



UNIVERSIDAD DE GRANADA

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE GESTIÓN MEDIANTE UN MODELO LINEAL MAREAL EN EL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR

Tesis doctoral presentada por Reyes Siles Ajamil
dentro del Programa de Doctorado en
Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus Aplicaciones
Dirigida por Dr. Manuel Díez Minguito

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Reyes Siles Ajamil
ISBN: 978-84-1117-510-4
URI <https://hdl.handle.net/10481/77141>

Publicaciones e Informes Técnicos

A continuación se incluyen trabajos realizados en el marco de esta tesis doctoral:

- Siles-Ajamil, R., Díez-Minguito, M., & Losada, M. Á. (2017). Respuesta Mareal y de la Distribución de la Salinidad en el Estuario del Guadalquivir por Cambios en la Morfología de la Red de Canales. Ponencia en XIV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos celebrado el 25 de mayo 2017. Alicante. Libro de Ponencias páginas 485-493. <https://costasypuertos.com/ediciones>
- Reyes Merlo, M. Á., Siles-Ajamil, R., & Díez-Minguito, M. (2018). Forecasting Subtidal Water Levels and Currents in Estuaries: Assessment of Management Scenarios. Theory and Applications of Time Series Analysis: Selected Contributions from ITISE 2018, 229. In International Conference on Time Series and Forecasting (pp. 229-242). Springer. DOI:10.1007/978-3-030-26036-1_16
- Cobos M., Siles-Ajamil R., Serrano-García M.A. & Díez-Minguito M. (2019). Estimación de los efectos del cambio climático de la amplitud y fase mareal en las elevaciones y salinidad del estuario del Río Guadalquivir. Póster en XV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos celebrado el 8 y 9 mayo 2019. Torremolinos. <https://costasypuertos.com/ediciones>
- Siles-Ajamil, R., Díez-Minguito, M., & Losada, M. Á. (2019). Tide propagation and salinity distribution response to changes in water depth and channel network in the Guadalquivir River Estuary: an exploratory model approach. *Ocean & Coastal Management*, 174, 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.015>

-
- R. Siles-Ajamil, Bermúdez Pita, M. Díez-Minguito, M., Losada, M. Á. & Ortega, AN. Evaluación de Cambios en la Onda de Marea y Salinidad Producidos por Dragados, Recuperación de Llanos Mareales, Subida del Nivel del Mar y Permeabilización de la Presa de Alcalá del Río (2020). Informe Técnico Universidad de Granada a solicitud de WWF. 01.07.2020.

Editado en Granada
Primera edición, 13 de junio de 2022

”Sin constancia y decisión de nada el talento vale, nada en el mundo hay que iguale a una asidua aplicación”, con esta frase de mi entrañable tía HERMINIA que me recordaba mi querida MADRINA durante mi periplo doctoral quiero dedicarles esta tesis junto a mis tres pilares terrenales: MADRE, HERMANA e HIJA y a quien me acompaña junto a DIOS desde el cielo: mi PADRE.

Resumen

Los estuarios son zonas de transición entre el medio fluvial y marino, donde interactúa el flujo fluvial con el mareal y existe un gradiente de densidad con importantes efectos dinámicos. Se trata de cuerpos semicerrados en conexión con el mar abierto cuyo límite aguas arriba del estuario se define hasta donde alcanza la marea. Su importancia social, económica y ambiental son difícilmente sobreestimadas.

No sólo procesos morfo-hidrodinámicos naturales han modificado los estuarios. La influencia antrópica ha variado artificialmente sus características: dragando, modificando su trazado original con cortas y canalizaciones, ocupando terrenos para conferirle nuevos usos o construyendo presas. Numerosos cambios con la finalidad de captar agua para riego, favorecer la navegabilidad o evitar inundaciones, en muchos casos contraviniendo la legislación vigente, han propiciado con el tiempo conflictos socio-económicos y ambientales.

Los procesos de toma de decisiones por parte de Administraciones para promover un uso sostenible del agua, prevenir su deterioro, garantizar la reducción progresiva de contaminantes y contribuir a paliar los efectos de inundaciones y sequías, requiere modelos de gestión que asistan y optimicen para compatibilizar usos y actividades.

Esta tesis está encaminada a evaluar escenarios de gestión actuales y confeccionar una herramienta útil fundamentada en el conocimiento científico más actual para optimizar la gestión de espacios estuarinos, tal y como estipulan las políticas y Directivas Comunitarias.

La evaluación de escenarios se realiza mediante un modelo hidrodinámico idealizado. Los modelos idealizados son teóricamente sencillos y

flexibles, lo suficiente para ser implementados fácilmente con el fin de proporcionar una evaluación rápida del comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios. En concreto, en esta Tesis se desarrolla e implementa un modelo unidimensional, lineal, mareal con fricción permite evaluar diferentes escenarios de gestión para obtener elevaciones, corrientes y la distribución de sal a lo largo de un estuario dividido por tramos. El punto de partida nace del análisis de propagación de la onda a través de la red mareal usando las soluciones bien conocidas de las ecuaciones linealizadas, unidimensionales, de conservación de la masa y de cantidad de movimiento en aguas someras para canales rectangulares.

La respuesta dinámica del estuario enmarcada en sus distintos tramos espaciales viene establecida en términos de un conjunto de variables físicas y biogeoquímicas, la cual se determina mediante la solución semi-analítica del modelo matemático hidrodinámico y de transporte de sal confeccionado.

El modelo se aplica al Estuario del Río Guadalquivir. Se trata de un estuario altamente antropizado, sujeto a fuertes estiajes y en el que concurren importantes conflictos de gestión, sociales, económicos y ambientales.

Se estudiará la problemática actual de este estuario con el propósito de analizar diferentes estrategias de dragado, regulación de caudales, desecación e inundación de caños mareales y eliminación de la barrera aguas arriba. En concreto, considerando el contexto histórico, se definen los siguientes escenarios: (1) Efecto de Profundización del canal de navegación; (2) La Reconexión del Brazo del Oeste; (3) La Recuperación de Marismas en Doñana y (4) Eliminación de la Presa de Alcalá del Río.

En general, los cambios observados con el modelo idealizado apuntan que (1) un dragado de profundización en todo el estuario incrementa la amplitud de elevaciones y corrientes mareales, así como la intrusión salina. las elevaciones submareales disminuyen cuando se reduce la

entrada de agua dulce, y aumentan como consecuencia de la profundización del canal. (2) La onda de marea que se propaga por el canal de marea reconectado interacciona con aquélla del canal principal. Asimismo, dependiendo de los parámetros geométricos asignados al canal secundario, la onda de marea en el canal principal puede o bien amplificarse o amortiguarse. En relación al escenario (3), para caudales reducidos y áreas recuperadas, la recuperación de los humedales no supone cambios significativos en la propagación de onda e intrusión salina en el estuario. (4) El efecto aguas arriba de las amplitudes de las elevaciones mareales debido a la geometría convergente del estuario, se visualiza completamente cuando la presa de cabecera (Alcalá del Río) es eliminada. Además, si la barrera se desplaza aguas arriba, la amplitud de las elevaciones mareales presentaría una menor amplificación que lo observado actualmente cerca de la presa de cabecera.

El análisis de las soluciones permite afirmar que el modelo es una herramienta útil para la gestión medioambiental y que, combinando adecuadamente actuaciones, pueden mitigarse o compensarse los efectos de escenarios de gestión específicos.

Las soluciones del modelo están sujetas a restricciones legales y ambientales (p.ej., umbrales de calidad del agua impuestos por la Directiva Marco del Agua), o por aspectos socio-económicos (p.ej., rendimientos económicos de actividades portuarias o agrarias) encaminadas a proporcionar herramientas para una mejor gestión integral en los estuarios.

Agradecimientos

"A todos los que ya me apoyan desde el cielo y a los que me siguen acompañando en la mesa",

"ETERNAMENTE GRACIAS"

Reyes Siles Ajamil

13 de junio de 2022

Índice general

| | |
|---|-------------|
| Índice de figuras | xv |
| Índice de tablas | xvii |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 2 Modelo y Observaciones | 7 |
| 2.1 Modelo idealizado | 7 |
| 2.2 Aplicación al ERG | 14 |
| 2.2.1 Área de Estudio | 14 |
| 2.2.2 Topología Base | 15 |
| 2.2.3 Observaciones | 18 |
| 2.2.4 Calibración del Modelo en el ERG | 20 |
| 3 Contexto Histórico para Definir Escenarios | 27 |
| 3.1 Génesis del Estuario | 28 |
| 3.2 Antecedentes históricos del Estuario | 30 |
| 3.3 Obras Remarcables en el ERG | 32 |
| 3.3.1 Obras de Mejora de la Navegabilidad. | 36 |
| 3.3.2 Cortas | 41 |
| 3.3.3 Obras de Ocupación de Marismas y Aislamiento del Régimen Mareal | 44 |
| 3.3.4 Obras de Control Hidráulico | 48 |

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Definición de Escenarios | 53 |
| 4.1 | Escenario 1: Efecto de la Profundización del Canal de Navegación | 54 |
| 4.2 | Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste | 56 |
| 4.3 | Escenario 3: La Recuperación de Marismas en la Parte Baja . . . | 57 |
| 4.4 | Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río | 59 |
| 5 | Resultados y su Discusión | 61 |
| 5.1 | Escenario 1: Efecto de la Profundización del canal de navegación. | 61 |
| 5.2 | Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste. | 64 |
| 5.3 | Escenario 3: La Recuperación de Marismas Mareales/Salobres en el Espacio Natural de Doñana. | 68 |
| 5.4 | Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río. | 71 |
| 5.5 | Análisis Comparativo de Escenarios. | 73 |
| 5.6 | Análisis de Sensibilidad del Modelo. | 77 |
| 6 | Transferencia de conocimiento: Legislación y Gestión Integral | 83 |
| 6.1 | Servicios Ecosistémicos en el ERG: perspectiva ambiental y aspectos jurídicos. | 85 |
| 6.2 | Derecho Ambiental aplicado a los Escenarios del ERG | 91 |
| 7 | Conclusiones | 95 |
| A | Aproximación estocástica | 101 |
| A.1 | Modelos estocásticos | 101 |
| | Referencias | 107 |

Índice de figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Diagrama del procedimiento de cálculo de las variables del modelo. | 10 |
| 2.2 | Área de Estudio:ERG. | 14 |
| 2.3 | Escenarios. | 16 |
| 2.4 | Calibración del modelo: Armónico M2. | 21 |
| 2.5 | Calibración del modelo: Armónicos O1, K1 y M4. | 26 |
| 3.1 | Evolución Geológica del Paleoestuario. | 29 |
| 3.2 | Modificaciones del Estuario del Río Guadalquivir. | 34 |
| 3.3 | Muelle de la Riza. | 38 |
| 3.4 | Proyecto de limpieza en el ERG. | 39 |
| 3.5 | ERG en 1760. | 40 |
| 3.6 | EL ERG en 1804 por Felipe Losada. | 41 |
| 3.7 | Mapa Ecológico del P.N. de Doñana | 47 |
| 3.8 | Espacio Natural de Doñana | 48 |
| 3.9 | Efecto del Dique de la Montaña del Río en ERG. | 50 |
| 4.1 | Diagrama de Flujo de las Simulaciones. | 54 |
| 4.2 | Representación Topológica del Escenario 1. | 55 |
| 4.3 | Representación Topológica del Escenario 2. | 56 |
| 4.4 | Representación Topológica del Escenario 3. | 58 |
| 4.5 | Representación Topológica del Escenario 4. | 59 |
| 5.1 | Escenario 1: Canal principal. | 63 |
| 5.2 | Escenario 2: Canal principal. | 65 |
| 5.3 | Escenario 2: Brazo del Oeste. | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.4 | Escenario 3: Canal principal. | 69 |
| 5.5 | Escenario 3: Doñana. | 70 |
| 5.6 | Escenario 4: Sin la presa Alcalá del Río. | 72 |
| 5.7 | Representación de la Configuración de Referencia y los Cuatro Escenarios. | 74 |
| 5.8 | Otras Simulaciones: Compensación de la profundización mediante la superposición de escenarios. | 78 |
| 5.9 | Sensibilidad del modelo. | 80 |
| 6.1 | Sistema Socio-Económico Ecológico del ERG. | 84 |
| 6.2 | Servicios Ecosistémicos en el ERG. | 86 |
| A.1 | Modelos estocásticos. | 102 |
| A.2 | Ajuste de los parámetros de entrada. | 104 |
| A.3 | Simulaciones: elevaciones submareales. | 104 |

Índice de tablas

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Valores de los parámetros de cada tramo. | 17 |
| 2.2 | Localización de equipos de monitorización. | 19 |
| 2.3 | Localización de CTDs. | 19 |
| 3.1 | Cronología de la Intervención Antrópica en ERG según Figura 3.2. Obras Remarcables del ERG en los epígrafes: 3.3.1 Obras de Mejora de la Navegabilidad, 3.3.2 Cortas, 3.3.4 Obras de Ocupación de Marismas y 3.3.4 Obras de Control Hidráulico. | 35 |

”Cualquier daño hecho al Medio Ambiente, es un daño hecho a la Humanidad”.

Papa Francisco

CAPÍTULO

1

Introducción

Los estuarios son sistemas de interacción entre el mar, la atmósfera y la cuenca fluvial. En ellos se intercambian agua, nutrientes y otros solutos, dando cobijo a uno de los ecosistemas más productivos de la Tierra, los cuales dan soporte a importantes actividades ambientales, sociales y económicas.

El avance del conocimiento de las últimas décadas ha permitido identificar y analizar la interconexión entre los diversos procesos naturales que concurren en un estuario. Así, la marea incorpora agua salada y oxigenada, y extrae una mezcla fértil de agua con nutrientes. El agua dulce favorece la estratificación de la columna de agua y la formación y ubicación del frente salino; los llanos mareales extienden la acción del mar por amplias planicies, marismas, caños y esteros, e influyen en el sentido de las corrientes residuales y los intercambios de sustancias y nutrientes entre el estuario y la plataforma. Los procesos de intercambio y su evolución espacial y temporal, determina la capacidad del estuario para albergar vida y mitigar las consecuencias de eventos extremos, tales como avenidas y temporales en el océano y sus tiempos de relajación.

En estos entornos el hombre ha encontrado un amplio territorio para sus actividades económicas con repercusiones sociales y ambientales. Las Administraciones practican una gestión descoordinada y muy alejada de los principios requeridos en las Directivas Europeas que deben regir la gestión eficiente de cualquier sistema

1. INTRODUCCIÓN

litoral. España no ha sido ajena a este proceso de ocupación. De hecho, todos los estuarios relevantes de Andalucía, entre ellos el Guadalquivir, muestran la huella de las actividades humanas, en particular, el comercio marítimo y su demanda de vías navegables y suelo para áreas industriales, y la agricultura. Estas actividades han requerido y requieren de la intervención de Administraciones. Para tomar las medidas adecuadas y coordinadas, estos organismos necesitan de herramientas idóneas para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de aquellas sobre un estuario. Se recurre a modelos de gestión lo suficientemente versátiles que permitan optimizar y compatibilizar usos y actividades.

Un sistema prototipo de conflictos humanos y ambientales es el Estuario del Río Guadalquivir (ERG). No sólo los procesos de intercambio naturales en el estuario alteran la morfo-hidrodinámica del sistema. El estuario, con mayor intensidad desde el siglo XIX, ha sido dragado y modificado en sus trazados originales con cortas y canalizaciones para favorecer la navegación hasta el Puerto interior de Sevilla, se han ocupado sus áreas intermareales y marismas para conferirle nuevos usos, y se han construido presas para regular sus avenidas y el reducir el riesgo de inundación.

En los últimos años no sólo no se ha detenido la sobreexplotación del estuario, sino que han aumentado las demandas de transformación. En una situación próxima al agotamiento de los recursos básicos de suelo y agua, la manifiesta imposibilidad de satisfacer todas estas demandas ha incrementado la crispación social. Los conflictos de intereses y competencias entre los diferentes usuarios del estuario y las Administraciones tiene difícil acople y resolución ya que, en general, se carece de herramientas operativas para predecir el efecto que, a corto, medio y largo plazo, pueden tener las actuaciones sobre el sistema.

Ante un uso y demandas crecientes y bajo el escenario de cambio global, la capacidad de modelar y predecir tanto la respuesta natural como estresada frente a agentes forzadores, y su cambio espacio-temporal, es un tema en estudio permanente.

En este contexto se establecen los objetivos que se indican a continuación.

1.1 Objetivos

El objetivo general de esta tesis doctoral es desarrollar un modelo hidrodinámico y de transporte de solutos idealizado para estuarios que permita evaluar escenarios de gestión con los que poder diagnosticar y pronosticar los efectos y repercusiones en el contexto estuarino. Como sistema prototipo de aplicación se ha seleccionado el Estuario del Río Guadalquivir, por su relevancia ambiental y la disponibilidad de observaciones.

Los objetivos específicos a alcanzar aplicados al Estuario del Río Guadalquivir son:

- Implementar un modelo idealizado que permita evaluar la dinámica mareal y de salinidad.
- Plantear escenarios actuales de gestión basados en los antecedentes históricos del Estuario del Río Guadalquivir.
- Cuantificar impactos en la dinámica mareal y de salinidad de esos escenarios.
- Complementar los resultados con modelos estocásticos que permiten predecir las elevaciones y corrientes submareales.
- Analizar en base a los resultados la transferencia del conocimiento y la normativa aplicable al estuario para valorar las restricciones impuestas por cuestiones legales y ambientales (p. ej., Directiva Marco del Agua) y su gestión integral.

El modelo idealizado unidimensional lineal mareal objeto de esta tesis, se centra específicamente en el análisis de la propagación de la onda de marea semidiurna M2 y la distribución longitudinal de salinidad en la red de canales del ERG. Para la propagación mareal se emplean soluciones de las ecuaciones linealizadas para aguas someras a escala mareal con fricción, debidamente calibradas y establecidas por tramos de sección rectangular (e.g., [56], [81]). Este estudio extiende las soluciones propuestas por [86] obteniendo soluciones analíticas exactas para las

1. INTRODUCCIÓN

amplitudes de la salinidad mareal obtenidas de la ecuación de transporte unidimensional de salinidad caracterizada por un término advectivo acoplado al flujo mareal y un coeficiente efectivo de dispersión longitudinal.

Este análisis sigue desarrollos previos en otros estuarios y en el propio Estuario del Río Guadalquivir. Otros modelos, [104],[5],[88] obtuvieron soluciones analíticas sin incluir el efecto de amortiguación por fricción en las mareas. La fricción linealizada en geometrías complejas fue considerada por varios autores como [54],[91],[102],[105],[108],[1],[62]. [87],[86] desarrollando soluciones analíticas para estuarios con una sección variable que le permitió evaluar la influencia de las barreras en la propagación mareal y la distribución de salinidad submareal longitudinal, respectivamente. Otros trabajos como [113] en el estuario de Delaware, [102],[52] en Queen Charlotte Sound, al oeste de Canadá o [68] en el estuario de Ems proporcionan soluciones analíticas que permiten evaluar la dinámica mareal en una red compleja de canales o estudios más recientes como [39] aplicado al estuario del Guadiana. En el ERG también se han desarrollado previamente estudios similares. Modelos predecesores como el de [69] considera un modelo lineal unidimensional para estudiar el efecto de la reflexión mareal en el canal del Puerto de Sevilla. [19] extendió el análisis hasta la presa Alcalá del Río adoptando un enfoque heurístico para incluir fricción. Estudios más recientes como [14] estudiaron las condiciones de resonancia del ERG. Este estudio hidrodinámico de los estuarios mediante modelos deterministas como el que centra esta tesis, se complementa con modelos estocásticos, ver Apéndice A. En este sentido, tomando como base la tesis doctoral [89], se enlaza con modelos estocásticos dentro del ámbito estuarino prediciendo elevaciones y corrientes submareales en el ERG.

Esta tesis doctoral está organizada en siete capítulos. En este Capítulo 1 se han introducido el entorno de estudio y marcado los Objetivos. El Capítulo 2 de Modelo y Observaciones se divide en dos secciones: 2.1 con la descripción del desarrollo matemático del modelo idealizado y 2.2.1 con su aplicación al ERG en él se describe la zona de estudio, se establece la topología base sobre la que se implementa y se incluyen los datos observados para calibrar el modelo en al ERG. El Capítulo 3 se centra en la historia de ERG con la finalidad de poder plantear los escenarios a modelar y que son descritos en el siguiente Capítulo 4 relativo a

Definición de Escenarios. En el Capítulo 5 se presentan y analizan los principales resultados aplicando modelos deterministas y, complementariamente, estocásticos. En este último capítulo, se analizan los escenarios 5.1 "Efecto de la Profundización del canal de navegación", 5.2 "Reconexión del Brazo del Oeste", 5.3 "La recuperación de Marismas en Doñana" y 5.4 "Eliminación de la Presa de Alcalá del Río". El alcance de los Resultados y sus posibles implicaciones se discute en la Sección 5.5. Una discusión sobre la Transferencia de Conocimiento, Legislación y Gestión Integral en el ERG se encuentra en el Capítulo 6. Finalmente, las Conclusiones de la Tesis Doctoral están recogidas en el Capítulo 7.

*”Si buscas resultados distintos, no
hagas siempre lo mismo.”*

Albert Einstein

CAPÍTULO

2

Modelo y Observaciones

En el primer epígrafe de este capítulo se describe el desarrollo matemático del modelo y en el segundo su aplicación al ERG. Este subcapítulo incluye una descripción del Área de Estudio, la Topología Base establecida para su implementación, los datos de las observaciones fruto de la campaña de monitorización del ERG entre 2008-2011 y la calibración del modelo en el ERG con la obtención de los parámetros de ajuste, r como el coeficiente de fricción linealizado a la Lorentz y D el coeficiente efectivo de dispersión.

2.1 Modelo idealizado

El movimiento mareal unidimensional en un canal recto de longitud L y sección rectangular es descrito por las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento (e.g. [56, 81]) siguientes

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial (hbu)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{r}{h} u &= 0.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Aquí x representa la coordenada longitudinal al canal y t es el tiempo. La variable $\eta(x, t)$ es la elevación mareal respecto al nivel medio del agua h , $u(x, t)$ es la

2. MODELO Y OBSERVACIONES

corriente mareal promediada en la sección. La anchura del canal es b y r es un coeficiente de fricción linealizado según el esquema de Lorentz, el cual será debidamente ajustado en la etapa de calibración. La propagación de la onda de marea descrita según Ec. 2.1 es barotrópica, $L \gg h$, lineal ($\eta/h \ll 1$) (e.g., [55]) y sin rotación (radio de deformación de Rossby pequeño comparado con b).

La salinidad está acoplada al movimiento mareal y es descrita por la ecuación de advección-difusión unidimensional siguiente

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial s}{\partial x} \right), \quad (2.2)$$

donde $s(x, t)$ es la salinidad y D el coeficiente efectivo de dispersión que da cuenta de la mezcla longitudinal y se considera en este trabajo constante. Este coeficiente D será igualmente calibrado con observaciones.

Para un forzamiento armónico de frecuencia $\sigma = 2\pi/T$ y periodo T en $x = 0$ (desembocadura), la estructura lineal de las ecuaciones 2.1 y 2.2 sugiere soluciones de la forma

$$\begin{aligned} \eta(x, t) &= \Re\{\bar{\eta}(x) + \hat{\eta}(x, t)\} = \Re\{\bar{\eta}(x) + Z(x) \exp(-i\sigma t)\} \\ u(x, t) &= \Re\{\bar{u}(x) + \hat{u}(x, t)\} = \Re\{\bar{u}(x) + U(x) \exp(-i\sigma t)\} \\ s(x, t) &= \Re\{\bar{s}(x) + \hat{s}(x, t)\} = \Re\{\bar{s}(x) + S(x) \exp(-i\sigma t)\}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde la barra, $(\bar{\quad})$, indica promedio en el tiempo y el gorro ($\hat{\quad}$) representa desviaciones mareales respecto del comportamiento promedio. Aquí Z , U y S son las amplitudes mareales complejas de las elevaciones, corriente y salinidad, respectivamente. A escala promediada o submareal se considera el movimiento independiente de t , i.e., estacionario.

Por ejemplo, considerando un tramo recto de longitud x_L , anchura b y profundidad h constantes, combinando las ecuaciones para u y η se llega a una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden para Z que tiene solución analítica (e.g. [56, 81]). A partir de la solución de Z y haciendo uso de Ec.2.1 obtiene una expresión analítica para U . Éstas son

$$\begin{aligned} Z(x) &= A \exp(i\kappa x) + B \exp(-i\kappa x) \\ U(x) &= \sigma / (\kappa h) (A \exp(i\kappa x) - B \exp(-i\kappa x)) \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.1 Modelo idealizado

donde κ es un número de onda complejo dado por $\kappa = \kappa_0 \sqrt{1 + ir/(\sigma h)}$, y κ_0 es el número de onda cuando no existe fricción. Físicamente, la solución para $\hat{\eta}$ (también para \hat{u}) es interpretada como una superposición lineal de dos ondas planas propagándose en sentidos opuestos. Imponiendo las condiciones de contorno de marea co-oscilante en $x = 0$ ($\hat{\eta}(0, t) = \Re\{Z_0 \exp(-i\sigma t)\}$) y pared cerrada en $x = x_L$ ($\hat{u}(x_L, t) = 0$) se calculan A y B . Las soluciones para la parte oscilatoria del campo de elevaciones y corrientes son

$$\hat{\eta}(x, t) = \Re\left\{Z_0 \frac{\cos(\kappa(x_L - x))}{\cos(\kappa x_L)} \exp(-i\sigma t)\right\}, \quad (2.5)$$

$$\hat{u}(x, t) = \Re\left\{-\frac{Z_0 \sigma i \sin(\kappa(x_L - x))}{h\kappa \cos(\kappa x_L)} \exp(-i\sigma t)\right\} \quad (2.6)$$

Similarmente, se deduce la componente mareal de la salinidad siendo su expresión:

$$\hat{s}(x, t) = \Re\left\{(x\hat{A} \exp((i\kappa + \lambda)x) - x\hat{B} \exp(-(i\kappa - \lambda)x)) \exp(-i\sigma t)\right\}, \quad (2.7)$$

donde $\lambda = Q_d/(bhD)$, con Q_d la descarga de agua dulce y los coeficientes \hat{A} y \hat{B} son constantes y serán calculadas con las condiciones de contorno (y condiciones de acuerdo en el caso de considerar nodos intermedios).

Paralelamente, las soluciones para la componente promediada de las elevaciones, corrientes y salinidad corresponden a las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$\bar{\eta} = -\frac{fQ_d}{ghbT_{M2}\sqrt{gh}}x + d, \quad (2.8)$$

$$\bar{u} = Q_d/bh, \quad (2.9)$$

$$\bar{s} = \delta_2 \exp(\lambda x) + \delta_1/(\lambda), \quad (2.10)$$

con d , δ_1 , δ_2 constantes que serán obtenidas mediante las condiciones de contorno y las condiciones de acuerdo, y f es un coeficiente de fricción efectiva a escala promediada.

La Figura 2.1 muestra el procedimiento a seguir para calcular las todas variables. Una vez obtenidos los valores de r y D del ajuste del modelo (paso 1), se pueden calcular las elevaciones y corrientes mareales, $\hat{\eta}$ y \hat{u} , mediante las ecuaciones deducidas 2.5 y 2.6 (paso 2). Además, teniendo en cuenta que las secciones de

2. MODELO Y OBSERVACIONES

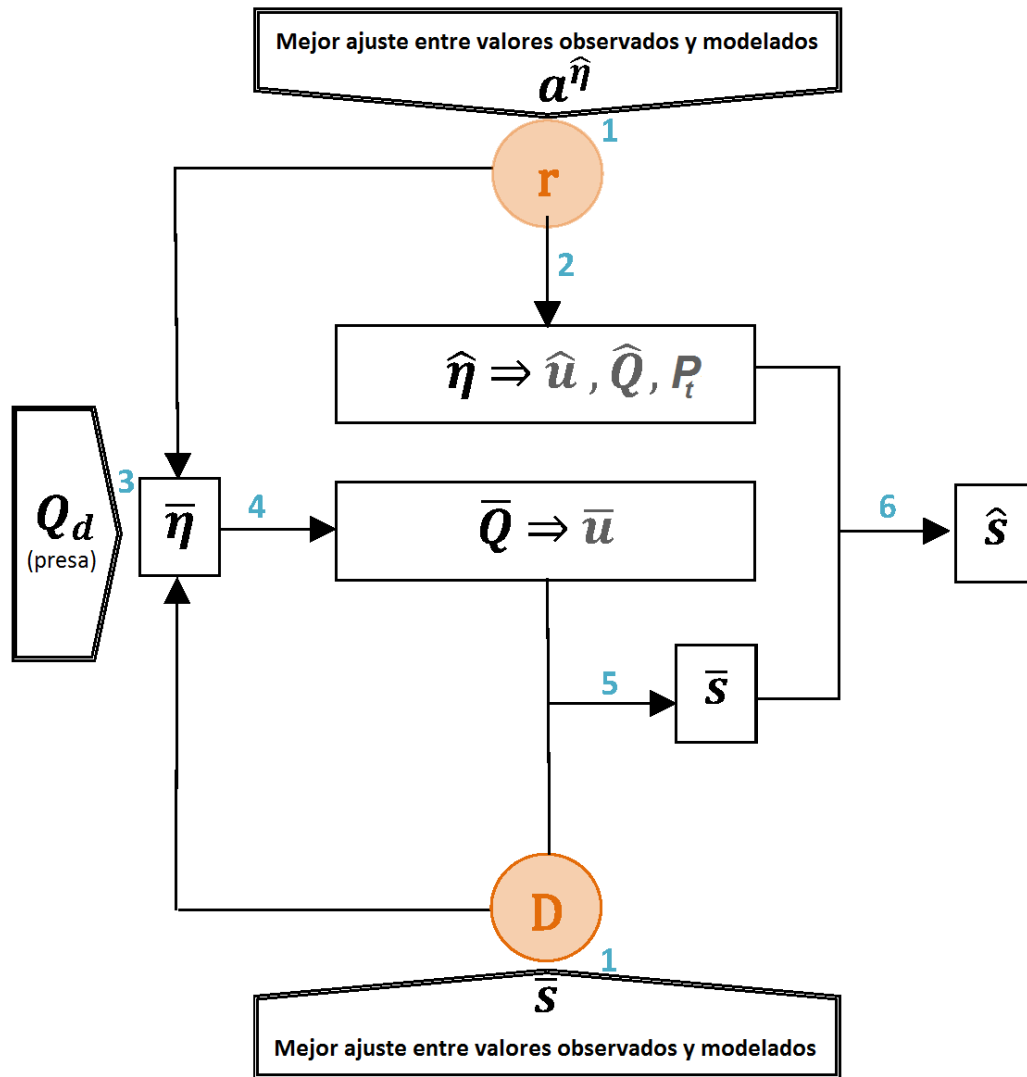


Figura 2.1: Diagrama con los seis pasos a seguir para obtener las componentes de las elevaciones, corrientes y salinidad promediadas $\{\bar{\eta}, \bar{u}, \bar{s}\}$, y mareales $\{\hat{\eta}, \hat{u}, \hat{s}\}$. Los datos observados impuestos están representados por pentágonos, \diamond , los parámetros ajustados con círculos naranjas, \bullet , y las variables calculadas mediante cuadriláteros, \square .

2.1 Modelo idealizado

cada tramo son conocidas, b y h , los caudales mareales, \hat{Q} , y el volumen mareal, P_t , son también deducidos. El siguiente paso es conseguir las componentes promediadas. Partiendo de la combinación de las expresiones 2.1 y 2.2 se deduce el siguiente sistema:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{r\bar{u}}{h} = 0, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial x^2}. \quad (2.13)$$

Su resolución permite obtener la ecuación 2.14 de las elevaciones promediadas, $\bar{\eta}$, para cada tramo (paso 3), la ecuación 2.15 para obtener caudales y corrientes promediados, \bar{Q} y \bar{u} , (paso 4) y la salinidad promediada, \bar{s} , con la ecuación 2.16 (paso 5).

$$\bar{\eta}(x) = -\frac{fQ_d}{ghbT_{M2}\sqrt{gh}}x + d, \quad (2.14)$$

$$\bar{u}(x) = Q_d/(bh) = \text{constante}, \quad (2.15)$$

$$\bar{s}(x) = (\delta_2 \exp(Q_dx/bhD)) + (\delta_1/(Q_d/bhD)). \quad (2.16)$$

En el caso de aplicación del Estuario del Río Guadalquivir, la descarga fluvial, Q_d , se asume constante e igual a $40 \text{ m}^3/\text{s}$ en régimen de aguas bajas y localizada en la presa de Alcalá del Río.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo anteriormente calculado, la salinidad mareal, \hat{s} , puede ser calculada (paso 6). En este caso la ecuación a resolver es:

$$(i\sigma \hat{s}) + (\bar{u}(\frac{\partial \hat{s}}{\partial x})) - (D(\frac{\partial^2 \hat{s}}{\partial x^2})) = \hat{u}(\frac{\partial \bar{s}}{\partial x}),$$

y su solución es la ecuación 2.17.

$$\hat{s}(x) = x\hat{A} \exp((i\kappa + \lambda)x) - x\hat{B} \exp(-(i\kappa - \lambda)x) \quad (2.17)$$

Además, los coeficientes \hat{A} y \hat{B} son igual a,

$$\hat{A} = \frac{((A\sigma\lambda\delta_2)/\kappa h)}{(D(i\kappa+\lambda)(2+(i\kappa+\lambda)x) - (\bar{u}(1+(i\kappa+\lambda)x) - (i\sigma x)))}$$

$$\hat{B} = \frac{((B\sigma\lambda\delta_2)/\kappa h)}{(-D(i\kappa-\lambda)(2-(i\kappa-\lambda)x) - (\bar{u}(1-(i\kappa-\lambda)x) - (i\sigma x)))}$$

2. MODELO Y OBSERVACIONES

siendo $\lambda = Q_d/(bhD)$.

El método de superposición de soluciones de Lugt, [68], también se utilizó para verificar que los resultados obtenidos con este modelo para el estuario prototipo son correctos. En particular, se modeló la configuración de referencia para elevaciones y corrientes mareales en el ERG. Las máximas desviaciones entre los resultados de los dos métodos se consideran admisibles ya que el intervalo de error establecido para los datos observados es mayor. Además, las mayores discrepancias se producen alrededor del punto de conexión entre el canal principal y el secundario, para el caso del Estuario del Río Guadalquivir se trata del ramal del Puerto de Sevilla. Este resultado es predecible puesto que el método basado en Ippen-Harleman obtiene la solución exacta, mientras que este segundo método es perturbativo.

La ecuación diferencial para concentración de sólidos en suspensión, c , es, [46],

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \alpha_s u^2 + \gamma_s c = 0, \quad (2.18)$$

siendo $\gamma_s = \frac{w_s^2}{k_v}$ parámetro a ajustar con los datos observados del estuario.

Nuevamente, este planteamiento presenta una solución con la estructura:

$$c(x, t) = \Re\{\bar{c}(x) + \hat{c}(x, t)\} = \Re\{\bar{c}(x) + C(x) \exp(-i2\sigma t)\} \quad (2.19)$$

Para resolver la concentración de sólidos en suspensión procederemos con la siguiente secuencia de cálculo de cada uno de los términos de la ecuación 2.18, es decir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \gamma_s c = \alpha_s u^2. \quad (2.20)$$

Considerando 2.19 y desarrollando cada uno de los tres términos de la ecuación 2.20 se deduce:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial(\bar{c} + \hat{c})}{\partial t} = \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{c}}{\partial t}. \quad (2.21)$$

$$\gamma_s c = \gamma_s (\bar{c} + \hat{c}) = \gamma_s \bar{c} + \gamma_s \hat{c}. \quad (2.22)$$

$$\alpha_s u^2 = \alpha_s (\bar{u} + \hat{u})^2 = \alpha_s (\bar{u}^2 + \hat{u}^2 + 2\bar{u}\hat{u}). \quad (2.23)$$

Y así podemos obtener por un lado la solución de la componente promediada estacionaria de la concentración de sólidos en suspensión:

$$\gamma_s \bar{c} = \alpha_s \bar{u}^2 \rightarrow \bar{c} = \frac{\alpha_s \bar{u}^2}{\gamma_s}. \quad (2.24)$$

Y por otro lado la componente oscilatoria de la concentración de sólidos en suspensión:

$$\frac{\partial \hat{c}}{\partial t} + \gamma_s \hat{c} = \alpha_s \hat{u} (\hat{u} + 2\bar{u}). \quad (2.25)$$

Si \bar{u} es pequeña, i.e. $|\hat{u}| \gg |\bar{u}|$, entonces la ec. 2.25 se aproxima a:

$$\frac{\partial \hat{c}}{\partial t} + \gamma_s \hat{c} \approx \alpha_s \hat{u}^2. \quad (2.26)$$

Resolviendo la ecuación diferencial aproximada 2.26 y teniendo en cuenta las expresiones definidas para componentes mareales de la corriente con la ecuación 2.3: $\hat{u}(x, t) = U(x) \exp(-i\sigma t)$, y concentración de sólidos en suspensión con la expresión 2.19: $\hat{c}(x, t) = C(x) \exp(-i2\sigma t)$, se obtiene,

$$2i\sigma C(x) + \gamma_s C(x) \approx \alpha_s U(x), \quad (2.27)$$

y por lo tanto el transporte de sedimentos está relacionado con los cambios de las corrientes mareales y la amplitud de la componente mareal de la concentración de sólidos en suspensión adopta la siguiente expresión aproximada:

$$C(x) \approx \frac{\alpha_s U(x)^2}{\gamma_s + 2i\sigma}. \quad (2.28)$$

De manera que $q \propto |\hat{u}^3|$, siendo q la tasa potencial del transporte, [48].

2. MODELO Y OBSERVACIONES

2.2 Aplicación al ERG

2.2.1 Área de Estudio



Figura 2.2: Área de estudio: El mapa incluye las estaciones de monitorización utilizadas en este trabajo. La red está formada por mareógrafos ubicados en el canal principal y en canal de acceso al Puerto de Sevilla, estaciones de muestreo o CTDs y correntímetros. Los nodos seleccionados están simbolizados con estrellas. El origen de coordenadas a lo largo del estuario (km 0) es $n_{m,0}$. Éste coincide con la estación $\beta_{m,0}$, localizada en la desembocadura, aunque la primera estación de control, $\gamma_{m,0}$, se encuentra en la parte negativa del eje de abscisas.

El Estuario del Río Guadalquivir se encuentra en el SO de la Península Ibérica (Figura 2.2), y desemboca en el Golfo de Cádiz (Océano Atlántico). El canal de marea principal se extiende 110 km, siendo débilmente convergente desde su única desembocadura en Sanlúcar de Barrameda hasta la presa de Alcalá del Río en cabecera, aguas arriba de Sevilla. La presa de Alcalá del Río representa el último punto de control de agua dulce, y el límite aguas arriba de la marea entrante. El ERG es navegable hasta el puerto de Sevilla, a 85 km de la desembocadura, separado del canal principal, *thalweg*, por un corto canal secundario de menos de 1 km y una esclusa. Su profundidad mínima de 6,5 metros en el canal se mantiene actualmente con dragados para favorecer la navegabilidad. En general, el estuario está altamente canalizado, con ramales secundarios poco relevantes para la dinámica mareal del canal principal. El Parque Nacional de Doñana (Figura 2.2) se encuentra en su mayor parte aislado de las oscilaciones mareales y el canal del Brazo del Oeste se desconectó aguas arriba del canal principal para contener la intrusión salina. Las descargas de agua dulce, Q_d , son inferiores a 40 m³/s durante el 75 % del año (periodos secos). En estas condiciones, definidas como de aguas bajas, el estuario se

encuentra dominado por la marea, [29]. Las descargas superiores a 400 m³/s, que interrumpen la propagación de las mareas [66], se producen debido a los caudales altos de los ríos o están asociadas con las necesidades de regadío aguas abajo.

Se trata de un estuario mesomareal (carrera de marea en mareas vivas por debajo de 3.5 m) cuya principal constituyente es la semidiurna principal lunar M2 ($T_{M2} = 12.42$ horas). La propagación de la onda de marea en régimen de aguas bajas puede explicarse satisfactoriamente por la reflexión mareal, la fricción y la convergencia del canal [29].

En lo referente a la distribución de salinidad, el estuario está bien mezclado y es positivo [30]. Las máximas salinidades se observan normalmente en la desembocadura debido a que las pérdidas por evaporación se compensan por la descargas de agua dulce. Todo el análisis presentado se limita a condiciones normales o de aguas bajas.

2.2.2 Topología Base

El estuario puede ser segmentado en tramos de sección uniforme. En el caso del ERG, la división se realiza según la morfología actual y los escenarios propuestos en esta tesis.

La Figura 4 muestra la topología de diseño para cada escenario en términos de los tramos y nodos considerados. Las ecuaciones 2.1 y 2.2 pueden aplicarse a la red mareal completa del ERG. Para ello el canal se divide en una serie de segmentos, cada uno con su longitud (x_L), anchura (b) y profundidad (h) y delimitado por nodos. Definimos el canal principal del ERG con cinco tramos de sección rectangular uniforme denotados desde la desembocadura hacia aguas arriba como $S_{m,1}$, $S_{m,2}$, $S_{m,3}$, $S_{m,4}$, y $S_{m,5}$, respectivamente. Dichos tramos están delimitados por los seis nodos siguientes: $n_{m,0}$, $n_{m,1}$, $n_{m,2}$, $n_{m,3}$, $n_{m,4}$, y $n_{m,5}$. En los nodos o conexiones se deben cumplir las condiciones de contorno y continuidad, a saber, las elevaciones son iguales a ambos lados y se conserva el caudal. La Figura 2.2 muestra la posición real de cada nodo y la Tabla 2.1 indica los parámetros geométricos de cada tramo. Aguas abajo del tramo $S_{m,1}$, i.e. nodo $n_{m,0}$, está localizado geográficamente el Puerto de Bonanza ($\beta_{m,0}$). En este nodo se impone el forzamiento co-oscilante

2. MODELO Y OBSERVACIONES

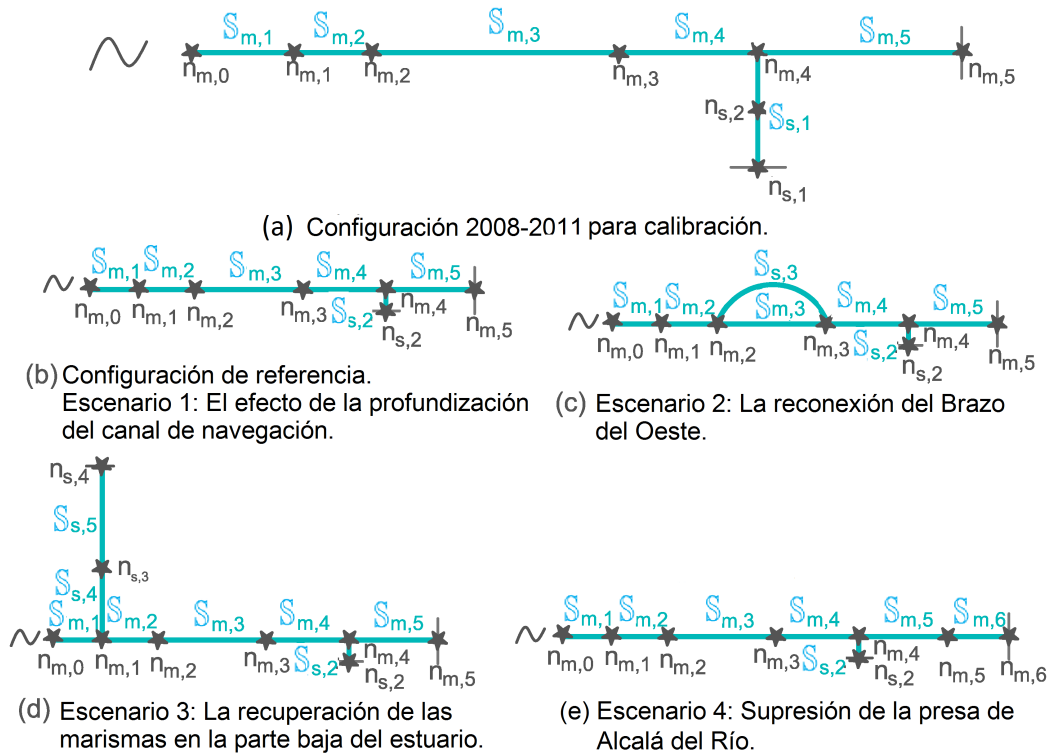


Figura 2.3: Representación topológica de la configuración durante el periodo 2008-2011 del ERG (panel (a)). Los paneles (b), (c), (d), y (e) muestran la topología de los diferentes escenarios. Los siguientes símbolos son comunes en todos los casos: nodos (\star , $n_{i,j}$ donde $i = m, s$ y $j = 0, \dots, 6$), tramos en línea azul ($S_{i,j}$ donde $i = m, s$ y $j = 0, \dots, 6$), barrera ($|$), y forzamiento mareal en desembocadura \sim .

2.2 Aplicación al ERG

del armónico de marea y es el origen de coordenadas para el cálculo de las elevaciones promediadas $\bar{\eta}$. El nodo $n_{m,5}$ está localizado en la presa de Alcalá del Río, donde la reflexión se considera total (nodo $n_{m,5}$, al final del tramo aguas arriba, $\mathbb{S}_{m,5}$).

Tabla 2.1: Valores de los parámetros para cada tramo: Nodos como se muestran en la Figura 4, longitud x_L , anchura b , profundidad h y coeficientes de fricción r y de difusión D ajustados para la constituyente M2.

| Tramos | Nodos | x_L (km) | b (km) | h (m) | $r \times 10^{-3}$ | D (m ² /s) |
|--------------------|----------------------|------------|----------|---------|--------------------|-------------------------|
| $\mathbb{S}_{m,1}$ | $(n_{m,0}, n_{m,1})$ | 12.0 | 0.400 | 6.5 | 1.9 | 550.00 |
| $\mathbb{S}_{m,2}$ | $(n_{m,1}, n_{m,2})$ | 6.3 | 0.350 | 6.5 | 1.5 | 514.29 |
| $\mathbb{S}_{m,3}$ | $(n_{m,2}, n_{m,3})$ | 42.6 | 0.300 | 6.5 | 1.3 | 514.29 |
| $\mathbb{S}_{m,4}$ | $(n_{m,3}, n_{m,4})$ | 18.1 | 0.200 | 6.5 | 1.0 | 300.00 |
| $\mathbb{S}_{m,5}$ | $(n_{m,4}, n_{m,5})$ | 24.2 | 0.100 | 6.5 | 1.4 | 335.71 |
| $\mathbb{S}_{m,6}$ | $(n_{m,5}, n_{m,6})$ | 22.4 | 0.080 | 4.0 | 1.4 | 335.71 |
| $\mathbb{S}_{s,1}$ | $(n_{m,4}, n_{s,1})$ | 2.9 | 0.238 | 6.5 | 1.0 | 300.00 |
| $\mathbb{S}_{s,2}$ | $(n_{m,4}, n_{s,2})$ | 0.8 | 0.192 | 6.5 | 1.0 | 300.00 |
| $\mathbb{S}_{s,3}$ | $(n_{m,2}, n_{m,3})$ | 56.1 | 0.350 | 6.5 | 1.0 | 514.29 |
| $\mathbb{S}_{s,4}$ | $(n_{m,1}, n_{s,3})$ | 4.0 | 0.100 | 1.0 | 1.0 | 550.00 |
| $\mathbb{S}_{s,5}$ | $(n_{s,3}, n_{s,4})$ | 16.0 | 16 | 1.0 | 1.0 | 550.00 |

Los canales mareales secundarios son denominados como $\mathbb{S}_{s,1}, \dots, \mathbb{S}_{s,5}$. La configuración de la red mareal durante el periodo 2008-2011 puede gráficamente ser representada como aparece en la Fig. 4, panel (a), donde el canal secundario de acceso al Puerto de Sevilla constituye el canal secundario definido como $\mathbb{S}_{s,1}$. Este tramo conecta con los nodos $n_{m,4}$ y $n_{s,1}$ y al final se cierra con la Antigua Esclusa donde la reflexión se considera total. Los tramos secundarios $\mathbb{S}_{s,2}, \dots, \mathbb{S}_{s,5}$ corresponden al canal secundario de la Nueva Esclusa, los dos siguientes al Brazo del Oeste y por último el tramo en la parte baja del estuario con $\mathbb{S}_{s,4}$ y $\mathbb{S}_{s,5}$. Estos canales secundarios se muestran en la Figura 4, paneles (b), (c) y (d) respectivamente. En el caso de la eliminación de la presa de Alcalá del Río, panel (e), se añade el tramo $\mathbb{S}_{m,6}$ y nodo $n_{m,6}$ al canal principal cuyas características aparecen en la tabla 2.1 y serán descritas en la modelización.

2. MODELO Y OBSERVACIONES

En resumen, 4 panel (a) representa la configuración de (2008-2011) utilizada para la calibración del modelo y ajuste de los parámetros r y D para cada tramo y el panel (b) muestra la topología base sobre la que se va a modelar los escenarios. Todos los valores de diseño se encuentran recogidos en la Tabla 2.1, los cuales han sido estimados mediante Google Earth©, Puestos del Estado, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

2.2.3 Observaciones

El ERG fue ampliamente monitorizado en un estudio llevado a cabo entre 2008 y 2011 y descrito por [75, 98]. Se instalaron, entre otros equipos, mareógrafos, correntímetros y sondas de calidad ambiental. En la Figura 2.2 se muestran los equipos relevantes a este estudio. Las Tablas 2.2 y 2.3 indican las localizaciones de la instrumentación. Los mareógrafos se denotan por $\beta_{m,i}$ y $\beta_{s,i}$. El subíndice m indica ubicación en el canal principal y s para canales secundarios, en este caso el de acceso al Puerto de Sevilla. El origen de coordenadas a lo largo del estuario (km 0) se encuentra situado en el mareógrafo más cercano a la desembocadura, $\beta_{m,0}$, en el Puerto pesquero de Bonanza. El mareógrafo $\beta_{s,1}$, situado en la Antigua Esclusa, separaba el canal principal del secundario del Puerto de Sevilla desde 4 de diciembre de 1951, y el mareógrafo denominado $\beta_{s,2}$, localizado a 2 km aguas abajo del canal secundario, fue colocado después de la construcción de la Nueva Esclusa de acceso al Puerto de Sevilla en 25 de noviembre de 2010. Además, se localizan seis correntímetros ($\alpha_{m,i}$ en Fig. 2.2) a lo largo del canal principal entre la desembocadura y el Puerto de Sevilla y ocho estaciones de calidad ambiental o CTDs ($\gamma_{m,i}$ en Fig. 2.2) que proporcionaron los datos de salinidad. Por lo tanto $\gamma_{m,0}$ está en la parte negativa del eje de abscisas. Otros esfuerzos de monitorización del Estuario del Río Guadalquivir se citan en [7].

En [29], a partir de los datos de niveles y corrientes proporcionados por los mareógrafos y correntímetros, se extrajeron mediante análisis armónico [83] las constantes armónicas de la constituyente M2, entre otras. Éstas comprenden amplitudes y fases de elevaciones y corrientes mareales. Se llama amplitud de elevaciones mareales, $a^{\hat{n}}$, al módulo de $Z(x)$ y fase de las elevaciones mareales, $\varphi^{\hat{n}}$,

Tabla 2.2: Localización de mareógrafos, correntímetros y nodos para el modelo. Unidades en km.

| Mareógrafos | | Correntímetros | | Nodos | |
|---------------|-------|----------------|-------|-----------|-----------------|
| $\beta_{m,0}$ | 0.00 | $\alpha_{m,0}$ | 9.00 | $n_{m,0}$ | 0.00 |
| $\beta_{m,1}$ | 16.25 | $\alpha_{m,1}$ | 15.50 | $n_{m,1}$ | 12.00 |
| $\beta_{m,2}$ | 21.5 | $\alpha_{m,2}$ | 26.50 | $n_{m,2}$ | 18.30 |
| $\beta_{m,3}$ | 31.15 | $\alpha_{m,3}$ | 34.50 | $n_{m,3}$ | 60.90 |
| $\beta_{m,4}$ | 46.5 | $\alpha_{m,4}$ | 44.00 | $n_{m,4}$ | 79.00 |
| $\beta_{m,5}$ | 57.25 | $\alpha_{m,5}$ | 58.50 | $n_{m,5}$ | 103.20 |
| $\beta_{m,6}$ | 70.70 | | | | |
| $\beta_{m,7}$ | 94.67 | | | | |
| $\beta_{s,1}$ | 81.94 | | | $n_{s,1}$ | $n_{m,4}+2.94$ |
| $\beta_{s,2}$ | 79.85 | | | $n_{s,2}$ | $n_{m,4}+0.85$ |
| | | | | $n_{s,3}$ | $n_{m,1}+16.00$ |
| | | | | $n_{s,4}$ | $n_{m,1}+20.00$ |

Tabla 2.3: Localización de las estaciones de calidad ambiental o CTDs (Ver Figura 2.2).

| | $\gamma_{m,0}$ | $\gamma_{m,1}$ | $\gamma_{m,2}$ | $\gamma_{m,3}$ | $\gamma_{m,4}$ | $\gamma_{m,5}$ | $\gamma_{m,6}$ | $\gamma_{m,7}$ |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| km | -5.3 | 12.0 | 18.3 | 20.9 | 30.0 | 41.8 | 52.3 | 79.0 |

2. MODELO Y OBSERVACIONES

al argumento de $Z(x)$. Análogo será el cálculo y la nomenclatura utilizada para el resto de componentes mareales: corrientes ($a^{\hat{u}}, \varphi^{\hat{u}}$) y salinidad ($a^{\hat{s}}, \varphi^{\hat{s}}$). Dichos valores de elevaciones, corrientes también expresada en términos del volumen mareal, P_t y salinidad para el armónico M2 se encuentran representados en la Figura 2.4, paneles (a), (b) y (d), respectivamente.

En efecto, el volumen de agua que entra (y sale) en el estuario en cada ciclo de marea se conoce como volumen mareal, P_t , [21]. Su cálculo consiste en multiplicar las corrientes mareales por la sección del tramo y por el periodo del armónico considerado. Los datos de salinidad fueron tomados de [30], cuyos valores de salinidad promedio-mareal están en el panel (c).

Amplitudes y fases mareales, junto con información batimétrica y topográfica proporcionada por Puertos del Estado y estimada mediante Google Earth©, se emplearán para la calibración del modelo.

2.2.4 Calibración del Modelo en el ERG

El ajuste del modelo se realiza obteniendo los valores del coeficiente de fricción linealizado, r , y el coeficiente de difusión, D , para cada tramo. Los valores del coeficiente de fricción linealizado, r , y el coeficiente de difusión, D , para cada tramo se obtienen comparando observaciones de amplitudes y fases de elevaciones y corrientes y salinidad promediada y mareal con los resultados del modelo. Los datos observados empleados para la calibración de este modelo pertenecen a la campaña de monitorización realizada entre los años 2008-2011. La configuración que presentaba el ERG entre estos años considera seis tramos, $\mathbb{S}_{m,1}$, $\mathbb{S}_{m,2}$, $\mathbb{S}_{m,3}$, $\mathbb{S}_{m,4}$, $\mathbb{S}_{m,5}$ y $\mathbb{S}_{s,1}$ (véase Fig. 4, panel(a)).

Para la obtención de los parámetros de ajuste se aplicarán las ecuaciones 2.5 a 2.10. El sistema de ecuaciones presenta doce incógnitas, dos por cada tramo, y requiere doce condiciones de acuerdo (contorno y continuidad de elevaciones y caudales) a resolver. Para el cálculo de r corresponden a:

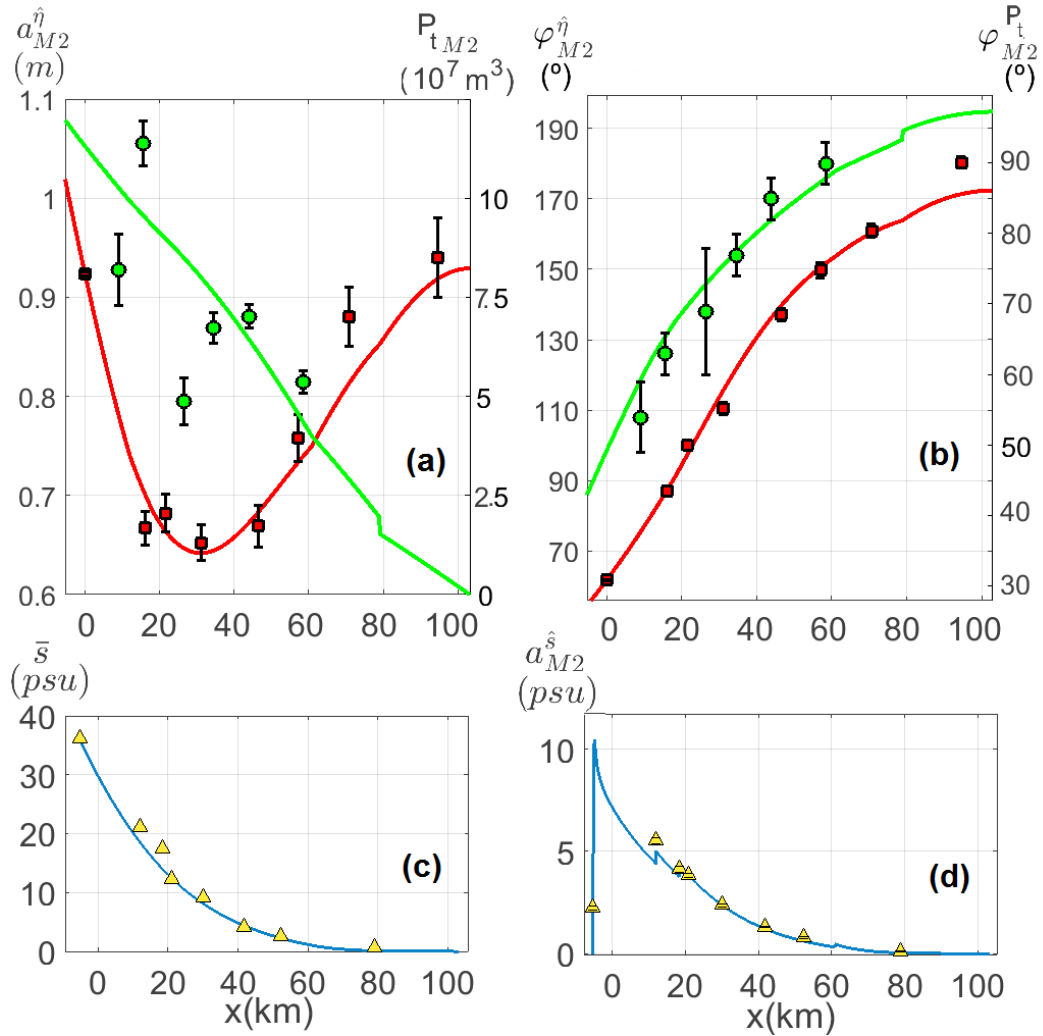


Figura 2.4: La coordenada del eje de abscisas, "x", indica la distancia a la desembocadura ubicada en el origen. Panel (a): amplitudes de las elevaciones mareales, $a_{M2}^{\hat{\eta}}$, observadas (cuadrados rojos) y modeladas (línea roja) para M2 y las amplitudes del volumen mareal, $a_{M2}^{P_t}$, observadas (círculos verdes) y modeladas (línea verde) para M2. Panel (b): la fase de las elevaciones mareales, $\varphi_{M2}^{\hat{\eta}}$, observadas (cuadrados rojos) y modeladas (línea roja) para M2 y la fase del volumen mareal, $\varphi_{M2}^{P_t}$, observadas (círculos verdes) y modeladas (línea verde) para M₂. Panel (c): sobre línea azul se muestran los resultados de la salinidad promediada, \bar{s} , y los observados (triángulos amarillos) Panel (d): la amplitud de la salinidad mareal, $a_{M2}^{\hat{s}}$, observada (triángulos amarillos) y modelada (línea azul).

2. MODELO Y OBSERVACIONES

$$\begin{aligned}
 \hat{\eta}_{\mathbb{S}_{m,1}}(n_{m,0}, t) &= a_0^{\hat{\eta}}, & (2.29) \\
 \hat{u}_{\mathbb{S}_{m,5}}(n_{m,5}, t) &= \hat{u}_{\mathbb{S}_{s,1}}(n_{s,1}, t) = 0, \\
 \hat{\eta}_{\mathbb{S}_{m,k}}(n_{m,k}, t) &= \hat{\eta}_{\mathbb{S}_{m,k+1}}(n_{m,k}, t), \\
 &\text{para } k = 1, \dots, 4. \\
 \hat{\eta}_{\mathbb{S}_{m,4}}(n_{m,4}, t) &= \hat{\eta}_{\mathbb{S}_{s,1}}(n_{m,4}, t), \\
 \hat{u}_{\mathbb{S}_{m,k}}(n_{m,k}, t) b_{m,k} h_{m,k} &= \hat{u}_{\mathbb{S}_{m,k}}(n_{m,k}, t) b_{m,k+1} h_{m,k+1}, \\
 &\text{para } k = 1, \dots, 3. \\
 \hat{u}_{\mathbb{S}_{m,4}}(n_{m,4}, t) b_{m,4} h_{m,4} &+ \hat{u}_{\mathbb{S}_{s,1}}(n_{m,4}, t) b_{s,1} h_{s,1} = \\
 \hat{u}_{\mathbb{S}_{m,5}}(n_{m,4}, t) b_{m,5} h_{m,5},
 \end{aligned}$$

donde $a_0^{\hat{\eta}}$ es el valor de la amplitud de la elevación mareal para la constituyente dada en el nodo $n_{m,0}$. Se define la amplitud de las elevaciones mareales para el armónico M2 como $a_{M2}^{\hat{\eta}}$, la fase de las elevaciones mareales para el armónico M2 como $\varphi_{M2}^{\hat{\eta}}$, y análogamente para \hat{u} , \hat{Q} y \hat{s} . Con estas condiciones las variables dependientes para cada tramo, i.e. las amplitudes complejas de la onda incidente y reflejada, pueden ser expresadas mediante el vector $\mathbb{X} = [A_{\mathbb{S}_{m,1}}, B_{\mathbb{S}_{m,1}}, A_{\mathbb{S}_{m,2}}, B_{\mathbb{S}_{m,2}}, A_{\mathbb{S}_{m,3}}, B_{\mathbb{S}_{m,3}}, A_{\mathbb{S}_{m,4}}, B_{\mathbb{S}_{m,4}}, A_{\mathbb{S}_{m,5}}, B_{\mathbb{S}_{m,5}}, A_{\mathbb{S}_{s,1}}, B_{\mathbb{S}_{s,1}}]$, y resueltas como $\mathbb{A} \cdot \mathbb{X} = \mathbb{B}$. Donde, $\mathbb{B} = [a_0^{\hat{\eta}}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$, y $\mathbb{A} = (\partial_{i,j})_{12 \times 12}$. Las filas en \mathbb{A} corresponde con las condiciones de contorno y de acuerdo, ordenadas de igual forma que la lista de ecuaciones 2.29. Los tramos $\mathbb{S}_{m,1}$, $\mathbb{S}_{m,2}$, $\mathbb{S}_{m,3}$, $\mathbb{S}_{m,4}$, $\mathbb{S}_{m,5}$ y $\mathbb{S}_{s,1}$ corresponden a la columnas de la matriz \mathbb{A} , estableciendo dos por cada tramo. El ajuste de r es obtenido comparando los valores observados y modelados de $\bar{\eta}(x)$. Los valores de r asignados para cada tramo corresponden a los valores que cumplen la condición de mínima distancia entre ambas curvas. En la Figura 2.4 se muestra los resultados del ajuste para el armónico M2, principal constituyente del ERG.

Las condiciones de acuerdo y contorno de las elevaciones promediadas, $\bar{\eta}$, nos permiten obtener el caudal promediado para tramo, \bar{Q} . Estas condiciones son:

$$\begin{aligned}
 Q_d &= \bar{Q}_{S_{m,k}} \text{ para } k = 1, \dots, 5. & (2.30) \\
 \bar{Q}_{S_{s,1}} &= 0, \\
 \bar{\eta}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_0}) &= 0, \\
 \bar{\eta}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{\eta}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k}) \text{ para } k = 1, \dots, 4. \\
 \bar{\eta}_{S_{s,1}}(x) &= \bar{\eta}_{S_{m,4}}(n_{m,4}) = \text{constante}.
 \end{aligned}$$

Denotar que el nodo $n_{m,\gamma_{m,0}}$ corresponde al punto donde la estación $\gamma_{m,0}$ está localizada. Éste es diferente a $n_{m,0}$, el cual es el origen de coordenadas definido para nuestro modelo e igual a $\beta_{m,0}$. En esta ocasión, las condiciones plantean doce ecuaciones linealmente independientes, de manera que las doce incógnitas pueden ser determinadas. Éstas son $\bar{Q}_{S_{m,1}}, \bar{Q}_{S_{m,2}}, \bar{Q}_{S_{m,3}}, \bar{Q}_{S_{m,4}}, \bar{Q}_{S_{m,5}}, \bar{Q}_{S_{s,1}}, \bar{\eta}_{S_{m,1}}, \bar{\eta}_{S_{m,2}}, \bar{\eta}_{S_{m,3}}, \bar{\eta}_{S_{m,4}}, \bar{\eta}_{S_{m,5}}$ y $\bar{\eta}_{S_{s,1}}$. Similarmente las siguientes ecuaciones pueden ser resueltas y la salinidad promediada, \bar{s} , puede ser obtenida en cada tramo, siendo éstas:

$$\begin{aligned}
 \bar{s}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_{m,0}}) &= \bar{s}_0 \text{ y } \bar{s}_{S_{m,5}}(n_{m,5}) = \bar{s}_L = 0, & (2.31) \\
 \bar{s}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{s}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k}) \text{ para } k = 1, \dots, 4. \\
 \frac{d\bar{s}_{S_{m,k}}(n_{m,k})}{dx} &= \frac{d\bar{s}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k})}{dx} \text{ para } k = 1, \dots, 4.
 \end{aligned}$$

donde \bar{s}_0 y \bar{s}_L son los valores observados de la salinidad promediada en desembocadura y en la cabecera, respectivamente. Sin embargo, el caudal de agua dulce es nulo en el canal secundario, en este caso la Antigua Esclusa. Por consiguiente, las componentes de la salinidad fluvial y mareal en este tramo no pueden ser modeladas.

Finalmente, la ecuación 2.17 es utilizada para calcular la salidad mareal, \hat{s} . En este caso las condiciones de contorno son $\hat{s}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_{m,0}}) = \hat{s}_0$ y $\hat{s}_{S_{m,5}}(n_{m,5}) = \hat{s}_L = 0$. Análogamente, \hat{s}_0 y \hat{s}_L son las amplitudes de la salinidad mareal en la desembocadura y cabecera, respectivamente.

Para verificar que los resultados del coeficiente de fricción en cada tramo son apropiados, la configuración de referencia se modela con los mismos valores. Recordemos que la diferencia entre la configuración (2008-2011) y la configuración

2. MODELO Y OBSERVACIONES

de referencia radica en las dimensiones del canal secundario (véase la figura 4 panel (a) y (b)). La reciente construcción de Nueva Esclusa en 2013 supuso acortar el canal secundario del puerto de Sevilla en aproximadamente dos kilómetros que la configuración (2008-2011). Los resultados de las amplitudes de las elevaciones mareales para el armónico M2, $a_{M2}^{\hat{\eta}}$, aumentan en tres centímetros a lo largo de todo el canal principal considerando la configuración de referencia, es decir, con el canal secundario más corto en el nodo $n_{m,4}$. Esto se traduce que la modificación del canal secundario afecta a todo el estuario, no es local. Sin embargo, la celeridad es similar. Esto está de acuerdo con los resultados del análisis armónico de los datos de nivel del mar registrados por Puertos del Estado. En general, el comportamiento de la propagación de onda de marea no cambia (hiposíncrono a 20 km, síncrono a 55 km y hipersíncrono en la cabecera).

Más allá de la concordancia entre el modelo y las observaciones, la construcción de la Nueva Esclusa significó principalmente una influencia local en la dinámica del estuario. Suponiendo que el nivel medio de referencia se ubica en el Puerto de Bonanza, es decir, $\bar{\eta}(n_{m,0})=0$ m, la elevación promedio en el Puerto de Sevilla es $\bar{\eta}(n_{m,4}) = 0.36$ m [21]. Esto muestra una diferencia de cinco centímetros respecto a los obtenidos experimentalmente en el estudio [66]. Este valor permite estimar el coeficiente de fricción en la escala promediada de la ecuación 2.15, que da un valor de $f \approx 600$ m/s.

Los resultados en el canal secundario del Puerto de Sevilla son distintos en la configuración (2008-2011), $\mathbb{S}_{s,1}$, y la configuración de referencia $\mathbb{S}_{s,2}$ porque sus características geométricas cambian. El mayor valor de $a_{M2}^{\hat{\eta}}$ se encuentra en la topología base, al contrario que con las amplitudes de los caudales mareales, $a_{M2}^{\hat{Q}}$.

En la Figura 2.4 donde aparecen los resultados del ajuste para el armónico M2 (curvas continuas) siendo el ajuste satisfactorio. Las amplitudes y fases de las elevaciones mareales se ajustan a los valores observados siendo el coeficiente de determinación $R^2=0.9854$ para las amplitudes de las elevaciones mareales, $a_{M2}^{\hat{\eta}}$, y 0.9973 para las fases de las elevaciones mareales, $\varphi_{M2}^{P_t}$, (paneles (a) y (b), curvas rojas). Las corrientes (volumen mareal) del armónico M2 están igualmente bien descritas por las amplitudes, $a_{M2}^{P_t}$, y fases, $\varphi_{M2}^{\hat{\eta}}$, del modelo (paneles (a) y (b), curvas verdes). Sin embargo, su ajuste empeora respecto al obtenido para las elevaciones. Los valores de los coeficientes de fricción estimados para cada tramo, $r_{\mathbb{S}_{m,1}}$,

$r_{S_{m,2}}, r_{S_{m,3}}, r_{S_{m,4}}, r_{S_{m,5}}$ y $r_{S_{s,1}}$, para la constituyente M2 están en la Tabla 2.1. El orden de magnitud es $\mathcal{O}(10^{-3})$ similar al obtenido en [69]. Los valores mayores se encuentran cerca de la desembocadura, donde según [29], la fricción disminuye la propagación de la marea.

Para el ajuste de D se consideran los valores observados de $\bar{s}(x)$ y $a_{M2}^{\hat{s}}(x)$ (Figura 2.4 paneles (c) y (d)). Éstos son ajustados para cada tramo ($D_{S_{m,1}}, D_{S_{m,2}}, D_{S_{m,3}}, D_{S_{m,4}}, D_{S_{m,5}}$ y $D_{S_{s,1}}$) haciendo uso del modelo. El ajuste es satisfactorio (paneles (c) y (d), curvas azules). Los valores del mejor ajuste para la componente M2 están recogidos en la Tabla 2.1. Dichos coeficientes oscilan entre $300 \text{ m}^2/\text{s}$ y $550 \text{ m}^2/\text{s}$, los cuales decrecen aguas arriba. Para el tramo más cercano a la desembocadura el valor es $550 \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor es ligeramente superior al observado por [30], donde el valor más probable es $500 \text{ m}^2/\text{s}$. Con estos datos la salinidad mareal, \hat{s} , también se modela (ver panel (d), Figura 2.4). En este caso el coeficiente de determinación para la salinidad promediada es $R^2=0.9967$ y para la amplitud de la salinidad mareal se obtiene un valor igual a 0.9517.

Se han ajustado también de forma satisfactoria otras componentes semidiurnas (S2 y N2) y diurnas (O1, Q1 y K1).

En la Figura 2.5, a modo de ejemplo, se pueden verificar los resultados de las constituyentes K1, O1 y M4. Resaltar que el ajuste de la componente M4 difiere notablemente de los valores observados. Este efecto es consecuencia de aplicar un modelo lineal para el ajuste a un armónico resultante de una interacción no lineal, en particular la componente M2 consigo misma siendo para los otros dos armónicos lineales el ajuste satisfactorio.

2. MODELO Y OBSERVACIONES

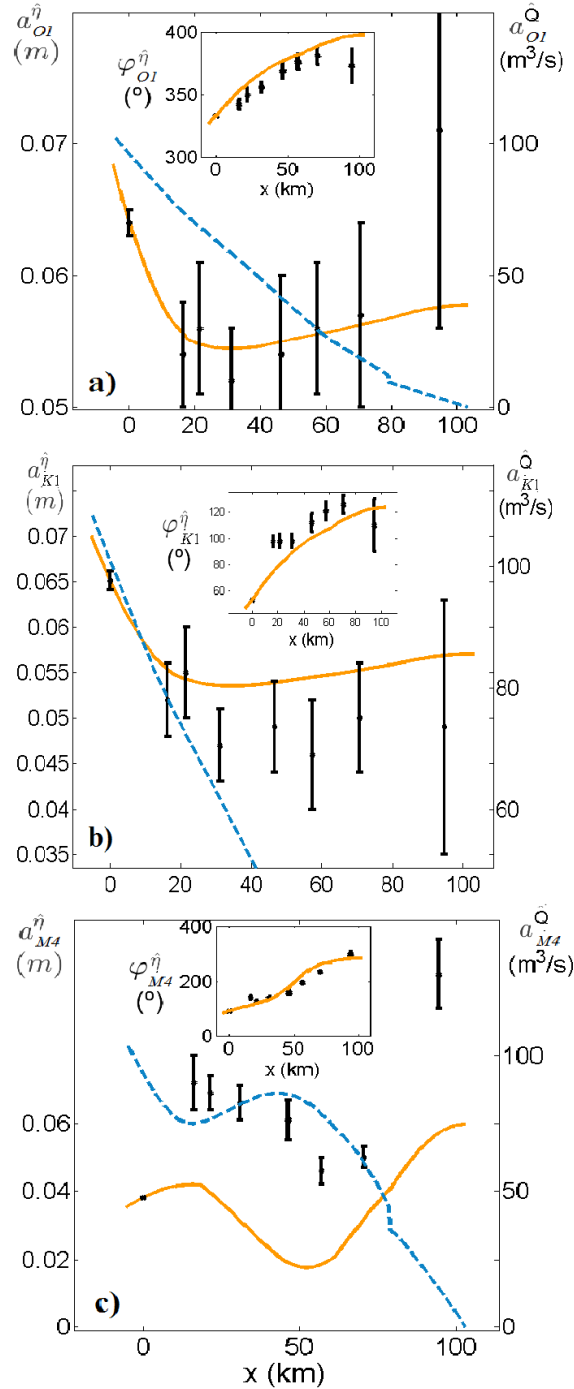


Figura 2.5: Panel (a): Armónico O1. Panel (b): Armónico K1. Panel (c): Armónico M4. En cada uno aparecen: Los datos observados con puntos negros, las amplitudes de las elevaciones mareales modeladas, $a_{\text{armónico}}^{\hat{\eta}}$, con una línea naranja y las amplitudes de caudales mareales modeladas, $a_{\text{armónico}}^{\hat{Q}}$, con una línea discontinua azul para cada armónico. En el recuadro están representadas la fase de las elevaciones mareales modeladas, $\varphi_{\text{armónico}}^{\hat{\eta}}$, con una línea naranja.

*”La Tierra no es una herencia de
nuestros padres, sino un préstamo
de nuestros hijos.”*

Proverbio Iberoamericano

CAPÍTULO

3

Contexto Histórico para Definir Escenarios

En este capítulo navegaremos por la Historia del Estuario del Río Guadalquivir, hasta llegar a la configuración actual del estuario, que es la que se aplica en el modelo idealizado. Se conocerá las necesidades y/o problemática del ERG. El proceso evolutivo del ERG ha sufrido a lo largo de su historia numerosas transformaciones producto de la concurrencia de factores naturales, sociales y económicos, desde finales del siglo XVIII hasta la actualidad, pero con mayor intensidad en el siglo XX.

La evolución del estuario, la disputa por la Hegemonía de la Real Casa de Contratación de Indias entre los Puertos de Cádiz y Sevilla, los intentos de dominar el río, extendidos en el tiempo, que pretendían y pretenden un tráfico fluvial con embarcaciones sobredimensionadas, serán los fundamentos de las diferentes transformaciones e intervenciones humanas que se han realizado en el Estuario del Río Guadalquivir y su Marisma, los cuales serán la base de inspiración para configurar los escenarios a definir e implementar al modelo idealizado introducido en la sección 2.1.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

3.1 Génesis del Estuario

Entre finales del Plioceno y principios del Cuaternario se produjo una nueva transgresión marina, instalándose un golfo que ocupó gran parte del espacio físico de estudio que nos interesa: “*Iniciándose posteriormente una barra litoral marina que cerró el golfo convirtiéndolo en albufera*”, constituyendo la génesis del Estuario del Río Guadalquivir según datos del Instituto Geológico Minero de España (I.G.M.E.) del Parque Nacional de Doñana.

Situándose en el año 6500 a.C. donde lo que ahora sería la localidad de Coria del Río, estaría la desembocadura del proto-estuario, seguramente formando un delta, ver Figura 3.1. Los sucesivos cambios del nivel del mar se conocen gracias a la relativa abundancia de estudios sobre la formación de las distintas capas de suelo que forman la actual marisma, sobre todo en las zonas dunares y donde persisten los antiguos acantilados, [4].

En el caso que nos ocupa, la bahía fue casi cerrada por la Barra de Sanlúcar, transformándola en una gran laguna costera y a medida que se cerraba la entrada de agua del mar se iba estableciendo un nuevo equilibrio: el agua dulce procedente del río y los aportes de agua salada iban conformando una gran laguna de muy escasa profundidad.

La teoría más aceptada para explicar el cierre de la Bahía es la que sostiene que el nivel de mar bajó entre 2 y 4 metros entre 6500 a.C. y 4500 a.C. lo que para una orografía con pocas alteraciones en la cota de nivel fue considerable, a lo que se unieron flechas litorales o cordones de dunas.

Las precipitaciones y las avenidas del río fueron convirtiendo a la futura marisma en una zona inundada que podrían alcanzar las 200.000 ha de lámina de agua, produciéndose el colmatado de la laguna cuando ni río ni mar podían superar la barrera. De esta manera se reconstruye el Golfo Tartésico y Paleoestuario del Guadalquivir en el año 1000 a.C. después de la Transgresión Flandriense como consecuencia de esta climatología representada por continuas inundaciones que formaron el Lacus Ligustinus, una laguna interior caracterizada por aguas abiertas y poco profundas, [38], Figura 3.1.

Así, la albufera fue colmatándose paulatinamente por aportes de materiales, los cuales, unidos con interferencias de origen marítimo-costero, contribuyeron a la

3.1 Génesis del Estuario

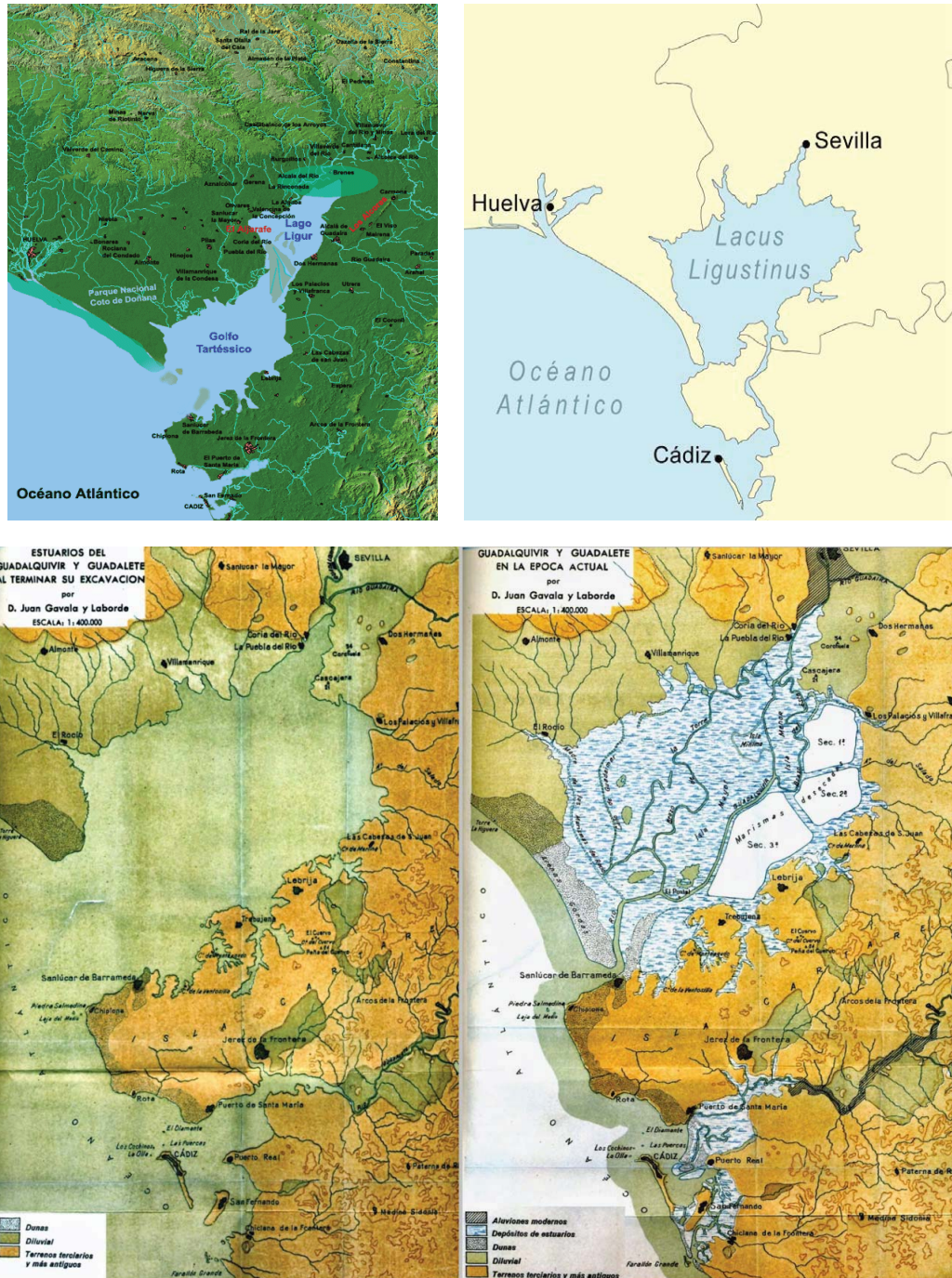


Figura 3.1: Evolución Geológica del Paleoestuario: **Arriba derecha:** Golfo Tartésico y Lacus Ligur, s. VI a.C. **Arriba izquierda:** Formación Lacus Ligustinus, s. I a.C., figuras del "Paleoestuario de Guadalquivir y la Ora Marítima" de Fco. José Barragán de la Rosa. Universidad de Sevilla. **Abajo:** Colmatación del Lacus Ligustinus por D. Juan Gavala y Laborda mapas del Instituto Geominero de España (IGME) 1955.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

formación de islas en el interior de la laguna, conformando canales sinuosos de marea y brazos más rectilíneos de materiales limosos u otros arenolimosos llamados vetas que flanqueaban los paleocanales. De esta manera se produjo la transformación de Bahía a Estuario colmatándose por la dinámica natural y acción antrópica.

3.2 Antecedentes históricos del Estuario

El río Guadalquivir ha tenido una larga historia desde la más remota antigüedad, y ha pasado por diversos nombres. Los fenicios llamaron al Río Baits, después Betis (o Baetis) desde tiempos pre-romanos hasta el periodo de al-Ándalus, dando su nombre a la provincia romana de la Bética en Hispania. Los griegos, que se interesaron por el Gran Río del sur de Hispania a través de la información recogida por los fenicios, lo llamaban Tharsis, río de Tartessos. Su nombre actual deriva del árabe "al-wadi al-Kabir" que significa "el Río Grande".

Los primeros registros documentados del estuario nos los transmite el geógrafo Estrabón en el siglo I a.C. donde afirma que el estuario desemboca en dos brazos, aunque en los últimos estudios han resuelto que el segundo brazo era la ría del Guadalete, [10]. Se fueron formando barras arenosas con acumulaciones de conchas, cubetas alargadas sobre tramos del canal formando lucios, destacándose las actuales Isla Mayor e Isla Menor en su desembocadura. Aguas arriba en el estrecho de Coria, el Lago/Lacus Ligustinus iba constituyendo una estructura glomerunal formada por numerosos canales y brazos del río, en algunos casos como la *Spal Fenicia* que perdió su carácter insular al adosarse a tierra convirtiéndose en la *Hispalis Romana*, retirada del mar y con un considerable estrechamiento de su cauce, [3].

La ciudad de Sevilla, localizada en el extremo superior del Guadalquivir resultaba navegable para grandes embarcaciones hasta la misma ciudad, fue y sigue siendo el lugar ideal para un asentamiento humano, ya que se conecta con el Océano Atlántico, y a través de él con el Mediterráneo. El lugar escogido para la fundación del primer asentamiento sevillano se encuentra donde el Guadalquivir se dividía en dos, habilitando el brazo secundario de una loma cercana hasta el punto de reunión de los dos brazos del río y la desembocadura del río Tagarete, cerca de la Torre del Oro. La altura de esta modesta elevación era suficiente para evitar las frecuentes

3.2 Antecedentes históricos del Estuario

inundaciones del sistema fluvial, reafirmada y ampliada con muros por la colonia romana.

Las continuas inundaciones que sufrieron los diferentes pueblos asentados, a medida que la población fue aumentando y adentrándose en zonas inundables, promovieron obras en el cauce del río para evitar en la medida de lo posible daños.

La importancia de la navegación en la Época romana, era vital para establecer una red comercial, haciendo de ella un instrumento ágil que se impuso al transporte por tierra. Tanto fue así, que un digesto del s. III d.C. nos dice: *"el Pretor prohíbe todo lo que perjudique la estancia en el Río y la navegación. Luego esta prohibición sólo afecta a los ríos que son navegables, a los demás no les afecta"*, [74].

Ya en el estuario de la Época romana se construyeron una serie de diques "el más importante fue el de Alcalá de Río" a entonces 14 km aguas arriba de la antigua ciudad de Sevilla. Las embarcaciones no eran de envergadura. Los pocos restos arqueológicos encontrados en los fondos del río relativamente bien conservados muestran naves de 10 m de longitud por casi 1.50 de ancho que se dedicaban al comercio de productos manufacturados de la ganadería, agricultura, salazón, pesca y minería a lo largo de todo el río, con astillero propio en Hispalis y en un *"dispensator portus ilipensis"*, [9].

Ya en la Época musulmana, la ciudad de Sevilla continuaba creciendo incesantemente en las riberas del río, y entre los siglos XI y comienzos del XII se crearon unas murallas de contención longitudinalmente al brazo principal del río a su paso por la ciudad, haciendo de defensa ante las importantes avenidas de agua y también de ataques de posibles ejércitos enemigos. Esta nueva configuración propició dejar al brazo secundario del estuario como eje principal de la vida pública de la ciudad, para posteriormente desecarlo en lo que es actualmente las calles Sierpes, Campanas y Tetuán, 1ª corta, [8]. Además se realizaron importantes obras hidráulicas como el Puerto del Arenal y otros embarcaderos, continuando la tendencia de no perjudicar su navegación ya que el río seguía siendo el eje de vida económica y social.

Con el periodo de la Reconquista, la navegabilidad perdió importancia como eje comercial; pero la ganó para fines bélicos. Tanto es así que Fernando III estableció la creación del Barrio de la Mar concediendo a sus vecinos una serie de exenciones a cambio de que cada año los vecinos sirviesen tres meses a la Armada.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

Esta medida estaba regida por el fuero otorgado a Sevilla, indicador claro de que el Guadalquivir estaba destinado a fines bélicos y comerciales. Su sucesor Alfonso X completó el proyecto con la construcción de unas atarazanas en 1252 destinadas a fabricar naves para la Armada Real. Su número fue aumentando durante la segunda mitad del siglo XIII y ya en gran parte del siglo XIV las referencias a la construcción de naves son abundantes y de más envergadura. En 1292 las tropas castellanas de Sancho IV, con el apoyo de tropas genovesas de Micer Baltasar Zacarías, abre Castilla al Atlántico creándose en la ciudad de Sevilla las primeras escuelas de navegadores, [76]. Posteriormente se crearía la escuela de mareantes en el barrio de Triana.

Antes de la Época Dorada y esplendor del río Guadalquivir en la Carrera de Indias, multitud de barcos genoveses, sobre el año 1400, fondeaban los parajes de las Horcadas para cargar aceite, vino, cereales, y demás productos provenientes de la agricultura siendo anterior al comercio de las Indias, [40].

El Bajo Guadalquivir es y ha sido un estuario histórico con un régimen muy irregular, con grandes inundaciones catastróficas, [20] y un complejo ensamble socio-económico y cultural, repleto de intereses donde ha llevado a una serie de importantes modificaciones en el cauce del río a lo largo del tiempo y que persisten en la actualidad.

3.3 Obras Remarcables en el ERG

Como se deriva de lo anterior, el ERG está documentado desde la antigüedad como un notable centro de actividades comerciales. [94] ubica al ERG dentro del área de influencia de la civilización Tartessos. Estrabón la mencionó como Lacus Ligustinus. Posteriormente, el relleno natural formó las marismas del ERG, sustrato del actual entorno del Parque Nacional de Doñana (Reserva de la Biosfera UNESCO-MAB y Patrimonio de la Humanidad) y dificultó también la navegación entre los puertos de interior y mar abierto. Esto llevó a profundizar periódicamente el estuario en el siglo XVI para mejorar la navegación y evitar inundaciones en las poblaciones ribereñas, [103], [23] y [80].

En el siglo XVIII, la primera de una serie de intervenciones conocidas como "cortas" para eliminar meandros, [8] y el cierre de canales de marea secundarios,

3.3 Obras Remarcables en el ERG

fue la primera intervención humana a gran escala del estuario. Con ello, se facilitó aún más el tránsito entre el océano abierto y el Puerto de Sevilla (hoy situados a 85 km aguas arriba de la desembocadura del ERG) y se controló la intrusión salina. Las numerosas cortas llevadas a cabo han reducido la longitud del canal principal en más de 40 km. La Directiva de la Compañía del Guadalquivir, apoyada por Francisco Saavedra, elaborador del Reglamento Libre Comercio con América (1778), y el asistente Arjona se dirigía a los provincianos para fomentar la agricultura y la industria, [26]. En 1814 con el regreso a España de Fernando VII tras la ocupación francesa los acontecimientos gubernativos volvieron a una relativa normalidad. En este mismo año el recién nombrado ministro Cevallos ordenaba poner en marcha una empresa de Navegación en el Guadalquivir desde Córdoba hasta su desembocadura. Con esto se recuperaba una vieja idea de Jovellanos, [60].

La colonia inglesa era abundante y emprendedora en las ciudades de Jerez, Cádiz y Sevilla, existiendo un fuerte convencimiento de la necesaria transformación de la agricultura y la navegación con nuevas tecnologías, apoyado por las transferencias idealistas de la recién Revolución Industrial Británica, [50]. Con esta conjunción de ideas y visión de la modernidad entra en juego la Compañía de Navegación del Guadalquivir (1814-1852) financiada por capital en su mayoría británico y bajo el consentimiento de la Casa Borbón, introduciendo la máquina de vapor para proyectos de desecación de lucios en la zona de las marismas, mejorar la navegabilidad del Guadalquivir, promover la repoblación en la zona e incentivar la economía.

Paralelamente en 1814, Briarly y Gregorio González presentan al Gobierno un plan con el que arrancará el proceso de maduración para los dos proyectos trascendentales del Bajo Guadalquivir: "La Recuperación de la Vía Navegable" y "La Valorización Agrícola de Nuevas Tierras". Como consecuencia se desata una notable actividad sobre libros técnicos de "Tratados de Canales y Barcos de Vapor". Temas obsesivos entre la élite ilustrada sevillana, en especial desde que se hacen las primeras gestiones para la creación de la Compañía de la Navegación, [70]. De esta manera quedaban claras las premisas para el devenir del ERG. Las primeras medidas fueron inútiles. Ni la limpieza de los "bajos del ERG" se produce por varios motivos, entre ellos la ineficacia del Pontón de limpieza, además ni los maderos de los muelles aguantaban las fuertes avenidas producidas en ERG.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

En el siglo XX, al amparo de la conocida como Ley Cambó, más del 80 % de la superficie original de las marismas fue desecada para fomentar las actividades agrícolas, lo que supuso una de las mayores pérdidas de marismas de Europa, aumentando la turbidez y favoreciendo la importación de sedimentos desde el mar hacia tierra, [16]. Además, desde mediados del siglo XX, las demandas agrícolas llevaron a una fuerte reducción de los aportes de agua dulce y una severa actuación sobre la cuenca de drenaje mediante la realización de presas de embalse. La presa de Alcalá del Río, situada a 110 km de su desembocadura del ERG, es la primera barrera aguas arriba que bloqueaba la propagación mareal.

Durante y después del vertido minero de Aznalcóllar en 1998 [47], el más grande en la historia de España, las marismas afectadas de Doñana se aislaron del estuario mediante diques y compuertas, lo que posteriormente redujo aún más la calidad del agua del mismo. El estuario ahora está compuesto por un canal principal con algunos ramales de marea sin zonas intermareales significativas.

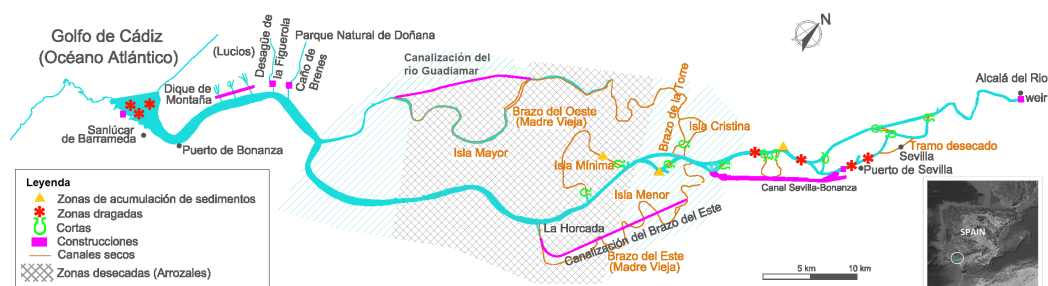


Figura 3.2: Modificaciones históricas relevantes en el ERG: El estado actual del estuario Guadalquivir (topología base para el modelo idealizado), está representado con línea continua azul y los tramos eliminados en naranja. Las diferentes intervenciones humanas simbolizadas son: zonas de acumulación de sedimentos (triángulos amarillos), zonas dragadas (asteriscos rojos), cortas (ómeegas invertidas verdes), construcciones como diques, presa, . . . (rectángulos rosas); humedales (rayado azulado) y zonas desecadas (rejilla azul).

Las modificaciones del Estuario del Río Guadalquivir reseñadas en la Tabla 3.1 aparecen ilustradas en la Figura 3.2. El ERG se encontraba dividido en brazos conocidos como Brazo del Oeste, de mayor longitud con 42.6 km, el Brazo del Este con una longitud de aproximadamente 39 km y el Brazo del Enmedio que es canal

3.3 Obras Remarcables en el ERG

Tabla 3.1: Cronología de la Intervención Antrópica en ERG según Figura 3.2. Obras Remarcables del ERG en los epígrafes: 3.3.1 Obras de Mejora de la Navegabilidad, 3.3.2 Cortas, 3.3.4 Obras de Ocupación de Marismas y 3.3.4 Obras de Control Hidráulico.

| Epígrafe | Fecha | Bibliografía | Intervención Antrópica |
|----------|-------------------------------------|-------------------|---|
| 3.3.4 | Siglo XI: Periodo musulmán | [8] | Canales desecados. |
| 3.3.1 | Desde siglo XII | [20] | Problemas en la ribera del ERG en Triana provocados residuos vertidos de la Industria cerámica de la zona. |
| 3.3.1 | Siglo XVI: Reinado de Juana La Loca | [103] | Puerto de Sanlúcar de Barrameda. |
| 3.3.1 | 1556: Reinado de Felipe II | [73] | Limpieza en Isla Mínima. |
| 3.3.1 | Siglo XVII | [23] y [76] | Zonas de acumulación de sedimentos. Profundidades en Isla Mínima (0.84-2.10 m) y Coria del Río (0.9 y 2.5 m). |
| 3.3.1 | 1700 | [103] | Primera campaña de monitorización en el ERG. |
| 3.3.1 | 1723 | [40] | Pruebas de navegación. Fallidas. |
| 3.3.1 | 1780 | [103] | Dragados en la barra de la desembocadura (Sanlúcar). |
| 3.3.2 | 1795 | [27] | Corta de la Merlina. |
| 3.3.1 | Siglo XVIII | [23] y [76] | Zonas de acumulación de sedimentos y embarcaciones. |
| 3.3.2 | 1816 | [27] | Corta de la Fernandina. |
| 3.3.1 | 1830-1850 | [26] | Dragados realizados por la Compañía de Navegación del Guadalquivir S.A. |
| 3.3.1 | 1830-1850 | [26] | Dragados en el Arenal por la Compañía de Navegación del Guadalquivir S.A. |
| 3.3.1 | 1835 | [26] | Dragados realizados por la Compañía de Navegación del Guadalquivir S.A. |
| 3.3.4 | 1850-1950 | [26],[112] y [16] | Zonas Desecadas (Arrozales) en Isla Mayor e Isla Menor. |
| 3.3.2 | 1880 | [27] | Corta de los Jerónimos. |
| 3.3.2 | 1926 | [27] | Corta de Tablada. |
| 3.3.2 | 1948 | [27] | Corta de la Vega de Triana. |
| 3.3.4 | 1953 | [27] | Canal Sevilla-Bonanza. (Inutilizado). |
| 3.3.1 | 1953-1954 | [26] | Dragados en el Puerto de Sevilla hasta 9 metros. |
| 3.3.4 | 1956 | [27] | Presa de Alcalá del Río. |
| 3.3.2 | 1971 | [27] | Corta de los Olivillos. |
| 3.3.2 | 1972 | [27] | Corta de la Isleta. |
| 3.3.2 | 1973 | [27] | Corta de Punta Verde. |
| 3.3.2 | 1983 | [27] | Corta de la Cartuja. |
| 3.3.4 | 1983-1985 | [92] | Dique de Montaña Alta en Doñana |

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

principal navegable actual. Entre los brazos se forman zonas desecadas conocidas con el nombre de Islas Mayor e Isla Menor, respectivamnte. Fue en 1888 con la Corta de los Jerónimos en 1888, un canal de 5.5 km, que atravesando la Isla Menor, estrangulaba un gran meandro del brazo principal del río. Esta corta aisló una extensión de marisma de algo más de 2000 ha, que pasó a denominarse Isla Mínima, por lo que ésta es en su origen, una isla artificial. La puesta en monocultivo de arroz de toda esa zona y el cegado del antiguo cauce del río hizo que este terreno pasase a formar actualmente parte de la Isla Mayor, [95].

Como se ha puesto de manifiesto en esta sección, ha habido una lucha cargada de intereses económicos, políticos y egos apoyados por informes y otros proyectos ingenieriles donde principalmente los intereses de la navegabilidad chocaban con otros, como proyectos de puestas en riego y otros usos domésticos. De aquí en adelante, se profundiza en los más importantes que servirán de inspiración para definir y dar una perspectiva histórica más detallada para la definición de los cuatro escenarios de estudio tratados en esta tesis.

3.3.1 Obras de Mejora de la Navegabilidad.

El ERG ha sido un estuario marcado por la supremacía de la navegación a lo largo de su historia. En la Época Dorada y plenitud del ERG en la Carrera de Indias donde la reina de España Juana (la Loca de Castilla), a solicitud de los colonos de Indias insta en el año de 1508 a crear los "Antepuerto de Sanlúcar de Barrameda". Su finalidad fue conseguir hacer trasbordo y transportar hasta Sevilla los alijos dada la peligrosidad para los navegantes de pasar la Barra de Sanlúcar, desembocadura del Guadalquivir, y navegar hasta el Puerto del Arenal en Sevilla con la mercancía, [103]. Las naos y galeones hasta el siglo XVI hacían trasbordo cuando las condiciones de navegabilidad eran difíciles en el Antepuerto del paraje de las Horcadas, situado pocos kilómetros aguas arriba del entronque del Brazo del Este con el Brazo de Enmedio, actualmente utilizado frecuentemente como "vaciado" para dragados de mantenimiento, Tabla 3.1 y Figura 3.2.

Existe una larga relación de documentos y otras publicaciones, [27], [84] y [111], donde refieren la importancia del estuario para el comercio pero al mismo tiempo las dificultades que entrañaba la navegación con embarcaciones cada vez

3.3 Obras Remarcables en el ERG

más voluminosas para ser competitivas en el negocio de las Indias. Los enfangamientos eran notables en la Torre de los Herberos, donde la profundidad del río en época de estiaje era de 0.84 m en bajamar y no llegaba a 2.10 m en pleamar, [24]. Este proceso de encegamiento no se debía solo a la propia dinámica natural erosiva y de aportes de sedimentos. Otro factor de empeoramiento de las condiciones de navegabilidad fueron los constantes naufragios. El elevado coste de recuperación del navío no permitía realizarse, quedando sumergida y por ende representaba una amenaza para la navegación. Esto dejó todo un cementerio de naves en la Barra de Sanlúcar y en todo el trayecto desde el Puerto de las Horcadas, situado en su entronque con el Brazo del Este, hasta la actual San Juan de Aznalfarache. Como dato anecdótico algunos escritos apuntan la etimología de Sanlúcar de Barrameda a la leyenda local "*San Lucas Barra me dá*", atribuyendo la palabra barra al cauce y dada la problemática de la zona.

Asimismo, mas allá de las negligencias del pilotaje, el ERG adquiría forma física con muladares cercanos, basureros, lastre de embarcaciones y el escombros de los alfareros de Triana que estaba empezando a colapsar "El Arenal", dándose orden de crear un recinto para este menester. De tal forma que se empezó a ver los restos de embarcaciones hundidas en el río como el primer escollo a resolver. Por ello, no fueron pocos los proyectos e intenciones de sondeos, limpieza y dragados que se fueron planeando a lo largo de la historia, [2]; pero la mayoría de las actuaciones fueron infructuosas, Tabla 3.1 y Figura 3.2. Posteriormente, el arquitecto naval Iñigo González de Gaztañeta en 1650 trató la cuestión técnica del calado en el paso de la Barra de Sanlúcar, proyectando un casco menos arqueado reduciendo el calado,[15].

El primer proyecto de realización de sondeos o batimetrías data del año 1666 y es dirigido por la supremacía del comercio sevillano para estudios del calado de la Barra de Sanlúcar. De éste se interpreta que se realizó en una zona conflictiva de la Barra ya que refiere valores entre 6.50 m y 7.70 m en el intervalo de mareas vivas, medias y muertas, [25]. En 1666 se culmina la obra del Muelle de la Riza (Figura 3.3) para mejorar la navegación en la Barra de Sanlúcar, presentando un canal angosto con fuertes corrientes y un estrechamiento de 30 metros. Más tarde en 1675 disminuyó a unos 20 metros de anchura posibilitando la navegación por el centro.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

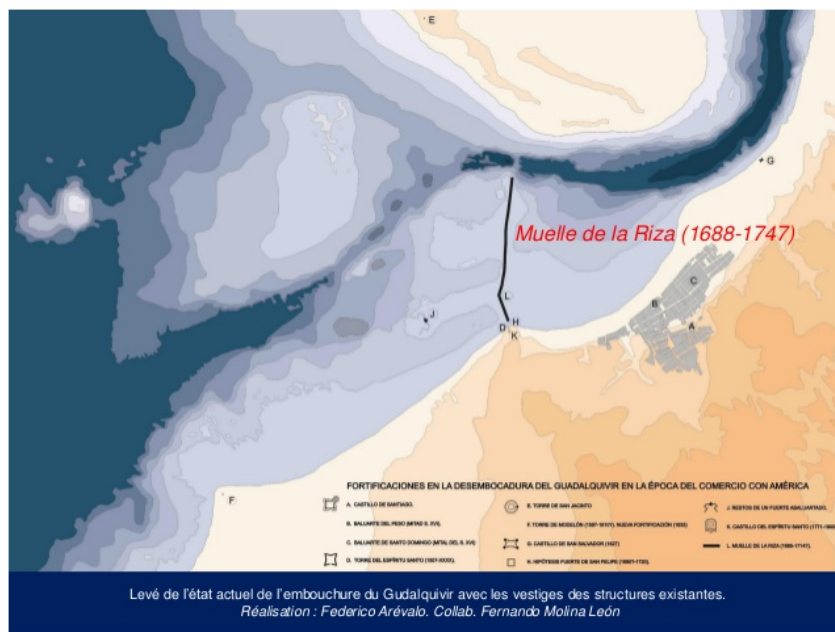


Figura 3.3: Localización del Muelle de la Riza. Restitución del plano de Sanlúcar 1725 sobre la planimetría actual donde se aprecia la curvatura inversa a la actual y las fortificaciones de la época, [93]

3.3 Obras Remarcables en el ERG

En 1684, cuando una gran avenida casi llega a colmatar de cantos rodados y lodos la Barra de Sanlúcar, se intentó su limpieza y dragado, sin embargo; la falta de medios materiales, económicos y la lentitud de los trabajos volvieron a dar otra vez al traste con dicho proyecto. Los dragados de fondo se hacían con barcas chamiceras con molinetes y cucharas, no difiriendo mucho de uno de los sistemas de dragado actuales.



Figura 3.4: Proyecto de limpieza de Matías de Figueroa. Documento del Archivo Municipal de Sevilla donde se esbozan las cortas de Merlina y Mercadera.

En 1702 se realizaron numerosos sondeos por lo que se balizaron las aguas desde el banco de las Galoneras, hasta el de las Dos Rizas, es decir a lo largo de todo el canal de la Barra. Los sondeos fueron realizados en marea baja indicando el informe que la pleamar aumenta en 5 desahogados codos o lo que es lo mismo 2.80 metros, [51]. Con vistas a posibles intervenciones del río, en 1739 Matías de Figueroa junto a Pedro de la Viesca Maestro Mayor titular y algunos peones y marineros, elaboró un croquis del río Guadalquivir entre Alcalá del Río y la Barra de Sanlúcar. En 1740 reclama el plano al Cabildo (Figura 3.4) para elaborar el proyecto de limpieza del río y nuevo trazado: "Evitar avenidas , el azolvamiento del río y la pérdida de navegabilidad". Ya en el 1747 una avenida de aguas destruyó el muelle de la Riza (Figura 3.3) siendo otro gran escollo para pasar la Barra de Sanlúcar. La Iglesia de Sanlúcar, que se encontraba en fase de construcción aprovechó en gran medida la piedra dispersa generada. Desde el siglo XIV no habían dejado de clamar los varones más científicos y amantes del bien del Estado por la necesidad de remediar estos males, con muchos proyectos y pocas realizaciones o que "el

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

Río estaba abandonado a sus caprichos, continuamente modificaba sus riberas y formaba islotes”, [82]. En la Figura 3.5 se muestra la configuración en 1760 del Estuario del Río Guadalquivir desde la desembocadura hasta Sevilla.

En plena lucha política de hacerse con la Casa de Contratación se encarga el dragado de la Barra de Sanlúcar, obra financiada por el gremio empresarial de Sevilla. El puerto de Sevilla se encontraba en decadencia, aún cuando siendo el mejor puerto protegido ante ataques de la Armada Inglesa no podía hacer navegar embarcaciones escolta con más de 480 cañones, [40].



Figura 3.5: Plano del Estuario del Río Guadalquivir desde Sevilla hasta su desembocadura en 1760. Anónimo. Ayuntamiento de Sevilla.

Otra de las muchas ideas y proyectos por impulsar la navegación en el s. XVIII fue la del ingeniero militar Juan Ballester en 1725, que tomó datos del río en el mes de marzo cuyos resultados fueron 3.5 pies de agua en un punto cuya anchura era 93 varas y razonaba que si se redujera la anchura de la "Madre Río" a 23 varas se podía obtener un calado de 14 pies. Una idea repetida a lo largo de la historia hasta la actualidad con la pretensión de reducir anchura al cauce para ganar profundidad.

La creación de la Compañía de la Navegación de Sevilla (1814-1852), responsable del Río y del Puerto de Sevilla, refleja el clamor de la sociedad sevillana por dominar un medio hidráulico difícil y para favorecer la navegabilidad mediante nuevas obras hidráulicas. Para permitir el tránsito de buques de mayor envergadura al Puerto de Sevilla se propone profundizar hasta los 9 metros, Tabla 3.1 y Figura

3.3 Obras Remarcables en el ERG

3.2. Actualmente, este canal es dragado periódicamente desde su desembocadura hasta su acceso al Puerto de Sevilla para garantizar un calado mínimo de navegación de unos 7 m. Medidas propuestas por la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) enmarcadas en periplos judiciales que sin llegar a conocer realmente sus efectos están sujetas a la decisión del Tribunal Supremo en base a informes científicos que frenan parcialmente las pretensiones de la APS. Por este motivo considerar un escenario donde se defina la profundidad del canal de navegación como parámetro de estudio está enormemente fundamentado.

3.3.2 Cortas

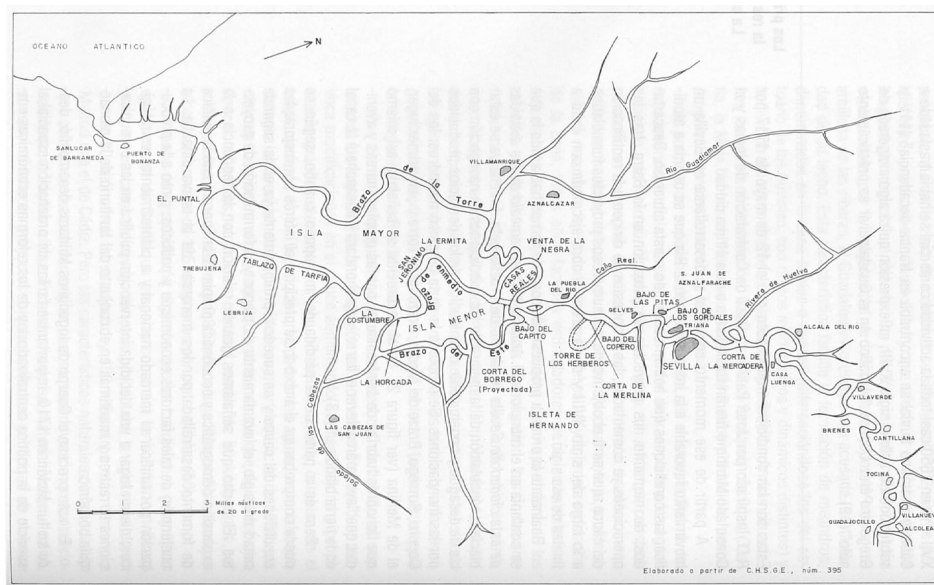


Figura 3.6: Interpretación del Río Guadalquivir a comienzos del s. XIX desde Guadajocillo (Guadajoz) hasta Sanlúcar de Barrameda por Felipe Losada (1804), [27].

El caudal del Guadalquivir no fue considerado un tema de estudio en el XVIII. La principal preocupación era la recuperación de la navegación por "la Madre del Río", [27]. El caudal fluvial y su influencia también en la navegación, comenzó a tomarse en cuenta a partir de la segunda mitad del siglo XIX (3.6). Con la documentación constatada a lo largo de la historia desde los tiempos de Roma la balanza

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

de intereses se inclinaba a favorecer la navegación, obviando cualquier afección a los factores socio-ecológicos.

Con el fin de optimizar la navegabilidad y evitar inundaciones en las poblaciones ribereñas el cauce del estuario se vió reducido en 40 km mediante un proceso de cortas. Realizada la corta de la Merlina, la navegación por el estuario seguía siendo dificultosa por lo que la recién creada Compañía del Guadalquivir se plantea: la corta del Borrego o Fernandina 1816, la limpieza de los "bajos del río", realizar el espolón en el Brazo del Oeste para su posterior cierre, inclusive el cierre del Brazo del Este, diques y otras obras hidráulicas que al final no se produjeron hasta 1830, cuando se retoman proyectos como la Corta de Tablada, ejecutada finalmente el año 1926, Tabla 3.1 y Figura 3.2.

Entre los años 1840 y 1860 el caudal en estiaje bajó en $2 \text{ m}^3/\text{s}$ debido posiblemente al despertar industrial de fábricas y molinos enclavados en el Guadalquivir, habiendo que subrayar, por encima de todo, la especial importancia de la reserva de caudal para garantizar la navegación marítima de Sevilla al mar, [27].

Luis Moliní, Director de las Juntas del Puerto, en el Plan Moiní (1903-1926) preveía: mejorar la navegación en la desembocadura ensanchando el cauce, realizar el canal de Alfonso XIII en el sur de la ciudad, evitar tres meandros antes de la entrada al puerto, dragar el estuario en su totalidad y dotar al puerto de nuevos espacios de desarrollo, nuevos muelles y puente levadizo de la boca, según datos de la Autoridad Portuaria del Puerto de Sevilla.

Ya en 1927 con el Plan Brackenbury se producen varios proyectos siendo el más importante la apertura de un nuevo cauce "Cartuja-Brazo de San Juan de Aznalfarache" desplazando el cauce hacia el oeste de Triana. Para la protección del Puerto ante avenidas de aguas o bujarretes se acometieron tres terraplenes: la Punta de Tablada, Chapina (1948) y el último en la zona sur del canal de Alfonso XIII convirtiendo el ERG en una dársena más. Posteriormente después de muchos inconvenientes, incluida una Guerra Civil de por medio, se da por finalizada la Esclusa del Puerto en 1951, conocida como Antigua Esclusa. A continuación, por orden cronológico se incluyen las cortas producidas en el ERG como consecuencia de la supremacía a lo largo de la historia de la navegación sobre otros factores socio económicos, [26], que supuso una reducción de la longitud de ERG superior a 40 km en los últimos 200 años, Tabla 3.1 y Figura 3.2:

3.3 Obras Remarcables en el ERG

1. La Corta de Merlina de 1795: para salvar un meandro con bajos poco profundos entre Coria y Dos Hermanas.
2. La Corta de la Fernandina o Corta de Borrego de 1816: realizada por la Compañía de Navegación del Guadaquivir para evitar el meandro y de nuevo los bajos del río. También se realiza dragados en el Arenal y San Juan de Aznalfarache con máquina de vapor y cazoletas tipo rosario pero sin efectividad.
3. La Corta de los Jerónimos: se realiza para reducir la distancia entre Sevilla a Bonanza en 39 km eliminando los bajos del Mármol, la Abundancia, La Cabeza del Moro y otras. Las obras se realizaron en tres fases: se iniciaron en 1860 pero las obras fueron abandonadas en 1871 teniendo una longitud de 5 kilómetros, 100 metros de ancho y 3.90 metros de profundidad. En 1881 se amplió la anchura a 104 metros y una profundidad de 5.6 metros quedando una porción de tierra aislada conocida como Isla Mínima, situada en el término municipal de La Puebla del Río. Este antiguo brazo del ERG actualmente dedicado al arroz y parcialmente navegable.
4. La Corta de Tablada y aterramiento de los Gordales 1926: para disminuir la distancia que tenían que recorrer los barcos para llegar al Puerto y proporcionar un calado de 7 m. En 1956 se realiza la Presa de embalse de Alcalá del Río con fines de producción de electricidad pero realizando efecto barrera. En 1953 el Consejo de Ministros de Franco dicta que pase el Puerto de 17 pies de calado a 30 pies, Resolución General del V Consejo Económico Social.
5. La Corta de los Olivillos de 1971: para salvar un meandro en Isla Menor.
6. La Corta de la Isleta de 1972 en la Puebla del Río con el mismo fin.
7. La Corta de Punta Verde de 1973 cerca de Gelves con igual objetivo.
8. La Corta de la Cartuja de 1983: para salvar un meandro y forma parte del sistema de defensa actual.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

Tomando como base el Brazo del Oeste, como la reconexión del tramo de mayor longitud del ERG, se define el escenario 2 como representación de las cortas realizadas al estuario.

3.3.3 Obras de Ocupación de Marismas y Aislamiento del Régimen Mareal

En el reinado de Fernando VII, recién creada la Compañía Navegación del Guadalquivir, se propone y ejecuta una serie de viveros de aclimatación de semillas de otras partes del planeta al norte de la Isla Menor y en los alrededores del sur de la actual Ciudad de Sevilla, el Jardín Botánico de las Delicias. Con ello, se inicia la investigación de la agricultura ornamental que pretendía imponerse en estas tierras baldías de las marismas donde el beneficio daba a duras penas para la manutención de la guardería del terreno, [71], al mismo tiempo que se estudiaba la viabilidad de éstos en la marisma, [37]. Entre tanto, Isla Menor, Tabla 3.1 y Figura 3.2, conocida más tarde como Isla Amalia, fue transferida por los *Propios* de la ciudad de Sevilla a la Compañía del Guadalquivir, produciéndose una desamortización municipal ya que las arcas del Excmo. Ayuntamiento de Sevilla se encontraban en un estado lamentable después de la ocupación francesa y su posterior expolio, [45].

En 1818 la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir toma posesión de Isla Menor y a finales de este año se multiplican los arrendamientos a colonos de la provincia, con la particularidad de repartir una pequeña parte de las tierras de segunda entre pobres braceros para su roturación y puesta en producción, [99]. En esta Isla fueron plantados los primeros 5.000 naranjos y limoneros, [58], tomando fuerza en las cercanías del canal Fernandino donde el agua no presenta un alto índice de salinidad y existía más protección a las crecidas porque se aprovechaban las suaves y poco frecuentes colinas que no eran susceptibles de inundación; anteriormente se aprovechaba para pastos de ganado sin apenas rendimiento, [106] y [33]. La privatización de Isla Menor se fue haciendo efectiva de norte a sur debido a la salinidad, ocupando las zonas con cotas sobre el nivel medio del mar y evitando en la medida de lo posible inundaciones. Sin embargo; los costosos trabajos de desecación y la pésima aclimatación del cultivo, provocaron que la mayor parte de los terrenos quedaran sin producción agrícola dejándola para uso de ganadería extensiva.

3.3 Obras Remarcables en el ERG

Paralelamente se escogieron las mejores tierras de Isla Mínima, unas 150 ha, para plantar hoja de tabaco con semilla traída de la Habana. Tenía como objetivo bajar el precio del mismo ya que la Real Fábrica de Tabacos lo importaba de los Estados Unidos casi en su totalidad. Laboreando las tierras con alto coste se constató como, con cada día de lluvia, las tierras se anegaban y producían enormes acequias que, una vez salía el sol quedaban duras como piedras para volver a empezar. Esto supuso un elevado coste y no se obtuvieron los resultados esperados, no ardiendo ni un puro y por lo tanto no pudiendo designarse como clase Habano o de Virginia, según datos de la Fábrica de Tabacos de Sevilla de 1828. Ese comportamiento del suelo supuso la definición de lo que en Andalucía se denominan "Grea", conocido actualmente como Gredas y Arcillas expansivas, suelos muy comunes en el valle del Guadalquivir. Ya en 1835, el Consejo General de Estado y de Indias previó erróneamente que serían unos cultivos ricos y cedieron a la Compañía de Navegación del Guadalquivir a 3.000 presidiarios, aunque la respuesta de la tierra era matar la planta al tocar la raíz la greda, [71]. Posteriormente se arrienda los terrenos a los ganaderos de la zona con un fuerte incremento del precio, quedando la marisma prácticamente virgen hasta el comienzo del siglo XX.

Con respecto a la valorización de los terrenos, la ley Cambó 1918 la secundó, aunque fue un intento frustrado, [103] y [112]. El apellido del entonces ministro de fomento Francisco Cambó quedaría ligado para siempre al afán desecador de los humedales. Corrían tiempos de bonanza económica después de la Primera Guerra Mundial y el Estado no podía permitirse el lujo de mantener intactos unos terrenos improductivos y que funcionaban a sus ojos como un enorme foco de enfermedades. Por eso se promovió la ley de desecación y saneamiento de lagunas, marismas y terrenos pantanosos. La ley contemplaba la financiación de la actuación en un 50 % y a quien realizase la obra desecadora se convertiría en su dueño de forma automática.

Los tres primeros intentos de transformación de la marisma de la era Cambó fueron un fracaso. El primero en 1923, con la empresa "Islas del Guadalquivir" al frente, no contempló la repercusión de la salinidad de ERG que empeoraba la plantación a medida que se regaba, tampoco logra recuperar la inversión inicial ni superar las riadas e inundaciones acaecidas, [27] y [26]. El segundo data de 1929, con la empresa "La Chispalense", que fracasa nuevamente por el grado de salinidad

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

del agua de regadío, aunque vislumbraron que la plantación ideal era el cultivo de arroz. El tercer intento fue en 1934 con la nueva empresa "Igmasa" que probó con plantaciones de: algodón en rama, cáñamo y otros cultivos subtropicales adecuados para una pluviometría baja. Esta vez se desecó la marisma y se roturó con maquinaria moderna e importante mano de obra. Sin embargo, el ambiente caótico y pre-bélico de la II República no le permitió más opción que arrendar los terrenos para pastos.

Para cultivar el arroz se probaron diferentes técnicas traídas por: valencianos de la Albufera, catalanes del Delta del Ebro y egipcios del Delta del Nilo. El modelo que triunfó fue el valenciano. En 1937, en plena República, el objetivo era cultivar la mayor cantidad de hectáreas posibles de arrozal para alimentar el ejército del levantamiento con mano de obra de presos republicanos. En 1939 bajo una hambruna insostenible y generalizada en plena Post-Guerra Civil, los colonos para la siembra de arroz empezaron a marcharse. Desde 1942 a 1949 empezaron por dar tierras en arrendamiento en condiciones excepcionales a nuevos colonos, mayoritariamente valencianos, quienes se quedaron las tierras de mayor calidad (no por cantidad). También catalanes, murcianos y almerienses fueron artífices de esta colonización, [43]. A partir del 1947 la masa de inmigrantes ascendió y en el 1949 llegó la transformación de unas 5.000 ha, de las cuales, más de 4.000 ha ya tenían adjudicadas cultivo, no sin antes haberse creado un conflicto generalizado entre andaluces y valencianos por el injusto acceso a la tierra. Su saber hacer fue el elemento legitimador del desigual reparto de la tierra que serviría para otorgar también un mayor salario a los colonos valencianos frente a los colonos perimarismeños, [43].

La extensión original de la marisma natural, estimada en alrededor de 180.000 ha, se redujo gradualmente hasta las 32.000 ha actuales, situada en la margen occidental del ERG y que recorre las provincias de Sevilla, Cádiz y Huelva. En los años 60 del siglo XX, 150.000 ha fueron drenadas para establecer cultivos de algodón, trigo, girasol, o convertidas en arrozales (hasta 37.000 ha), piscifactorías (3.200 ha) y salinas (1.000 ha). Desde 1950 al 1953 se ocupan las grandes zonas nuevas del Toruño, Mínima y Calonge, con la posibilidad de aumentar la superficie en unas 500 ha anuales, afianzándose el sistema productivo con otros sistemas de bombeo y diferentes obras hidráulicas hasta nuestros días. El malentendido avance insistía en desecar y plantar pinos y eucaliptos en los humedales. De hecho, el biólogo

3.3 Obras Remarcables en el ERG

español José Antonio Valverde, preocupado por las desecaciones, expuso en 1952 un artículo internacional llamando la atención del peligro que corrían las marismas como riqueza medioambiental, persuadiendo a Francisco Franco, Jefe del Estado, para que apoyara el conservacionismo ambiental de Doñana. También convenció a Mauricio González Gordon, dueño de media marisma para que lo apoyara, indicando éste que "va en contra de mis intereses familiares pero hay que ayudar a esto porque es importante y trasciende". En el año 1963 WWF compra 6794 ha y en 1965 las cede al CSIC y otras 3200 ha en el año 1969 son compradas en el corazón de Doñana para la creación del Observatorio de Doñana actualmente en servicio, Figuras 3.7 y 3.8.

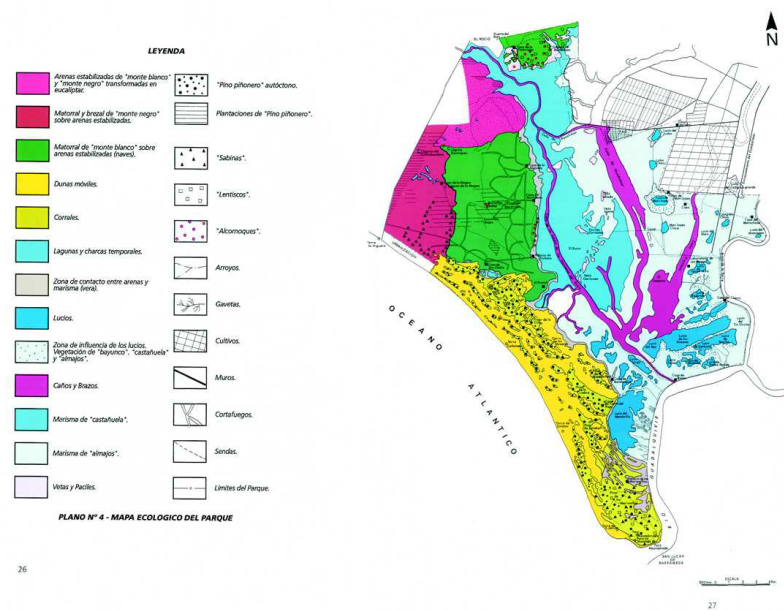


Figura 3.7: Mapa Ecológico del Parque Natural de Doñana realizado por el Instituto Geológico Minero de España. http://www.igme.es/zonas_humedas/donana/pdf/mapa_geologico.pdf

En 1969 Doñana fue declarado como Parque Nacional con una extensión 37.425 ha protegidas sin zonas costeras. Posteriormente, el año 1972 se aprobó la primera fase del "Plan de Desecación Almonte-Marismas" y en 1978 se ampliaron los límites del Parque hasta las 50.720 ha incluyendo playas. En la década de 1980, el dique de la Montaña del Río fue construido a lo largo de la frontera entre las

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS



Figura 3.8: Mapa Ecológico del Espacio Natural de Doñana en [7].

marismas del Parque Nacional de Doñana y el ERG, con el objetivo de prolongar el período de inundación con agua dulce de la Marisma del Parque. En efecto, actualmente, la mayoría de sus humedales tienen un carácter continental y estacional, ya que el agua de mar sólo entra en una pequeña parte de las marismas con marea alta. Sólo un pequeño número de lagunas, localizadas en puntos de descarga de los acuíferos locales y regionales situados en el límite entre dunas móviles y estables, retienen agua durante todo el año. Además, algunas charcas naturales han sido profundizadas por el hombre para abastecer de agua a los animales domésticos y salvajes, creando así pequeños cuerpos de agua permanentes. Estas charcas artificiales, llamadas "zacallones", juegan un papel importante en la conservación de la flora y fauna acuática: por ejemplo, algunas planta acuáticas sólo persisten actualmente. En resumen, actualmente el aislamiento de Doñana respecto al ERG, o mejor dicho, el aislamiento del flujo mareal de la zona es un hecho constatado que perfila la configuración del escenario 3.

3.3.4 Obras de Control Hidráulico

Numerosas han sido las construcciones realizadas a lo largo del ERG, entre otras, las obras realizadas se pueden englobar en: esclusas, diques y presas de embalse.

Como ya se ha mencionado a lo largo del Capítulo, existen numerosos textos griegos y latinos que resaltan la importancia del Puerto de la antigua ciudad de Hispalis, la actual Sevilla. En la Baja Edad Media el Puerto de Sevilla siguió teniendo importancia pero su periodo de mayor esplendor comenzó a principios del siglo XVI, a raíz del Descubrimiento de América y del establecimiento en 1503 en Sevilla de la Casa de la Contratación, que centralizaba todo el tráfico marítimo con las Indias. En esta época el Puerto se encontraba situado en el Arenal, entre

3.3 Obras Remarcables en el ERG

la Puerta de Triana y la Torre del Oro. El declive del puerto empezó en el siglo XVII entre otros factores por las dificultades de navegación cada vez mayores por el canal del Guadalquivir debido al aumento de tonelaje de los barcos, las mejoras defensivas de la ciudad de Cádiz, la peste de 1649, la fijación de la cabecera de las flotas en Cádiz en 1680, y en 1717 el traslado de la Casa de la Contratación a dicha ciudad. Asimismo, las continuas inundaciones acaecidas en Sevilla provocadas por el desbordamiento del ERG a su paso lleva a desviar su curso vivo. En 1905 se construye el muelle de Nueva York y en 1925-1931 el Puente de San Telmo abriendo Sevilla al barrio de los Remedios. Posteriormente se creó el muelle de las Delicias, flanqueado por el nudo ferroviario. Además, esto supuso la construcción de un muro de defensa que rodea aproximadamente dos tercios de la ciudad, y la esclusa terminada a mediados del siglo XX.

El calado del río (pendiente de la Resolución del Tribunal Constitucional) o la realización de la **Antigua Esclusa** eran insuficientes para satisfacer las necesidades de la flota existente. Así y tras seis décadas de servicio a Sevilla y su Puerto se proyectó la **Nueva Esclusa**, "Puerta del Mar", finalizada en Otoño de 2010. La red de monitorización de Puertos del Estado dispone de los mareógrafos 3338, Sevilla 1 para Antigua Esclusa y 3337, Sevilla 2 para la Nueva Esclusa cuya información se encuentra disponible en <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>. Sendas construcciones han servido de base para las configuraciones de diseño. En particular, la calibración del modelo se ha realizado con la configuración de la Antigua, sin embargo; la configuración de referencia se define con los parámetros del ramal del Puerto de Sevilla considerando la Nueva Esclusa.

El **Dique de la Montaña del Río**, Tabla 3.1 y Figura 3.2, ya mencionado en el epígrafe, fue construido, en la década de 1980, a lo largo de la frontera entre las marismas del Parque Nacional de Doñana y el ERG, con el objetivo de prolongar el período de inundación de la Marisma del Parque. La presencia de este dique significa que los niveles de agua se vuelven artificialmente altos en inviernos húmedos, y el drenaje aguas arriba del ERG se controla a través de compuertas.

En la Figura 3.9 se muestra el Seguimiento de la evolución de inundación en la marisma de Doñana y el efecto del Dique de la Montaña del Río en el proceso de inundación [107].

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

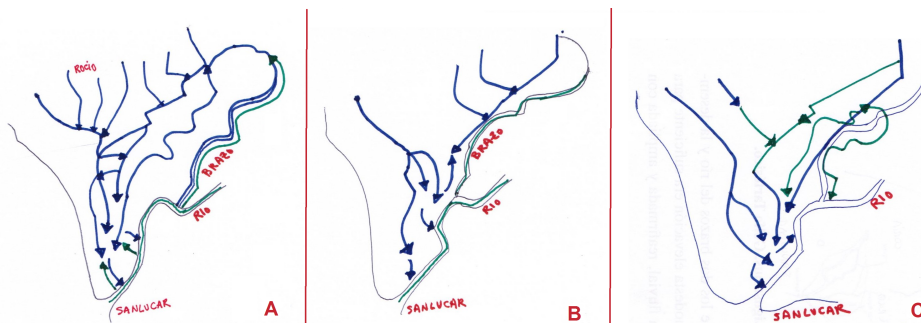


Figura 3.9: Seguimiento de la evolución de inundación en Doñana y efecto del Dique de la Montaña del Río en su proceso de inundación. **A:** Situación original de 1900. **B:** Momento de máxima alteración año 2000. **C:** Situación previsible cuando concluye el proyecto de Doñana en 2005. Alteraciones de la red hidrográfica [107].

En resumen, un estuario modificado por la acción antrópica que ya desde la antigüedad no ha podido resolver las inquietudes y necesidades de una sociedad sevillana cansada de cambios de dirección y fracasos como deja reflejado en [26] y [27].

Desde la antigüedad ya contaba Alcalá del Río con un vado (más arriba de donde actualmente se levanta la presa) por donde el refluo de la marea permitía atravesar de una orilla a otra "a pie enjuto", [28].

En el estuario de la Época romana se establecen toda una serie de diques siendo "el más importante el de Alcalá de Río" a 14 km aguas arriba de la antigua ciudad de Sevilla. Otros puentes y sistemas de regadío a lo largo de todo el estuario fueron también realizados en los siglos II, III, IV. Desde la Edad Media y hasta el siglo XIX, contó también Alcalá del Río para realizar el pasaje de éste, con una barca, propiedad del concejo municipal de Sevilla. A principios del siglo XX existió en esta localidad un puente de madera sobre barcas que estuvo en uso hasta la edificación del puente de la presa.

Un hito importante fue el plan concebido por el ingeniero civil Carlos Mendoza Sáez de Argandoña, el cual maduraba desde hacía tiempo la arriesgada empresa de hacer navegable el Guadalquivir desde Sevilla hasta Córdoba. El proyecto comprendía la construcción de once saltos de agua entre Córdoba y Sevilla entre los que estaba la presa de Cantillana (1956), ubicada aguas arriba a 10 km de distancia de Alcalá del Río.

3.3 Obras Remarcables en el ERG

La presa de Alcalá del Río fue construida entre los años 1928 a 1937, actualmente explotada como central hidroeléctrica y reguladora del caudal. Su manejo no sólo influye en la hidrología, sino también en la calidad del agua, su turbidez. El caudal medio descargado en la presa de Alcalá del Río es de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aunque en régimen normal no descarga más de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, excepto en avenidas, en las que puede llegar a superar los $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, [29]. Los caudales que circulan por la presa tienen un importante impacto sobre la salinidad del estuario aguas abajo. Esos caudales son relativamente constantes a lo largo del año, si bien registran importantes picos en momentos puntuales. La Presa fue histórica en tiempos atrás por ser los Ybarra, a quien se les atribuye la paternidad del "caviar sevillano", 100 % español de (1897-1979) propietarios de la Presa hasta la desaparición del esturión, sobre las consecuencias se puede ver un trabajo realizado por el "*Grupo Aphanis*" que lidera Carlos Fernández Delgado, Catedrático de Biología Animal y Profesor de la Universidad de Córdoba, [32]. Las presas de Alcalá del Río y de Cantillana pertenecen actualmente a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (Ministerio de Medio Ambiente), que tiene concedidos los derechos de explotación a una empresa privada, ENDESA S.A.

En resumen, desde el siglo XVIII, y a lo largo del siglo pasado, se han realizado numerosas modificaciones del cauce natural, ejecutando cortas y ampliando la anchura y la profundidad del cauce principal. En los últimos 60 años una parte sustancial de superficie de humedal y forestal se ha visto reducida en favor de asentamientos urbanos y agrícolas. Aproximadamente, una cuarta parte de la superficie total del estuario forma parte del Espacio Natural Doñana, humedal de agua dulce. En la actualidad, el estuario está formado por un cauce principal con algunos caños mareales y no tiene zonas intermareales de dimensiones apreciables. Esta reducción del prisma de marea, entre otros factores, ha alterado la desembocadura y la morfología de las costas adyacentes [64]. En general, el ERG está altamente canalizado, con canales secundarios poco relevantes. El Parque Nacional de Doñana se encuentra en su mayor parte aislado mediante muros y compuertas de las oscilaciones mareales. El canal del Brazo del Oeste se desconectó aguas arriba del canal principal para contener la intrusión salina observándose las máximas salinidades normalmente en la desembocadura debido a que las pérdidas por evaporación se compensan por la descargas de agua dulce.

3. CONTEXTO HISTÓRICO PARA DEFINIR ESCENARIOS

La importancia de la Navegación descrita en la sección 3.3.1 va vinculado "*al Río Grande con calificación de Gran Torrente*", [109], un río con un caudal de $185 \text{ m}^3/\text{s}$ llegando en estiaje a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ sin ser sometido a la regulación del caudal actual, experimenta crecidas de hasta $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ con periodos de recurrencia de 5 y 100 años, respectivamente, dan como resultado un proceso de intensa intervención sobre el cauce que por medio de diferentes cortas o rectificaciones ejecutadas en los últimos, sección 3.3.2, 200 años ha reducido en cerca de 40 km el desarrollo inicial del estuario, [27]. La situación se desenvuelve a lo largo de la historia ERG entre una lucha cargada de intereses económicos, políticos y egos apoyados por informes y otros proyectos de Ingenieros donde los intereses de la navegabilidad chocaban con otros como proyectos de puestas en riego y otros usos domésticos y comerciales donde obras de ocupación de marismas, sección 3.3.4, están ligadas a un aislamiento del flujo mareal. La definición de un escenario asociado a estas zonas de gran valor ecológico está íntimamente asociado al entorno estuarino. Por último, dentro de las obras de control hidráulico, sección 3.3.4, la eliminación de la barrera aguas arriba del ERG completa la definición de los cuatro escenarios elegidos.

”Creatividad es permitirte cometer errores. Diseño es saber con cuáles te quedas.”

Scott Adams

CAPÍTULO

4

Definición de Escenarios

Cuatro son los Escenarios considerados en esta tesis. Los escenarios configuran posibles alternativas de Gestión actualmente promovidas por las diferentes Administraciones Públicas. El análisis de los escenarios se realiza con el modelo calibrado en términos de los cambios en elevaciones, corrientes y salinidad. Estos escenarios deducidos de la Sección 3.3 son: (1) Efecto de la Profundización del canal de navegación respecto a las Obras de Mejora de la Navegación del epígrafe 3.3.1, (2) La Reconexión del Brazo del Oeste respecto a las Cortas reseñadas en el epígrafe 3.3.2, (3) Recuperación de Marismas en Doñana según las Obras de Ocupación de Marismas del epígrafe 3.3.4 y (4) Eliminación de la Presa de Alcalá del Río dentro de las Obras de Control Hidráulico referidas en el epígrafe 3.3.4.

Los escenarios modelados están definidos como modificaciones respecto a la Configuración de Referencia (véase Figura 4 panel b)). En la Figura 4.1 se resume el proceso seguido. Recordemos que la configuración de referencia, Figura , panel (b), considera un canal principal de profundidad constante, 6.5 m, y longitud total 103.2 m, el cual es dividido en cinco segmentos: $S_{m,1}$, $S_{m,2}$, $S_{m,3}$, $S_{m,4}$ y $S_{m,5}$. Los tramos están delimitados por cinco nodos elegidos de acuerdo a los escenarios, donde $n_{m,0}$ es el origen de referencia, $n_{m,1}$ está en Doñana, $n_{m,2}$ y $n_{m,3}$ en sendas intersecciones entre el Brazo del Oeste y el canal principal, $n_{m,4}$ en el Puerto de Sevilla y $n_{m,5}$ en la presa de Alcalá del Río. A esta situación se le añade un canal

4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

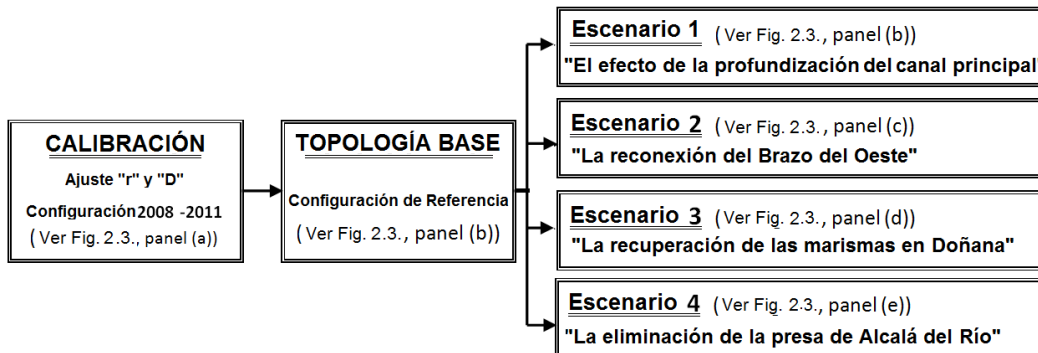


Figura 4.1: Diagrama de Flujo de las Simulaciones. Los Escenarios se encuentran en la Figura 4.

secundario en $n_{m,4}$, a 79 km de la desembocadura, con una longitud de 846.57 m. Esta topología base es idéntica a la utilizada para la calibración del modelo, a excepción del ramal secundario considerado, en este caso, $\mathbb{S}_{s,2}$, Nueva Esclusa, en lugar de $\mathbb{S}_{s,1}$, Antigua Esclusa.

4.1 Escenario 1: Efecto de la Profundización del Canal de Navegación

En el Escenario 1 se analizan los efectos de la variación del calado, h , a lo largo del canal de navegación. La profundidad del ERG es mantenida actualmente por dragados periódicos para mantener el acceso al Puerto de Sevilla. La motivación de este escenario es múltiple. En la actualidad existen propuestas encontradas sobre la gestión del canal de navegación. Por una parte, se ha propuesto profundizar el canal de navegación para permitir que buques de mayor calado alcancen con seguridad del Puerto de Sevilla [98]. Por otra, existen propuestas que piden reducir el número de dragados de mantenimiento en el canal, devolviendo al estuario un comportamiento "más natural". La colmatación parcial del estuario también supone una reducción del calado. Estas situaciones pueden evaluarse con el modelo debidamente calibrado. Además, este escenario también reproduce el efecto de la subida del nivel medio del mar en la propagación mareal y la distribución promediada y mareal de la salinidad en los diferentes tramos de estuario. La configuración del modelo para

4.1 Escenario 1: Efecto de la Profundización del Canal de Navegación

este caso se muestra en la Figura 4.2. Éste parte de la Topología Base añadiendo la variación de la profundidad de 4 a 10 m en los tramos $S_{m,1}, S_{m,2}, S_{m,3}, S_{m,4}$ y $S_{s,2}$ siendo la profundidad de referencia de 6.5 m.

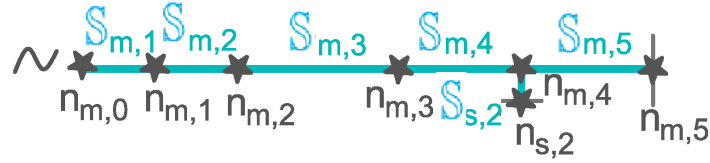


Figura 4.2: Representación topológica de la configuración del Escenario 1: Efecto de la Profundización del Canal de Navegación.

El sistema resultante de ecuaciones lineales puede ser expresado en forma matricial como $\mathbb{A} \cdot \mathbb{X} = \mathbb{B}$, con $\mathbb{A} = (\partial_{i,j})_{12 \times 12}$, $\mathbb{X} = [A_{S_{m,1}}, B_{S_{m,1}}, A_{S_{m,2}}, B_{S_{m,2}}, A_{S_{m,3}}, B_{S_{m,3}}, A_{S_{m,4}}, B_{S_{m,4}}, A_{S_{m,5}}, B_{S_{m,5}}, A_{S_{s,2}}, B_{S_{s,2}}]$ y $\mathbb{B} = [a_0^{\hat{\eta}}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$.

Las condiciones de contorno y de acuerdo para obtener $\bar{\eta}$ y \bar{Q} coinciden con las planteadas para la calibración y que incluimos a continuación:

$$\begin{aligned} Q_d &= \bar{Q}_{S_{m,k}} \text{ para } k = 1, \dots, 5. \\ \bar{Q}_{S_{s,2}} &= 0, \\ \bar{\eta}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_0}) &= 0, \\ \bar{\eta}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{\eta}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k}) \text{ para } k = 1, \dots, 4. \\ \bar{\eta}_{S_{s,1}}(x) &= \bar{\eta}_{S_{m,4}}(n_{m,4}) = \text{constante.} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Y las condiciones utilizadas para estimar \bar{s} son idénticas a las de la Configuración de Referencia y desarrolladas en la Calibración del modelo, es decir,

$$\begin{aligned} \bar{s}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_{m,0}}) &= \bar{s}_0 \text{ y } \bar{s}_{S_{m,5}}(n_{m,5}) = \bar{s}_L = 0, \\ \bar{s}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{s}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k}) \text{ para } k = 1, \dots, 4. \\ \frac{d\bar{s}_{S_{m,k}}(n_{m,k})}{dx} &= \frac{d\bar{s}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k})}{dx} \text{ para } k = 1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (4.2)$$

4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

donde \bar{s}_0 y \bar{s}_L son los valores observados de la salinidad promediada en desembocadura y en la cabecera, respectivamente. Sin embargo, el caudal de agua dulce es nulo en el canal secundario, en este caso la Nueva Esclusa. Por consiguiente, las componentes de la salinidad fluvial y mareal en este tramo no pueden ser modeladas.

Finalmente para calcular la salidad mareal, \hat{s} , se aplica la ecuación 2.17 siendo las condiciones de contorno $\hat{s}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_{m,0}}) = \hat{s}_0$ y $\hat{s}_{S_{m,5}}(n_{m,5}) = \hat{s}_L = 0$. Esto permite obtener las constantes d , δ_1 , δ_2 , \hat{A} y \hat{B} en cada tramo. En consecuencia, \bar{q} , \bar{Q} , \bar{s} y \hat{s} son determinadas.

4.2 Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste

Como se vio en el Capítulo 3, con mayor intensidad desde el siglo XIX, se han llevado a cabo cortas en el ERG para mejorar la navegabilidad y contener la intrusión salina. Esto supuso la pérdida de varios canales del estuario. La situación actual es que el estuario está reducido a un único canal principal. Este Escenario 2 (Figura 4.3) consiste en la reconexión del canal mareal secundario más largo: el del Brazo del Oeste (Figura 2.2). Esta configuración del ERG presenta por tanto dos canales secundarios: el del Puerto de Sevilla y el del Brazo del Oeste, denominados, $S_{s,2}$ y $S_{s,3}$, respectivamente. Con una longitud aproximada de 56 km, discurriría parcialmente por el actual Parque Nacional de Doñana e intersecta al ERG en dos nodos: $n_{m,2}$ en el p.k. 18.3, latitud $36,91^\circ$ N y longitud $6,27^\circ$ W, y el nodo $n_{m,3}$ en el p.k. 60.9, latitud $37,20^\circ$ N y longitud $6,10^\circ$ W (Figura 2.2).

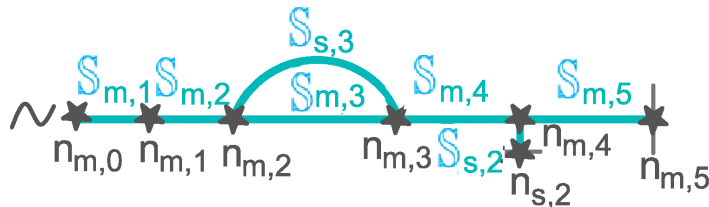


Figura 4.3: Representación topológica de la configuración del Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste.

4.3 Escenario 3: La Recuperación de Marismas en la Parte Baja

El planteamiento para su modelización se expresa mediante el sistema resultante de ecuaciones lineales expresado en forma matricial como $\mathbb{A} \cdot \mathbb{X} = \mathbb{B}$, donde

las incógnitas son ahora, $\mathbb{X}=[A_{S_{m,1}}, B_{S_{m,1}}, A_{S_{m,2}}, B_{S_{m,2}}, A_{S_{m,3}}, B_{S_{m,3}}, A_{S_{m,4}}, B_{S_{m,4}}, A_{S_{m,5}}, B_{S_{m,5}}, A_{S_{s,2}}, B_{S_{s,2}}, A_{S_{s,3}}, B_{S_{s,3}}]$. El término independiente es de la forma:

$\mathbb{B}=[a_0^{\hat{\eta}}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ y la matriz cuadrada $\mathbb{A}=(\partial_{i,j})_{14 \times 14}$.

Las condiciones de contorno y de acuerdo para obtener $\bar{\eta}$ y \bar{Q} corresponden a:

$$\begin{aligned}
 Q_d &= \bar{Q}_{S_{m,k}} \text{ for } k = 1, 2, 4, 5 & (4.3) \\
 \bar{Q}_{S_{s,2}} &= 0 \\
 \bar{Q}_{S_{s,3}} &= Q_d - \bar{Q}_{S_{m,3}} \\
 \bar{\eta}_{S_{m,1}}(n_{m,\gamma_{m,0}}) &= 0 \\
 \bar{\eta}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{\eta}_{S_{m,k+1}}(n_{m,k}) \text{ for } k = 1 \dots 4 \\
 \bar{\eta}_{S_{s,2}}(x) &= \text{constant} = \bar{\eta}_{S_{m,4}}(n_{m,4}) \\
 \bar{\eta}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{\eta}_{S_{s,3}}(n_{m,k}) \text{ for } k = 2, 3
 \end{aligned}$$

Y las condiciones utilizadas para estimar \bar{s} son idénticas a las de la configuración de referencia incluyendo:

$$\begin{aligned}
 \bar{s}_{S_{m,k}}(n_{m,k}) &= \bar{s}_{S_{s,3}}(n_{m,k}) \text{ for } k = 2, 3 & (4.4) \\
 \frac{d\bar{s}_{S_{m,k}}(n_{m,k})}{dx} &= \frac{d\bar{s}_{S_{s,3}}(n_{m,k})}{dx} \text{ for } k = 2, 3
 \end{aligned}$$

Esto permite obtener las constantes d , δ_1 , δ_2 , \hat{A} y \hat{B} en cada tramo. En consecuencia, $\bar{\eta}$, \bar{Q} , \bar{s} y \hat{s} son determinadas.

4.3 Escenario 3: La Recuperación de Marismas en la Parte Baja

La recuperación de zonas de marismas ocupadas en el estuario del Guadalquivir persigue varios objetivos. Se trata de una medida para reducir la turbidez del es-

4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

tuario, que se encuentra en un estado hiperturbio [31], y favorecer la productividad primaria [96]. La recuperación de la marisma supondría incrementar una superficie de las cuencas de retención de sedimento, favorecería el dominio de la vaciante y, en principio, también podría incrementar la fricción sobre la onda de marea reduciendo más la turbidez en el estuario. Por otra parte, favorecería también la captura del carbono orgánico e inorgánico (e.g., [17]) y como medida compensatoria al incremento de la turbidez por las actividades portuarias [12]. La zona del estuario en la que se propone la recuperación de la marisma de agua salobre es la parte baja del estuario. Se añade por tanto un canal secundario somero y extenso situado en el nodo $n_{m,1}$ a 12 km del origen de coordenadas, (Figura 4.4).

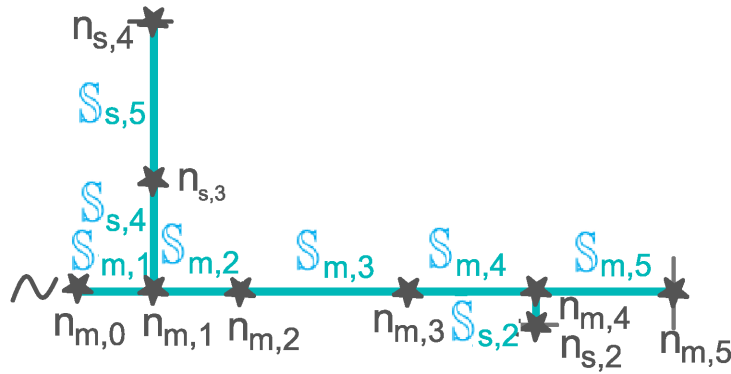


Figura 4.4: Representación topológica de la configuración del Escenario 3: La Recuperación de Marismas en la Parte Baja.

En esta situación existen también dos canales secundarios, el Puerto de Sevilla y Doñana, pero son tres los tramos, puesto que Doñana está dividido en dos segmentos de igual profundidad, un metro. El tramo $S_{s,4}$ es el más próximo al canal principal, unido a través del nodo $n_{m,1}$, localizado a 12 km del origen de coordenadas, y de dimensiones $100 \times 4000 \text{ m}^2$, y el tramo $S_{s,5}$, diseñado con un área cuadrangular de extensión muy superior al anterior, $16000 \times 16000 \text{ m}^2$. En total, hay ocho tramos: cinco del canal principal y dos del secundario y por lo tanto, dieciséis son las incógnitas a resolver: $\mathbb{X}=[A_{S_{m,1}}, B_{S_{m,1}}, A_{S_{m,2}}, B_{S_{m,2}}, A_{S_{m,3}}, B_{S_{m,3}}, A_{S_{m,4}}, B_{S_{m,4}}, A_{S_{m,5}}, B_{S_{m,5}}, A_{S_{s,2}}, B_{S_{s,2}}, A_{S_{s,4}}, B_{S_{s,4}}, A_{S_{s,5}}, B_{S_{s,5}}]$, el término independiente es:

$\mathbb{B}=[a_0^{\hat{\eta}}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ y la matriz cuadrada de coeficientes

4.4 Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río

es de la forma $\mathbb{A}=(\partial_{i,j})_{16 \times 16}$. El sistema resultante de ecuaciones lineales puede ser expresado en forma matricial nuevamente como $\mathbb{A} \cdot \mathbb{X} = \mathbb{B}$. Los caudales promediados considerados en Doñana, $\bar{Q}_{S_{s,4}}$ y $\bar{Q}_{S_{s,5}}$, son $0 \text{ m}^3/\text{s}$ para ambos tramos, siendo los resultados de salinidad en el canal principal similares a la Configuración de Referencia.

4.4 Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río

Este escenario, (Figura 4.5) explora los efectos sobre $\hat{\eta}$, \hat{u} y \hat{Q} al eliminar la presa de Alcalá del Río. Un nuevo segmento, el tramo $S_{m,6}$, es considerado para evaluar estos resultados, (Tabla 2.1). Esto permite obtener información aguas arriba de la presa de la Alcalá del Río. Las condiciones son las mismas que la configuración de referencia pero excluyendo la condición de velocidad mareal nula en cabecera $\hat{u}(n_{m,5}, t) = 0$. De manera que a partir del tramo $S_{m,5}$ existe sólo una onda incidente. El sistema resultante de ecuaciones lineales puede ser expresado en forma matricial como $\mathbb{A} \cdot \mathbb{X} = \mathbb{B}$, con $\mathbb{A}=(\partial_{i,j})_{11 \times 11}$, $\mathbb{X}=[A_{S_{m,1}}, B_{S_{m,1}}, A_{S_{m,2}}, B_{S_{m,2}}, A_{S_{m,3}}, B_{S_{m,3}}, A_{S_{m,4}}, B_{S_{m,4}}, A_{S_{m,5}}, A_{S_{s,2}}, B_{S_{s,2}},]$ y $\mathbb{B}=[a_0^{\hat{\eta}}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$. Los parámetros $A_{S_{m,6}}$ y $r_{S_{m,6}}$ son obtenidos a partir de las ecuaciones de acuerdo entre los tramos $S_{m,5}$ y $S_{m,6}$.

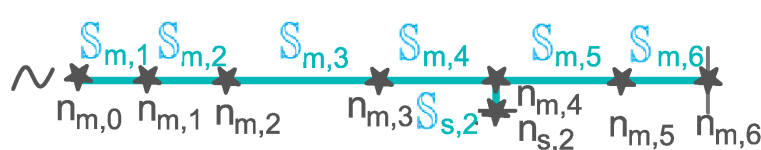


Figura 4.5: Representación topológica de la configuración del Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río.

Sin embargo los resultados de salinidad dependen de la longitud del tramo $S_{m,6}$ ya que la condición de contorno depende de la localización de la cabecera del estuario, denotado por el nodo $n_{m,6}$ y donde se verifica que $\bar{s}(n_{m,6}) = a_{M2}^{\hat{s}}(n_{m,6}) = 0$ psu. Este nodo coincide con el punto donde $\hat{u} = 0$.

4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

Por este motivo se considera un subcaso en este escenario teniendo en cuenta la presa de Cantillana localizada a 125.55 km aguas arriba haciéndolo coincidir con el nodo $n_{m,6}$. Esta situación es similar a la configuración de referencia pero con seis tramos en total y una longitud del canal principal aumentada en 15.55 km.

”No podemos resolver problemas pensando de la misma manera que cuando los creamos.”

Albert Einstein

CAPÍTULO

5

Resultados y su Discusión

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos de cada uno de los cuatro escenarios definidos en el anterior capítulo 4 correspondiendo a los epígrafes: 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, respectivamente. Seguidamente, se realiza un análisis comparativo de los escenarios, Sección 5.5, planteando la combinación de configuraciones y/o mitigación de efectos entre estos, con la finalidad de obtener resultados similares o compensatorios. Por último, en el epígrafe 5.6 se incluye la Sensibilidad del Modelo.

5.1 Escenario 1: Efecto de la Profundización del canal de navegación.

La Figura 5.1 muestra los efectos del cambio de profundidad en el canal principal sobre la propagación de la onda de marea M2 y la distribución de salinidad. En el panel (a) se muestran las amplitudes de las elevaciones mareales M2 a lo largo del canal principal, $a_{M2}^{\hat{\eta}}$. La profundidad de referencia del ERG (6.5 m actualmente) se marca con una línea discontinua blanca. En ese caso se puede comprobar que la amplitud de la elevación (panel (a)) decrece hacia la cabecera en los primeros kilómetros del tramo bajo del estuario, luego se estabiliza y finalmente vuelve a

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

amplificarse cerca de la presa de cabecera, principalmente por el efecto de la reflexión mareal (véase también esta variación en Figura 2.4). En panel (b) de la Figura 5.1 se muestra el volumen mareal M2, $a_{M2}^{P_t}$ estimado en cada sección del estuario por el periodo del armónico M2. Tal y como se mostró en la Figura 2.4 en la etapa de calibración, el volumen mareal relacionado con las corrientes mareales a la profundidad de referencia (línea discontinua blanca) decrecen desde la desembocadura agua arriba, hasta hacerse cero en la presa de cabecera. A la profundidad de referencia, también se puede comprobar cómo el modelo reproduce que la distribución de salinidad promediada (panel (c)) y la mareal (d) decaen aguas arriba.

Si ahora consideramos un incremento en la profundidad del canal, se puede comprobar que, en general, se produce un incremento tanto de las amplitudes de la elevación (panel (a)) como de las corrientes (panel (b)). El incremento no es uniforme. Las amplitudes se incrementan más sustancialmente cerca de la presa, mientras que las corrientes se incrementan en la parte baja del estuario. Por ejemplo, el valor de $a_{M2}^{\hat{n}}(n_{m,5})$ para $h=8$ m son un 36 % mayor que para $h=6.5$ m. Para profundidades mayores a 7.8 m, la amplitud ya no decrece en ningún punto del estuario respecto al valor de la desembocadura. Es siempre creciente aguas arriba.

La profundización del canal de navegación también produce un incremento sustancial en las amplitudes de las corrientes. Las amplitudes de las corrientes mareales en el canal principal, $a_{M2}^{\hat{u}}$, aumentan en todo el estuario, siendo estos resultados un 12 % mayor para $h=8$ m que para $h=6.5$ m, excepto en la cabecera, por la condición de flujo mareal nulo. El incremento en amplitudes y corrientes es fundamentalmente debido a una reducción del efecto de la fricción que experimenta la onda de marea en su propagación tras la profundización. La profundización disminuye el amortiguamiento tanto de la onda de marea incidente como la reflejada en la cabecera. Por el contrario, la reducción de la profundidad media incrementa el efecto de la fricción, produciendo a su vez una reducción de las corrientes y amplitudes mareales. Por ejemplo, para $h = 4$, la reducción sería tan significativa que la energía mareal incidente sobre la presa sería prácticamente nula.

Respecto del efecto del cambio de calado en la distribución de sal en el canal principal, la profundización del canal incrementa la intrusión salina. También desplaza el máximo gradiente de sal aguas arriba. Por el contrario, la reducción

5.1 Escenario 1: Efecto de la Profundización del canal de navegación.

de la profundidad media decremента la intrusión salina y lleva el punto de máximo gradiente aguas abajo. Manteniendo el caudal de agua dulce y la dispersión mareal constante, una profundización del canal produciría un aumento de la intrusión salina media en el estuario (panel (c)) debido al incremento de la proporción de agua salada en el estuario. Para la isohalina 5 son 44.6, 39.85 y 26.7 km para profundidades 8, 6.5 y 4 m, respectivamente.

Una profundización de 1 m del canal de navegación incrementa la intrusión promediada en el ERG en aproximadamente 3 km, mientras que una reducción de 1 m supone un retroceso de 5 km. En el panel (d), que representa la amplitud M2 de la salinidad mareal $a_{M2}^{\hat{s}}$, se puede ver que las mayores amplitudes se presentan donde el gradiente de sal es mayor, puesto que la corriente M2 es la que advecta el gradiente de salinidad.

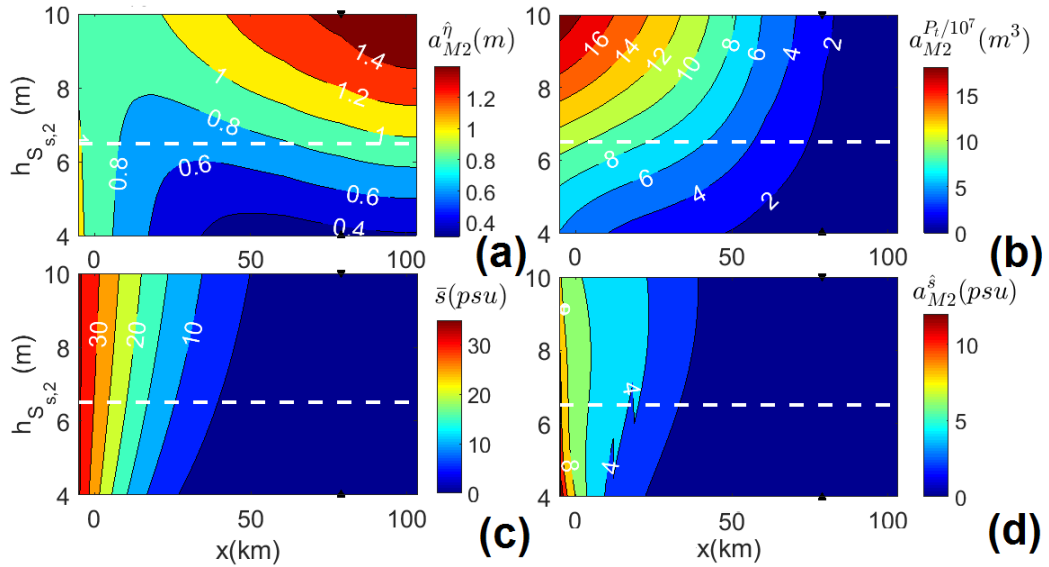


Figura 5.1: Escenario 1: Cambio de la profundidad en el canal de navegación. Representación de las amplitudes de las elevaciones mareales M2 (panel (a)), volumen mareal M2 (panel (b)), salinidad promediada (panel (c)) y salinidad mareal M2 (panel (d)) a lo largo en el canal principal para diferentes profundidades. La localización del canal secundario del Puerto de Sevilla está denotado por $\blacktriangle \blacktriangledown$. La línea discontinua blanca representa la profundidad actual.

Respecto a los resultados del canal secundario del Puerto de Sevilla, aunque no se muestra figura explícitamente, la localización del canal se indica en los paneles

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

de la Figura 5.1 mediante una punta de flecha, han sido también modeladas obteniendo la amplitud de las elevaciones mareales a lo largo de todo el tramo, $\mathbb{S}_{s,2}$, prácticamente constantes debido a la reducida longitud de este canal secundario. Los valores de $a_{M2}^{\hat{\eta}}$ y a_{M2}^{Pt} también aumentan/decrementan cuando la profundidad media aumenta/disminuye. La salinidad no cambia a lo largo del canal secundario en ningún caso, puesto que no se consideran fuentes (producidas por, por ejemplo, evaporación) ni sumideros de sal (debidos a aportes de agua dulce y/o condensación). La salinidad promediada y mareal son las mismas que las indicadas en el punto de conexión, es decir, el valor obtenido en la punta de flecha negra en Figura 5.1 paneles (c) y (d) respectivamente.

5.2 Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste.

En este escenario se considera el Brazo del Oeste conectado al canal principal en los puntos kilométricos 18.3 y 60.9 (nodos $n_{m,2}$ y $n_{m,3}$). En la Figura 5.2 se muestra el efecto de la reconexión sobre el comportamiento de las amplitudes mareales y la salinidad a lo largo del canal principal para diferentes anchuras del canal secundario. En los paneles de esta Figura los puntos donde el Brazo del Oeste conecta con el canal principal aparecen denotados con cuadrados. El punto de conexión del canal secundario del Puerto de Sevilla ubicado en el pk 79 se representa con una punta de flecha. La Figura 5.3 muestra las mismas variables que la Figura 5.2 a lo largo del Brazo del Oeste, donde el origen de coordenadas coincide con el punto de conexión con el canal principal más próximo a la desembocadura (nodo $n_{m,2}$). Este escenario es estudiado para diferentes anchuras del canal reconectado $b_{\mathbb{S}_{s,3}}$. En ambas figuras, la línea blanca discontinua representa una anchura de referencia del canal reconectado de 350 m (Tabla 2.1). La profundidad se mantiene en 6.5 m.

Para las condiciones de referencia, tal y como se muestra en la Figura 5.2, los valores de las amplitudes de las elevaciones mareales M2, $a_{M2}^{\hat{\eta}}(x)$, son en general superiores a las actuales en el estuario (sin reconexión). En especial, su valor asciende hasta casi 1.7 m en cabecera (panel (a)). Respecto a los caudales, en el panel (b) se aprecian discontinuidades en los puntos de unión. En general, el volumen mareal M2 a_{M2}^{Pt} tienden a aumentar desde la desembocadura hasta el punto de conexión en ~ 18.30 km y decrecen aguas arriba desde ese punto. Los efectos de

5.2 Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste.

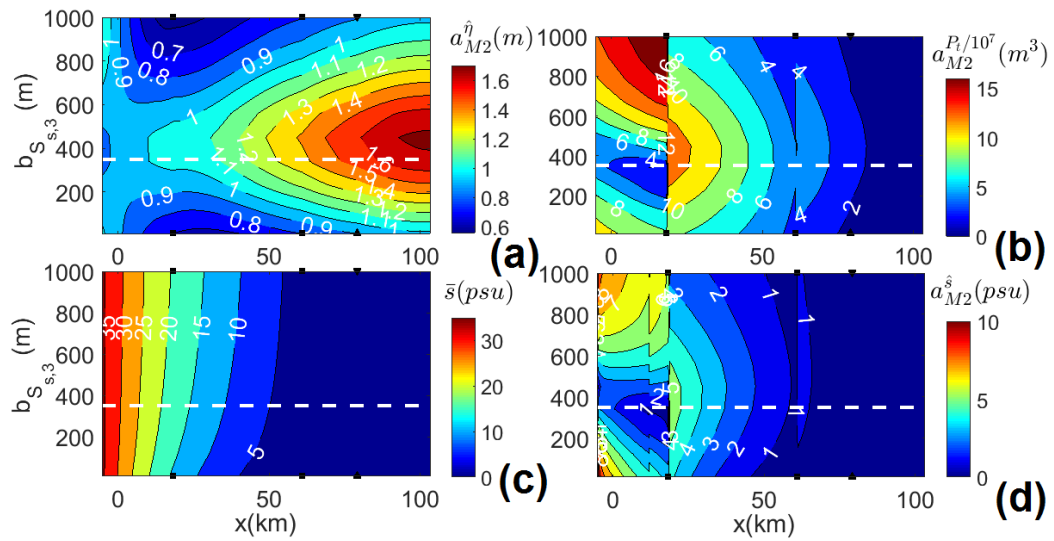


Figura 5.2: Escenario 2: Reconexión de canal mareal, Brazo del Oeste. Representación de las amplitudes de las elevaciones mareales M2 (panel (a)), volumen mareal M2 (panel (b)), salinidad promediada (panel (c)) y salinidad mareal M2 (panel(d)) a lo largo del canal principal variando la anchura del Brazo del Oeste, $b_{S_s,3}$. Los dos nodos del brazo, $n_{m,2}$ y $n_{m,3}$, están denotados por \blacksquare y el nodo del Puerto de Sevilla, $n_{m,4}$, por $\blacktriangle \blacktriangledown$. La línea blanca discontinua representa la configuración de la reconexión del Brazo del Oeste con los parámetros de diseño descritos en la Tabla 2.1.

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

la reconexión del brazo en la salinidad promediada (panel (c)), $\bar{s}(x)$, muestran un suave incremento debido a la reducción del caudal de agua dulce, que ahora debe repartirse entre los dos tramos conectados. Los mayores efectos de la reconexión se concentran entre los puntos de conexión (km 18.30 y 60.90). Así tanto las corrientes mareales (o expresadas según el volumen mareal M2), como la salinidad mareal, son significativas en los puntos de unión con el Brazo del Oeste, llegando a alcanzar en esas zonas los valores máximos.

El rango de anchuras del canal reconectado considerado en los experimentos se encuentra entre 100 y 1000 m. Los paneles (a) de las Figuras 5.2 y 5.3 muestran que los máximos valores de las amplitudes de las elevaciones mareales M2 en el canal principal y en el secundario, respectivamente, son alcanzados para la anchura $b_{S_{s,3}} \approx 500$ m. Las amplitudes máximas se alcanzan cerca de la presa de cabecera en el primer caso y en el punto de conexión aguas arriba en el segundo. Esta anchura presenta un valor muy próximo a la anchura de diseño adoptada para el Brazo del Oeste en este trabajo, 350 m, (ver tabla 2.1). En lo referente a las corrientes mareales M2, el mayor valor de la amplitud, $a_{M2}^{\hat{u}} \sim 1.6$ m/s, tiene lugar entorno al pk 13, aguas abajo del nodo $n_{m,2}$ y para una anchura del brazo $b_{S_{s,3}}=1000$ m (Figuras 5.2, panel (b)).

La reapertura del brazo produce un incremento/reducción de las amplitudes de las corrientes mareales M2 para anchuras del brazo con valores menores/mayores a 400 m a lo largo del ERG desde la desembocadura hasta el nodo $n_{m,2}$, es decir, los primeros 20 kilómetros. En el Brazo del Oeste, (Figura 5.3, panel (b)), los valores del volumen mareal M2 representados, $a_{M2}^{P_t}$, muestran que decrecen aguas arriba a lo largo del Brazo del Oeste por efecto de la fricción. Las amplitudes de la elevación mareal M2 aumentan por el gradiente de nivel que se establece desde el canal principal (Figura 5.3, panel (b)). La tendencia de las amplitudes de la elevación mareal M2 a lo largo del Brazo es similar al del canal principal entre los puntos de reconexión, i.e., en ambos casos las amplitudes son crecientes aguas arriba y las fases son decrecientes hacia la presa de Alcalá del Río.

Los cambios de amplitud mareal de salinidad más importantes se producen en los primeros 20 km (Figura 5.2, panel (d)). Estas amplitudes de la salinidad M2 decrecen notablemente cerca de la desembocadura debido a la reducción de las corrientes mareales M2 (panel (b)). En buena medida, las amplitudes de la salinidad

5.2 Escenario 2: La Reconexión del Brazo del Oeste.

están correlacionadas con los resultados de las corrientes mareales. Los mayores valores de las amplitudes se corresponden con las anchuras de 100 m, puesto que el gradiente máximo de la salinidad promediada (panel (c)) se encuentra en torno a los 15 km.

El comportamiento similar de las amplitudes de las respectivas elevaciones en el canal principal y secundario (paneles(a) en Figuras 5.2 y 5.3) sugiere el acoplamiento entre ambas ondas de marea propagadas. En términos de la propagación de onda de marea, el Brazo del Oeste y el tramo del canal principal entre los nodos $n_{m,2}$ y $n_{m,3}$, presentan una distribución y magnitudes similares. En este sentido, se han explorado los efectos de la variación del coeficiente de fricción $r_{S_{s,3}}$ para evaluar la posibilidad de un comportamiento resonante. Los resultados (no mostrados) indican que, para rangos realistas del coeficiente de fricción, no se detecta resonancia. No obstante, se observa que, como era de esperar, las amplitudes mareales y la intrusión salina, dada por la distribución de salinidad promediada, decrecen en todo el estuario cuando los valores del coeficiente de fricción aumentan.

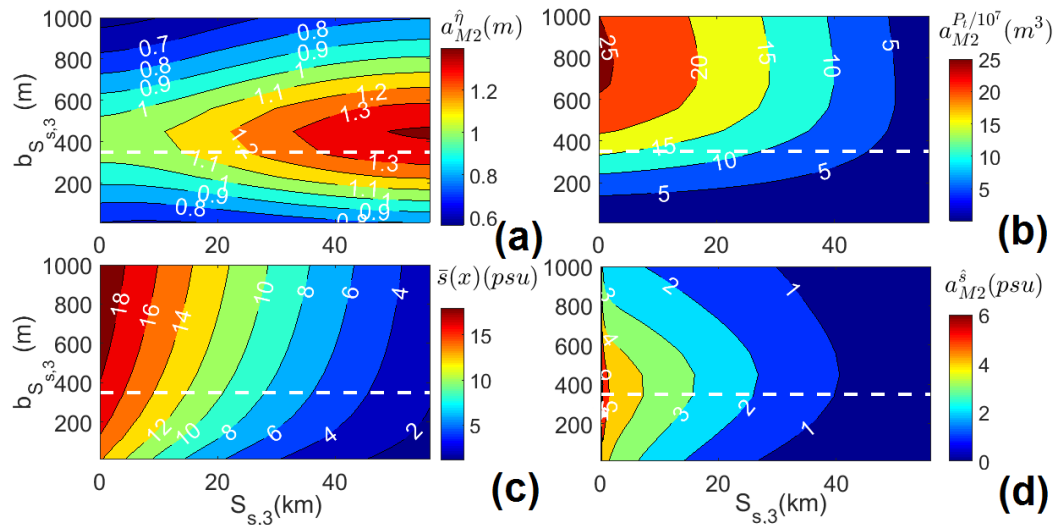


Figura 5.3: Escenario 2: Reconexión de canal mareal secundario del Brazo del Oeste. Representación de las amplitudes de las elevaciones mareales M2 (panel (a)), volumen mareal M2 (panel (b)), salinidad promediada (panel (c)) y salinidad mareal M2 (panel(d)) a lo largo del Brazo del Oeste variando su anchura, $b_{S_{s,3}}$. Aquí 0 es el punto de conexión con el canal principal $n_{m,2}$. La línea discontinua blanca representa los resultados del Brazo del Oeste con los parámetros de diseño descritos en la Tabla 2.1.

5.3 Escenario 3: La Recuperación de Marismas Mareales/Salobres en el Espacio Natural de Doñana.

Este tercer escenario analiza el efecto en la propagación de onda de marea y la salinidad de la recuperación de zonas inundables en la parte baja del estuario, que es, dadas las restricciones administrativas actuales, la única configuración posible para este tipo de actuaciones. La nueva zona inundable queda representada en el modelo como un nuevo canal secundario conectado a la parte baja del estuario y definido por dos tramos someros. El primero es un tramo estrecho y corto de transición entre el canal principal y la zona de marisma, la cual viene representada por el segundo tramo. Éste se encuentra cerrado aguas arriba y sin aporte de caudal de agua dulce (Figura 4, panel (d)). Se considera la zona inundable como ancha y somera con una fricción efectiva elevada de profundidad 1 m (Tabla 2.1, $S_{s,4}$ y $S_{s,5}$) de acuerdo a la información accesible en <http://observatorio.ebd.csic.es/>.

En la Figura 5.4 se muestran los efectos en el canal principal en función del área recuperada de marisma $A_{S_{s,4},S_{s,5}}$ (desde 25 km^2 hasta 400 km^2). Los resultados para los parámetros de referencia indicados en la Tabla 2.1 se marcan con la línea discontinua blanca. La propagación de la onda de marea y la distribución de sal a lo largo del estuario apenas cambia si el área del humedal salobre se modifica.

La Figura 5.5 muestra los resultados para diferentes anchuras del tramo de transición entre el canal principal y la marisma, $b_{S_{s,4}}$. El rango de los valores considerado está entre 0 y 1000 metros. En general, los efectos comienzan a ser perceptibles para anchuras superiores a 60 m. Las amplitudes de las elevaciones mareales (panel (a)) disminuyen aguas arriba a partir del punto de conexión con el humedal, cuando $b_{S_{s,4}}$ aumenta. Para cada $\Delta b_{S_{s,4}}=50$ m considerado, la amplitud experimenta aproximadamente un decremento de $\Delta a^{\hat{n}} \approx -1 \text{ cm}$ a lo largo del canal principal. Este efecto podría afectar en menor medida a la navegabilidad hasta el Puerto de Sevilla (es muy pequeño). Los valores del volumen mareal representados en el panel (b), muestran que cuanto mayor sea la anchura de la conexión, los valores del volumen mareal aguas abajo del punto de conexión de la marisma serán mayores. Por el contrario, aguas arriba, el volumen mareal se reducirá respecto a la situación actual. En cuanto a la componente promediada de la distribución longitudinal de salinidad

5.3 Escenario 3: La Recuperación de Marismas Mareales/Salobres en el Espacio Natural de Doñana.

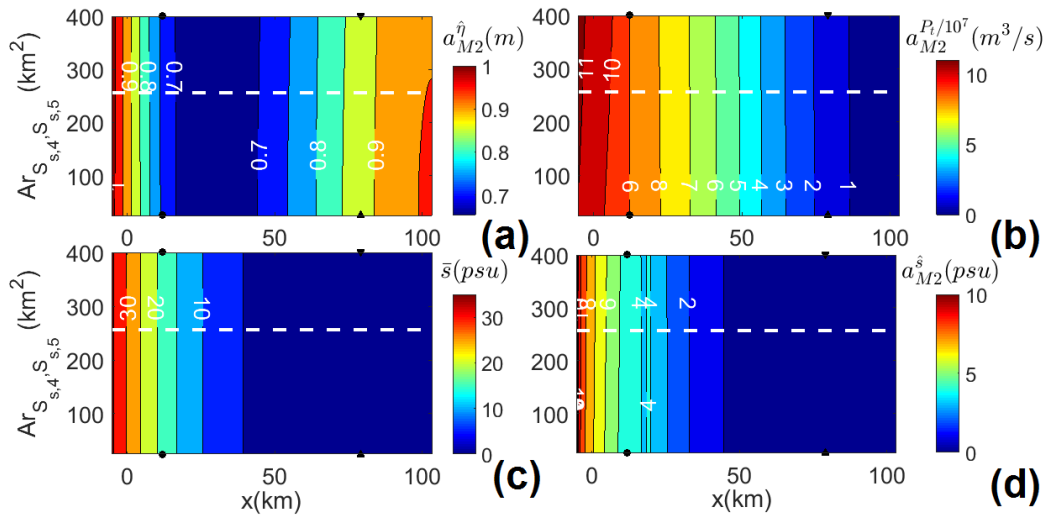


Figura 5.4: Escenario 3: Recuperación de marismas en la parte baja del estuario. Representación de las amplitudes de las elevaciones mareales M2 (panel (a)), volumen mareal M2 (panel (b)), salinidad promediada (panel (c)) y salinidad mareal M2 (panel(d)) a lo largo del canal principal variando el área de las marismas. La localización del nodo de conexión en la parte del estuario, $n_{m,1}$, está denotado por \bullet y el canal secundario del Puerto de Sevilla, $n_{m,4}$, por $\blacktriangle \blacktriangledown$. La línea discontinua blanca representa la configuración del escenario 3 con los parámetros descritos en la Tabla 2.1.

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

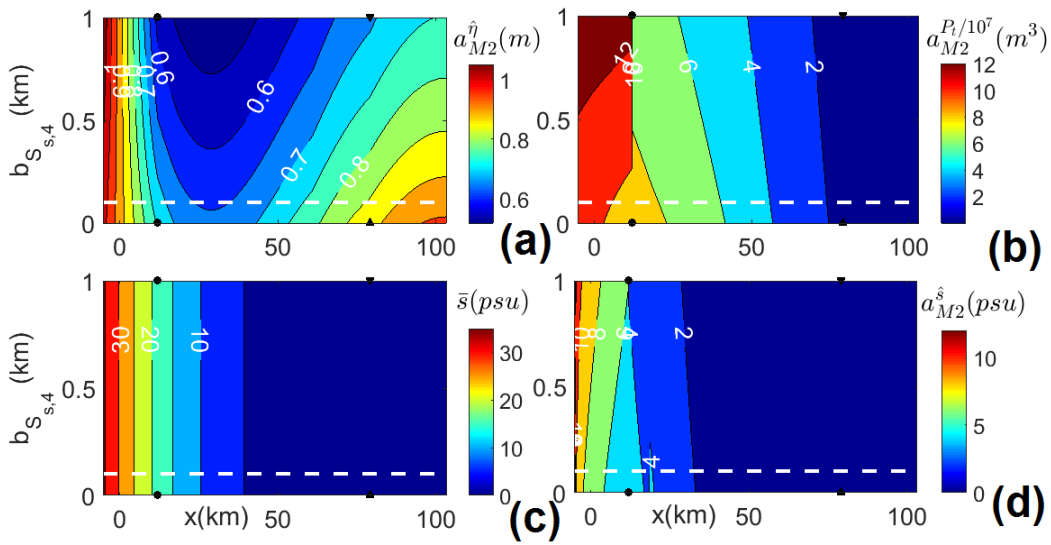


Figura 5.5: Escenario 3: Recuperación de marismas en la parte baja del estuario. Representación de las amplitudes de las elevaciones mareales M2 (panel (a)), volumen mareal M2 (panel (b)), salinidad promediada (panel (c)) y salinidad mareal M2 (panel(d)) a lo largo del canal principal variando la anchura del primer tramo conectado, $b_{S_{s,4}}$. La localización del nodo de conexión en la parte del estuario, $n_{m,1}$, está denotado por \bullet y el canal secundario del Puerto de Sevilla, $n_{m,4}$, por $\blacktriangle \blacktriangledown$. La línea discontinua blanca representa la configuración del escenario 3 con los parámetros descritos en la Tabla 2.1.

5.4 Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río.

(panel (c)) apenas se ve modificada por la apertura de la marisma. Sin embargo, las amplitudes de la salinidad mareal (panel (d)) se ven modificadas principalmente por el cambio en las amplitudes de las corrientes mareales que transportan el campo de salinidad.

En general, los resultados muestran que las amplitudes mareales y distribución de la salinidad a lo largo del ERG apenas se ven modificadas al abrir una zona de marisma somera. Por una parte, esto puede ser debido a la localización de la zona de marisma, la cual está próxima a la desembocadura [1]. Por otra parte, la profundidad tanto del canal de conexión como de la marisma es muy reducida por lo que el efecto de la fricción sobre la propagación de la onda de marea por este canal secundario es muy significativo. La mayor parte del momento se transporta por el canal principal por lo que físicamente es una situación parecida a la actual.

5.4 Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río.

Cuando la presa de Alcalá del Río es eliminada se produce un incremento de la amplitud de las elevaciones mareales en el tramo medio y un decremento aguas arriba. Este incremento es debido a la convergencia del canal cuando la barrera es eliminada. La Figura 5.6 muestra los resultados del escenario 4 donde se puede ver que la amplificación de $a_{M2}^{\hat{\eta}}(x)$ aguas arriba se reduce tras eliminar la presa puesto que ya no hay reflexión.

También el comportamiento de la propagación de la onda aguas arriba en el tramo $\mathbb{S}_{m,6}$, puede ser analizado. Por este motivo, también en la Figura 5.6 se muestran los resultados considerando diferentes profundidades para el tramo $\mathbb{S}_{m,5}$, hasta la presa de Alcalá del Río. Los valores son 4, 5 y 6.5 m. El ancho, $b_{\mathbb{S}_{m,6}}$, y la profundidad del tramo añadido, $h_{\mathbb{S}_{m,6}}$, son 80 m y 4 m, respectivamente. Estas situaciones corresponden a un estuario sin presa aguas arriba. La representación de $a_{M2}^{\hat{\eta}}(x)$, reproduce en este tramo un suave decrecimiento. Esto permite estudiar la longitud del estuario o el lugar hasta donde se propaga la onda de marea, $\hat{u} = 0$. El valor de la velocidad tiende asintóticamente a cero. En consecuencia, esto se traduce en $0 \pm \Delta$, siendo Δ la tolerancia y su valor fijado como el mayor del error de las

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

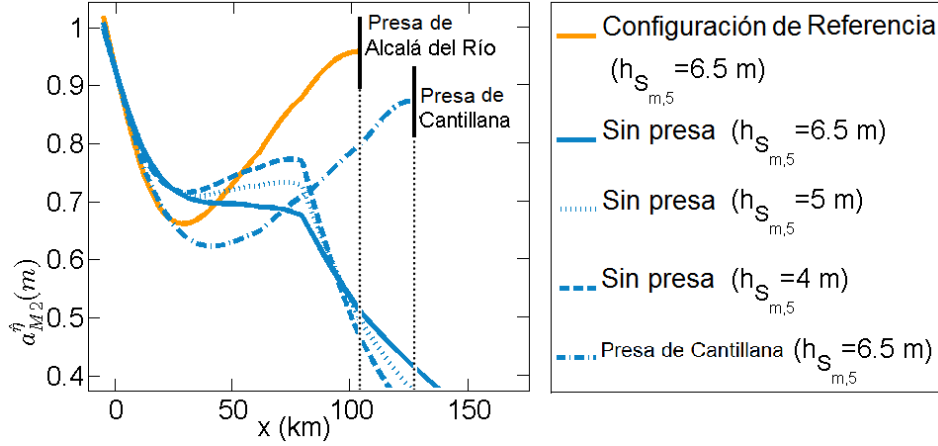


Figura 5.6: Escenario 4: Eliminación de la Presa de Alcalá del Río. Las amplitudes de las elevaciones mareales, $a_{M2}^{\hat{\eta}}(x)$, del estuario sin presa están representados mediante línea continua azul, —, para $h_{S_{m,5}}=6.5$ m, con línea de puntos azul, ···, para $h_{S_{m,5}}=5$ m y línea discontinua azul, - - -, para $h_{S_{m,5}}=4$ m. La línea continua naranja, —, muestra estos resultados considerando la presa de Alcalá del Río (topología base), y la línea punto-rayado azul, -·-, incluyendo la presa de Cantillana.

amplitudes de las elevaciones mareales, en nuestro caso 4 cm. Éste corresponde aproximadamente al intervalo de la tolerancia de los instrumentos utilizados en la red monitorización.

De manera que, la nueva longitud del estuario resulta estar en torno a 450 km, 335 km o 280 km dependiendo de la diferencia entre las profundidades de los dos últimos tramos, $h_{S_{m,5}}$ y $h_{S_{m,6}}$. Si ésta es menor, la longitud será mayor (véase la posición de los triángulos, ▲, colocados en el eje x de la Figura 5.6).

La superposición lineal de la contribución mareal y fluvial, [41] y [53], no es considerada en este modelo, ver el Apéndice A. En realidad, las descargas de agua dulce amortiguan la propagación de la onda de marea, entonces el coeficiente de fricción es mayor y la longitud esperada del estuario resulta ser inferior a los mostrados en la Figura 5.6.

Si se considera la presa de Cantillana, la longitud del tramo estará nuevamente delimitada, siendo $L_{S_{m,6}}$ igual a 22.4 km. Esta situación supone una longitud total del canal principal de 125.55 km, hasta Cantillana. Así que los resultados de $a_{M2}^{\hat{\eta}}(x)$ disminuirán, aunque menos que sin presa. Esto es debido al efecto de la reflexión.

5.5 Análisis Comparativo de Escenarios.

La onda de marea llega aún con energía, por ejemplo en el p.k. 79 desde los 0.88 m para la topología base a 0.71 m con la presa de Cantillana y a 0.68 sin presa aguas arriba. En este caso, el coeficiente de difusión considerado $D_{S_{m,6}}$ es igual a $D_{S_{m,5}}=335.71 \text{ m}^2/\text{s}$. Además, la magnitud de $a_{M2}^{\hat{u}}(x)$ también decrece. Los valores de \bar{s} coinciden con los resultados de la configuración de referencia sin embargo $a_{M2}^{\hat{s}}(x)$ es menor debido a la eliminación de la barrera, ver Figura paneles c y d respectivamente.

En general, al desplazar el foco reflector, la energía de la onda incidente es menor debido a la amortiguación por efecto de la fricción. Por lo tanto la onda reflejada tendrá menos energía, y esto supone una menor amplificación cerca de la presa.

5.5 Análisis Comparativo de Escenarios.

Los resultados de los experimentos llevados a cabo con el modelo aportan información valiosa sobre la dinámica del ERG y su gestión.

En la Figura 5.7 se muestran simultáneamente los resultados de los cuatro escenarios (líneas azules) respecto a la Configuración de Referencia sobre línea naranja continua. Como se ha visto anteriormente, la modificación del ramal del Puerto de Sevilla tiende a aumentar las amplitudes de las elevaciones mareales a lo largo de todo el canal principal. Esto indica que la hidrodinámica cambia debido al acortamiento de este tramo. El escenario 1 modelado para $h = 8 \text{ m}$, muestra que la profundización del estuario incrementa las amplitudes mareales, y, por lo tanto, las concentraciones de sólidos en suspensión en el estuario aumentarán según indica ec. 2.28. Consecuentemente, el efecto de reducir el calado al canal principal disminuye las elevaciones mareales, corrientes mareales y las concentraciones de sólidos en suspensión. Además, en el escenario 2 con la configuración original del Brazo del Oeste según parámetros indicados en Tabla 2.1 se deduce que las dos ondas se encuentran completamente acopladas. Sus resultados son similares en escala y forma, lo cual se interpreta como que el estuario se comporta como un único ramal en el tramo donde éste intersecta con el brazo. Estos resultados revelan que su reapertura mejoraría la navegación, eventualmente promoviendo algunas de las actividades socioeconómicas relacionadas y simultáneamente; contribuirían a

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

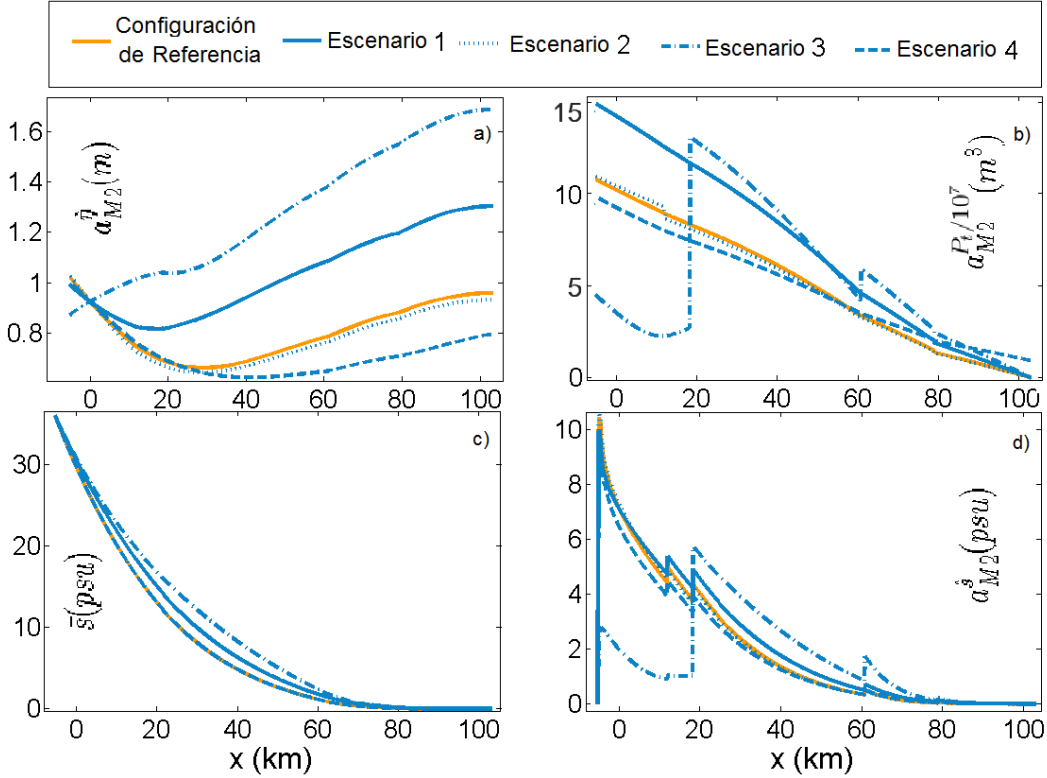


Figura 5.7: Resultados del canal principal. Panel a): las amplitudes de las elevaciones mareales, $a_{M2}^{\eta}(x)$ en m. Panel b): el volumen mareal, $a_{M2}^{P_t}(x)$ en m^3 . Panel c): la salinidad promediada, $\bar{s}(x)$ en psu. Panel d): Las amplitudes de la salinidad mareal, $a_{M2}^{\hat{s}}(x)$ en psu. Cada panel muestra sobre línea continua naranja la configuración de referencia, —, sobre línea continua azul el escenario 1 particularizado para una profundidad de 8 m, —, la línea azul con trazo punto-rama es el escenario 2, —·—, la línea azul punteada es el escenario 3, ··· y la línea discontinua azul es el escenario 4 considerando la presa de Cantillana —·—.

5.5 Análisis Comparativo de Escenarios.

extremos de turbidez e incrementarían la intrusión salina en el ERG. Además, el comportamiento del estuario podría alcanzar efectos similares en el canal principal dragando o reconectando el Brazo del Oeste; aunque los mayores efectos son ocasionados por el brazo.

Con respecto a nuestro escenario 3, los resultados son similares a la configuración de referencia, pero los valores de $a_{M2}^{\hat{\eta}}$ se amplifican para ciertas áreas de humedales. Esto podría aparentar la existencia de efectos resonantes que realmente no se producen, Figura 5.4, panel (a).

Sin embargo, estos efectos decrecen sin la presa de Alcalá del Río. El comportamiento general de $a_{M2}^{\hat{\eta}}(x)$ es decreciente en todo el estuario excepto un leve aumento aguas arriba debido a su geometría convergente. Si bien la eliminación de la presa de Alcalá del Río podría resultar beneficiosa en términos de conectividad ecológica y para reducir la turbidez podría no serlo para los intereses del Puerto por la reducción de la amplitud mareal. Si se considera la presa de Cantillana, las amplitudes de las elevaciones mareales serán algo superiores debido a la presencia de la barrera aunque siguen siendo muy inferiores a aquellas observadas actualmente.

Los resultados típicos extraídos de los experimentos realizados para los escenarios en la Figura 5.7 empleando los parámetros indicados en la Tabla 2.1 conllevan a poder comparar entre sí los escenarios y relacionarlos según los efectos similares que producen a lo largo del canal principal. Por un lado los mayores valores respecto a la configuración de referencia los muestran los escenarios 1 y 2, sin embargo; los menores valores aparecen en el escenario 3 y 4. En general, un dragado de profundización (o una subida del nivel medio del mar) incrementaría las amplitudes de las elevaciones, el volumen mareal y, en menor medida, la intrusión salina en el estuario (paneles a, b y c, respectivamente, curvas azul oscuro continua). Efectos similares han sido comunicados para otros estuarios (e.g., [13],[22]). Un efecto similar tendría la reconexión del canal secundario del Brazo del Oeste, excepto cerca de la desembocadura, donde amplitudes de elevaciones y corrientes mareales decrecen, estas últimas, de forma significativa (curvas azul discontinua).

Esto tendría consecuencias a varios niveles. Respecto a la navegación por el estuario, el mayor rango mareal favorecería la navegación desde la desembocadura

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

hasta el puerto de Sevilla, puesto que los barcos podrían seguir la pleamar navegando sobre una mayor columna de agua (panel (a)). Por otra parte, si se pretende llevar a cabo una profundización del canal de navegación mediante un dragado para que buques de mayor calado alcancen con seguridad del Puerto de Sevilla, debe contarse también con el incremento mareal. De manera que, esto permitiría optimizar (reducir) el volumen de material dragado. Es más, teniendo en cuenta el incremento tan significativo de las amplitudes mareales observadas en el escenario 2 (panel (a), curva azul discontinua), la reconexión del Brazo del Oeste podría representar una alternativa al dragado de profundización como anteriormente se indicó. Por ejemplo, un dragado del canal de navegación de 8 m presenta resultados similares para elevaciones y corrientes mareales al de una reapertura del canal secundario del Brazo del Oeste con $b_{S_{s,3}}=150$ m y $h_{S_{s,3}}=6.5$ m, o bien con $b_{S_{s,3}}=350$ m y $h_{S_{s,3}}=5$ m.

El incremento de las corrientes mareales pronosticado por el modelo para los escenarios 1 y 2 (panel (b)) también resultaría en un incremento de los esfuerzos tangenciales en lecho y márgenes. Esto favorecería el incremento de las tasas de erosión local y la concentración de sedimentos en suspensión [22]. Esto tendería a empeorar la calidad del agua en el estuario. De hecho, el Estuario del Río Guadalquivir es un estuario que presenta, en condiciones normales, elevadas concentraciones de sedimento en suspensión [31], las cuales limitan la penetración de luz y, por tanto, representan un factor limitante para la producción primaria [96].

El modelo también cuantifica el previsible incremento de la intrusión salina (e.g., [59]) tanto para una profundización del canal (panel (c), curva azul oscuro continua) como para la reapertura del Brazo del Oeste (panel (c), curva azul discontinua). El desplazamiento de la distribución de salinidad aguas arriba es más significativo para el escenario 2. En este caso, la contención de la intrusión salina para actividades agrarias sería más complicada, pues se pronostica un incremento de hasta 10 km en la parte central del estuario. Este incremento es significativo frente a los 110 km de longitud del estuario. Es importante también mencionar que estos resultados (panel (c)) se han obtenido manteniendo constante el caudal de agua dulce en $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, la tendencia es que en los próximos años el caudal de agua dulce se reduzca un 15 %, lo que, según [90], incrementaría en un 8 % la intrusión salina. Asimismo, el coeficiente de dispersión longitudinal se ha

5.6 Análisis de Sensibilidad del Modelo.

mantenido igualmente constante tras el procedimiento de calibración. No obstante, se espera que con el incremento de las corrientes mareales el coeficiente de dispersión longitudinal también se incremente debido a que la mezcla en el Estuario del Río Guadalquivir está controlada por la acción mareal [30]. Este incremento de la mezcla longitudinal supondría un cambio en la escala de mezcla, reduciendo los tiempos de ajuste transitorios del campo de salinidad en regímenes fluvio-mareales no estacionarios.

Los efectos del cambio en el calado podrían ser compensados o mitigados con otras actuaciones inspiradas en los escenarios 2 y 3, a saber, la reconexión de canales secundarios en puntos específicos del canal de navegación, como el del Brazo del Oeste, o la recuperación y/o creación de llanos mareales/cuencas de retención de sedimentos. El emplazamiento de una cuenca de retención o la recuperación de una marisma en la parte baja del estuario (escenario 3) sería morfológicamente viable dada la configuración actual del estuario. Esta actuación, por sí sola, favorecería una reducción de las elevaciones y corrientes mareales a lo largo del canal principal del estuario y sería una medida efectiva para la compensación de efectos contrarios producidos, por ejemplo, por un dragado.

En la Figura 5.8 se muestra la compensación del efecto de un dragado de 8 m en el canal de navegación mediante la reconexión de un ramal mareal (paneles (a) y (b)) o mediante la recuperación de los llanos mareales en la parte baja del estuario (paneles (c) y (d)). Los datos de diseño del brazo difieren del Brazo del Oeste en la profundidad, en este caso $h_{S_s,3}=2$ m. Para la zona de marisma los valores diferentes son la profundidad y anchura del tramo adyacente al canal principal, $h_{S_s,4}=2$ m y $h_{S_s,4}=400$ m, respectivamente. (Resto de valores ver Tabla 2.1).

5.6 Análisis de Sensibilidad del Modelo.

Todos los resultados mostrados en la Figura 5.8 corresponden al armónico semi-diurno M2. Sin embargo en la Figura 2.5, la diurna K1 también se ha ajustado, cuyo periodo es 23.93 h. Para esta constituyente diurna, los coeficientes de fricción $r_{S_m,1}$, $r_{S_m,2}$, $r_{S_m,3}$, $r_{S_m,4}$, $r_{S_m,5}$ y $r_{S_s,1}$ son 0, 0, 0.001, 0.0007, 0.001 y 0, respectivamente. Ésta muestra un similar comportamiento a la semidiurna M2. Sus coeficientes de fricción son menores porque las constituyentes asociadas al periodo diurno son

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

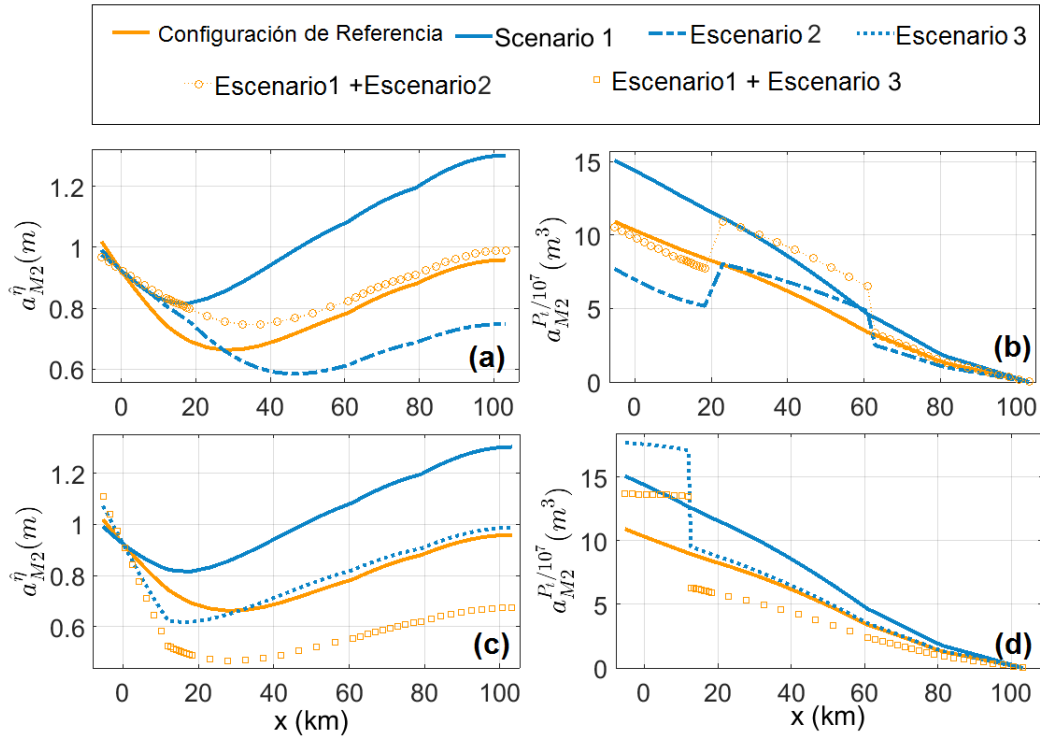


Figura 5.8: Compensación del efecto de una profundización del canal principal con $h=8\text{m}$ (Escenario 1, —). Arriba: Reconexión del Brazo del Oeste con una profundidad del brazo de 2 m (Escenario 2, - -). Abajo: Recuperación de marismas en la parte baja del estuario (Escenario 3, ···) con una anchura de 400 m y una profundidad de 2 m del primer tramo, $S_{s,5}$. El resto de parámetros los descritos en la Tabla 2.1. La línea continua naranja representa la configuración de referencia — y la superposición de los Escenarios 1 y 2 con ···○··· y los Escenarios 1 y 3 con □. Las amplitudes de las elevaciones mareales M2 en m (paneles (a) y (c)) y las amplitudes del volumen mareal M2 en m^3 (panel (b) y (d)) a lo largo del canal principal.

5.6 Análisis de Sensibilidad del Modelo.

menos energéticas en la plataforma continental, así como en el interior del estuario. De una forma similar puede entenderse la diurna O1 con un periodo de 25.82 h. En el caso de la otra componente mareal representada M4 cuyo periodo es 6.21 h, su ajuste no es óptimo debido a la interacción no lineal M2 - M2 como ya se explicó al final de la sección de Calibración del Modelo en el ERG, Sección 2.2.4.

Aunque el coeficiente de determinación R^2 obtenido es elevado en todos los casos, se estudia la sensibilidad del modelo a los parámetros ajustados, especialmente, el coeficiente de fricción r y el de dispersión efectiva D . Para ello se considera un intervalo de valores de los parámetros h , r , D y Q_d . La sensibilidad se estudia usando siete valores que varían desde la mitad al doble de los considerados en cada tramo para la configuración de referencia, es decir, entre 0.0038 y 0.002 para r y entre 1100 y 600 m^2/s para D . La Figura 5.9 muestra los resultados de las amplitudes de las elevaciones mareales variando r y la salinidad promediada variando D . Esto indica que los cambios en las salidas del modelo son mayores si se modifica el coeficiente de fricción. Evidentemente, r no influye en la salinidad promediada porque no depende de ésta. Lo mismo sucede con Q_d y D que no influyen en las elevaciones y corrientes mareales. Las diferencias más importantes a lo largo del canal principal se producen para los valores inferiores al coeficiente de fricción de referencia, r^* . Pero en el caso del coeficiente de dispersión, las mayores variaciones son a partir del p.k. 80, con valores superiores a D^* . El modelo es más sensible a r que a D . En este sentido, se confirma que una profundidad elevada de dragado podría aumentar la circulación estuarina y cambiar significativamente los parámetros de mezcla.

El método de superposición de soluciones, [68] también se utilizó para verificar que los resultados de este modelo son correctos. Sólo se ha modelado la configuración de referencia. Además, las desviaciones máximas entre los dos resultados son admisibles ya que el intervalo de error establecida para los datos observados es mayor produciéndose las mayores discrepancias alrededor del nodo $n_{m,4}$. Estos resultados son predecibles ya que el método basado en Ippen-Harleman obtiene la solución exacta, [57], mientras que este segundo método es perturbativo. Mencionar que los análisis llevados a cabo con el modelo exploratorio no considera variaciones en los parámetros de intercambio (coeficientes de fricción y dispersión longitudinal) debido a cambios en la profundidad, ni otras fuentes/sumidero para

5. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

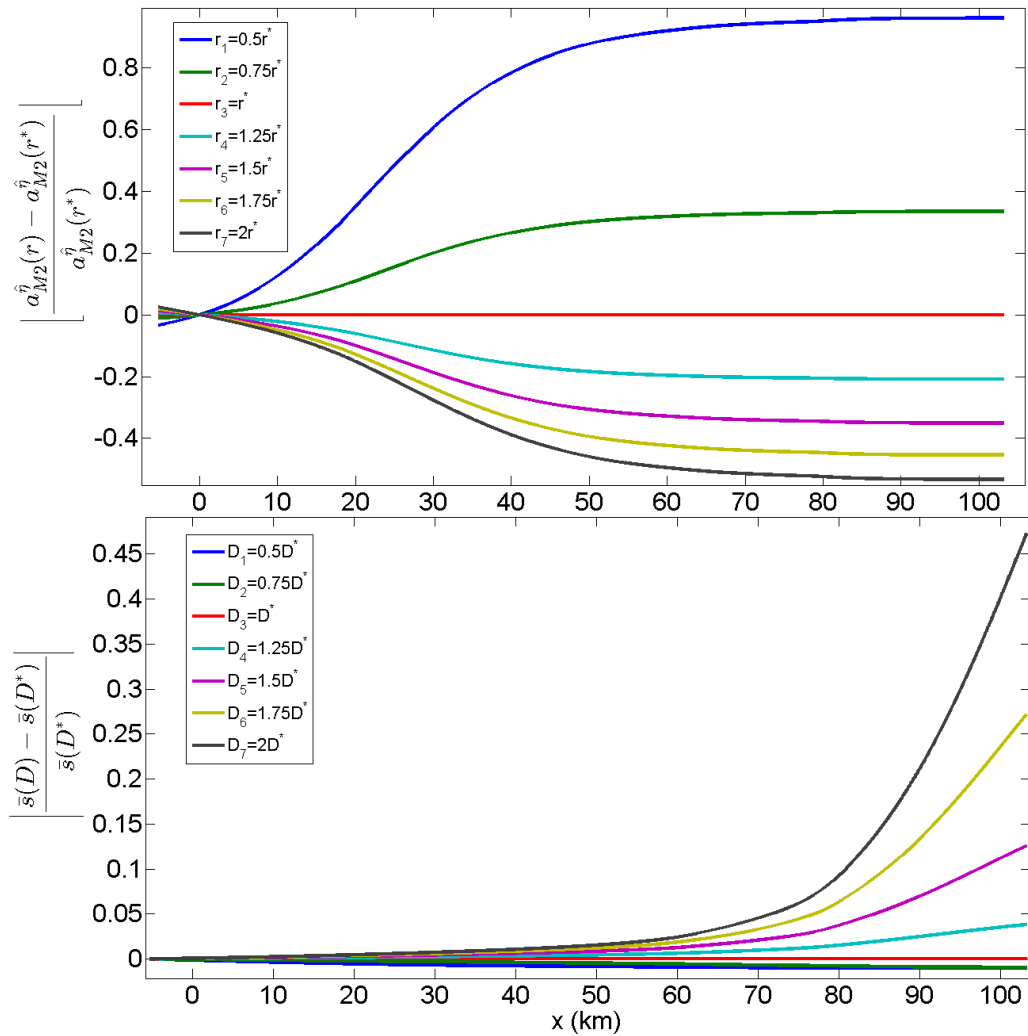


Figura 5.9: Análisis de Sensibilidad. Arriba: Estudio de las elevaciones mareales variando el coeficiente de fricción. Abajo: Estudio de la salinidad promediada variando el coeficiente de difusión. Los valores de referencia, denotados como r^* y D^* , respectivamente, son el tercer valor dibujado (véase la Tabla 2.1).

5.6 Análisis de Sensibilidad del Modelo.

la ecuación de conservación de la salinidad (e.g., precipitación y evaporación). El modelo exploratorio es flexible y permite extraer tendencias dinámicas del sistema frente a diferentes escenarios como hemos visto anteriormente. Es un modelo rápido y adecuado para estudios de sensibilidad como el presentado en esta tesis. No obstante, presenta limitaciones. Sus resultados deben considerarse como cualitativos o tendenciales. El modelo no considera efectos no lineales, por lo que no es capaz de reproducir efectos de segundo orden (residuales) en la propagación de la onda de marea o en el transporte de sal. Tampoco considera la interacción fluvio-mareal, [66]. No obstante, los análisis realizados se han llevado a cabo para caudales bajos de agua dulce, por lo que los efectos de la interacción fluvio-mareal es despreciable en la mayor parte del estuario, excepto en las cercanías de la presa de cabecera.

”Lo malo de hacer sugerencias inteligentes es que uno corre el riesgo de que se le asigne para llevarlas a cabo.”

Groucho Marx

CAPÍTULO

6

Transferencia de conocimiento: Legislación y Gestión Integral

El proceso evolutivo del ERG descrito en el Capítulo 3 muestra que el interés humano por dominarlo ha provocado numerosas transformaciones, a menudo indeseadas, en este espacio de gran valor socio-económico y ecológico. Esto ha sucedido porque estos Sistemas, denominados en esta tesis como Sistemas Socio-Económico-Ecológico (SSEE's), son complejos a causa de la interacción entre procesos que ocurren en múltiples escalas, temporales y espaciales, entre el sistema social y el sistema natural [42]. Uno de los retos del estudio de los SSEE's es entender sus retro-alimentaciones para averiguar cuáles fomentan la vulnerabilidad en el sistema y cuáles fortalecen la resiliencia. De esta manera, el objetivo último que debe perseguir la gestión de cualquier SSEE es la sostenibilidad entre medio natural y medio social, [36]. Cualquier SSEE debe entenderse como el resultado del proceso de co-evolución mediante el cual los sistemas sociales y naturales se han ido adaptando conjuntamente hasta convertirse en un sistema integrado de intervenciones humanas en la naturaleza [6]. Desde este punto de vista, el ecosistema

6. TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO: LEGISLACIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL

deja de ser un área aislada para convertirse en uno contenedor de una serie de procesos y dinámicas biofísicas y sociales, ambas interdependientes, que conforman un sistema con una determinada estructura, composición y funcionamiento, [35].

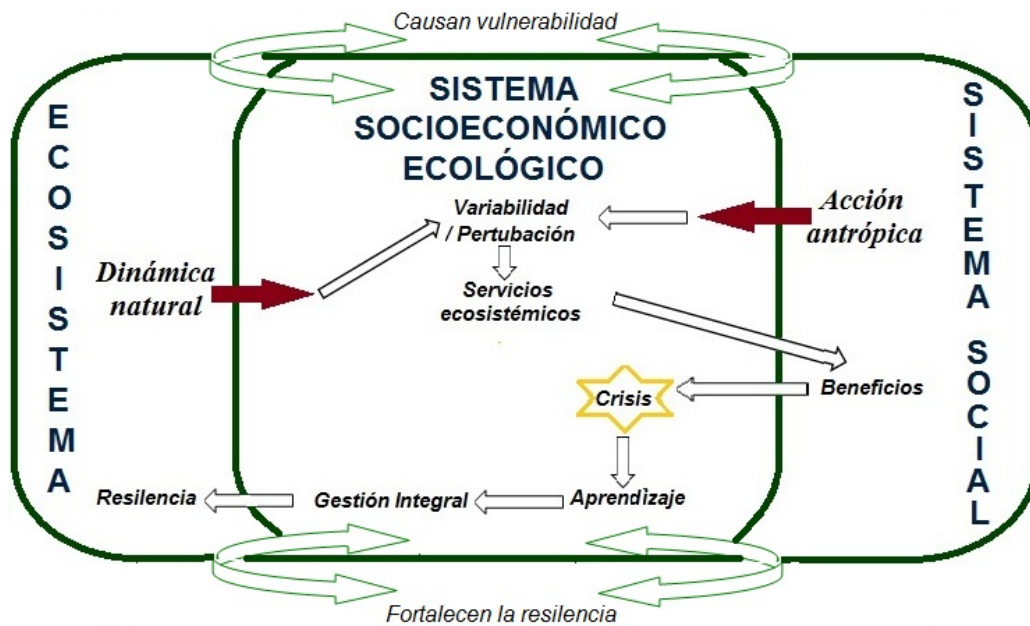


Figura 6.1: Representación del Sistema Socio-Económico-Ecológico del Estuario en el Río Guadalquivir. Diagrama de elaboración propia en base a [110].

Estas relaciones son bidireccionales, Figura 6.1. El sistema social se nutre del sistema natural mientras éste es modificado en base a las acciones antrópicas que promueven los servicios ecosistémicos: socio-económicos, políticos y culturales. Los servicios que pueden ofrecer se pueden agrupar en tres categorías. La primera, de abastecimiento: productos obtenidos directamente de los ecosistemas; la segunda, de regulación: aquellos obtenidos de manera indirecta de los ecosistemas; y, por último, los de carácter cultural, que incluye aquellos beneficios intangibles o no materiales que se obtienen a través de la experiencia con la naturaleza, [72]. La Figura 6.1 presenta la compleja red de relaciones que se dan en el SSEE del ERG basada en [110] donde se representa la interacción entre lo social y lo natural mediante la dinámica natural y la acción antrópica. La variabilidad generada en éste conlleva a suscitar una serie de servicios ecosistémicos que permiten beneficios en el ámbito socio-económico pero que paralelamente producen una alteración en el

6.1 Servicios Ecosistémicos en el ERG: perspectiva ambiental y aspectos jurídicos.

SSEE. El análisis de esta crisis produce un aprendizaje encaminado al diseño de una visión del mismo siendo fundamental la gestión integral del SSEE para conseguir la resiliencia ambiental y el equilibrio en este.

En este sentido, el ERG aún alberga valores naturales, culturales, históricos y económicos extraordinarios. La gestión del estuario y de sus ecosistemas asociados resulta compleja y se debe realizar dentro del marco del Plan Hidrológico y de los planes especiales que se proyectan sobre este espacio (aprobación de Plan Especial del Estuario del Guadalquivir, Planes de ordenación y recursos naturales, etc.) [79].

6.1 Servicios Ecosistémicos en el ERG: perspectiva ambiental y aspectos jurídicos.

Los Servicios Ecosistémicos del ERG, Figura 6.2, interrelacionan los beneficios y amenazas del estuario. En particular, la depuración de agua y la generación de energías alternativas corresponden a servicios ecosistémicos de abastecimiento. Simultáneamente, la agricultura, acuicultura, pesca y marisqueo son actividades íntimamente ligadas con la regulación del caudal. A este respecto, el represado en el estuario y la extracción de aguas subterráneas mediante pozos induce al colapso de los recursos estuarinos para favorecer estas actividades. Por último dentro de los servicios de tercera categoría (culturales) como el turismo, el ocio y el transporte de mercancías por tratarse de un estuario navegable hasta el Puerto de Sevilla, promueve la resolución de conflictos vinculados a la gestión cualitativa y cuantitativa del agua en el ERG.

Los sistemas de explotación enmarcados en la planificación hidrológica permite estimar los recursos hidráulicos disponibles procedentes de la captación y regulación de aguas superficiales, la extracción de aguas subterráneas, la reutilización, la desalación de aguas salobres y marinas y la transferencia a otras demarcaciones. Encontrar el equilibrio en el ERG entre los sistemas hidráulicos y los sistemas de explotación es una idea de gestión del agua más técnica que administrativa.

En particular, hasta el siglo XX la actividad pesquera y marisquera en el ERG, Figura 6.2, ha sido el sustento de muchas poblaciones ribereñas; pero la sobreexplotación por la falta de regulación y los cambios en los ecosistemas de los estuarios

6. TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO: LEGISLACIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL

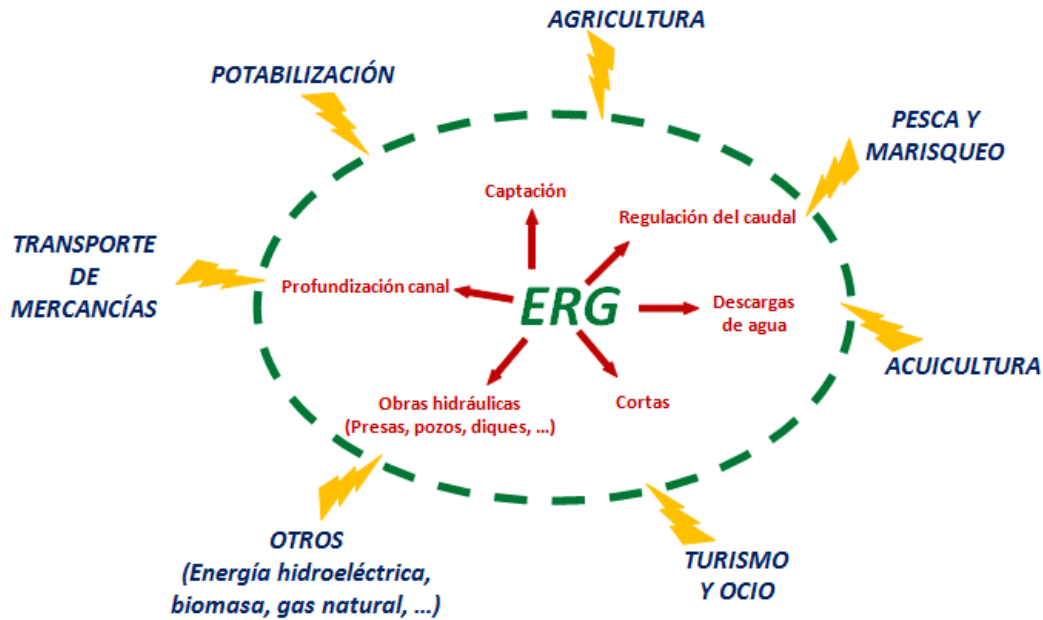


Figura 6.2: Servicios Ecosistémicos en el ERG.

atlánticos-andaluces han acabado con especies como el esturión, [32], [34] y [44]. El sector pesquero se encuentra regulado actualmente en sus últimos 16 km aguas abajo, por la Orden de la Junta de Andalucía de 6 de junio de 2010, actualmente en proceso revisión, por la que se modifica la de 16 de junio de 2004, que declaraba una Reserva de Pesca en la desembocadura del río Guadalquivir. Con la Reserva de Pesca en la desembocadura del ERG, se inició una etapa de protección de los recursos pesqueros y marisqueros en dicha zona, justificada por sus características especiales como zona de cría y alevinaje de especies catádromas y anádromas. A su vez, la Reserva se establece como una herramienta para mantener un equilibrio entre la producción pesquera y la conservación de los recursos, de forma que se pueda realizar una explotación sostenible de los mismos. Estudios y observaciones directas realizadas en torno a la Reserva evidencian la necesidad de extender sus límites, [49], inicialmente de 202 km², para reducir los impactos producidos por determinadas modalidades de pesca profesional y para potenciar la afluencia de individuos adultos de las principales especies pesqueras al estuario con el objeto de desovar. La comunidad acuática del estuario está formada al menos por 281 especies, siendo la mayoría de ellas especies marinas que accidentalmente entran favorecidas por el

6.1 Servicios Ecosistémicos en el ERG: perspectiva ambiental y aspectos jurídicos.

bajo aporte de agua dulce propio del clima que saliniza el estuario, datos extraídos de la citada Orden de la Junta de Andalucía.

La agricultura, Figura 6.2, en particular el regadío del sector arrocerero, requiere unos 400 hm^3 anuales de consumo real, lo que adquiere gran importancia en el uso del agua del estuario. Otros cultivos como la fresa y la alcachofa, que están ganando terreno, nos llevan a decir que se están imponiendo los cultivos de regadío por su alta productividad. En diciembre de 2014 la Junta de Andalucía aprobó el Plan Especial de ordenación de las zonas de regadíos ubicadas al norte de la Corona Forestal de Doñana. Este Plan se estableció como instrumento de regulación de los cultivos bajo plástico y pozos ilegales. Dicho Plan conocido también como Plan de la Fresa 2014 fue un proyecto de nueva regulación y protección del acuífero de Doñana. Según World Wildlife Fund (WWF) esto supondría un incremento hídrico 7-9 hm^3 al año y la amnistía 1400 a 1900 ha. Dicho proyecto choca con los convenios internacionales RAMSAR por lo que interviene el Tribunal de Justicia de la Unión Europea, TJUE, declarando la desprotección del humedal. A este respecto, en enero de 2022 el Parlamento de Andalucía tramita una propuesta de ley para la modificación de criterios del Plan de la Fresa.

La actividad que viene ganando más terreno en la última década, es la acuicultura, especies acuáticas vegetales y animales indicada en la Figura 6.2, que requiere de recursos hídricos de calidad y cantidad.

Otras actividades, Figura 6.2, como la producción de energía hidroeléctrica en la presa de Alcalá del Río, además de efecto barrera que produce en los últimos cien kilómetros del ERG, es otro factor a considerar junto a la sobreexplotación de los acuíferos debido al incremento de cultivos y pozos ilegales, las nuevas plantaciones de eucaliptos para la creación de biomasa, el proyecto de gas natural o la potabilización de sus aguas, Figura 6.2.

El estuario es utilizado para el transporte de mercancías por vía marítima hasta el Puerto de Sevilla, Figura 6.2, formando parte de la red TENT de transporte de importancia europea (Eurovía), siendo la navegación fluvial objeto principal de las obras hidráulicas en el estuario, tales como: cortas, presas, esclusas en el Puerto y dragados en el tramo navegable del estuario. Esto resulta fundamental para comprender la importancia del Puerto de Sevilla en la forma y los tiempos en los que se ha desarrollado la ciudad y se ha adecuado el ERG en los últimos siglos; porque

6. TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO: LEGISLACIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL

es clave, hasta tal punto, que cualquier extracción de agua ha estado condicionada por las actividades del Puerto de Sevilla. Esta cuestión central en los recursos hídricos en el Bajo Guadalquivir continúa vigente hasta nuestros días y el proyecto del dragado del estuario es fiel ejemplo de ello, [110].

En 2003 se propone el Macroproyecto de profundización entre 7 y 9 metros a lo largo del ERG para dar navegabilidad a navíos con mayor calado. Este proyecto de dragado de profundización se enmarca dentro del Proyecto de Mejora de Acceso Marítimo (MAM) que se elaboró en el año 2000 y es uno de los objetivos principales del Plan Director del Puerto 2020. Un proyecto ligado a un largo proceso administrativo desde que se emitió la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) positiva.

Con el fin de analizar las deficiencias de la DIA se acordó constituir una comisión científica dirigida por D. Miguel Ángel Losada y D. Javier Ruiz que realizó el estudio denominado "Propuesta Metodológica para Diagnosticar y Pronosticar las Consecuencias de las Actuaciones Humanas en el estuario del Guadalquivir", [67], y una vez finalizado en 2010 dicta que: "*Aconseja desestimar el dragado de profundización y advierte que volver a evaluar la posibilidad de un dragado de este tipo se ha de realizar antes una gestión del estuario, acometiéndose la restauración de los llanos mareales y reconectando los brazos secundarios con el cauce principal, mejorando los aportes de caudales de agua dulce y reducir los aportes de sedimentos, nutrientes y pesticidas en la cuenca*". El Ministerio de Medio Ambiente instó entonces a la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) para que tuvieran en cuenta las conclusiones del dictamen.

Así, la Comisión Científica recomendó desestimar el proyecto de profundización (impactos sobre la biodiversidad y morfología) a menos que se consideraran otras medidas compensatorias como recuperar las marismas, o reducir el aporte de nutrientes. Sin embargo, en 2012 la Agencia Regional de Gestión del Agua incluye en su plan para el Guadalquivir la propuesta de profundización, sin mencionar las recomendaciones de la Comisión. En junio de 2013, el Comité del Patrimonio Mundial de la UNESCO instó al gobierno español a no permitir la profundización del estuario, de acuerdo con las recomendaciones de la Comisión Científica y otras recomendaciones anteriores de la UNESCO. Ni los datos obtenidos del estudio, ni las consideraciones de la comisión científica, fueron considerados en el Plan

6.1 Servicios Ecosistémicos en el ERG: perspectiva ambiental y aspectos jurídicos.

Hidrológico del Guadalquivir aprobado en 2013. El proyecto del dragado no fue propuesto a consulta pública y fue incorporado en dicho Plan. En definitiva, debido al gran número de alegaciones recibidas y al informe emitido por el Patronato del Parque Nacional de Doñana en contra de dicho proyecto, el propio Ministerio de Medio Ambiente reconoció que la información de éste fue insuficiente, estableciendo así unas nuevas condiciones en la DIA. Así, se supone que la Autoridad del Puerto de Sevilla (APS) lo abandonó teniendo entre manos actualmente un proyecto de optimización de la navegación que apunta al estrechamiento del cauce. Esta modificación, teniendo en cuenta los resultados modelados con cambios de las dimensiones geométricas de los tramos, es otro modo soslayado de profundización del canal y conseguir mayores elevaciones.

El entorno de Doñana, Espacio Natural protegido, resulta singularmente complejo debido a la acumulación de figuras de protección que se refieren al mismo: Reserva de la Biosfera por la UNESCO (1980), Parque Natural y Parque Nacional (1989), Reserva Natural Concertada Dehesa de Abajo (2000), Zona Especial de Protección para las Aves (2003), Lugar de la lista de Humedales de Importancia Internacional del Convenio de Ramsar (2005), Zona de Especial Conservación (2012), Lista Verde de Áreas Protegidas y Conservadas de la UICN (2015), entre otros. Entre otros servicios ecosistémicos el turismo y el ocio, Figura 6.2, están fuertemente vinculados.

Dado el depauperado estado medioambiental del ERG, identificado como el más sensible del arco atlántico al cambio global, [100], resulta un objetivo prioritario establecer estrategias para una gestión integral que permita reducir su vulnerabilidad y aumenta su resiliencia ambiental. En este contexto es esencial que la investigación científica proporcione argumentos convincentes sobre la necesidad del alineamiento administrado, la ubicación, la extensión y el tipo de marismas que deben de restaurarse, proporcionar defensas y garantizar la buena salud de las mismas, [85].

La UNESCO y la Comisión Europea consideraron vinculantes las declaraciones del dictamen por la DIA, como consecuencia de la grave amenaza que supone para el Parque Nacional de Doñana y otros espacios de la Red Natura 2000.

WWF considera necesario en su informe anual de 2012 que se establezcan una serie de medidas de adaptación al cambio climático. Su prioridad versa en impo-

6. TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO: LEGISLACIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL

ner unas moratorias a todos los nuevos proyectos de ocupación de suelos en el área de influencia del ERG como: regadíos, arrozales, instalaciones industriales y de generación de energía solar, hasta que se haya deslindado el Dominio Público Marítimo Terrestre (nuevos conflictos) y establecido las zonas a restaurar para que actúen como llanuras de inundación. Así mismo, se deberían asegurar los caudales de agua dulce para el estuario, por ejemplo en [18] se apunta la necesidad de subir a $100 \text{ m}^2/\text{s}$ el caudal ecológico, no autorizando nuevas actividades que impidan recuperar el equilibrio del mismo. Un siguiente informe de WWF también hace saber de los efectos perniciosos de la presa de Alcalá del Río y Cantillana, aguas arriba de ésta, denunciando en un informe que realizan efecto barrera, con la consiguiente desconexión de poblaciones piscícolas, degradación de la calidad del agua y afectación a la tasa de entrada de sedimentos y nutrientes al estuario.

En 2014 de nuevo WWF en una situación distinta, dice que una vez se haya puesto en marcha una gestión integral del estuario y se acometan actuaciones que permitan, entre otros, recuperar llanuras mareales, reconectar los brazos del río con el cauce principal, aumentar y mejorar los aportes de caudales de agua dulce, reducir el aporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas desde la Cuenca del Guadalquivir, y una vez que se haya comprobado que el estuario ha mejorado su funcionalidad, podrá volver a evaluarse la posibilidad de un dragado de profundización en el estuario.

En 2019 WWF se propone el Plan Verde 2030 del ERG que aspira a constituir un paso importante para impulsar un cambio de la gestión de ERG hacia su sostenibilidad, promoviendo su resiliencia frente al cambio climático, la resolución de conflictos entre usos y modelo económico y social orientado al largo plazo y basado en los servicios ambientales.

Actualmente, parte de la sociedad demanda la recuperación de los sistemas fluviales y una mejor ordenación territorial de las riberas, además del refuerzo de la protección del paisaje y del sentir ciudadano que liga a la persona a un territorio concreto, [11].

En particular, el ERG es un ejemplo de alto interés ecológico, sometido a lo largo de su historia a fuertes cambios de origen antrópico, abocado, si no se toman medidas urgentes, a ser un mero canal con una reducida productividad biológica, [98], [97] y [63].

6.2 Derecho Ambiental aplicado a los Escenarios del ERG

La problemática jurídica, económica y social de los escenarios propuestos es tema de discusión fruto de las particularidades (geográficas, ambientales, reguladoras) de la zona de estudio, así como en un contexto de singularidad hidrológica que se proyecta en el ámbito superior de la demarcación, y, en general, en el conjunto del Estado, [65]; las posiciones e intereses de parte creados (*lobbies* y grupos de presión); y a las políticas públicas que se concitan en torno a la gestión del estuario en el medio y largo plazo.

Teniendo en cuenta los escenarios propuestos y aplicando el Derecho Ambiental se puede indicar que:

- En relación al Escenario 1, Efecto de la profundización del canal de Navegación, hay que tener en cuenta las siguientes cuestiones jurídicas y administrativas [77], [78]:

Por un lado, la realización de un dragado de profundización puede suponer una excepción ambiental a los efectos de la Directiva Marco de Aguas y debe sujetarse a los límites que ésta impone. Del mismo modo, puede aumentar la degradación de la calidad ambiental de las aguas de transición a efectos de la Directiva Marco de Aguas y conllevar la declaración como masas de agua modificadas.

Por otro lado, un mayor rango de mareas provocado por la hipotética realización de un dragado o estrechamiento del canal puede producir la sustitución aguas arriba de los deslindes de Dominio Público Hidráulico (DPH) regulados en el Texto Refundido de la Ley de Aguas, como consecuencia del procedimiento de revisión de deslinde del dominio público marítimo-terrestre (DPMT) efectuado en aplicación de la Ley de Costas. Además, debe considerarse una posible ampliación de la zona de servidumbre de protección indicada en dicha Ley como consecuencia de esta operación de mutación demanial. De hecho, la Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, pretende alcanzar una protección integrada (visión ecosistémica).

6. TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO: LEGISLACIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL

La norma europea adopta, en coherencia con su base jurídica (Art. 175.1. TCE, Tratado constitutivo de la Comunidad Europea, actual Art. 192.1 TFUE, Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea), un enfoque técnico exclusivo o fundamentalmente ambiental. Este enfoque hace de la protección del agua y de sus ecosistemas una prioridad, eludiendo el hecho de que no hay primacía de lo ambiental sobre el resto de objetivos y, en particular, sobre el "suministro suficiente de agua", pues todos estos objetivos deben de alcanzarse simultáneamente. Un fallo y no sería admisible la actuación. De hecho, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, CHG, no vela por la calidad ambiental del agua del estuario, sólo por el reparto del agua.

- En este sentido, lo indicado al escenario 1 sería de aplicación a la Reconexión del Brazo del Oeste, Escenario 2, puesto que los resultados muestran un comportamiento similar a los efectos de profundización del canal de navegación.

En general, las instituciones europeas se han mostrado reticentes a la hora de permitir "nuevas alteraciones" de los objetivos ambientales propuestos para cumplir objetivos de tipo socioeconómico; del mismo modo, han negado la posibilidad de alegar dificultades de orden interno para justificar el incumplimiento de las obligaciones resultantes de la Directiva.

- En lo que se refiere al Escenario 3, la Recuperación de la Marismas en la parte baja, el estudio precisa que una ubicación diferente de la marisma o de la cuenca de retención del estuario tendría probablemente diferentes consecuencias en la hidrodinámica y el transporte de sustancias en el mismo. El emplazamiento de una cuenca de retención o la recuperación de una marisma en la parte baja del estuario sería morfológicamente viable dada la configuración del estuario. A falta de definir con mayor detalle la propuesta, debería incluirse dicho proyecto en el Plan hidrológico de la demarcación y en los futuros planes específicos de protección del estuario y del entorno de Doñana. Es fundamental avanzar hacia mecanismos de gestión que comporten una visión integrada de las decisiones en el ámbito de la cuenca GIGGII (Gestión Integrada de Gestiones Integradas) de acuerdo a los objetivos generales

6.2 Derecho Ambiental aplicado a los Escenarios del ERG

de la política de aguas y de protección del medio marino; interpretando, los principios generales de la gestión integrada de zonas costera. Una protección esforzada y autónoma de estos espacios puede estar, bajo determinados presupuestos, alejada de las necesidades de la cuenca y desvirtuar el principio de continuidad ecológica. La intervención administrativa debe atender al interés general basado en el tratamiento unitario del recurso en todo el ámbito de la demarcación hidrográfica.

- Respecto a la Eliminación de la Presa de Alcalá del Río ofrece resultados que no permiten la posibilidad de emitir un pronunciamiento jurídico a falta de analizar las consecuencias que tendría la adopción de esta medida desde el punto de vista técnico. Se trata, en última instancia, de una decisión de gran calado, que debe ser motivada de acuerdo a su carácter discrecional técnico y político, por sobrepasar los criterios reglados del ordenamiento jurídico. Por ello, debe ser planteada y discutida en el marco de los procesos de decisión y planificación hidrológica de la demarcación, debido a los efectos cuantitativos y cualitativos que dicha medida podría producir en los sistemas de explotación de la cuenca, así como en relación al régimen de caudales ecológicos y el resto de actuaciones ambientales de la misma. En todo caso, sería pertinente realizar estudios más avanzados que tengan en cuenta las consecuencias que dicha decisión podría acarrear: oceanográficas, sedimentológicas, ecológicas evolutivas, económicas, etc, conforme a una visión que integre los procesos económicos, de gestión del agua, así como los trabajos de campo, de gabinete y de laboratorio.

*”No hay que apagar la luz del otro
para lograr que brille la nuestra.”*

Mahatma Gandhi

CAPÍTULO

7

Conclusiones

El objetivo general de esta tesis doctoral ha sido desarrollar un modelo hidrodinámico y de transporte de solutos idealizado para estuarios que permita evaluar escenarios de gestión con los que poder diagnosticar y pronosticar los efectos y repercusiones en el contexto estuarino. Como sistema prototipo de aplicación se ha seleccionado el Estuario del Río Guadalquivir, por su relevancia ambiental y la disponibilidad de observaciones.

Las conclusiones dadas a continuación corresponden con los objetivos específicos marcados en esta tesis, 1.1.

La trayectoria histórica se ha analizado para seleccionar y definir los escenarios de gestión dibujados a lo largo de su historia y demandados actualmente por diferentes Administraciones en el Estuario del Río Guadalquivir. De su análisis se extraen como conclusiones que las actuaciones de Mejora de la Navegabilidad, Cortas, Ocupación de Marismas y Aislamiento del Régimen Mareal y Control Hidráulico han sido los más relevantes históricamente. Según esto, se han implementado y definido los escenarios de gestión (1) Efecto de la Profundización del Canal de Navegación, (2) La Reconexión del Brazo del Oeste, (3) La Recuperación de Marismas en la Parte Baja y (4) Eliminación de la Presa de Alcalá del Río.

Los impactos de tales Escenarios en la dinámica estuárica se han simulado con el modelo unidimensional, mareal, lineal y con fricción. Dicho modelo resuelve

7. CONCLUSIONES

analíticamente de forma acoplada las ecuaciones para aguas someras linealizadas y unidimensionales para elevación y corriente mareales y distribución de salinidad. Habiendo simulado estos escenarios se concluye para cada uno de ellos:

- Escenario 1: Los resultados del modelo sugieren que las amplitudes mareales de elevaciones y corrientes se incrementan como respuesta a una profundización del canal. Esto es debido a una reducción de la fricción efectiva y al incremento de energía mareal reflejada en la presa de cabecera. La distribución de salinidad promediada se desplaza aguas arriba incrementando la intrusión salina, así como el gradiente máximo de salinidad. Esto hace que la salinidad mareal M2, que advecta el gradiente de salinidad medio, se incremente aguas arriba. Efectos contrarios se observan cuando el nivel medio se reduce.
- Escenario 2: La reapertura de un canal secundario, el cual conecta en paralelo al canal principal la parte baja del estuario con la parte alta, produce alteraciones importantes respecto a la situación actual. La onda de marea propagada por el canal principal y el secundario interactúan dando lugar a un incremento de elevaciones mareales (especialmente cerca de la presa) y del volumen mareal, excepto en la zona de desembocadura. La reducción de las corrientes cerca de la desembocadura reducen las amplitudes de la salinidad mareal M2. Respecto a la distribución de salinidad, al repartirse el caudal de agua dulce entre las dos ramas, la intrusión salina progresa aguas arriba de forma significativa. La modificación del canal secundario afecta a todo el estuario, no es local. Sin embargo, la celeridad es similar. Esto está de acuerdo con los resultados del análisis armónico de los datos de nivel del mar registrados por Puertos del Estado. En general, el comportamiento de la propagación de onda de marea no cambia (hiposíncrono a 20 km, síncrono a 55 km y hipersíncrono en la cabecera).
- Escenario 3: La recuperación de una marisma alimentada por un caño conectado al canal principal, en la parte baja del estuario, también tiene consecuencias notables en la propagación de la onda de marea, cuyo impacto más destacable es mitigar los efectos del dragado en proporción a los parámetros geométricos de diseño del humedal.

-
- Escenario 4: La eliminación de la presa de Alcalá del Río, supone un incremento de las amplitudes de las elevaciones mareales aguas arriba del estuario. Esto es debido a la geometría convergente del estuario cuando la barrera es eliminada. Esta amplificación es menor que la producida por la reflexión. Los valores de las amplitudes de la salinidad mareal son menores a los de la configuración de referencia, sin embargo la salinidad promediada coincide. Además, si el foco reflector es desplazado aguas arriba, la amortiguación por efecto de la fricción a lo largo de una mayor longitud mostrará una menor amplificación cerca de la barrera.

Algunos efectos son complementarios que podrían en buena parte compensarse mutuamente con un adecuado diseño de las actuaciones. El modelo, desde el punto de vista de la gestión de estos entornos naturales, permite explorar contra-medidas útiles de mitigación de impactos. Por ejemplo, el incremento de elevaciones y corrientes mareales por un dragado de profundización o por la subida esperada del nivel del mar podrían compensarse por la creación o extensión de una marisma con los parámetros geométricos de diseño adecuados.

Combinando modelos deterministas y estocásticos se puede concluir que:

- La distribución no estacionaria para los caudales de descarga de agua dulce mejora notablemente el ajuste considerando la variación estacional de los parámetros.
- El mejor ajuste para elevaciones submareales se obtiene por una superposición lineal de rango de marea y descarga fluvial, mientras que el mejor ajuste para corrientes submareales incluye interacción no lineal.
- En ERG, estos modelos modelizan las elevaciones submareales mejor que las corrientes submareales.
- La comparación entre el estado actual y los escenarios reveló que las elevaciones submareales disminuyen cuando se reduce el aporte de agua dulce y aumentan como respuesta a una intervención de dragado. Por lo tanto, la profundización del canal aumenta el riesgo de inundaciones.

7. CONCLUSIONES

De estos resultados relativos a los impactos de los escenarios se puede extraer un conjunto de conclusiones respecto a la Gestión Integral del espacio y aspectos jurídicos a tener en cuenta:

- La supremacía de la navegación en la gestión del estuario ha quedado constatada a lo largo de la historia del ERG, eclipsando a otras actividades típicas del ecosistema estuárico, sustento de las poblaciones ribereñas, invisibilizadas por su cotidianidad.
- Los hechos históricos más remarcables desde el punto de vista de gestión de estuarios como: la Ley Cambó (1918) supuso un cambio de uso a los terrenos ribereños; la declaración del Parque Nacional de Doñana como Reserva de la Biosfera (1980) y la Reserva de Pesca (2004) evidencia la preocupación sobre la sobreexplotación de un estuario protagonista de importantes modificaciones que ha generado y está generando conflictos de intereses y dificultades en la toma de decisiones.
- Una de las mayores dificultades de la gestión del río Guadalquivir y su estuario, se basa en la necesidad de compatibilizar los usos del agua (abastecimiento a poblaciones e industrias, regadío y transporte fluvial) con el cumplimiento de los objetivos ambientales en el tramo estuarino, desde la presa de Alcalá del Río hasta la desembocadura.
- Determinados litigios como la regulación del caudal o la profundización del canal de navegación, se pueden acotar con una sentencia, pero no resuelve el problema de raíz; solamente supone una solución temporal. Así, se deduce la necesidad de una estrategia de Gestión Integral en el ámbito estuárico que no suponga soluciones cortoplacistas, sino medidas de actuación que integren un equilibrio entre lo natural y lo social a medio y largo plazo.

En definitiva, poner coto a usos con un desarrollo ambiental sostenible y corregir las prácticas en un contexto más ambientalista son esenciales.

La salud del Estuario del Guadalquivir no depende sólo de unas actuaciones puntuales en el tiempo y en el espacio. Según esto, se impone la necesidad de una

planificación y conjunción de actitudes y aptitudes por parte de las Administraciones con el objetivo establecer las medidas a tomar dentro de la Gestión Integrada de Gestiones Integradas, GIGGII, del entorno estuarino. Futuros estudios para abordar y avanzar en el conocimiento, Gestión Integral y aspectos legales serían:

- Proyecciones a corto, medio y largo plazo con modelos computacionales complejos y modelos estocásticos que incluyan la variabilidad de los forzamientos.
- Análisis de revisión de los deslindes administrativos en dominio público marítimo-terrestre y propuestas para la recuperación y regeneración del estuario como unidad hidromorfológica singular vinculada a la legislación de aguas y costas.
- Valorización del estuario como sistema de protección, abrigo y refugio para la conservación de los entornos costeros.
- Propuestas de *lege ferenda* basadas en los canales de adaptación y mitigación del ERG ante escenarios tendenciales y posibles actuaciones antrópicas en el Estuario (construcción de presas, dragados, limpieza de cauces, explotación de recursos marinos y cambios en los procesos morfológicos y de sedimentación).
- La necesidad de que la Gestión Integral (GI) sea promovida, apoyada y coordinada a nivel, al menos, autonómico y/o nacional es un hecho constatado. Cualquier iniciativa de GI a menor nivel podría estar sesgada por intereses particulares.

Un río conocido como el "Río Grande" remodelado a voluntad del hombre mediante cortas, desecación de terrenos adyacentes, trabajos de profundización, ejecución presas de embalse, esclusas y diques con la finalidad nuevamente de regular el caudal del ERG. Una regulación que altera el punto de intrusión salina y por tanto modifica el ecosistema estuárico.

Para concluir, remarcar que la gestión de los estuarios y su entorno continua inmersa en una normativa limitada que no impide la pugna entre lo natural y lo social. Sin embargo, haciendo uso de la teoría de ecuaciones diferenciales parciales

7. CONCLUSIONES

para desarrollar un modelo analítico se ha contribuido a una mejor comprensión de los efectos de la intervención humana sobre la dinámica mareal estuarina y orientar a las diferentes Administraciones implicadas en su Gestión Integral. A pesar de las limitaciones y restricciones del modelo idealizado, espero haber contribuido a mejorar el conocimiento y entendimiento de estos fascinantes sistemas, y en particular del Estuario del Río Guadalquivir, el cual vio nacer un 13 de febrero de 1943 a la persona que dedico esta tesis, mi padre.



Aproximación estocástica

A.1 Modelos estocásticos

Con la red de monitorización del ERG que se implementó desde 2008 hasta 2011 podemos identificar diferentes regímenes estocásticos del mismo considerando la descarga de agua dulce y sus efectos sobre el movimiento de las mareas [89]. Recordemos que se trata de un estuario mesomareal, bien mezclado y relativamente angosto, con 110 km de largo y una profundidad promedio considerada de 7 m, cuya constituyente principal es el armónico semidiurno lunar M2. La descarga de agua dulce exhibe una marcada estacionalidad durante el año. La presa de Alcalá del Río regula alrededor del 80 % del aporte fluvial en el ERG.

El principal objetivo de estas modelizaciones es predecir las elevaciones y corrientes submareales en el ERG. Para las simulaciones en el ERG fueron consideradas las descargas de agua dulce y la marea como los agentes forzadores predominantes. Además, se utilizaron tres modelos de regresión para evaluar los efectos de los diferentes escenarios en las elevaciones y corrientes submareales. Las tres simulaciones fueron modeladas variando las descargas fluviales y/o la profundidad del estuario: (S1) estado actual, (S2) reducción del 15 % de la descarga fluvial y (S3) aumento del 23 % de la profundidad del estuario. La metodología aplicada consta de tres partes, (Figura A.1). Por un lado los datos de entrada, las descargas

A. APROXIMACIÓN ESTOCÁSTICA

de agua dulce, Q_d y la profundidad del estuario, h , en función del rango de marea, H ; y por otro los datos de salida, las elevaciones y corrientes submareales. Paralelamente, para caracterizar las elevaciones y las corrientes submareales, los tres modelos de regresión automática empleados:

1. Godin, [41]: superposición lineal de la descarga de agua dulce y un rango de marea.
2. Kukulka y Jay, [61]: interacción no lineal entre la descarga del río y el rango de marea.
3. Y Mixto: combinación parcial de ambos.

Donde a, \dots, f son los coeficientes de ajuste, H rango de marea y Q_d caudal del río. Aquí, el movimiento submareal es un promedio de los valores observados en un intervalo de tiempo de 25 horas.

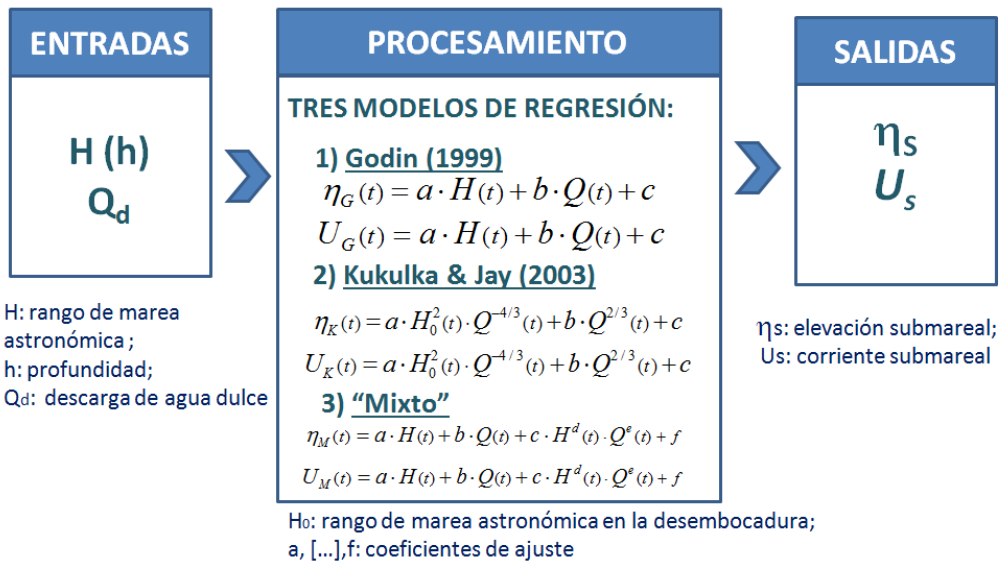


Figura A.1: Metodología seguida para pronosticar las corrientes y elevaciones submareales.

Una vez definido el modelo utilizado se explica cada una de las partes. Respecto a los datos de entrada, el objetivo de su caracterización es obtener las distribuciones marginales que mejor representen el comportamiento de los forzamientos. Para

su simulación fueron utilizadas una serie temporal larga de cada variable. En el caso del rango de marea (o profundidad del estuario) se aplicó el modelo unidimensional mareal de Prandle y Rahman que centra esta tesis, [87], ya que se trata de una variable determinista. Sin embargo, para la descarga de agua dulce al ser una variable estocástica con una marcada estacionalidad, la distribución que mejor se ajusta a los datos, es una distribución mixta, (Figura A.2), que consta de dos Pareto generalizado en ambas colas y una distribución logarítmica normal para el cuerpo principal. Como se observa en la Figura A.2 la función de densidad de probabilidad, PDF, y la función de distribución acumulada, CDF, la línea azul, que representa el modelo, podría estar más cerca de los datos. Para ello, se aplicó el método de Solari y Losada,[101], que incluye la estacionalidad en los parámetros de distribución mediante una Serie de Fourier. En este caso, se trata de variaciones intraanuales (dentro del año), considerando para el ajuste variaciones máximas con períodos de tres meses. Estos cambios con respecto a la distribución estacionaria son significativos. Para implementar la estacionalidad en los parámetros de la distribución se recurrió a una serie temporal de Fourier y para la distribución marginal de la descarga fluvial a la Distribución Lognormal (LN) y Pareto Generalizada (GPD) en las colas superior e inferior, es decir, el Modelo con Criterio de Información Bayesiano Mínimo. Por último, la prueba de Kolmogotov-Smirnov, con un nivel de significancia del 5 %, evaluó la bondad del ajuste.

En resumen, la descarga fluvial se simuló con el método de Monte Carlo con la distribución No Estacionaria mientras que los cambios producidos por el dragado se evaluaron con un modelo unidimensional mareal.

De los tres modelos de regresión automática utilizados se obtiene que las elevaciones submareales se capturaron mejor con Godin, [41], mientras que las corrientes submareales con Kukulka y Jay, [61]. Por lo tanto, y en aras de la simplicidad, este trabajo se centró en las elevaciones.

Para conseguir el mejor ajuste se recurrió, en el caso de las elevaciones, a una superposición lineal de la marea y descargas de agua dulce, mientras que para las corrientes se estableció una interacción no lineal de ambos, (Figura A.2).

Teniendo en cuenta que las inundaciones son uno de los eventos extremos que ocurren en los estuarios, que están influidos por las mareas y las descargas de agua dulce y utilizando como modelo el ERG, ya que ha experimentado inundaciones

A. APROXIMACIÓN ESTOCÁSTICA

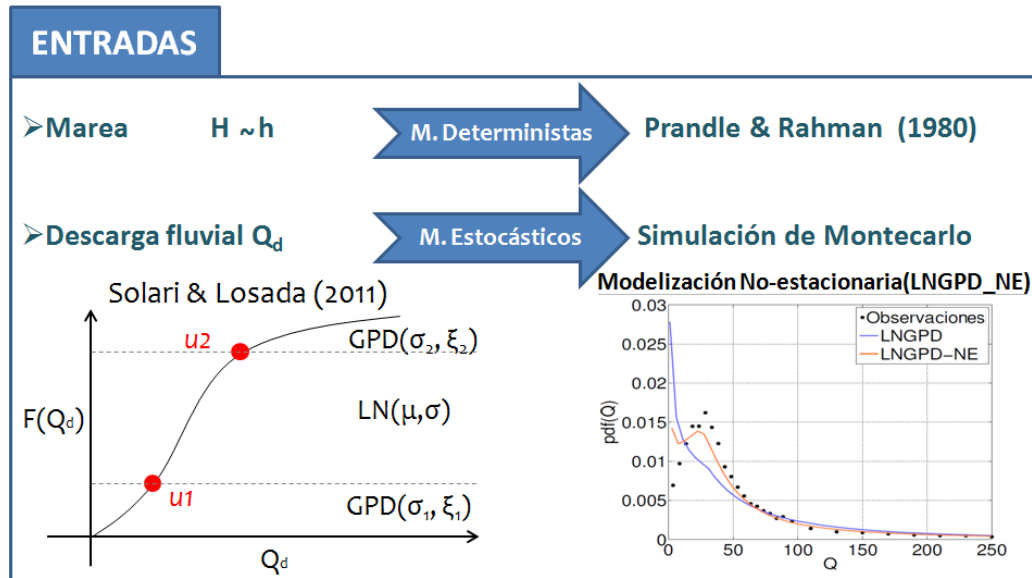


Figura A.2: Ajuste de los parámetros de entrada: marea y descargas fluviales, mediante modelos deterministas y estocásticos, respectivamente.

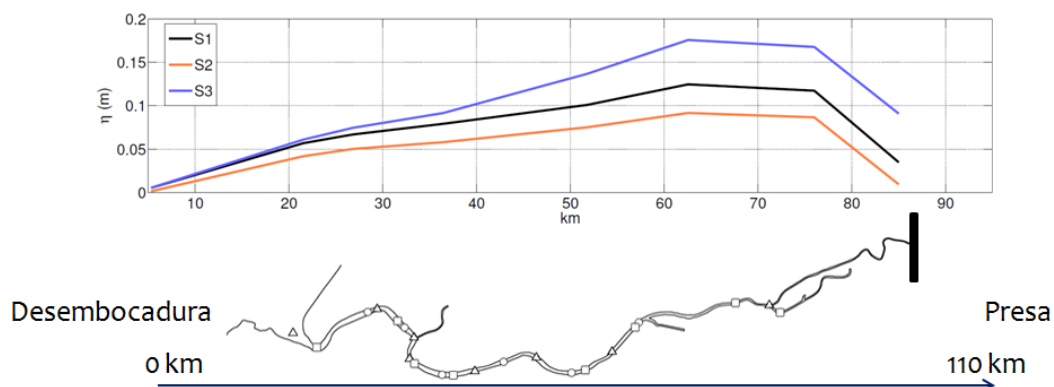


Figura A.3: Simulaciones: Estado actual, S1; 15 % de la reducción de la descarga fluvial, S2 y 23 % del aumento de la profundidad del estuario.

varias veces en los últimos años, se analizaron las series cronológicas de alta resolución de una campaña de monitoreo a largo plazo para evaluar los impactos de dos estrategias de gestión diferentes: **a.** la reducción del 15 % de las descargas fluviales basada en la información obtenido por una Institución Gubernamental Española y **b.** el 23 % de profundización del canal de navegación según el nivel propuesto por el Puerto de Sevilla.

Así pues, establecido el modelo y la metodología, se comparó la situación actual, S1, con los dos escenarios de gestión anteriormente indicados denominados S2 y S3 respectivamente, (Figura A.3).

Las relaciones obtenidas se utilizaron para evaluar de los escenarios, a medio plazo, el efecto en las elevaciones y corrientes submareales. La comparación entre los resultados de los escenarios y las condiciones presentes del estuario reveló que las elevaciones submareales disminuyen cuando se reduce la entrada de agua dulce, y aumenta como consecuencia de la profundización del canal.

Referencias

- [1] Alebregtse, N. C., de Swart, H. E., and Schuttelaars, H. M. (2013). Resonance characteristics of tides in branching channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 728:R3. 4, 71
- [2] Badajoz (1580). Real cédula a los oficiales de hacienda de la isla de Cuba para que manden las maderas que se les pidió para el monasterio de San Lorenzo el Real. *Archivo General de Indias. Santo Domingo*. 37
- [3] Barragán Mallofret, D. (2016). La Transgresión Flandriense en la vega de Sevilla. El paleoestuario del río Guadalquivir. *Tesis doctoral. Universidad de Sevilla*. 30
- [4] Barrera, F. B. and Muñoz, M. B. (2004). Evolución Hitórica de Vega de Sevilla. Estudio de Geoarqueología Urbana. *Catedral de Sevilla. Aula Hernán Ruiz. Archidiócesis de Sevilla*. 28
- [5] Bennett, A. (1975). Tides in the Bristol channel. *Geophysical Journal International*, 40(1):37–43. 4
- [6] Berkes, F., Colding, J., and Folke, C. (2008). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press. 83
- [7] Bermúdez, M., Vilas, C., Quintana, R., González-Fernández, D., Cózar, A., and Díez-Minguito, M. (2021). Unravelling spatio-temporal patterns of suspended microplastic concentration in the Natura 2000 Guadalquivir Estuary

REFERENCIAS

- (SW Spain): Observations and model simulations. *Marine Pollution Bulletin*, 170:112622. 18, 48
- [8] Blasco, J. A. (2014). Sevilla y el río Guadalquivir: una relación de amor y odio en diez etapas. *Urban Networks*. 31, 32, 35
- [9] Blázquez, J. M. (1978). *Historia económica de la Hispania romana*. Ediciones cristiandad. 31
- [10] Borja, F., Hunt, M., Ubera, J., Zazo, C., Dabrio, C., Goy, J., Barral, M., Llergo, Y., and Borja, C. (2008). Estudio geoarqueológico de la Vega de Sevilla. Reconstrucción paleogeográfica del sector interno del estuario del Guadalquivir durante el Holoceno. In *Actas VII Congreso Ibérico de Arqueometría*, pages 87–96. 30
- [11] Brufao Curiel, P. (2006). Breves apuntes sobre los ríos protegidos. AEMS-RIOS CON VIDA. 90
- [12] Caballero, I., Navarro, G., and Ruiz, J. (2018). Multi-platform assessment of turbidity plumes during dredging operations in a major estuarine system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68:31–41. 58
- [13] Cai, H., Savenije, H. H., Yang, Q., Ou, S., and Lei, Y. (2012). Influence of river discharge and dredging on tidal wave propagation: Modaomen estuary case. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10):885–896. 75
- [14] Cai, H., Toffolon, M., and Savenije, H. H. (2016). An analytical approach to determining resonance in semi-closed convergent tidal channels. *Coastal Engineering Journal*, 58(03):1650009. 4
- [15] Cayetano, H. (2013). La barra de Sanlúcar y el Diseño del Gálibo maestro en la obra de Antonio Gaztañeta 1712 y 1720. page 19. 37
- [16] Ceballos-Moreno, M. (2001). La problemática jurídico-administrativa de las zonas húmedas. *Humedales Mediterráneos. SEHUMED*. 34, 35

REFERENCIAS

- [17] Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., and Lynch, J. C. (2003). Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global biogeochemical cycles*, 17(4). 58
- [18] Cobos Budia, M. (2021). *A model to study the consequences of human actions in the Guadalquivir River Estuary*. PhD thesis, Universidad de Granada. 90
- [19] Contreras, D. G. (2009). Estuario del río Guadalquivir: tramificación, pérdidas de carga y modelo lineal de propagación de onda de marea. Tesina Fin de Máster. Máster Oficial de Hidráulica Ambiental. Universidad de Granada. 4
- [20] de Borja Palomo, F. (1877). *Memoria. Histórico Crítica sobre las riadas o grandes avenidas del Guadalquivir en Sevilla desde principios del siglo XV hasta nuestros días*. Catedrático Numerario de la Facultad de Derecho en la Universidad Literaria de Sevilla. 32, 35
- [21] De Jonge, V. (1992). Tidal flow and residual flow in the Ems estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34(1):1–22. 20, 24
- [22] de Jonge, V. N., Schuttelaars, H. M., van Beusekom, J. E., Talke, S. A., and de Swart, H. E. (2014). The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139:46–59. 75, 76
- [23] de Medina, P. and Cespedes, A. (1552). *Regimiento de Navegación*. Cátedra de Historia Naval. Armada Española. Universidad de Murcia., 1st edition. 32, 35
- [24] de Mendoza, J. d. E. and de Navarrete, M. F. (1985). *Itinerario de navegación de los mares y tierras occidentales, 1575*. Museo Naval. 37
- [25] de Veitia Linage, J. (1945). *Norte de la Contratación de las Indias Occidentales*, volume 182. Iuan Francisco de Blas. 37
- [26] del Moral Ituarte, L. (1989). Un intento frustrado de Acondicionamiento del Guadalquivir: la actuación de la Real Compañía de Navegación en la primera mitad del siglo XIX: Nuevas aportaciones y replanteamiento geo-histórico de

REFERENCIAS

- un tema polémico. *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 25(1):327–353. 33, 35, 42, 45, 50
- [27] del Moral Ituarte, L. (1991). *La obra hidráulica en la Cuenca Baja del Guadalquivir, siglos XVIII-XX: gestión del agua y organización del territorio*, volume 3. Universidad de Sevilla. 35, 36, 41, 42, 45, 50, 52
- [28] Desconocido (2014). De Ilipa a Alcalá. *Blog*. 50
- [29] Díez-Minguito, M., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Navarro, G., and Losada, M. (2012). Tide transformation in the Guadalquivir estuary (SW Spain) and process-based zonation. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 117(C3). 15, 18, 25, 51
- [30] Díez-Minguito, M., Contreras, E., Polo, M., and Losada, M. (2013). Spatio-temporal distribution, along-channel transport, and post-riverflood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (SW Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5):2267–2278. 15, 20, 25, 77
- [31] Díez-Minguito, M., Baquerizo, A., de Swart, H., and Losada, M. (2014). Structure of the turbidity field in the Guadalquivir estuary: Analysis of observations and a box model approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(10):7190–7204. 58, 76
- [32] Doadrio, I., Carmona, J., and Fernandez-Delgado, C. (2002). Morphometric study of the Iberian Aphanus (Actinopterygii, Cyprinodontiformes), with description of a new species. *Folia Zoologica (Czech Republic)*. 51, 86
- [33] Drain Mothré, M. (1977). *Les campagnes de la province de Seville espace agricole et société rurale*. Universite Lille ISBN: 84-500-1057-8. Edition. 44
- [34] Drake, P., Arias, A. M., Baldó, F., Cuesta, J. A., Rodríguez, A., Silva-Garcia, A., Sobrino, I., García-González, D., and Fernández-Delgado, C. (2002). Spatial and temporal variation of the nekton and hyperbenthos from a temperate European estuary with regulated freshwater inflow. *Estuaries*, 25(3):451–468. 86

- [35] Folch, R. (2003). Los conceptos socioecológicos de partida. principio ecológicos versus criterios territoriales, en Folch, R. (coord.): El territorio como sistema. conceptos y herramientas de ordenación. Barcelona, Consorci Universitari Internacional Menéndez Pelayo i Diputació de Barcelona, 19-42. 84
- [36] Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global environmental change*, 16(3):253–267. 83
- [37] García-Pereda, I. (2013). Los trabajos agronómicos de la Compañía del Guadalquivir en la primera mitad del siglo XIX. cuadernos de historia de la ingeniería. volumen xiv. 44
- [38] García Vargas, E., Alonso, C., Jiménez, M., and Maclino, I. (2004). Perspectivas de investigación sobre puertos y fondeaderos en el Sur de Hispania. *Le strutture dei porti e degli approdi antichi. Roma*, pages 3–21. 28
- [39] Garel, E. and Cai, H. (2018). Effects of Tidal-Forcing Variations on Tidal Properties Along a Narrow Convergent Estuary. *Estuaries and Coasts*, 41(7):1924–1942. 4
- [40] Girard, A. (2006). *La rivalidad comercial y marítima entre Sevilla y Cádiz: hasta finales del siglo XVIII*, volume 4. Editorial Renacimiento. 32, 35, 40
- [41] Godin, G. (1999). The propagation of tides up rivers with special considerations on the upper Saint Lawrence River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(3):307–324. 72, 102, 103
- [42] Gomez-Baggethun, E., Olsson, P., and Montes, C. (2009). Learning with crises: building resilience to secure ecosystem services in Mediterranean resource management systems. In *Proceedings of the 8th International Conference of the European Society for Ecological Economics*, 15 pages. 83
- [43] González Arteaga, J. M. (1993). Valencianos y arroz en las marismas del Guadalquivir. *Revista de Estudios Andaluces*, (19):67–95. 46

REFERENCIAS

- [44] González-Ortegón, E., Subida, M. D., Cuesta, J. A., Arias, A. M., Fernández-Delgado, C., and Drake, P. (2010). The impact of extreme turbidity events on the nursery function of a temperate European estuary with regulated freshwater inflow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(2):311–324. 86
- [45] González Arteaga, J. (2008). *El Rincón de los Lirios. Las islas del Guadalquivir 1927-1930*. Instituto de Estudios Fiscales. Madrid. ISBN: 9788461233465 Edition. 44
- [46] Gräwe, U., Burchard, H., Müller, M., and Schuttelaars, H. M. (2014). Seasonal variability in M2 and M4 tidal constituents and its implications for the coastal residual sediment transport. *Geophysical Research Letters*, 41(15):5563–5570. 12
- [47] Grimalt, J. O., Ferrer, M., and Macpherson, E. (1999). The mine tailing accident in Aznalcollar. *Science of the Total Environment*, 242(1):3–11. 34
- [48] Groen, P. (1967). On the residual transport of suspended matter by an alternating tidal current. *Netherlands Journal of Sea Research*, 3(4):564–574. 13
- [49] Gutiérrez-Martínez, M., González-Ortegón, E., Baldó, F., and Cañavate, J Pedro y Vilas, C. (2015). Evolución espacio-temporal de la comunidad de zooplancton en el estuario del Guadalquivir. 86
- [50] Herr, R. (1991). *La Hacienda Real y los cambios rurales en la España de finales del Antiguo Régimen*. Instituto de Estudios Fiscales. Madrid. ISBN: 84-7196-951-3 Edition. 33
- [51] Herrera, F. M. (1984). *El pleito Cádiz Sevilla por la Casa de Contratación: memorial de Fco. Manuel Herrera, 1726*. Diputación Provincial de Cádiz. 39
- [52] Hill, A. and Souza, A. (2006). Tidal dynamics in channels: 2. Complex channel networks. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 111(C11). 4
- [53] Hoitink, A. and Jay, D. A. (2016). Tidal river dynamics: implications for deltas. *Reviews of Geophysics*. 72

- [54] Hunt, J. (1964). Tidal oscillations in estuaries. *Geophysical Journal International*, 8(4):440–455. 4
- [55] Ianniello, J. (1977). Tidally induced residual currents in estuaries of constant breadth and depth. *Journal of Marine Research*, 35:755–786. 8
- [56] Ippen, A. T. (1966). Estuary and coastline hydrodynamics. McGraw-Hill Book Company. 3, 7, 8
- [57] Ippen, A. T. and Harleman, D. R. (1961). One-Dimensional Analysis of Salinity Intrusion in Estuaries. New York, McGraw-Hill Book Company. dtic document. 79
- [58] J.J.M. (1841). Viaje de Cádiz a Sevilla. *Semanario Pintoresco Español*. Tomo III, Núm. 10, 7 de marzo de 1841. 44
- [59] Johnston, S. A. (1981). Estuarine dredge and fill activities: a review of impacts. *Environmental management*, 5(5):427–440. 76
- [60] Jovellanos, G. M. (1795). Informe de la Sociedad Económica de ésta Corte al Real y Supremo Consejo de Castilla en el Expediente de la Ley Agraria. 33
- [61] Kukulka, T. and Jay, D. A. (2003). Impacts of columbia river discharge on Salmonid habitat: 2. Chages in Shallow-Water Habitat. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C9). 102, 103
- [62] Li, C., Schuttelaars, H. M., Roos, P. C., Damveld, J. H., Gong, W., and Hulcher, S. J. (2016). Influence of retention basins on tidal dynamics in estuaries: Application to the ems estuary. *Ocean & Coastal Management*, 134:216–225. 4
- [63] Llope, M. (2017). The ecosystem approach in the Gulf of Cádiz. A perspective from the southernmost European Atlantic Regional sea. *ICES Journal of Marine Science*, 74(1):382–390. 90
- [64] López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., and Losada, M. A. (2012). Short and medium-term evolution of shoreline undulations on curvilinear coasts. *Geomorphology*, 159:189–200. 51

REFERENCIAS

- [65] Loras, A. F. (2017). La Singularidad Hidrológica de España: un sistema de aguas artificializado. *Perfiles de la ordenación jurídica del agua en Italia, España y América Latina*, pages 21–44. 91
- [66] Losada, M. Á., Díez Minguito, M., and Reyes-Merlo, M. Á. (2017). Tidal-fluvial interaction in the Guadalquivir River Estuary: spatial and frequency-dependent response of currents and water levels. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(2):847–865. 15, 24, 81
- [67] Losada-Rodríguez, M. and Ruiz-Segura, J. (2010). Propuesta metodológica para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de las actuaciones humanas en el estuario del Guadalquivir. Tech. Rep U2C11, section 5.5.3, Inst. of Mar. Sci of Andaluc  (CSIC) [disponible en www.apsevilla.com]. 88
- [68] Lugt., D. (2012). The Influence of Retention Basins on Tidal Dynamics in Estuaries. Bachelor of Science in Applied Mathematics. (August). 4, 12, 79
- [69]  lvarez, O., Tejedor, B., and Vidal, J. (2001). La dinámica de marea en el estuario del Guadalquivir: un caso peculiar de resonancia antrópica. *Física de la Tierra*. 4, 25
- [70]  lvarez Pantoja, M. (1979). Los orígenes de la industrialización sevillana. Las primeras máquinas de vapor. In *Actas del I Congreso de Historia de Andaluc . Andaluc  Contemporánea, siglos XIX y XX*, pages 7–18. 33
- [71] Madoz Ibañez, P. (1845). Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de ultramar. *Madrid.(1846–1850)*. Pág, 324. 44, 45
- [72] Martín-López, B., G mez-Baggethun, E., and Montesl, C. (2009). Un marco conceptual para la gestión de las interacciones naturaleza-sociedad en un mundo cambiante, en *Cuides*. Univesidad de Barcelona, 3, 229-258. 84
- [73] Melchor-Gil, E. (2002). La navegación por el Guadalquivir en época Antigua y Medieval. *Patrimonio Histórico Hidráulico de la Cuenca del Gualdalquivir*, pages 319–347. 35

- [74] Muñoz, A. F. (1997). La navegabilidad en el curso alto del Guadalquivir en época romana. *Florentia Iliberritana*, (8):125–147. 31
- [75] Navarro, G., Gutierrez, F. J., Díez-Minguito, M., Losada, M. A., and Ruiz, J. (2011). Temporal and spatial variability in the Guadalquivir Estuary: A challenge for real-time telemetry. *Ocean Dynamics*, 61(6):753–765. 18
- [76] Navarro Grau, J. (2012). Cuaderno de Casa Alta. Juan Sintierra. Los señores de Puñana. 32, 35
- [77] Navarro Ortega, A. (2014). *El Régimen Jurídico de las Aguas de Transición: Un Punto de Encuentro entre la Legislación de Aguas y la de Costa*. PhD thesis, Universidad de Granada. 91
- [78] Navarro Ortega, A. (2018). De la hidronomía a la egialografía: Las aguas de transición como espacio de integración jurídica y de desarrollo sostenible. *En Homenaje al profesor Ángel Menéndez Rexach*, 2-2:429–460. 91
- [79] Navarro Ortega, A. (2020). Las áreas marinas protegidas en España: una visión de conjunto. *Revista Catalana de Dret Ambiental*, 10(2). 85
- [80] Nettel, P. (1988). Sevilla y el Atlántico de Hugette y Pierre Chaunu: una lectura. *Historias*. 20. 32
- [81] Officer, C. B. (1976). *Physical Oceanography of Estuaries and Associated Coastal Waters*. John Wiley. 3, 7, 8
- [82] Ortiz, A. D. (1992). *La sociedad española en el Siglo XVII.: el Estamento nobiliario*, volume 1. Editorial CSIC-CSIC Press. 40
- [83] Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE. *Computers & Geosciences*, 28:929–937. 18
- [84] Pérez-Mallaína, P. E. (1997). Auge y decadencia del Puerto de Sevilla como cabecera de las rutas indianas. *Caravelle (1988)*, pages 15–39. 36

REFERENCIAS

- [85] Pethick, J. (2001). Coastal management and sea-level rise. *CATENA*, 42:307–322. 89
- [86] Prandle, D. (1981). Salinity Intrusion in Estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 11(OCTOBER):1311–1324. 3, 4
- [87] Prandle, D. and Rahman, M. (1980). Tidal response in estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 10(10):1552–1573. 4, 103
- [88] Rainey, R. (2009). The optimum position for a tidal power barrage in the severn estuary. *Journal of Fluid Mechanics*, 636:497–507. 4
- [89] Reyes-Merlo, M. Á. (2016). *Multiscale Analysis of Morphodynamic Processes in Estuaries and their Integration into dredging projects*. PhD thesis, Programa de Doctorado de Dinámica de Flujos Biogeoquímicos y sus Aplicaciones. Universidad de Granada. 4, 101
- [90] Reyes-Merlo, M. Á., Díez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., and Losada, M. Á. (2013). On the relative influence of climate forcing agents on the saline intrusion in a well-mixed estuary: Medium-term monte carlo predictions. *Journal of Coastal Research*, 65(sp2):1200–1205. 76
- [91] Robinson, I. (1980). Tides in the bristol channel—an analytical wedge model with friction. *Geophysical Journal International*, 62(1):77–95. 4
- [92] Robles, C. O. (2003). Evolución geomorfológica de los márgenes del bajo Guadalquivir. In *XX Semana de Estudios del Mar*, pages 319–334. Asociación de Estudios del Mar. 35
- [93] Rodríguez, F. A. (2012). El Análisis documental y el levantamiento como metodología de investigación en arquitecturas desaparecidas: El fuerte de San Felipe y el Muelle de la Riza en la desembocadura del Guadalquivir. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 17(20):134–143. 38
- [94] Rodríguez-Ramírez, A., Rodríguez-Vidal, J., Cáceres, L., Clemente, L., Belluomini, G., Manfra, L., Improta, S., and de Andrés, J. (1996). Recent coastal evolution of the doñana national park (SW Spain). *Quaternary Science Reviews*, 15(8):803–809. 32

- [95] Román, J. (2015). ¿Qué es en realidad la Isla Mínima? *Blog. Observatorio de Biodiversidad y Cambio Global de Doñana. Dpto. Biología de la Conservación. Estación Biológica de Doñana-CSIC*. 36
- [96] Ruiz, J., Macías, D., Losada, M., Díez-Minguito, M., and Prieto, L. (2013). A simple biogeochemical model for estuaries with high sediment loads: Application to the Guadalquivir River (SW Iberia). *Ecological modelling*, 265:194–206. 58, 76
- [97] Ruiz, J., Macías, D., and Navarro, G. (2017). Natural forcings on a transformed territory overshoot thresholds of primary productivity in the Guadalquivir estuary. *Continental Shelf Research*, 148:199–207. 90
- [98] Ruiz, J., Polo, M., Díez-Minguito, M., Navarro, G., Morris, E., Huertas, E., Caballero, I., Contreras, E., and Losada, M. (2014). The Guadalquivir estuary: A hot spot for environmental and human conflicts. In Finkl, C. W. and Makowski, C., editors, *Environmental Management and Governance*, volume 8 of *Coastal Research Library*, pages 199–232. Springer. 18, 54, 90
- [99] Sancho, N. (1858). *Memoria histórica de la extinguida sociedad denominada Compañía de Navegación del Guadalquivir y Canal Fernandino*. Librería Española y Extranjera. Sevilla. Compañía de Navegación del Guadalquivir (España). Biblioteca de la Universidad de Sevilla. 44
- [100] Serrano, M., Cobos, M., Magaña, P., and Díez-Minguito, M. (2020). Sensitivity of Iberian estuaries to changes in sea water temperature, salinity, river flow, mean sea level, and tidal amplitudes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236:106624. 89
- [101] Solari, S y Losada, M. (2011). Non-stationary wave height climate modeling and simulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9). 103
- [102] Souza, A. and Hill, A. (2006). Tidal dynamics in channels: Single channels. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 111(C9). 4

REFERENCIAS

- [103] Tapias-Herrero, E. (2014). El sueño del Almirante Pes: El traslado de la Casa de la Contratación a Cádiz en 1717. *Departamento de Historia de América en la Universidad de Sevilla*. 32, 35, 36, 45
- [104] Taylor, G. (1921). Tides in the Bristol channel. In *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, volume 20, pages 320–325. 4
- [105] Toffolon, M. and Savenije, H. H. (2011). Revisiting linearized one-dimensional tidal propagation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7). 4
- [106] Torner, J. (1831). *Diccionario Geográfico Universal. Tomo 4*. Edición Barcelona. 44
- [107] Urdiales Alonso, C., García Díaz, D., and Valero Lancho, Abel y Fernández-Palacios, J. M. (2010). Seguimiento de la inundación en la Marisma de Doñana: resultados del ciclo 2009/2010 y efecto del Dique de la Montaña del Río en el proceso de inundación. Universidad de Sevilla. 49, 50
- [108] van Rijn, L. C. (2011). Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part i: tidal wave propagation in convergent estuaries. *Ocean Dynamics*, 61(11):1719–1741. 4
- [109] Vanney, J.-R. (1970). *L'hydrologie du bas Guadalquivir*. Inst. de Geografía Aplicada. 52
- [110] Vargas-Molina, J. (2014). Consecuencias del megaproyecto de dragado de profundización en el sistema socio-ecológico del estuario del Guadalquivir, España. *Agua y Territorio*, (4):23–34. 84, 88
- [111] Vicente Maroto, M. I. (2003). El arte de la navegación en el Siglo de Oro. Universidade da Coruña. 36
- [112] Villalón, J. C. (1988). La intervención del hombre en la Ría y Marismas del Guadalquivir. *Eria*, (16):109–123. 35, 45

REFERENCIAS

- [113] Wong, K.-C. (1991). The response of the Delaware estuary to the combined forcing from Chesapeake Bay and the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 96(C5):8797–8809. 4