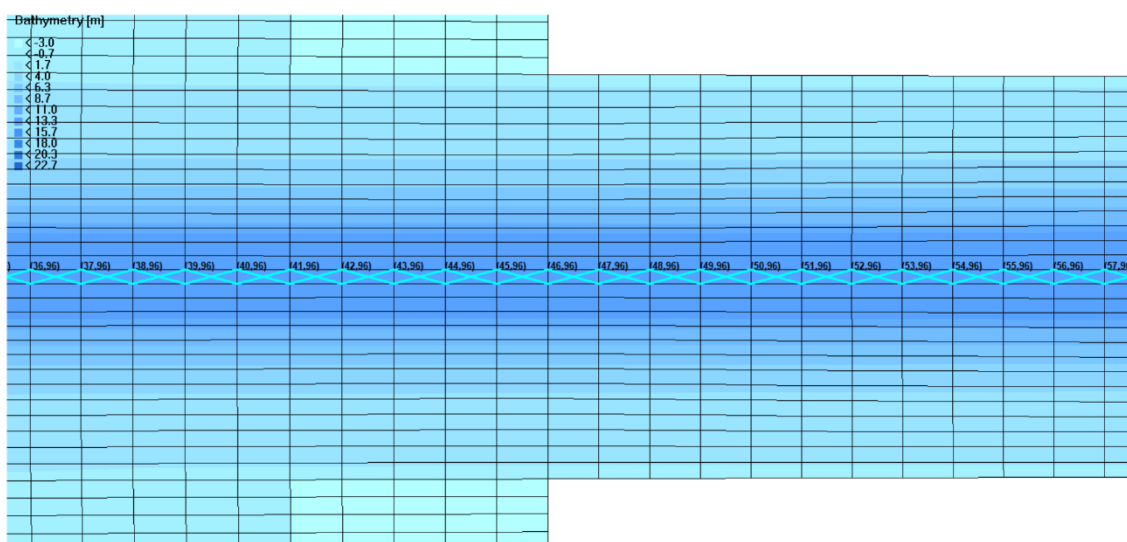


Figura 4.1 Localización de los puntos de control a lo largo del thalweg

4.2 Escenario original

Antes de pasar con los resultados específicos de cada escenario de dragado, será conveniente analizar la hidrodinámica de la batimetría original, ya que representa la geometría del equilibrio natural del estuario ‘quasi-idealizado’, y corresponde con las condiciones iniciales de cada caso modificado. Por ello, primero es necesario examinar el estuario original en régimen ordinario para el adecuado análisis del resto.

4.2.1 Hidrodinámica

Como se ha comentado a lo largo del documento, es predecible que la marea astronómica sea el principal agente regulador de la hidrodinámica del estuario, especialmente cuando la dinámica fluvial se mantiene constante, como ocurre en esta simulación, y sin presencia de oleaje. Esto se puede comprobar si representamos la evolución de los niveles del estuario, en la figura 4.2, donde se observa un comportamiento notablemente sinusoidal por la influencia oscilatoria de la marea.

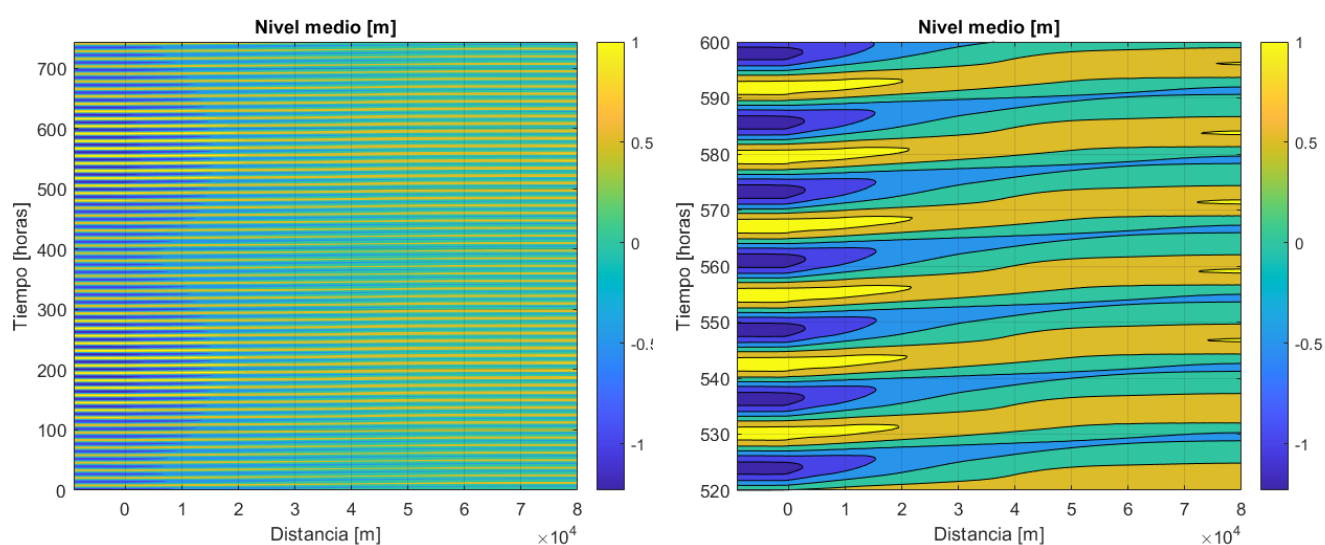


Figura 4.2 Evolución espaciotemporal del nivel medio del estuario. Escenario original

A partir de esta gráfica de contorno se puede extraer una gran cantidad de información acerca de la evolución espaciotemporal del nivel en el estuario. No obstante, la gran extensión del tiempo de simulación dificulta la visualización del comportamiento a escala intramareal. Por ello, será conveniente desglosar el gráfico en un intervalo de tiempo más corto, mostrando en la figura de la derecha un periodo de 37 horas que corresponde a la ocurrencia de la segunda marea viva.

Realizando un seguimiento de la envolvente de máximos valores del gráfico de la derecha a lo largo del thalweg, se puede apreciar la propagación de las perturbaciones generadas por la marea como condición de contorno aguas abajo, que, al ser la fuente de mayor componente energética en nuestro caso, tiene gran influencia en la zona superior del estuario. La velocidad a la que avanzan estas perturbaciones aguas arriba está determinada por la inversa de la pendiente de las envolventes (ver la disposición de los ejes del gráfico). Si bien se señala la propagación hacia aguas arriba de las crecidas de pleamar y bajamar a través del conjunto de puntos de mayor y menor valor, respectivamente, se percibe una atenuación general de las ondas de marea ocasionada por la fricción en el estuario. Asimismo, nótese que se produce un ligero aumento del nivel en la zona superior del dominio, lo cual puede atribuirse a la influencia de la descarga fluvial y la reducción de la sección transversal, que contribuye al aumento de la lámina de agua en esa zona.

Se puede constatar esta información representando la evolución de la amplitud de la onda de marea. Para ello, se realiza un análisis armónico donde identificamos que el armónico de mayor influencia es el M2, al tener una marea principalmente semidiurna. Debido a la ausencia del oleaje y viento en la simulación, y teniendo una descarga fluvial moderada, no se espera una contribución significativa de marea meteorológica, lo que permite concluir que la componente de marea M2 será una buena aproximación del nivel real del estuario. Bajo esta premisa, analizaremos la evolución de las amplitudes y fases de las constituyentes M2 y M4. Este último está asociado con las interacciones no lineales de la fricción del cauce y nos servirá para calcular la asimetría de marea más adelante.

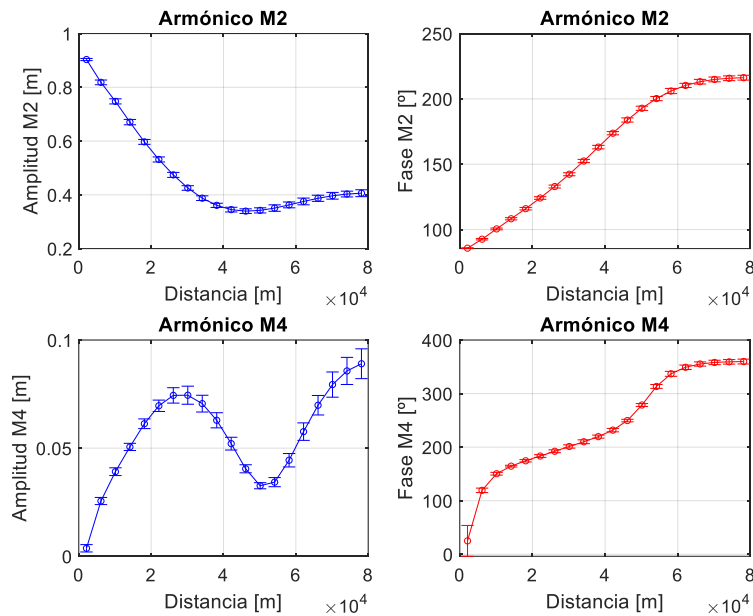


Figura 4.3 Variación de las amplitudes y fases de las constituyentes M2 y M4. Escenario original

Tal y como se comentó en apartados anteriores, se confirma que a pesar de haber sido consistentes con las relaciones geométricas que describen los estuarios ideales en la construcción del modelo, nuestro estuario se aleja de encontrarse en condiciones ideales. Los estuarios ideales se caracterizan por una amplitud y carrera de marea constantes a lo largo de su eje longitudinal, teniendo un comportamiento síncrono. En cambio, nuestro estuario se encuentra principalmente en régimen hiposíncrono, observando un descenso generalizado de la carrera de marea con la distancia longitudinal hasta la mitad de su extensión, aproximadamente, donde parece estabilizarse y la amplitud de marea aumenta pasando a ser hipersíncrono en el curso superior. Nótese que este comportamiento se sustenta con lo visto en la figura 4.2.

De acuerdo con el apartado 2.5, la tendencia hiposíncrona del estuario resulta del balance energético de la onda de marea M2, donde la disipación de energía por la fricción es superior a la ganancia de energía por unidad de anchura debido a la convergencia de los márgenes durante la propagación de la onda. En lo que respecta al avance de la onda de marea, la experiencia recogida en numerosos estudios demuestra que la descarga fluvial tiene el mismo efecto que la fricción, lo que debería contribuir en la atenuación de la amplitud M2 aguas arriba donde su efecto es mayor. En concreto, lo que se denomina flujo advectivo fluvial en la ecuación de advección-difusión 3D se opone al término de transporte hacia aguas arriba, afectando al avance de la onda de marea y la intrusión salina. De igual manera, la rugosidad del cauce tendrá un mayor efecto en la zona aguas arriba debido a la reducción de las profundidades.

En este sentido, sería de esperar una mayor disminución de la amplitud de onda aguas arriba, al contrario del pequeño repunte que observamos en la gráfica. No obstante, aunque la convergencia del estuario sea constante, cabe destacar que la función es exponencial negativa, por lo que la reducción del ancho es muy fuerte cuando nos encontramos aguas arriba, provocando una mayor reducción de la sección transversal. Esto implica que la energía se concentra en una superficie más pequeña. Por lo tanto, si la concentración energética es mayor que el aumento relativo de la fricción por estrechamiento de la sección el nivel

aumenta, a lo que se suma el efecto de la descarga (caudal entrante) en una superficie menor. Esto hace que el nivel aumente y se vea reflejado en el análisis armónico como una suavización en la atenuación de la M2. Así, a pesar de que el comportamiento hipersíncrono de esta zona difiere con el efecto sumidero de la descarga fluvial, vemos que, por cuestiones de la geometría en equilibrio con la fricción, la reducción de la sección y la propia descarga provocan un aumento de nivel.

Por otro lado, sí podemos contemplar este efecto fijándonos en el aumento del armónico M4 en la zona superior del estuario, donde se reduce la profundidad del lecho y por lo tanto el efecto de la fricción en combinación de la descarga fluvial es mayor. En esta zona notamos un crecimiento de las barras de error lo que señala una mayor incertidumbre en los resultados, aunque en líneas generales no afecta a evolución comentada.

Con los valores de la fase de la constituyente M2, puede calcularse cuánto tiempo tarda la marea en propagarse aguas arriba desde la desembocadura. Esto se puede hacer midiendo la diferencia entre las fases de dos puntos, dado que el desfase un ciclo completo de 360° corresponde con periodo de 12.42h, que será el tiempo de propagación de la onda. Además, conocidas las fases de los armónicos M2 y M4 podremos determinar el desequilibrio llenante/vaciante posteriormente.

Se representarán los resultados de la asimetría de marea y la relación llenante-vaciante del estuario. La asimetría nos indica si la oscilación del nivel en los ciclos de la marea es o no simétrica en relación con el nivel medio del mar. También se aplica al campo de velocidades, estableciendo la dirección de las corrientes y el transporte neto de sedimentos. Se puede calcular con la siguiente expresión:

$$asimetría = \frac{\eta_{M4}}{\eta_{M2}}$$

Para deducir si predomina la marea llenante o vaciante:

$$|2\phi_{M2} - \phi_{M4}|$$

De manera que si obtenemos un desfase entre $0-90^\circ$ y $270-360^\circ$ domina la vaciante, y si es entre $90-270^\circ$ domina la llenante. Y cuando es exactamente 90° o 270° hay igualdad en llenante y vaciante.

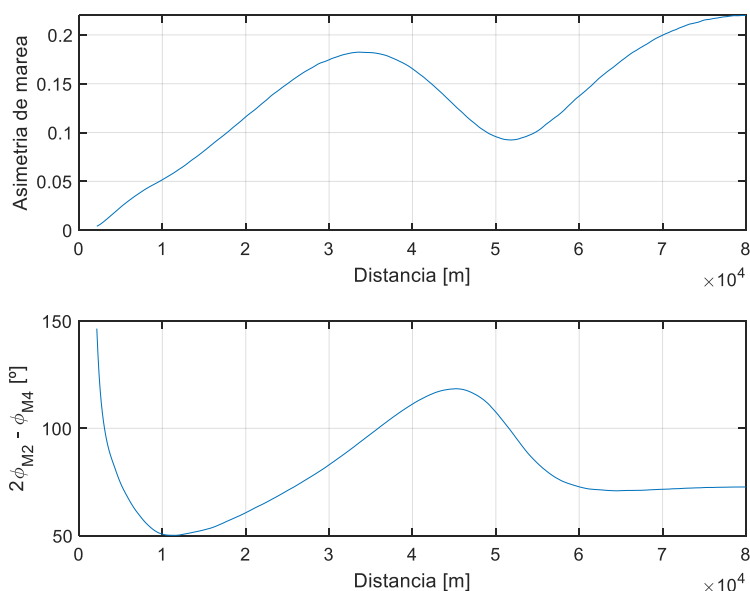


Figura 4.4 Variación de la asimetría de marea y el desequilibrio llenante-vaciante. Escenario original

A valores más altos de la asimetría, mayor es la distorsión de la propagación de la onda de marea en el estuario. De este modo, la figura 4.4 ilustra cómo la asimetría aumenta aguas arriba donde, en general, el efecto de la fricción y por consiguiente la amplitud M4 aumenta. Así pues, este gráfico tiene gran semejanza con la evolución de la amplitud M4. Además, hemos visto que el estuario es en su mayor parte hiposíncrono con una disminución de la amplitud M2, lo que contribuye en el aumento de la asimetría a medida que se avanza aguas arriba donde existe mayor carácter fluvial.

Uno de los parámetros hidrodinámicos más importantes para el análisis de salinidad será el prisma de marea P_t , que determinará el volumen de agua salada que entra en el estuario durante un ciclo de marea completo. P_t puede aproximarse con la expresión:

$$P_t \approx A_0 E_0 = 1.08 A(x) \frac{U(x) T}{\pi}$$

Donde $A(x)$ es el área de la sección transversal, $U(x)$ es la amplitud de la velocidad de marea y T es el periodo de la onda de marea. Consideraremos las amplitudes y periodo de onda (12.42h) correspondientes al armónico M2, que es el más representativo de nuestra marea. Por otra parte, podríamos calcular el P_t apoyándonos del modelo midiendo el caudal que atraviesa una sección de control localizada en la boca del estuario durante un ciclo completo. Sin embargo, nos interesará representar la evolución de la velocidad $U(x)$ y el área $A(x)$ más adelante para analizar la variación del prisma con los dragados, que, como veremos, es principal responsable del aumento de la intrusión salina. Así pues, se contempla la evolución espacial de estos parámetros en la batimetría original

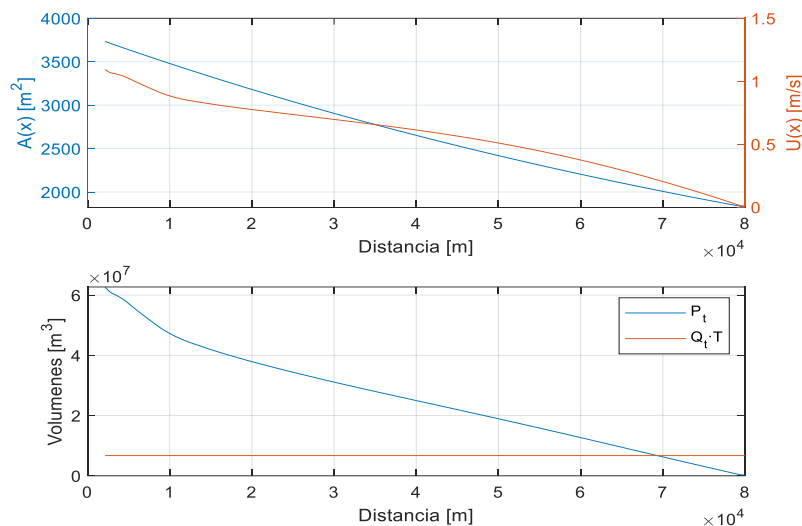


Figura 4.5 Evolución de la amplitud de la velocidad y área de sección transversal con la distancia (arriba), y variación del prisma de marea y volumen de agua dulce en el estuario (abajo). Escenario original

Se ha incluido en el gráfico inferior de la figura 4.5 el volumen de agua dulce del aporte fluvial, de manera que podamos compararlo con el volumen de agua salada que entra al estuario durante un ciclo de marea. Al tener un caudal de descarga fijo de 150 m³/s, el volumen de descarga permanece constante a lo largo del estuario, ya que será el producto del caudal y el periodo de la componente de marea M2 (12.42h). El cociente de estos dos volúmenes representa el número de estuario, definido en el apartado 2.6.2, que nos indica la relación entre la energía procedente del aporte fluvial y litoral, y nos ayuda a predecir el proceso de mezcla entre agua dulce y salada. Fijándonos en la figura 4.5, el número de estuario o de Canter-Cremers es reducido debido a la dominancia de la dinámica litoral en el sistema, lo que favorece la homogeneidad de la mezcla en el estuario. Este número alcanza la unidad aproximadamente en el km 70, a partir del cual predomina el régimen fluvial y se produce un ligero aumento del nivel por la influencia de la descarga, tal y como señalamos en la figura 4.2 y la figura 4.3.

4.2.2 Salinidad

En vista de la dominancia de la marea en la hidrodinámica del estuario, puede intuirse que los niveles de salinidad experimenten un comportamiento oscilatorio, impulsado por las corrientes inducidas por la variabilidad de la marea. Esto puede comprobarse en la figura 4.6, mostrando la evolución espaciotemporal la velocidad y salinidad del estuario. Se ha representado la salinidad hasta el kilómetro veinte, dado que aguas arriba de este punto la salinidad es prácticamente despreciable.

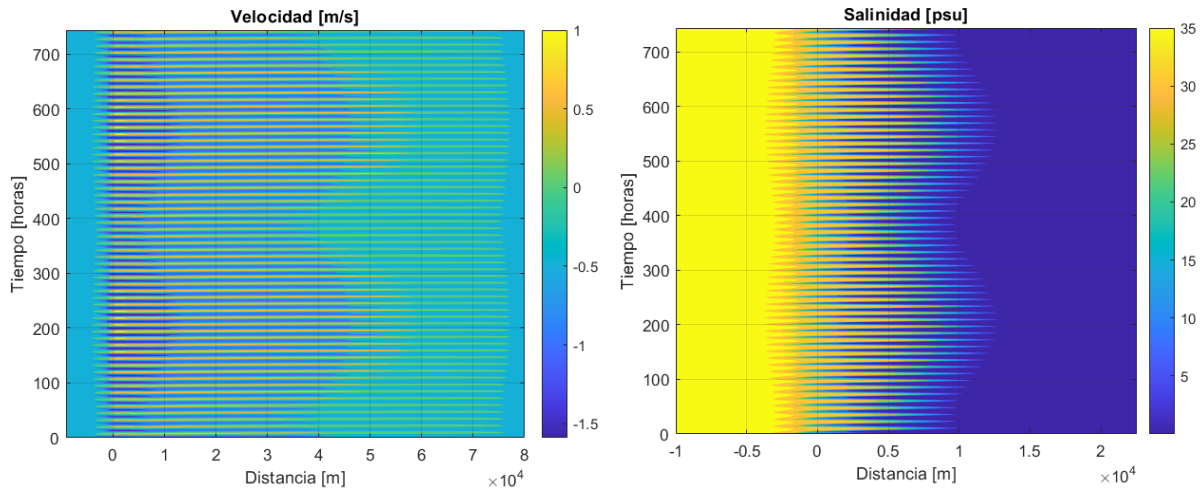


Figura 4.6 Evolución espaciotemporal de la velocidad (izquierda) y de la salinidad (derecha) del estuario. Escenario original

En efecto, se observa un carácter doblemente periódico en la oscilación de las velocidades y la salinidad, que se explica por la doble periodicidad asociada a la marea introducida. Así, los gráficos de contorno representados tanto del nivel, velocidad y salinidad manifiestan esta frecuencia tanto a nivel intramareal (pleamares y bajamares) como intermareal (mareas vivas y muertas).

De la figura 4.6, nos interesará hacer un seguimiento de la intrusión salina a lo largo del tiempo, la cual indica la penetración del agua salada e impacto ambiental generado aguas abajo de dicho punto. Recordemos que la intrusión salina se ha establecido como la posición del eje longitudinal del estuario que tiene una concentración del 10% del agua del mar, equivalente a 3.6psu. Debido a la forma de los gradientes de densidad y a los patrones de circulación longitudinal, normalmente la máxima intrusión de la cuña salina se localiza en el fondo del cauce, como vemos en la figura 3.12, que representa el perfil típico de la distribución salina. De esta manera, y como comprobaremos en la figura 4.9, hemos calculado la intrusión salina en la capa 10, que es la próxima al lecho, lo que nos deja en el lado de la seguridad. A continuación, representamos la evolución de la intrusión comparando con respecto al nivel y velocidad en la desembocadura del estuario.

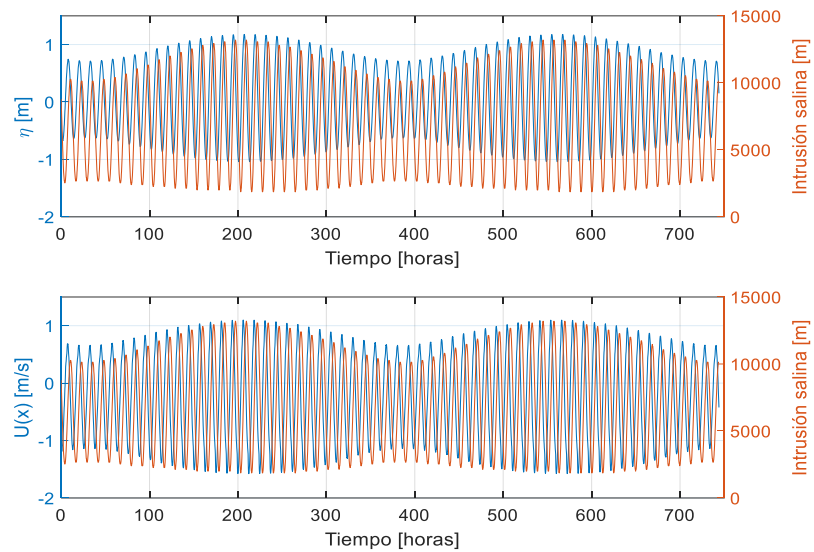


Figura 4.7 Evolución del nivel y la velocidad con la intrusión salina en la boca del estuario. Escenario original

En primera instancia, contemplamos un comportamiento doblemente periódico en consistencia con lo comentado en la figura anterior. Además, se evidencia la influencia de la marea astronómica en la evolución de la intrusión salina, notándose una alineación vertical razonable a nivel intermareal con los niveles y la velocidad, coincidiendo la máxima y mínima intrusión cuando se producen las mareas vivas. Finalmente, se determina que la máxima intrusión alcanza los 13200 metros, que son 11200 metros desde la desembocadura. Si nos fijamos en el envolvente inferior, la intrusión mínima llega a retroceder hasta los 1865 metros, es decir, 135 m aguas abajo de la boca del estuario. Para visualizar la variación de los resultados en escala intramareal representamos los mismos gráficos en el intervalo de tiempo correspondiente a la segunda marea viva.

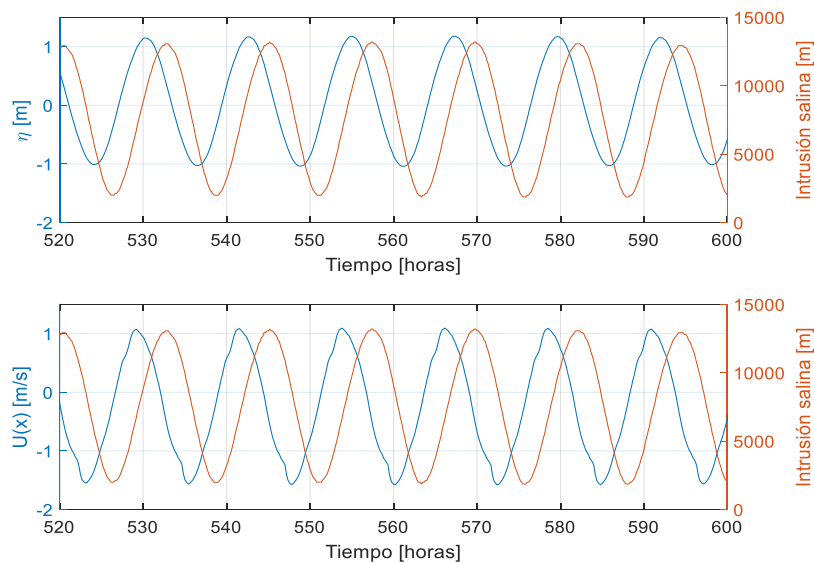


Figura 4.8 Vista ampliada de la evolución del nivel y la velocidad con la intrusión salina en la boca del estuario. Escenario original

Como puede verse ahora, existe un desfase entre la oscilación de la intrusión salina con respecto al nivel y la velocidad, las cuales tienen una fase similar entre sí, revelando que se trata de una onda de marea casi progresiva en la desembocadura. Este desfase debe principalmente a dos factores clave. El más significativo será el tiempo de propagación de la onda de marea hasta el emplazamiento de la cuña salina, que puede distanciarse hasta 11200m de la desembocadura. En segundo lugar, el tiempo de reacción de los niveles de salinidad en alcanzar la máxima intrusión, que dependerá de la difusividad y la dinámica de transporte del estuario, dado que los procesos de mezcla entre agua dulce y salada pueden causar un retardo en la respuesta de los niveles de sal, contribuyendo al desfase observado.

De esta manera, se observa un desfase de 2.67 horas entre los valores máximos de la intrusión y del nivel en la desembocadura. Dado que el nivel y la velocidad presentan un desfase de 1 hora, vemos que no se trata de una onda completamente progresiva, y por tanto el desfase entre la intrusión y la velocidad es de 3.67 horas. De este modo, se concluye que las corrientes del estuario y la dinámica de transporte no están acopladas. Además, puede observarse que las velocidades oscilan respecto un nivel medio menor que cero, lo que indica que prevalece la marea vaciante, acentuada por la descarga fluvial, con un transporte potencial de sedimentos hacia aguas abajo. Véase la figura 4.4, donde en la mayor parte del dominio tenemos resultados entre 0 y 90°, que indica marea vaciante.

Gracias a la determinación de estos tiempos de desfase, sería posible determinar la posición del frente salino con exactitud llevando al cabo un registro a través de mareógrafos en la desembocadura u otros puntos. No obstante, este método presentará limitaciones cuando la presencia de la marea meteorológica sea significativa en la contribución del nivel medio del mar, lo que podría afectar al desfase observado.

Será también conveniente representar el perfil de salinidad del estuario, aprovechando que los puntos de control del modelo están localizados a lo largo del talweg. Este gráfico resulta muy útil ya que nos permite visualizar la disposición de las isohalinas de forma análoga a la figura 3.12, evaluando si existen fuertes gradientes de salinidad o si la mezcla es homogénea a grandes rasgos. Además, se ha decidido incluir una sección de control ubicada en la desembocadura (2km aguas arriba del origen longitudinal) para contemplar de manera general la distribución transversal de la salinidad. Estas representaciones espaciales de la figura 4.9 corresponderán a un instante de tiempo específico, por lo que tomamos el instante cuando se produce la máxima intrusión salina, que será cuando ocurre la segunda marea viva más el desfase de 2.67 horas.

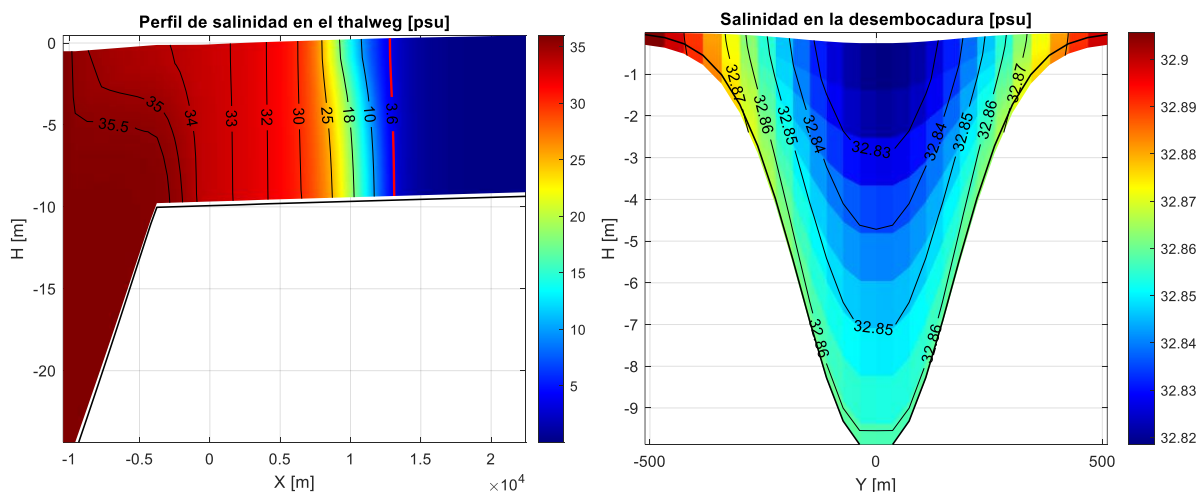


Figura 4.9 Distribución de salinidad del perfil del thalweg y la sección transversal de la desembocadura en el instante de máxima intrusión. Escenario original

El perfil de salinidad obtenido corresponde en líneas generales con la configuración típica de los estuarios, como vimos de manera representativa en la figura 3.12, observando gradientes de densidad verticales con una mayor intrusión salina en las capas del fondo. Esto es debido, entre otros factores, a la circulación interna del estuario (entrada de agua salada por el fondo y salida de agua dulce por la superficie, por la diferencia de densidad). De esta manera justificamos haber cuantificado la intrusión de la cuña con la salinidad de la capa del fondo, lo que también nos sitúa del lado de la seguridad ya que una mayor intrusión

implica un mayor impacto ambiental. Además, se destaca que nos encontramos con los mayores gradientes horizontales en las inmediaciones aguas abajo de la cuña salina, indicando una fuerte variación de salinidad en poca distancia. Esto resalta la importancia de un seguimiento adecuado de la cuña salina para garantizar la protección del medio ambiente.

Vemos que el perfil transversal de salinidad en la desembocadura se distribuye de manera simétrica y con una disposición de isolíneas análoga al campo de velocidades habitual del cauce de un río. Esto último refleja claramente cómo la dinámica de transporte de sal es impulsada por las corrientes del estuario. En efecto, como el instante de la máxima intrusión se da al inicio de la marea vaciante en la desembocadura (ver la figura 4.8), vemos cómo en el centro del cauce, donde las velocidades de flujo son mayores, los niveles de salinidad más bajos. Esta diferencia de las corrientes en la sección transversal genera un desfase en la distribución de salinidad, especialmente en los márgenes del estuario, dando lugar gradientes de densidad importantes que inducen un proceso de mezcla bidireccional. Este mecanismo se conoce como ‘tidal trapping’, y es uno de los procesos de mezcla dominantes en estuarios aluviales, especialmente en aquellos de grandes dimensiones y formas irregulares donde el agua pueda quedar “atrapada” durante los ciclos de marea.

Volviendo al perfil longitudinal de la figura 4.9, se señala la inclinación de las isohalinas aguas abajo de la desembocadura, en el régimen litoral, las cuales presentan una clara estratificación del flujo, con unos mayores gradientes verticales de salinidad. Por lo tanto, será conveniente cuantificar la estratificación mediante el número de Richardson para comprobar esta condición en el tiempo. No obstante, se obtienen valores inestables al calcular el número de Richardson de la expresión de Savenije en las simulaciones, por lo que se ha decidido no incluirlos en los resultados. En su lugar, se ha optado por representar la diferencia de salinidad entre la capa del fondo y de la superficie (ΔS), que también se considera un parámetro representativo de la estratificación. Esta elección evita los problemas de inestabilidad al no tener denominador, ya que no se producen divisiones por cero.

$$\Delta S = |S_{Fondo} - S_{Superficie}|$$

Para una mejor visualización del gráfico de contorno de la figura 4.10, se han excluido los valores cercanos a cero ($<10^{-6}$ psu), y se ha representado en un intervalo de tiempo adecuado que corresponde a la segunda marea viva. Debido a que a partir de los 15 km nos encontramos con agua dulce y los gradientes de salinidad son prácticamente nulos, como se aprecia en la figura 4.9, podemos acortar el eje horizontal del gráfico.

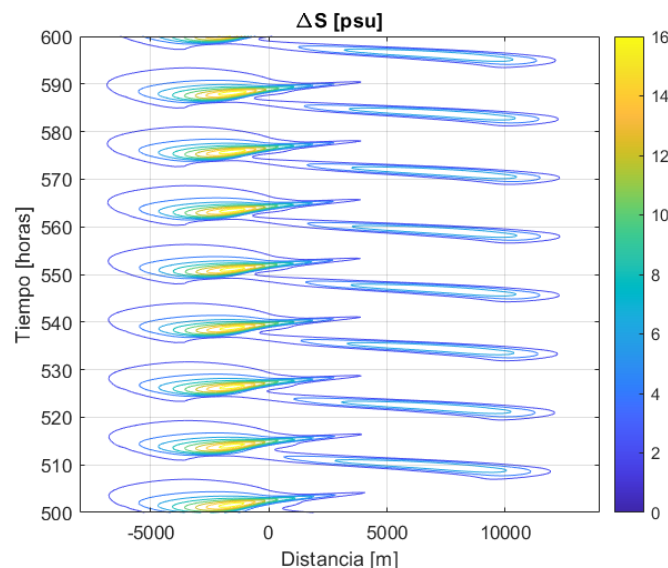


Figura 4.10 Evolución espaciotemporal de la estratificación con el parámetro ΔS . Escenario original

En consonancia con la figura 4.9, se puede observar que los valores máximos de la estratificación se encuentran en la zona litoral aguas abajo del dominio, aunque no se dan de forma permanente en el tiempo. En efecto, la mayor estratificación del flujo se produce durante la marea vaciante, como se puede observar si comparamos los tiempos con los de la figura 4.8, donde la diferencia de salinidad entre superficie y fondo alcanza sus valores máximos.

4.3 Análisis del dragado

Habiendo examinado de manera global la hidrodinámica y la distribución salina del estuario en su estado original, pasamos a analizar la respuesta de los niveles de sal a los diferentes escenarios de dragados que se han definido. En este apartado, nos enfocaremos de manera concisa en la comparación y el efecto que tienen los dragados en la dinámica del transporte.

En primer lugar, representamos la intrusión salina de cada escenario de dragado en el tiempo, incluyendo la batimetría original, en la figura 4.11. Para una mejor visualización, al igual que se hizo en figuras anteriores, se muestra la intrusión en un periodo menor cuando se produce la segunda marea viva, que será cuando se da la máxima intrusión de interés en este estudio.

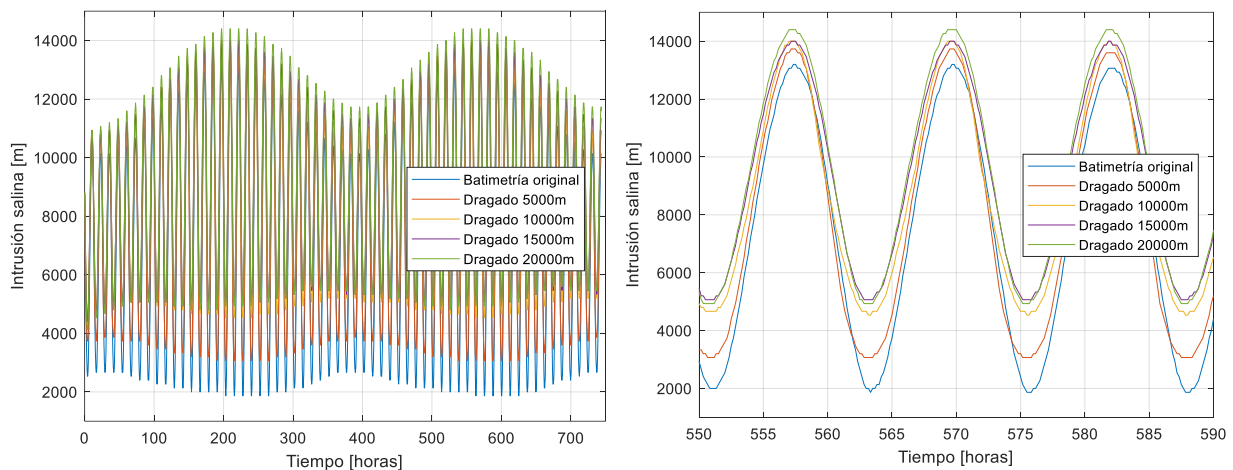


Figura 4.11 Evolución temporal de la intrusión salina de los diferentes escenarios de dragado

En vistas a los resultados, la figura 4.11 revela un aumento general de la intrusión salina cuanto mayor es la distancia dragada desde la desembocadura. De acuerdo con la hipótesis de aguas someras, el efecto de la fricción aumenta significativamente en condiciones de menor profundidad, ya que la superficie de contacto con el fondo aumenta en proporción a la profundidad del cauce, y por lo tanto la resistencia al flujo. Esto ya se vio reflejado en el apartado anterior, observando una atenuación de la onda de marea debido al efecto sumidero que supone la reducción de la sección del cauce aguas arriba, que, entre otros factores, aumentaba las interacciones no lineales de la fricción. Esto se traducía con un aumento de la amplitud M4 en el curso alto. En este sentido, al encontrarnos ahora con unas profundidades del lecho mayores en la zona dragada, el efecto de la fricción será menor en esta zona. Esto supone un aumento de la amplitud de la onda de marea y el campo de velocidades del canal de navegación en comparación con la batimetría inalterada, afectando la dinámica de transporte del estuario. Cuanto mayor sea la profundidad y la longitud dragada a lo largo del cauce, se concluye que menor será la fricción del estuario en términos generales, favoreciendo el término de transporte hacia aguas arriba y el aumento de la intrusión salina.

En el gráfico derecho de la figura 4.11, se observa que el avance de la intrusión salina no sigue una progresión constante a medida que aumenta la distancia de dragado en el estuario. En general, se puede apreciar que cuanto mayor es la distancia de dragado, el avance de la intrusión salina se produce en menor medida. De hecho, véase que la mínima intrusión del dragado 20000m es menor a la del dragado 15000m, lo que difiere con lo comentado en el párrafo anterior. Para cuantificar esta observación, la tabla 2 recoge los valores de máxima y mínima intrusión de cada caso, así como el avance respecto a la distancia dragada inmediatamente anterior.

	<i>Max X (m)</i>	$\Delta X (m)$	$\Delta X (\%)$	$(\Delta X)_{i-j} (\%)$	<i>Min X (m)</i>	$\Delta X (m)$	$\Delta X (\%)$	$(\Delta X)_{i-j} (\%)$
<i>Original</i>	13199				1865.1			
<i>5000</i>	13733	534	4.05	4.05	3067.7	1203	64.48	64.48
<i>10000</i>	14000	801	6.07	2.04	4532.4	2667	143.01	78.53
<i>15000</i>	14000	801	6.07	0	5065.3	3200	171.58	28.57
<i>20000</i>	14399	1200	9.09	3.02	4798.7	2934	157.29	-14.29

Tabla 2 Máxima y mínima intrusión salina de cada escenario de dragado

Debido a que el emplazamiento físico de la desembocadura de localiza 2km aguas arriba del origen, el primer dragado tiene una distancia de 3km y el segundo de 8km desde a desembocadura. Es por ello que se observa un mayor avance en el caso del dragado de 10000m en comparación con el de 5000m.

Es importante subrayar que, aunque utilicemos la intrusión salina como una medida rápida para evaluar el impacto ambiental del estuario, en realidad, la salinidad se distribuye de manera continua a lo largo del estuario de acuerdo con su configuración y perfil de salinidad, como se observó en la figura 4.9. En lugar de tener valores discretos, como se refiere el término de intrusión de la cuña salina, la salinidad varía gradualmente desde la desembocadura hasta la parte más interna del estuario. Esto nos lleva a deducir que, si bien los dragados son un medio impulsor del avance de sal, estos tendrán un mayor efecto en aquellas zonas donde los niveles de salinidad son mayores, al igual que no tendría ningún efecto aparente dragar en regiones donde los niveles son nulos. Siguiendo esta línea, resulta fácil entender que los dragados realizados cerca de la desembocadura tengan un impacto más significativo en la penetración de la sal en comparación con los dragados más hacia aguas arriba, donde los niveles de salinidad son naturalmente más bajos. En consecuencia, el avance de la intrusión salina es relativamente mayor en los dragados con menor distancia (partiendo desde la desembocadura), y se produce generalmente un mayor avance en la intrusión salina mínima en comparación con la intrusión máxima en todos los dragados analizados. Una vez que la distancia del dragado supera la posición de la cuña salina, como vemos, el avance de la intrusión apenas es significativo.

De este modo, los valores de intrusión parecen converger gradualmente hacia un valor máximo a medida que se incrementa la distancia de dragado, llegando a obtener intrusiones de magnitud similar, en función de la profundidad dragada. Es importante tener en cuenta que estos resultados están sujetos a cierta incertidumbre debido a la discretización espacial del dominio, con un tamaño longitudinal de celda de aproximadamente 133 metros. Por ello, se respalda la obtención de un avance nulo en el caso de la intrusión en el dragado de 10000m a 15000m, así como un ligero retroceso de la cuña salina en el dragado de 20000m en comparación con el dragado de 15000m. A pesar de que se esperaría una tendencia progresiva de avance de la intrusión salina con la distancia de dragado, con una disminución en la magnitud de dicho avance, vemos que con distancias de dragado considerables el orden de magnitud de la incertidumbre asociada puede ser mayor al avance real de la cuña salina, afectando la coherencia e interpretación de los resultados obtenidos.

Por otro lado, resultaría interesante de comprobar si al dragar suficientemente aguas arriba, hasta una distancia donde predomine la marea vaciante, se produciría un retroceso de la intrusión salina en comparación con distancias menores.

Se puede apreciar un leve desfase entre la oscilación de la intrusión de la batimetría original y los dragados, ya que estos últimos muestran una onda ligeramente adelantada en comparación con el caso original. Esto se explica por el hecho de que los dragados presentan una menor influencia de la fricción debido a su mayor profundidad, lo que resulta en un ligero aumento de la velocidad de propagación de las perturbaciones que movilizan el transporte de sal, como la onda de marea.

Como se ha observado, el impacto de los dragados en la intrusión salina está estrechamente relacionado con los niveles de salinidad en la zona que se realizan. Por tanto, será fundamental determinar la cantidad de agua salada que se introduce en el estuario a través del análisis del prisma de marea. El prisma de marea P_t , según la expresión definida en el escenario original, puede considerarse proporcional al producto del área de la sección transversal $A(x)$ y la amplitud de la velocidad de marea $U(x)$, entre otras aproximaciones. Como veremos, la representación de estos factores del prisma es merecedora de análisis, dado que contabiliza la relación entre la configuración geométrica del estuario y la velocidad, que es la variable hidrodinámica más importante en el transporte de sal, entre la turbulencia y otros procesos.

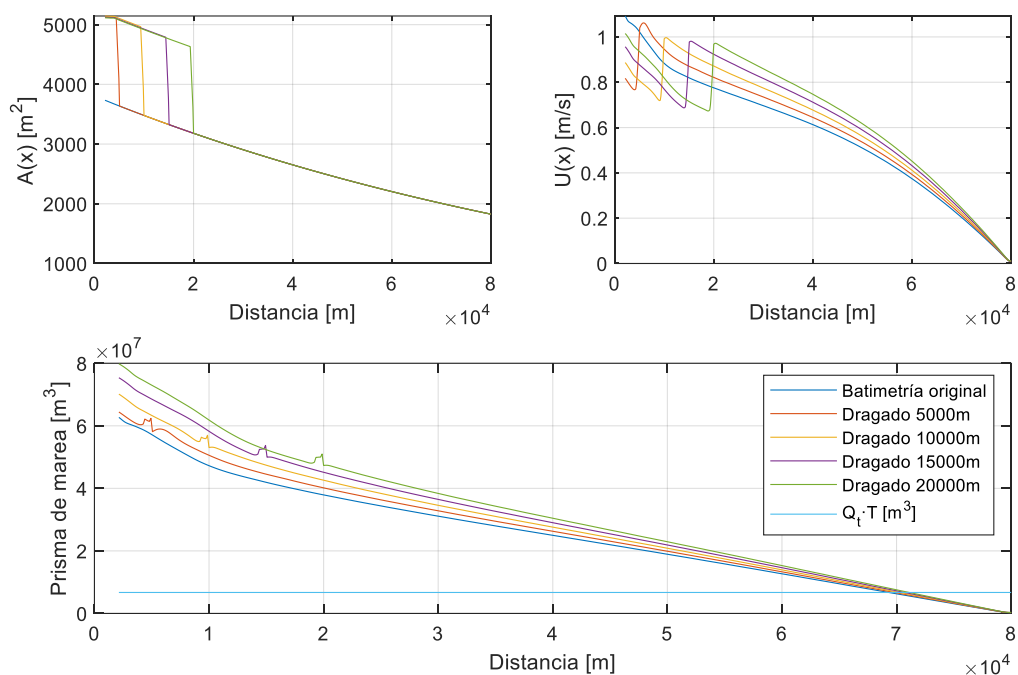


Figura 4.12 Relación entre las variaciones espaciales del área transversal, amplitud de la velocidad y prisma de marea con los dragados

La variación espacial del área de la sección transversal del cauce disminuye notablemente en la posición del talud de transición entre el dragado y el lecho inalterado, como puede verse en la figura 4.12. Esta reducción abrupta de la sección afectará notablemente a la hidrodinámica del estuario, viéndose reflejado en la variación de la amplitud de la velocidad en el gráfico de la derecha. Como se comentó en la figura 4.8, la onda de marea es sensiblemente progresiva en las proximidades de la desembocadura del estuario. A medida que avanza a lo largo del cauce, la velocidad de la onda disminuye debido a la fricción y, de manera similar a la hidrodinámica de un canal, experimenta un aumento repentino debido al estrechamiento del cauce cuando llega al talud, por la conservación del caudal.

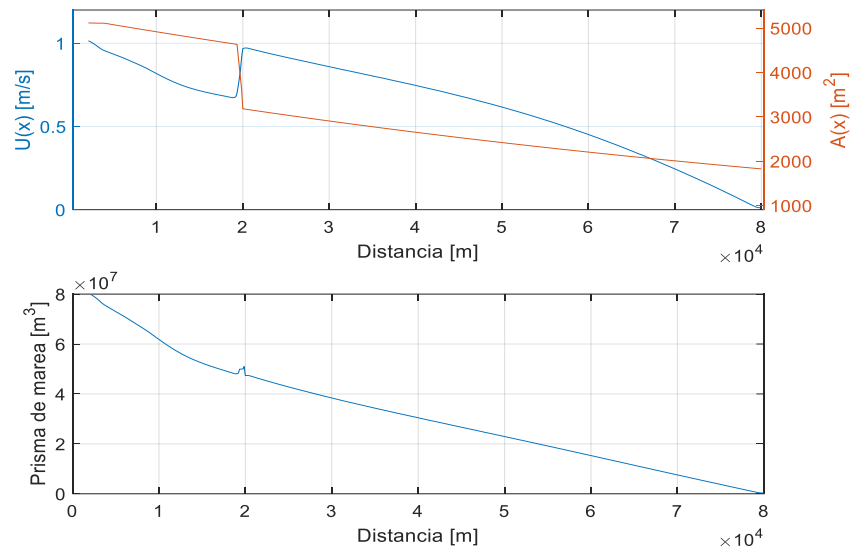


Figura 4.13 Relación entre la variación espacial del área transversal, amplitud de la velocidad y prisma de marea del dragado 20000m

La presencia del talud en el estuario genera una marcada variación en el área y las velocidades del flujo, con signos opuestos en la misma posición donde se encuentra el talud. Como resultado, vemos que el producto de ambas variaciones se cancela encontrándonos con prismas de marea que siguen una evolución espacial continua y sin transiciones repentinas. Podemos notar la presencia de un ligero ruido numérico en la zona del talud de cada escenario de dragado debido a las fuertes variaciones hidrodinámicas que ocurren en esta zona. Además, en esta región podrán producirse variaciones verticales significativas, las cuales representan una limitación importante para nuestro modelo tridimensional que, en realidad, funciona como un conjunto de capas bidimensionales anidadas por la condición de continuidad, y se rige por las ecuaciones de aguas someras, las cuales no consideran la componente vertical de las variables.

No obstante, se puede ver que este ruido numérico no es significativo en la evolución general de los prismas. Así, de la figura 4.12 y 4.13 podemos concluir que la presencia del talud no se traduce como un fenómeno local en el prisma de marea, sino que se manifiesta como un aumento general del volumen de agua salada en función de la ubicación del talud con respecto a la desembocadura del estuario. Cuanto mayor sea la distancia dragada, se produce un aumento del prisma de marea, y por tanto un mayor volumen de agua salada entrante en el estuario.

Ahora bien, se destaca que la variación del prisma de marea entre los diferentes dragados es mayor cuanto más próximos estemos a la desembocadura del estuario, ya que los prismas con distancias de dragado mayores presentan una pendiente más pronunciada. A medida que nos adentramos aguas arriba, la diferencia entre los prismas de marea de los dragados disminuye, ya que todos convergen a cero en el kilómetro 80. Esto último sugiere que la intrusión del prisma de marea es independiente de la distancia dragada, aunque puede deberse realmente a que en este punto se localiza la condición de contorno aguas arriba, lo que implica el forzamiento de los niveles de sal a ser nulos en esta zona con carácter únicamente fluvial. Esta evolución es consistente con la disminución del avance de la cuña salina con la distancia de los dragados en posiciones más aguas arriba, ya que la diferencia entre los prismas de marea de los dragados en estas zonas es menor.

Resultará también interesante analizar la variación de la amplitud del nivel de la onda de marea M2 con los diferentes escenarios de dragado. En consistencia con las hipótesis concluidas, podemos esperar un incremento de la onda de marea en comparación con la batimetría original debido al menor efecto de la fricción que conlleva el aumento de la profundidad de los dragados. Esto se confirma en la figura 4.14, donde además observamos que los gráficos en la zona dragada tienen una menor pendiente debido a este efecto, lo que los hace menos hiposíncronos, y siguiendo la misma evolución que el escenario original a partir del talud de transición.

En adición, sería conveniente investigar si la influencia de la geometría se manifiesta en la distribución espacial de la amplitud, dado que la forma de las secciones transversales dragadas no sigue una distribución normal al igual que el cauce original, sino con una forma de cajón como se vio en el apartado 3.3. No obstante, este aspecto no se abordará en el alcance del presente trabajo.

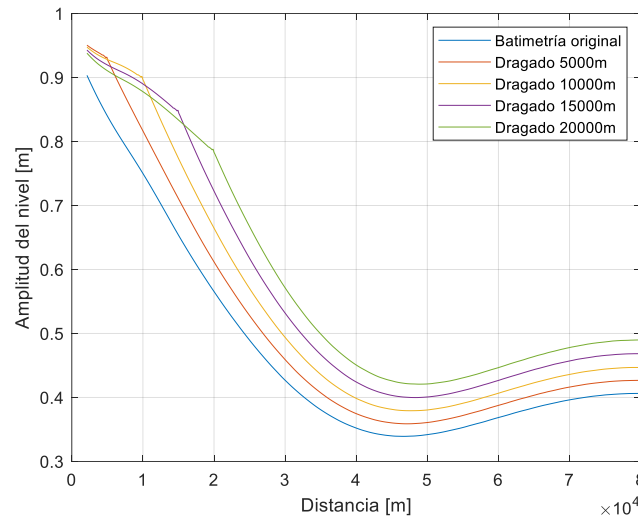


Figura 4.14 Evolución de la amplitud del nivel con el dragado

Por el contrario, observamos que en la zona dragada los gráficos del dragado alteran su orden y pasan a estar ordenados de manera inversa; con menor amplitud cuanto mayor sea la distancia del dragado. La evolución de las amplitudes de onda está determinada por la relación entre la fricción y la convergencia de la sección del cauce. Estos factores influyen en la distribución de la energía de la onda por unidad de anchura del cauce. Se concluye por tanto que este fenómeno observado en la zona dragada está relacionado con la alta no linealidad de la interacción fricción-convergencia del cauce, de manera que esta relación se ve afectada si aumentamos la distancia del dragado, resultando en una mayor componente de fricción por unidad de distancia longitudinal. Sin embargo, debido a la localización de taludes, cuando se produce el cambio de pendiente, los gráficos aguas arriba de este punto muestran una tendencia ordenada con la distancia del dragado.

Al igual que se hizo con la batimetría original, será interesante representar los perfiles longitudinales de salinidad para el caso de los dragados. Para ser concisos en el análisis, se representarán solamente los perfiles de los dragados con distancias de 10000m y 20000m. Estos se ilustrarán para el mismo instante de tiempo de la figura 4.15, en la ocurrencia de la máxima intrusión salina.

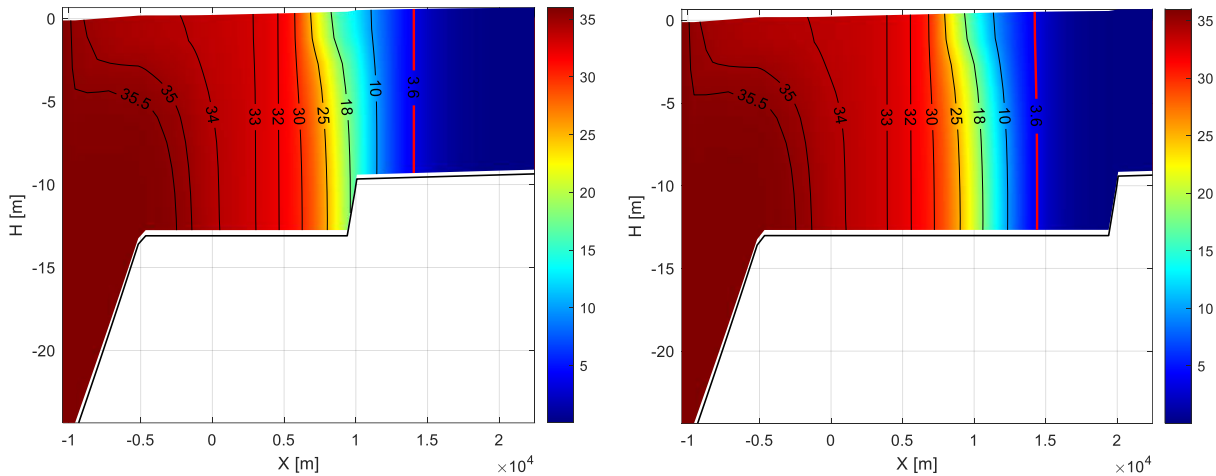


Figura 4.15 Perfil de salinidad del thalweg en el instante que se produce la máxima intrusión, para el dragado 10000m (izquierda) y el dragado 20000m (derecha)

Como se puede llegar a apreciar, se observa un aumento en la intrusión salina debido al dragado, especialmente al comparar con el perfil de la batimetría original. Estos resultados son consistentes con las conclusiones obtenidas a partir de la figura 4.11. Sin embargo, a grandes rasgos, no se observan diferencias significativas en la distribución salina entre los diferentes escenarios de dragado, mostrando la misma configuración de isohalinas. Tampoco se evidencia ningún fenómeno local atribuible a la presencia del talud en el estuario. Por lo tanto, no se realizará una cuantificación de la estratificación del flujo en este apartado. Dado que las fases de la intrusión salina presentan la misma evolución temporal en todos los escenarios de dragado, como se muestra en la figura 4.11, se puede concluir que la estructura del flujo en los dragados es similar a la que se observa en la batimetría original discutida en el apartado anterior.

4.4 Análisis del pulso de descarga

Finalmente, el objetivo de este apartado será evaluar el efecto que tienen los pulsos de descarga dulce, generados por la presencia de presas u otros elementos reguladores del caudal, en la distribución de salinidad del estuario. Como ya hemos observado, el término advectivo fluvial constituye una restricción del transporte de la dinámica litoral aguas arriba del estuario. En vista de esto, se plantea la posibilidad de aumentar el caudal de descarga, para el caso de aquellos estuarios cuyo cauce esté regulado por infraestructuras como presas o compuertas aguas arriba, como una estrategia para contrarrestar el avance de intrusión salina provocada por los dragados.

Esta medida podría ser de utilidad en numerosos estuarios del mundo que experimentan un incremento progresivo de la intrusión salina, lo que supone una preocupación ambiental y económica importante. Además de las operaciones de dragados, el avance de la intrusión puede deberse a numerosos factores, como otros cambios en la geometría o el aumento del nivel del mar debido al cambio climático. En el caso del Guadalquivir, esta problemática afecta especialmente a la agricultura que se desarrolla en los márgenes del estuario, en particular al sector arrocero, donde miles de hectáreas peligran ante el avance paulatino de la salinidad, siendo las parcelas más cercanas a la desembocadura las más afectadas. La implementación de pulsos de descarga fluvial puede ayudar a mitigar este impacto, permitiendo captaciones puntuales de agua dulce para riego en las zonas que comprenden el retroceso de la cuña salina.

No obstante, como se dijo con anterioridad, esta medida no altera realmente el equilibrio dinámico del estuario, manteniéndose la preocupación ambiental que concierne al Parque Natural de Doñana. El avance general de la intrusión obliga la migración de diversas especies localizadas la zona intermedia del estuario hacia posiciones más altas, afectando de igual manera a la flora presente. Además, se señala la potencial contaminación de acuíferos debido al contacto con niveles más altos de salinidad, afectando a su vez a los cultivos de la zona. Asimismo, este proceso puede verse acelerado por la explotación descontrolada de pozos ilegales en de Doñana, que provocan un descenso significativo del nivel freático.

Partiendo de un caudal base de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ en las simulaciones anteriores, se propone un incremento de caudal de descarga a dos niveles: $750 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, que son valores asociados a eventos extremos, representando descargas puntuales por encima del nivel medio. Para evaluar la respuesta del estuario, se ha establecido un tiempo de 5 días durante el cual se mantendrán constantes los caudales de descarga en los valores propuestos. Este se ha considerado un periodo suficiente para la estabilización de los niveles de sal con la nueva descarga, dado que se han comenzado estas simulaciones partiendo de unas condiciones iniciales correspondientes al final de la simulación previa de cada batimetría, asegurando que el sistema se encuentra en equilibrio en el instante inicial de las simulaciones del pulso de descarga. Posteriormente, reduciremos los caudales hasta llegar al caudal base nuevamente, para así analizar el tiempo de recuperación del sistema en alcanzar los niveles de sal originales.

Para cuantificar la respuesta de la distribución de salinidad del estuario ante los pulsos de descarga, como se adelantó en el apartado 3.3, nos apoyaremos de dos parámetros de interés: el tiempo de ajuste T_{adj} y el tiempo de recuperación T_{rec} . El tiempo de ajuste se define como

$$X(t = T_{adj}) = X(t = 0) - 0.9\Delta X$$

Es el tiempo que tardan los niveles de sal del estuario en ajustarse al caudal pico del hidrograma, en concreto, el tiempo que la intrusión tarda en alcanzar el 90% de la intrusión mínima que se produce. Por otro lado, el tiempo de recuperación T_{rec} se expresa de la siguiente forma

$$X(t = T_{rec}) = X(t = 0) - 0.1\Delta X$$

Es el tiempo que le toma a la salinidad recuperar en un 90% su distribución correspondiente al caudal base una vez que cesa el pico del hidrograma. En ambas expresiones, X es la intrusión salina y ΔX se refiere al cambio en la intrusión desde instante inicial cuando se comienza el pulso de descarga, hasta la mínima intrusión que se alcanza debido al retroceso generado por la descarga.

$$\Delta X = |X(t = 0) - \min(X)|$$

Una vez definidos estos tiempos, se procede a evaluar la respuesta del estuario ante los nuevos hidrogramas. Como se ha descrito, la duración del pulso será de 5 días, con una forma de hidrograma rectangular. Ahora bien, es importante tener en cuenta que la transición del caudal base hasta alcanzar el caudal máximo requiere cierto tiempo, ya que la presa no pasará a descargar el caudal pico de manera instantánea. En este sentido, será relevante saber si la velocidad con la que operan los órganos de descarga de las presas puede condicionar el transporte de sal en el estuario, ya que los hidrogramas de descarga no presentan una forma rectangular exacta, sino que dispondrán de ramas ascendentes y descendentes que representan el tiempo de transición.

Para ello, se decide evaluar dos tipos de hidrograma para cada caudal pico. El primer hidrograma simulará el tiempo de operación del aliviadero, con ramas ascendentes y descendentes de duración de 2 horas cada una. Esta configuración reflejará el escenario en el que los órganos de descarga funcionan de acuerdo con su diseño y operación previstos. Por otro lado, se utilizará un segundo hidrograma que desprejará la transición y tendrá ramas de solamente 2 minutos, simulando unas condiciones más extremas de una situación de avería o falla en el funcionamiento de los elementos de la presa.

4.4.1 Hidrograma de descarga con ramas de transición.

A continuación, se representa el hidrograma correspondiente a este apartado.

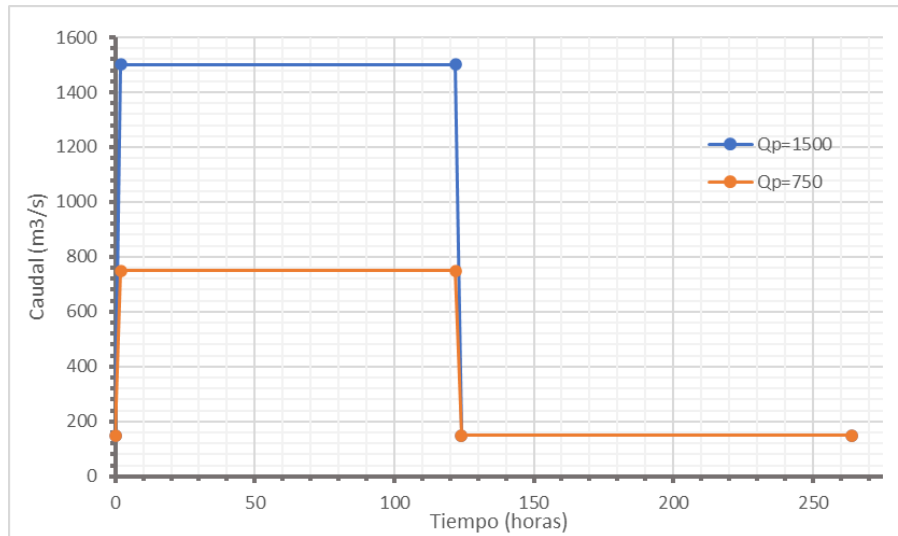


Figura 4.16 Hidrogramas de descarga con ramas de transición

Antes de pasar con el análisis los tiempos de ajuste y recuperación, conviene representar la evolución de la intrusión salina con los nuevos hidrogramas introducidos. Esto nos permitirá visualizar el comportamiento real del retroceso de la cuña, aparte de proporcionarnos un orden de magnitud sobre estos tiempos de estabilización y el retroceso generado. Nos referiremos a estos hidrogramas por su valor de caudal punta, siendo el hidrograma original el de $Q_p = 150 \text{ m}^3/\text{s}$. Para ser concisos, representamos los gráficos del caso de la batimetría original y el del dragado de 20000m de mayor distancia.

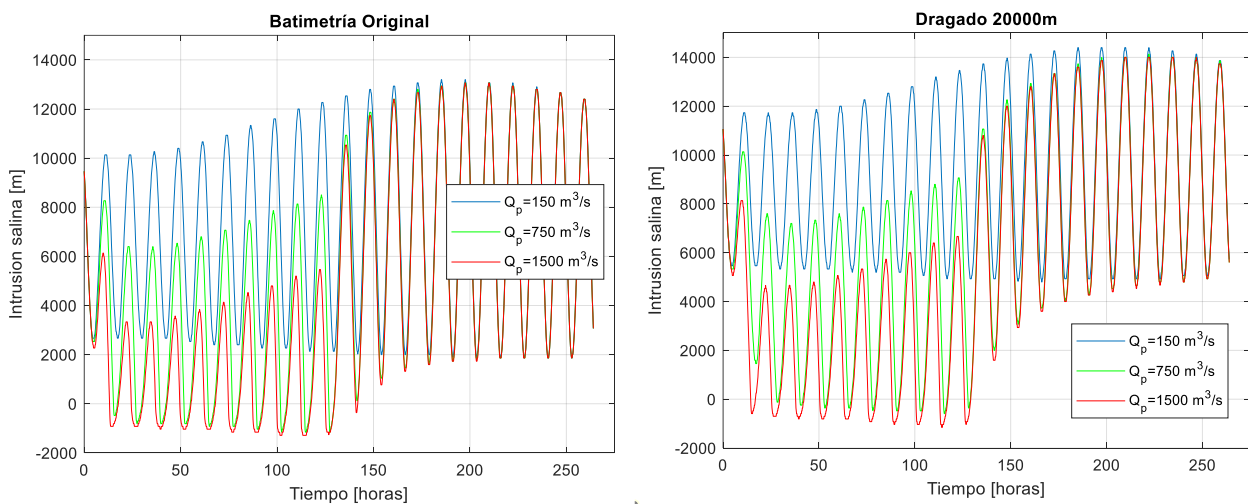


Figura 4.17 Evolución temporal de la intrusión salina con los pulsos de descarga en el escenario original (izquierda) y el dragado 20000m (derecha). Hidrograma con ramas de transición.

En la figura 4.17, se manifiesta de manera clara un retroceso de la intrusión salina proporcional a la magnitud de los pulsos de descarga. En ambos gráficos, el efecto del pulso empieza a notarse a partir de la segunda crecida de la intrusión 2.67 horas después de producirse la segunda pleamar aproximadamente, ya que la intrusión en este instante disminuye en comparación con la intrusión de la descarga original. No obstante, se aprecia que en ese momento todavía no se alcanza la mínima posición de la cuña salina, que puede deberse porque el caudal máximo todavía no se haya propagado hasta la posición de la cuña, o bien porque los niveles de salinidad se encuentran en proceso de transporte hacia aguas abajo. En cualquier caso, se observa que a partir del segundo máximo la intrusión parece haberse estabilizado en respuesta a la nueva descarga fluvial, siguiendo una evolución análoga al hidrograma original controlada por la variabilidad de la marea astronómica.

Durante la permanencia del pulso de descarga, destacamos que se produce un mayor retroceso de los máximos del frente salino en comparación con los mínimos de las intrusiones en ambos gráficos. Esto no es sorprendente debido a la mayor influencia de la descarga fluvial en las posiciones más altas del estuario, donde la sección del cauce disminuye y nos alejamos del régimen litoral. Además, se puede observar claramente en el gráfico de la derecha que hay un retroceso notablemente mayor en respuesta a los pulsos de descarga en el caso del estuario dragado. Esto resulta interesante debido a que el rango de la intrusión salina se encuentra dentro de la zona dragada (por debajo de 20000m), donde la sección del cauce se amplía considerablemente. Teóricamente, esto implica que la influencia de la descarga en esta zona debería ser menor, lo que explica parcialmente el aumento de la intrusión salina en comparación con la batimetría original. A pesar de esto, se contempla que la intrusión retrocede hasta valores próximos a los de la batimetría original, aunque inicialmente fuesen bastante más altos. Esto sugiere que, en el caso de dragados más extensos, que conllevan una mayor intrusión salina, la efectividad de los pulsos de descarga parece ser relativamente mayor. Al incrementar la profundidad, tanto la descarga fluvial como la onda de marea se propagan con mayor facilidad.

A partir de las 124 horas, cuando finaliza el pulso de descarga, podemos apreciar que la intrusión comienza a adaptarse gradualmente al régimen ordinario. En comparación con el tiempo de ajuste, resulta notable que la intrusión tarda más en estabilizarse a los niveles originales del caudal base, como veremos a continuación. Una vez que la salinidad del estuario se estabiliza y retorna a un estado de equilibrio, su evolución posterior es gobernada fundamentalmente por la dinámica mareal.

Estas simulaciones se han llevado al cabo como una continuación directa de las simulaciones anteriores, en las cuales se mantuvo un caudal constante de 150 m³/s para cada caso de dragado. Con esto asegurábamos partir de un régimen permanente en las condiciones iniciales del análisis de los pulsos de descarga. No obstante, cabe destacar que la elección del momento de inicio y la duración de los pulsos de descarga debe ser cuidadosamente analizada debido a la variabilidad de la intrusión salina y la influencia de las mareas. Es por esta razón que el efecto de la descarga no es el mismo según el instante del ciclo en el que se realice. Teniendo esto en cuenta, sería posible optimizar el retroceso de salinidad generado si se programa la descarga del pulso en el momento adecuado, de acuerdo con el programa de captación de agua de los agricultores.

Si, por ejemplo, las captaciones de agua son frecuentes y de corta duración, podría ser beneficioso iniciar la descarga del pulso en el momento de la estoa vaciante más 3.67 horas (teniendo en cuenta el desfase de la intrusión), menos el tiempo de ajuste del sistema. Esta estrategia permitiría maximizar el retroceso de la cuña salina y asegurar un suministro adecuado de agua dulce para los regantes. Para hacer esta afirmación será necesario verificar exactamente cuándo se produce la máxima efectividad en el transporte. Por otro lado, en situaciones donde se busca evitar que la intrusión salina alcance una posición determinada, se podría programar la descarga durante las mareas vivas. Esto ayudaría a contrarrestar el avance máximo de la intrusión y mantener la salinidad dentro de límites aceptables para los cultivos. No obstante, esta consideración no se ha incluido en este apartado del trabajo, aunque se reconoce su relevancia en el contexto de la gestión de la intrusión salina para futuros análisis

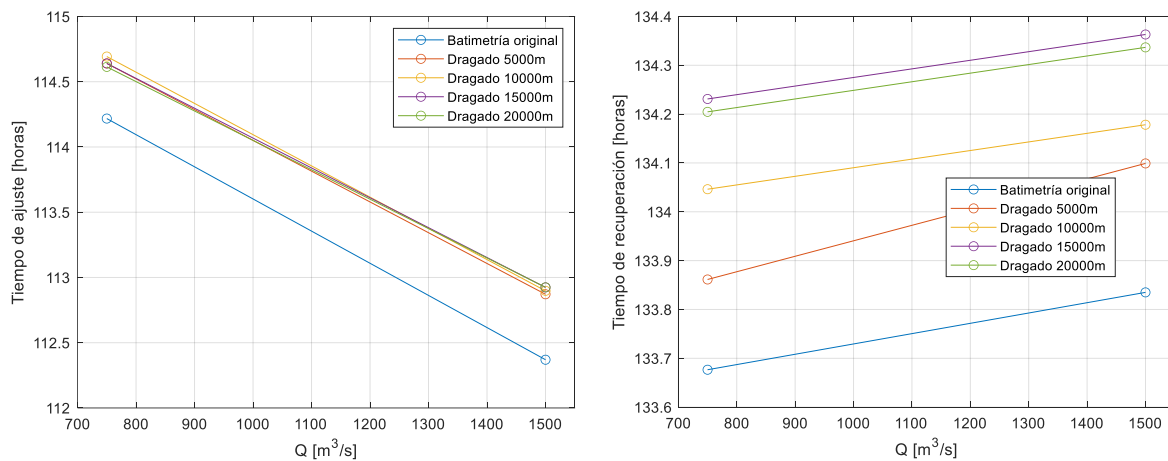


Figura 4.18 Tiempos de ajuste y recuperación de salinidad de los diferentes dragados. Hidrograma con ramas de transición

En primera instancia, contemplamos que los tiempos de recuperación son mayores que los tiempos de ajuste. Como se plasma en la figura 4.17, el aumento del pulso de descarga provoca un mayor retroceso de la intrusión salina, alejando a la cuña de su posición de equilibrio correspondiente al caudal base. Por consiguiente, la distancia que debe recuperar la cuña salina una vez que cesa el pulso de descarga es mayor, viéndose reflejado en un aumento del tiempo de recuperación, como vemos en la figura 4.18. Por otro lado, cuanto mayor sea el pulso de descarga, menor es el tiempo que tarda la salinidad en alcanzar el régimen permanente. De hecho, destacamos que el tiempo de ajuste es menor para una mayor distancia que debe recorrer la cuña, lo que representa claramente una mayor velocidad de ajuste del sistema con los pulsos de descarga en adaptarse a la nueva configuración, debido al mayor caudal.

En cuanto al efecto que tienen los dragados, se identifica que su realización conlleva un aumento del tiempo de ajuste en comparación con la situación original, sin embargo, parece que estos tiempos no se ven afectados por la distancia dragada. No ocurre lo mismo con los tiempos de recuperación, los cuales sí aumentan con la distancia del dragado, aunque en menor medida cuanto mayor sea la distancia desde la desembocadura. Este comportamiento es análogo con lo visto en el aumento de la intrusión en el apartado anterior, cuyo avance se reduce asintóticamente a medida que se aumenta la distancia de dragado. De ahí que observemos que el tiempo de recuperación del dragado 15000m es ligeramente mayor al de 20000m, ya que la incertidumbre de los resultados tiene mismo orden de magnitud que la diferencia entre los valores, considerando una distancia longitudinal de las celdas de 133m. No obstante, hasta el momento se esperaba encontrar un comportamiento similar en la evolución de los tiempos de ajuste y recuperación con los dragados, siendo explicados por el mismo proceso hidrodinámico en la dinámica de transporte, lo que nos lleva a destacar esta diferencia del comportamiento de la capacidad de adaptación del estuario con la distancia dragada.

4.4.2 Hidrograma de descarga sin ramas de transición

Continuando con la misma estructura, observamos el hidrograma de la hipótesis de descarga inmediata, sin ramas de transición.

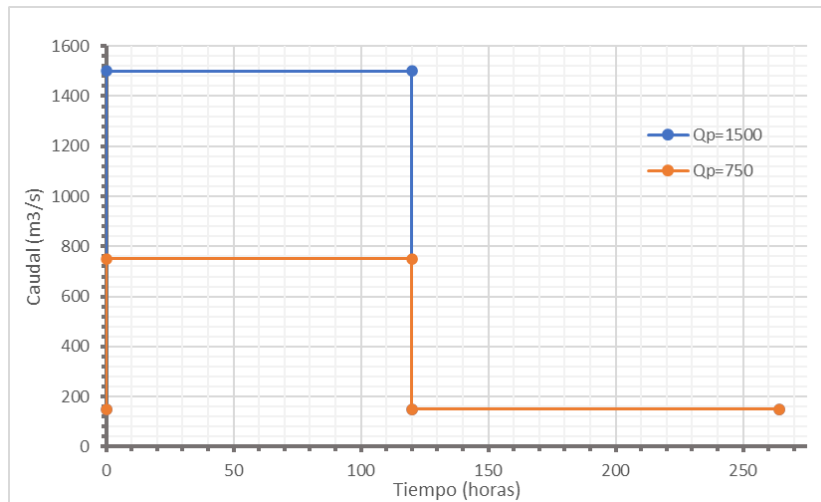


Figura 4.19 Hidrogramas de descarga sin ramas de transición

Representaremos directamente los gráficos de la evolución de la intrusión salina, para el caso original y del dragado de 20000m de distancia, prestando atención a su desarrollo en comparación con los hidrogramas anteriores.

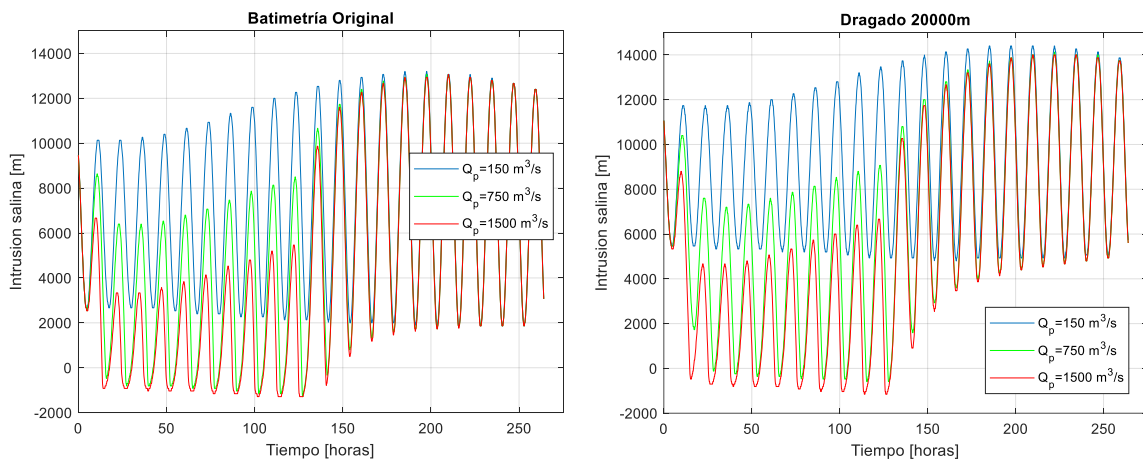


Figura 4.20 Evolución temporal de la intrusión salina con los pulsos de descarga en el escenario original (izquierda) y el dragado 20000m (derecha). Hidrograma sin ramas de transición.

En términos generales, observamos un comportamiento equivalente con lo comentado en el apartado anterior. Para cuantificar las posibles diferencias que provoca la presencia de ramas de transición en el hidrograma, mostramos los tiempos de estabilización de la salinidad.

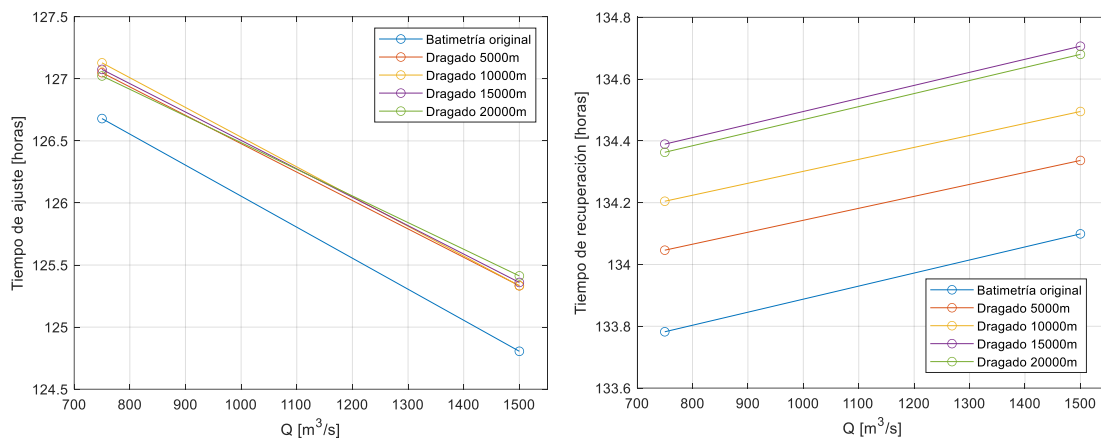


Figura 4.21 Tiempos de ajuste y recuperación de salinidad de los diferentes dragados. Hidrograma sin ramas de transición

Como se observa, se obtiene una configuración consistente con los resultados del hidrograma anterior, lo que respalda el análisis y las conclusiones tomadas acerca del comportamiento del sistema frente los pulsos de descarga y con la presencia de dragados en el estuario. Sin embargo, se manifiesta una diferencia significativa en la magnitud del tiempo de ajuste, que disminuye más de 10 horas cuando no se incluyen las ramas de transición en los hidrogramas. No obstante, considerando que la duración de la rama ascendente del hidrograma es de 2 horas, y teniendo en cuenta la semejanza entre las figuras 4.17 y 4.20, se concluye que esta diferencia de 10 horas es un valor demasiado elevado. Esto que puede ser debido a las limitaciones de la propia formulación para calcular tiempo de ajuste, que provoca un salto de una oscilación de diferencia (de aproximadamente 12h, un ciclo de marea) respecto al tiempo de ajuste del apartado anterior, aunque se reconoce que la diferencia real sea menor. Nótese que los tiempos de recuperación de este escenario son ligeramente menores a los hidrogramas con rama, del orden de 0.1 horas, lo que sí parece reflejar la verdadera magnitud del efecto de las ramas de transición.

En conclusión, se puede afirmar que la velocidad con la que operan los órganos de descarga de las presas no influye significativamente en la hidrodinámica del estuario, y se demuestra que la dinámica de transporte de la salinidad apenas se ve afectada. Ahora bien, si en lugar de dos horas de transición, que se consideró un tiempo razonablemente conservador para la adecuada explotación de las válvulas y elementos, se presenta una transición más duradera, se reflejará con un aumento de los tiempos de estabilización. En cualquier caso, se concluye que la velocidad de operación de la descarga deberá atender principalmente a los criterios de seguridad y mantenimiento de los elementos reguladores del caudal de descarga de la presa.

Por último, en el apartado 4.3 se destacó que la máxima estratificación se produce durante la marea vaciante del estuario. En este sentido, es predecible que un aumento en la descarga fluvial magnifique el cizallamiento de velocidades que se produce en la desembocadura, contribuyendo a la estratificación del flujo. Por lo tanto, para verificar este efecto, se propone representar el parámetro ΔS con el pulso de descarga de 1500 m³/s en los gráficos de contorno de la figura 4.22, utilizando el pulso de descarga de 1500 m³/s tanto para el escenario original como para el dragado de mayor distancia. El intervalo temporal de las representaciones será de las 100 a las 200 horas, de forma que incluimos tanto el caudal punta como la rama descendente del hidrograma hasta llegar al caudal base de 150 m³/s (véase la figura 4.20), permitiéndonos así observar la evolución de la estratificación con el pulso de descarga. Para simular unas condiciones más extremas se ha incluido el hidrograma sin ramas de transición.

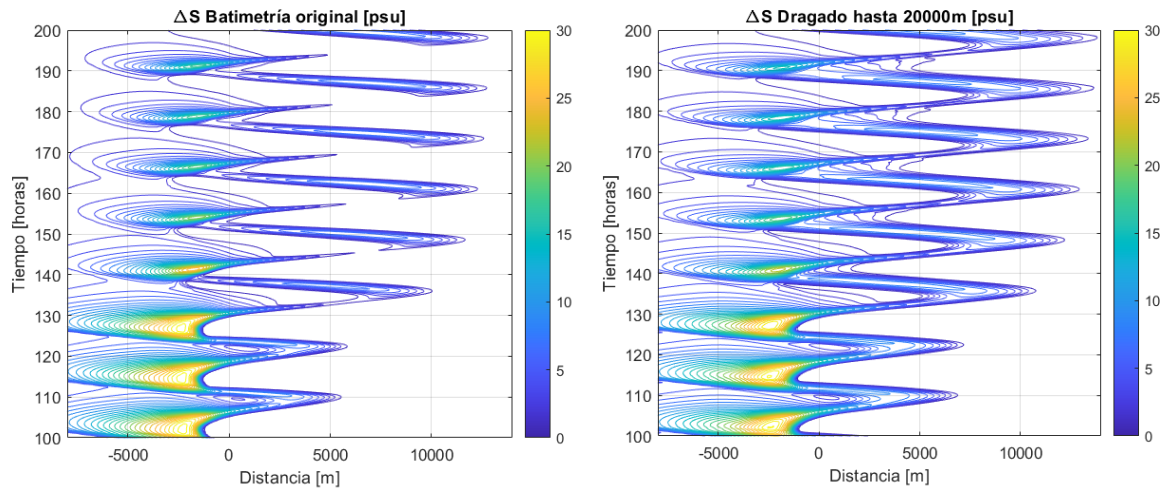


Figura 4.22 Evolución espaciotemporal de la estratificación con el parámetro ΔX con pulso de descarga $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Escenario original (izquierda), Dragado hasta 20000m (derecha).

Se concluye de la figura 4.22 que, efectivamente, el aumento del caudal de descarga genera una mayor estratificación del flujo, como se evidencia en los valores de ΔS . En comparación con la figura 4.10, los valores máximos de ΔS alcanzan hasta 30 psu, mientras que en el escenario original se observan valores máximos de 16 psu. En cuanto a la evolución de ΔS , se observa un comportamiento análogo al de la figura 4.10, donde la máxima estratificación ocurre durante las mareas vaciantes. Durante este período, en combinación con la mayor descarga fluvial, se produce un retroceso significativo de la interfase y los gradientes verticales de salinidad aumentan, lo que contribuye a la máxima estratificación del flujo en el estuario. Una vez que cesa el pulso de descarga, a partir de las 140 horas, observamos que los valores de estratificación se estabilizan, alcanzando el mismo comportamiento de la figura 4.10 correspondiente al régimen ordinario de descarga.

Por otro lado, se concluye que las operaciones de dragado no tienen efectos significativos sobre la estructura del flujo en estos escenarios, ya que apenas observamos diferencias significativas entre ambos gráficos. No obstante, cabe resaltar que la máxima estratificación en estas simulaciones se produce en el régimen litoral, donde se localiza el talud continental, por lo que realmente no existen cambios de profundidad entre ambos escenarios en esta zona. En cambio, si los mayores gradientes verticales se produjesen en la zona dragada, donde las profundidades sí son diferentes, podríamos encontrarnos con distintos valores de ΔS . Dado que ΔS representa la diferencia de salinidad entre la capa del fondo y la capa de superficie, se refleja su dependencia con la profundidad del lecho. Por lo tanto, es posible que los dragados den lugar a cambios en la estratificación del flujo cuando los gradientes verticales se localizan en zonas de variación de profundidad, dejando un frente abierto a futuras líneas de trabajo.

5 Conclusiones

En los últimos años, la presente preocupación ambiental aumenta de la mano con el deterioro acelerado de los medios y recursos naturales que disponemos. Lejos de ser una estrategia preventiva, la excesiva antropización de los ecosistemas ha llevado a la Ingeniería Civil a enfrentarse a exigencias más rígidas en términos ambientales, impuestas tanto por organismos ambientales como por otras actividades de la sociedad que se ven directamente afectadas. Esto desafía progresivamente el desarrollo de infraestructuras e intervenciones, que, impulsadas por el desarrollo ininterrumpido de la sociedad, deben ser compatibles con la preservación de espacios, actividades locales e infraestructuras preexistentes.

En este sentido, se reconocen los estuarios como entornos de gran valor ecológico, económico y social, que requieren de su estudio técnico, así como una gestión adecuada que asegure la sostenibilidad de todas las actividades realizadas en ellos. En este estudio se ha expuesto el caso del estuario del Guadalquivir que, al ser el único puerto interior de España, desempeña un papel crucial como vía de navegación para la economía de Sevilla, requiriendo de dragados cada cierto tiempo para mantener el calado de diseño de los buques. Sin embargo, se ha observado que el aumento de la intrusión salina generado no solo afecta las condiciones ambientales del estuario, sino también al sector agrícola, que es un componente fundamental de la economía local.

Así, se ha reflejado la importancia real de estudiar estas formaciones en los primeros apartados del trabajo, pasando al posterior análisis de la distribución de salinidad que experimentan en respuesta a cambios en su perfil longitudinal. Para ello, se ha partido de un modelo numérico desarrollado en un estudio anterior por A. López Ruiz y G. Martín Llanes de un estuario preparado para analizar la respuesta hidrodinámica ante modificaciones geométricas, tras su correcto análisis de sensibilidad.

Durante el transcurso del trabajo, hemos abordado de manera significativa el concepto de estuario ideal según Savenije (2012), una vez establecido el marco informativo del apartado 2. La formulación del estuario idealizado, como se vio, resulta útil para modelar los estuarios de manera sencilla, y permite identificar diferentes tendencias acerca del comportamiento energético que caracterizan a los distintos tipos de estuario. En consecuencia, la implementación del modelo original se realizó a partir de la definición geométrica de estuarios ideales. En este sentido, se ha dedicado el primer apartado de los resultados en analizar la hidrodinámica de la batimetría inalterada, lo que resulta fundamental para comprender adecuadamente los fenómenos asociados a los dragados, ya que representa el régimen ordinario del sistema que se pretende modificar.

De esta manera, el objetivo principal de este trabajo ha consistido en describir un comportamiento generalizado de los estuarios aluviales desde una perspectiva teórica, centrándonos especialmente en los procesos hidrodinámicos que subyacen a estos sistemas, a través de un modelo tipo sin basarnos en un caso real específico. Para ello, se han propuesto los distintos escenarios de dragado en función de la distancia dragada desde la desembocadura, simulando así ubicaciones alternativas de un puerto interior.

Los resultados obtenidos evidencian que, para los estuarios dentro del rango de aplicación del modelo, las operaciones de dragado provocan un aumento significativo de la intrusión salina. La susceptibilidad de este avance de la cuña salina es proporcional a los niveles de sal que registran la zona dragada, lo que implica que el avance de la intrusión por unidad de distancia dragada es mayor en las proximidades de la desembocadura, es decir, con menores distancias dragadas. Estos resultados son consistentes con la experiencia que recogen los dragados realizados en distintos estuarios de todo el mundo, como es el caso del Guadalquivir, el estuario de New-York y New-Jersey, entre otros que encontramos en la bibliografía.

Este comportamiento es explicado por el aumento general del prisma de marea que generan los dragados, lo que permite que una mayor cantidad de agua salada penetre en el interior del estuario. Sin embargo, se ha observado que la intrusión del prisma de marea es constante para todos los casos y converge en el kilómetro ochenta. En esta zona se encuentra la condición de contorno aguas arriba, que evita que la salinidad llegue a ese punto. Por lo tanto, se podría esperar que, si se aumentara la distancia aguas arriba en el dominio, se produciría un cambio en la intrusión del prisma de manera similar al aumento de la intrusión

con la distancia de dragado, aunque en menor proporción. En este escenario, el nivel mínimo de salinidad aumentaría la distancia recorrida aguas arriba con la distancia de dragado. Esta limitación se debe a la propia configuración del modelo numérico y la necesidad de establecer una condición de contorno aguas arriba donde se fuerza los niveles de sal a ser nulos, o visto de otra manera, donde la amplitud de la velocidad de marea es cero, ya la velocidad de flujo en esa sección corresponde con el caudal de descarga. No obstante, este fenómeno se considera poco significativo en el análisis de la intrusión salina, que alcanza su máximo en el km catorce.

En general, se ha visto que el aumento de profundidad de los dragados confiere al estuario un mayor carácter litoral, observándose un aumento en la amplitud de la onda de marea con la distancia dragada, y por lo tanto, un aumento general de la intrusión salina. Esto se debe principalmente a que la zona dragada experimenta una menor interacción de la fricción del cauce, y al encontrarse en una zona donde predomina el régimen litoral, la influencia de la marea aumenta en mayor medida que la influencia de la descarga del aporte fluvial. Esto nos lleva a plantear la siguiente cuestión: si realizamos dragados a una distancia suficiente aguas arriba, ¿podría haber un retroceso de la intrusión salina, hasta el punto en el que la marea llenante predomine sobre la vaciante (sobre km cuarenta), o posiblemente alrededor del kilómetro setenta, donde el volumen de agua dulce del régimen fluvial sea superior al prisma de marea? No obstante, es poco común encontrar dragados de esta extensión en la realidad.

Ahora bien, cabe señalar que los cálculos derivados del análisis armónico deberán contemplar todas las constituyentes identificadas de la marea astronómica real, y será una buena aproximación del nivel real siempre que la marea astronómica no sea significativa. Así, en este trabajo no se ha incluido presencia de viento ni oleaje, que son agentes clave en la dinámica litoral de costas y estuarios, lo que expone las limitaciones del modelo utilizado. En caso de temporales o eventos extremos, por tanto, nuestros resultados estarían alejados de la realidad y no nos permitiría predecir la posición de la cuña salina a través de aplicar un tiempo de desfase a la evolución del nivel registrado por mareógrafos. De la misma manera, este estudio contempla la relevancia de anticipar las posibles incertidumbres de los resultados obtenidos mediante el modelo.

Gracias a la previa elaboración de un modelo tridimensional, con el esquema sigma-layer, podemos estudiar las variaciones verticales de la salinidad en el dominio, que resultan necesarias para la correcta modelización del transporte. En general, nos encontramos con unos perfiles de salinidad verticalmente homogéneos (poca estratificación) en todos los escenarios de dragado. No obstante, se identifican fuertes gradientes horizontales de densidad en las inmediaciones aguas abajo de la cuña, lo que señala la necesidad de realizar un monitoreo adecuado y cauteloso de la posición de la cuña salina. Si la intrusión avanza más allá de lo esperado, resultará en un incremento significativo de los niveles de salinidad en las zonas afectadas por dicho avance. Esto magnifica el impacto ambiental generado, tanto para los organismos que habitan en el rango de niveles de sal alterados, como la calidad de agua de las captaciones localizadas en las zonas que comprenden el avance de la cuña, así como la contaminación de los acuíferos circundantes.

Como maniobra para contrarrestar dicho avance, se ha comprobado que los pulsos de descarga fluvial tienen un efecto positivo. Ahora bien, se destaca que el retroceso de la intrusión es temporal, ya que no afecta al equilibrio dinámico del sistema. Aunque esta medida puede resultar útil para la gestión del riego en la zona de las marismas, es necesario tener en cuenta que su aplicación se ve limitada en los tiempos actuales de sequía. Como la descarga de agua dulce desemboca directamente en el mar, es probable que resultase en un mayor desperdicio de agua en comparación con la cantidad captada durante el período de recuperación del estuario, aparte de suponer un malgasto energético. Esto hace que esta medida sea inviable desde el punto de vista de la gestión hidrológica de una cuenca. No obstante, el objetivo de este análisis es describir un modelo de comportamiento; en concreto, cómo responde un estuario dragado ante una crecida en comparación a su análogo no dragado. Asimismo, este conocimiento también es aplicable a valores de descarga asociados a eventos extremos, como avenidas debido al régimen de lluvias.

Es importante comentar que este modelo presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta, como son la ausencia de marea meteorológica, la geometría adoptada simplificada con una forma en planta rectilínea, o valores de rugosidad y difusividad constantes en el dominio; lo cual puede no ser realista, ya que estos parámetros varían en diferentes secciones del estuario debido a los materiales del lecho y las formas del fondo. Algunas de estas limitaciones se han ido comentado a lo largo del trabajo, aunque se destaca principalmente que la ausencia del módulo de transporte de sedimentos es una de las mayores simplificaciones tomadas, que resultaría fundamental para realizar un estudio más sofisticado y realista

sobre los dragados en el estuario. De esta manera, se reconoce el interés de investigar la velocidad de los procesos de erosión y sedimentación en el estuario, con el objetivo de alcanzar su perfil de equilibrio, considerando otros posibles fenómenos locales como la estabilidad de los márgenes y del talud de transición. Esto permite evaluar la duración del calado de diseño, que es el tiempo durante el cual el canal de navegación mantiene la profundidad necesaria, pudiendo analizar la viabilidad económico-ambiental de las operaciones de dragado.

No obstante, la inclusión del módulo de sedimentos implicaría un aumento considerable del esfuerzo computacional necesario para realizar las simulaciones. Además, sería necesario prestar especial atención a la correcta validación del modelo numérico y a las características de los materiales del lecho que se introducen en el modelo. Debido a las limitaciones de tiempo y alcance del trabajo, se ha optado por descartar esta opción y en su lugar centrarse en el análisis hidrodinámico llevado a cabo. De lo contrario, gran parte del estudio habría estado dedicado exclusivamente a la implementación del modelo numérico.

Bibliografía

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2023). Los estuarios. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/los-estuarios>
- Biamond, B., de Swart, H., Dijkstra, H., & Díez-Minguito, M. (2022). Estuarine salinity response to freshwater pulses. Utrecht University, University of Granada.
- Coastal Wiki. (s.f.). Seawater intrusion and mixing in estuaries. Obtenido de https://www.coastalwiki.org/wiki/Seawater_intrusion_and_mixing_in_estuaries
- Deltares. (2014). Delft3D Flow: User Manual.
- Diario de Sevilla. (2019). Los arrozeros denuncian que el río Guadalquivir sigue sufriendo una alta salinidad.
- Ecologistas en acción. (2023). Más pozos ilegales en el acuífero de Doñana. Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org/293975/mas-pozos-ilegales-en-el-acuifero-de-donana/>
- Europa Press. (2014). El aumento de la salinidad por el dragado del Guadalquivir, despreciable según la Autoridad Portuaria de Sevilla. iagua.
- Garrido, J. (2019). Container-ship size: What dimensions can we expect to see? PierNext.
- Granado Domínguez, I. (2016). Modelado hidrodinámico y de la calidad en la Bahía de Santander. TFM. Máster Universitario en Gestión Integrada de sistemas Hídricos. Universidad de Cantabria.
- Hubert H.G. Savenije. (2012). Salinity and tides in alluvial estuaries, 2nd completely revised edition. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.
- K. Ralston, D., Talke, S., Rockwell Geyer, Al-Zubaidi, & K. Sommerfiel, C. (2019). Bigger Tides, Less Flooding: Effects of Dredging on Barotropic Dynamics in a Highly Modified Estuary. *Advancing Earth and Space Sciences*.
- Martín Llanes, G. (2020). Análisis del efecto de la descarga fluvial en la distribución de salinidad de estuarios. TFG Grado Ingeniería Civil. ETSI Universidad de Sevilla.
- Martín Llanes, G. (2022). Desarrollo de una nueva herramienta para la gestión de estuarios: modelado numérico idealizado. TFG Grado Ingeniería Civil. ETSI Universidad de Sevilla.
- MathWorks. (s.f.). Centro de ayuda. Obtenido de MATLAB: <https://es.mathworks.com/help/index.html>
- P. Hoagland, A. Beet, D. Ralston, G. Parsons, Y. Shirazi, & E. Carr. (2020). Salinity Intrusion in a Modified River-Estuary System: An Integrated Modeling Framework for Source-to-Sea Management. Obtenido de *Frontiers in Marine Science*.
- R. Siles-Ajamil, M. Díez-Minguito, & M.Á. Losada. (2019). Tide propagation and salinity distribution response to changes in water depth and channel network in the Guadalquivir River Estuary: An exploratory model approach. Andalusian Institute for Earth System Research, University of Granada.
- Tal Ezer, G. L. (2003). A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University.
- Talke, R. F. (2016). The effect of channel deepening on tides and storm surge: A case study of Wilmington, NC. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, Oregon, USA.
- Xiang Pu, J. Z. (2015). Circulation and mixing along the North Passage in the Changjiang River.