AIRIS II - SYNCHRO. SYNCHROMODAL TRAFFIC & TRANSPORT INFORMATION SERVICES

2018-ES-TM-25

ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-3.

Estudio preliminar de un modelo predictivo de la respuesta en el interior del estuario a forzamientos meteorológicos y de descargas de río.

Infraestructura y Transporte

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

Control de firmas / Signature Control

Realizado Written	Aprobado Approved
	Jesús García Lafuente Javier Delgado Cabello
Javier Delgado Cabello - Universidad de Málaga (UMA)	Jesús García Lafuente - Universidad de Málaga (UMA)
21/10/2020 Firmado por DELGADO CABELLO JAVIER - 53680688E el día 21/10/2020	21/10/2020 GARCIA LAFUENTE JESUS MANUEL - 12706687S Firmado digitalmente por GARCIA LAFUENTE JESUS MANUEL - 12706687S Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, serialNumber=IDCES-12706687S, givenName=JESUS MANUEL, sn=GARCIA LAFUENTE, cn=GARCIA LAFUENTE JESUS MANUEL - 12706687S Fecha: 2020.10.21 13:12:35 +02'00'

Aprobación del documento / Document Approval

Pedro Sebastian Vila Aguiló	Rodrigo García Orera
Quality Leader (QL)	Action Coordination Leader (AcL)
SENER Ingeniería y Sistemas	Autoridad Portuaria de Sevilla
Fecha y Firma dd/mm/yyyy	Fecha y Firma dd/mm/yyyy

No precisa firma si está aprobado electrónicamente mediante ruta / Signature not needed if electronically approved by route

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

Información del Documento Document Information	
Realización del Documento	UMA
Código Documento	D02157-UMA-NT-01
Revisión	0
Nombre del documento	ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-3

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

Registro de cambios / Changes Record

Rev Rev	Fecha Date	Autor Autor	Sección afectada Affected section	Cambios Changes
R0		Todos	-	Versión inicial del documento

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

INDICE / TABLE OF CONTENTS

1. CONTRIBUCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO AL ESTUDIO DE PILOTOS 6
2. FORZAMIENTO METEOROLÓGICO OCEÁNICO 8
2.1. Planteamiento de los experimentos 8
2.2. Resultados 11
3. DESCARGAS DE AGUA DULCE 17
3.1. Planteamiento de los experimentos 17
3.2. Resultados 17
4. CONCLUSIONES DE LA 33 21
5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PILOTO 22
6. BIBLIOGRAFÍA 24

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

1. CONTRIBUCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO AL ESTUDIO DE PILOTOS

La contribución del modelado numérico al estudio de pilotos se plasma en la provisión de predicciones de la altura de la superficie libre en cualquier lugar del estuario (a efectos prácticos, se seleccionarán una serie de puntos) con el intervalo de tiempo que se requiera para la óptima planificación de la navegación. O, alternativamente, proporcionar el espesor de la lámina de agua en esos puntos seleccionados.

La altura de la superficie libre en un punto cualquiera es la suma de varios efectos. En primer lugar, el nivel medio en ese punto, que no es sino el promedio de los niveles instantáneos calculado sobre un intervalo de tiempo suficientemente grande (meses-años). Debe estar referido a un datum, preferiblemente el mismo al que esté referida la batimetría pues esto hace trivial el cálculo del espesor de la lámina de agua. La información batimétrica que ha proporcionado la APS está referida a cero de Alicante, por lo que se ha tomado esta referencia. De todo el estuario, el único punto en el que existe información contrastada del nivel medio del mar referido al cero de Alicante nivel es Bonanza, que se encuentra a 312mm por encima de ese cero (Figura 1).

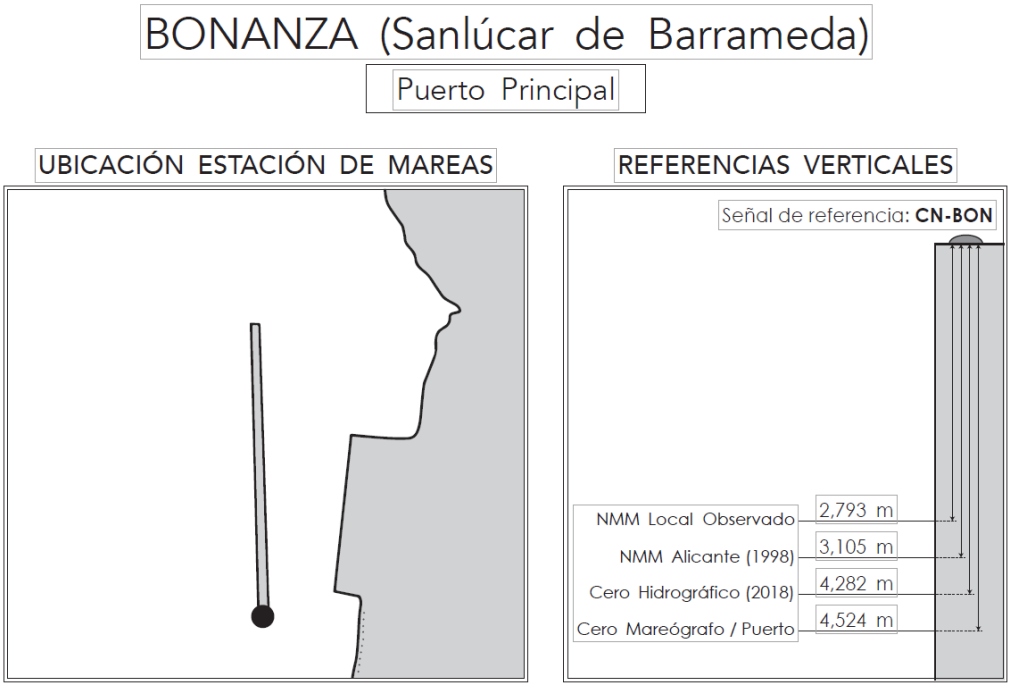

Figura 1. Izquierda: Ubicación del mareógrafo en el dique exento de Bonanza. Derecha; cotas de distintas referencias mareográficas respecto al clavo de referencia. El nivel medio del mar observado en esta localidad está 312 mm por encima del cero de Alicante. (fuente: https://armada.defensa.gob.es/ihm/Documentacion/Mareas/Mareografos/Bonanza0.pdf).

A la batimetría proporcionada por la APS se ha sumado esa cantidad como nivel de referencia del modelo hidrodinámico. La condición inicial para el comienzo de ejecución del modelo es llenar todo el estuario de agua hasta este nivel. Una vez el modelo alcanza su estado estacionario, es decir, tras el periodo de spin-up, éste genera un ligero desnivel longitudinal, elevando el nivel medio a medida que nos desplazamos aguas arriba. El modelo indica un desnivel entre la Esclusa (Sevilla) y Bonanza de unos 170mm.

El problema del nivel medio a lo largo de todo el cauce está sin resolver por falta de información sobre nivelación de precisión en otros puntos. A falta de esta información, la aproximación que se está actualmente haciendo es añadir artificialmente una pequeña corrección al nivel medio en cada punto para que en la Esclusa el nivel medio respecto al cero de Alicante sea 639mm, que es la mejor estima de la que se dispone hasta la fecha tras una estima de nivelación del clavo de referencia del mareógrafo de la Esclusa realizada el 23 de Junio de 2016 por IDOM (ver detalles en informe del Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2017). Actualmente se está en fase de realizar una nivelación de mucha mayor precisión que deberá proporcionar un

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

valor más exacto. Hasta que no se disponga de ella, se trabajará con esa cifra de referencia en Sevilla (Esclusa), que indica un desnivel de nivel medio de 639-312=327mm entre Esclusa (más alto) y Bonanza. Se espera disponer de dicha información en un tiempo relativamente breve, por lo que las correcciones más precisas que deriven de esa nueva nivelación se abordarían en la Actividad 4 del proyecto.

A ese nivel medio se le añade la oscilación mareal de origen astronómico, que el modelo la calcula respecto al nivel medio anterior. Puede ser por tanto positiva (pleamar y aledaños temporales) o negativa (bajamar). Esta contribución es fácil de calcular conocidas las constantes armónicas en un lugar dado o, como en el caso del presente enfoque, ejecutando el modelo para el periodo de predicción deseado y generando series temporales de nivel en los puntos seleccionados. En el corto o medio plazo, en tanto que la morfología del estuario no cambie tanto como para modificar la dinámica mareal, los valores producidos por el modelo son suficientemente precisos para los objetivos de optimización de navegación perseguidos en este proyecto. Y tienen un horizonte temporal de años, es decir, puede hacerse una predicción fiable para periodos de tiempo de esa escala temporal.

A la suma de las dos anteriores contribuciones, nivel medio y marea astronómica, deben sumarse perturbaciones menores cuyo origen es la marea meteorológica y las debidas a descargas de agua dulce de cierta entidad que se produzcan en las distintas presas que controlan los caudales en el estuario, la de Alcalá del Río en particular. Frente a oscilaciones del orden de un metro de la marea astronómica, éstas son sólo de algunos centímetros, no más de 20cm en situaciones de forzamiento alto para la marea meteorológica y menos aún para el caso de descargas de agua dulce salvo situaciones muy extremas que puedan llegar a ocasionar inundaciones incluso (el modelo no está preparado para trabajar estas últimas). Aunque de menor enjundia, ambas deben, al menos, ser consideradas y ese es el objetivo de este informe, que se centra en ellas exclusivamente.

El problema que tienen una y otra es que su horizonte de predicción es muy limitado, apenas dos-tres días para la marea meteorológica (el mismo horizonte predictivo que tienen los modelos meteorológicos) y más incierto para las descargas que en muchas ocasiones están reguladas por necesidades puramente antrópicas, eliminando cualquier posible ciclo natural o, paradójicamente, invirtiéndolos.

El estudio detallado sobre el comportamiento de la marea astronómica, meteorológica y descargas de agua dulce en el estuario se describe en las entregas previas de la Actividad 3: ST320 (Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020a), ST321 (2020b) y ST322 (2020c).

La forma de abordar el estudio es analizar casos de estudio en los que se generan perturbaciones artificiales perfectamente controladas y se las deja evolucionar por el estuario. En el caso de marea meteorológica, que se estudia en la Sección *2* del informe, se prescribe una señal artificial en la desembocadura que se deja propagar hacia el interior. En los diversos puntos de control a lo largo del estuario utilizados en el informe anterior (ver mapa de los puntos kilométricos (PK, de aquí en adelante) en la Figura 1 del ST322, Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020c) se registra el tamaño y posible desfase (retardo) de llegada de la señal para así establecer una función ganancia en cada uno de ellos. En el caso de las descargas de agua dulce se opera de forma similar, generando descargas controladas de diverso tamaño y duración, viendo la respuesta en los diferentes puntos de control y evaluando una nueva función ganancia que de nivel frente a descarga. Se estudia en la Sección *3*. Nombradas desde la desembocadura en dirección a la cabecera, las 10 estaciones que se han tenido en cuenta son: Chipiona, Bonanza, Salinas, Puntalete, Gola, Canal Nuevo, Lisa, Olivillos, Majano y Esclusa.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

2. FORZAMIENTO METEOROLÓGICO OCEÁNICO

2.1. Planteamiento de los experimentos

Para el estudio de respuesta al forzamiento meteorológico en el interior del estuario se han sintetizado mareas meteorológicas de perfil simplificado para poder llevar a cabo el estudio bajo diferentes condiciones controladas. El perfil empleado está esquematizado en la Figura 2 para el caso de un residuo positivo (sobrelevación), que correspondería a una marea meteorológica ocasionada por una situación de baja presión atmosférica. Se representa una perturbación de amplitud constante A (cm) de Δc días de duración a la que se llega por una rampa ascendente tipo sinusoidal de Δu días y que desaparece siguiendo otra rampa sinusoidal de Δd días. La perturbación comienza en el instante t_0. El residuo para el caso de una depresión (forzado por altas presiones) sería la imagen especular respecto al eje "y" de la curva de la Figura.

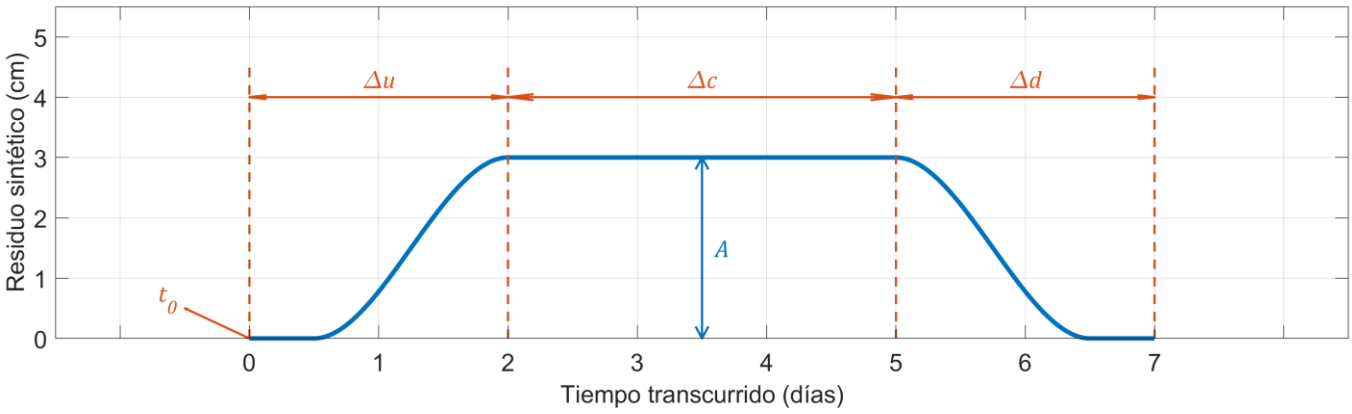

Figura 2. Prototipo de marea meteorológica oceánica simple sintetizada que ha sido usada para estudiar la respuesta a este forzamiento en el interior del estuario (ver detalles en el texto).

Matemáticamente, la perturbación sintetizada está representada por la función definida a trozos siguiente:

$$Y(t) = \frac{A}{2}\left(1 + \cos\left[\frac{\pi}{\Delta_u}(t - t_0) - \pi\right]\right) \qquad t_0 \le t \le t_0 + \Delta_u$$

$$Y(t) = A \qquad t_0 + \Delta_u \le t \le t_0 + \Delta_u + \Delta_c$$

$$Y(t) = \frac{A}{2}\left(1 + \cos\left[\frac{\pi}{\Delta_d}(t - t_0 - \Delta_u - \Delta_c - \Delta_d) + \pi\right]\right) \qquad t_0 + \Delta_u + \Delta_c \le t \le t_0 + \Delta_u + \Delta_c + \Delta_d$$

La función tiene cuatro parámetros de ajuste, $A, \Delta_u, \Delta_c, \Delta_d$. Por simplicidad se va a asumir $\Delta_u = \Delta_d$ y ambos proporcionales a la amplitud A con un factor de proporcionalidad de 2 horas/cm. Esta constante es físicamente comparable a un cambio de presión atmosférica (principal fuente de la marea meteorológica) de 0.5HPa/hora, un ritmo de variación alto, pero aceptable. Así, por ejemplo, una perturbación sintetizada que tenga una amplitud A=10cm se le asigna una rampa de subida (y otra de bajada) de 20 horas.

Se han realizado tres conjuntos de experimentos, uno que tiene por objetivo analizar la respuesta de distintas amplitudes en distintos puntos del estuario, y dos que plantean sendos análisis de sensibilidad en función de la duración del plateau Δ_c y de las rampas Δ_u y Δ_d, respectivamente (ver Figura 2). Para cada experimento, se han llevado a cabo dos simulaciones: una que considera el efecto aislado de la marea astronómica, y otro en el que se contempla el efecto conjunto de la marea meteorológica sintetizada y astronómica. En ambos casos, las descargas de agua dulce son desestimadas.

Con el fin de aislar y procesar correctamente la serie del residuo sintetizado a posteriori, la marea astronómica implementada en este considera únicamente la amplitud de la constituyente M2. Por otro lado, en los tres conjuntos de experimentos, los prototipos están precedidos por un periodo de 3 días de "spin-up" o periodo de ajuste del modelo a las condiciones astronómicas y meteorológicas impuestas.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

El primer conjunto de experimentos considera dos casos de variación de una serie de amplitudes A, ambas basadas en el rango de variación del residuo meteorológico en la desembocadura. Estudios previos del comportamiento de la marea meteorológica en el estuario permiten comprobar que los percentiles 5 y 95 del residuo medido en el mareógrafo de Bonanza, es decir, el valor por debajo del cual se encuentra el 5% y 95% de los datos, son -15.4 y +17.6 cm respectivamente. Por tanto, con el objetivo de preservar el mismo orden de magnitud que el residuo del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza, se han escogido las amplitudes de -15 cm a +18 cm con un paso de +3 cm. Por otro lado, con el fin de testear la respuesta del modelo a forzamientos extremos, aunque irreales, se han contemplado adicionalmente las amplitudes -60, -45, -30, 30, 45, y 60 cm.

En ambos conjuntos de amplitudes, se ha mantenido siempre una duración del plateau Δ_c de 3 días. Las rampas sinusoidales (Δu y Δd) definidas mantienen una duración de 2 días, por lo que el tiempo transcurrido completo para cada residuo meteorológico sintetizado es de 7 días. En total, se han ejecutado 129 días de simulación (3 días de "spin-up" + 7 días × 18 valores de A), con una frecuencia de escritura de las salidas de 5 minutos. La Figura 3 esquematiza el perfil de las 18 mareas meteorológicas sintetizadas en base a este esquema.

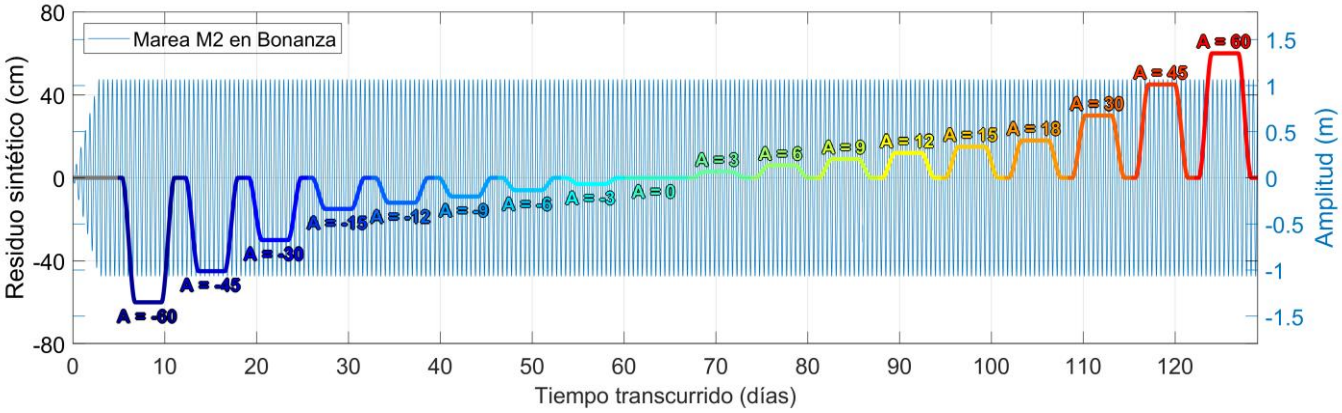

Figura 3. Prototipos de marea meteorológica oceánica en cm para las 18 A seleccionadas (eje izquierdo), siendo azul el prototipo de residuo meteorológico máximo negativo (A = -60 cm) y rojo el máximo positivo (A = +60 cm), frente a la serie modificada del nivel del mar en Bonanza. En gris, se muestran los tres primeros días de la simulación correspondientes al periodo de "spin-up". El periodo del nivel del mar que se muestra es 24/08/2019 – 31/12/2019.

El conjunto de amplitudes seleccionadas contempla tanto el posible efecto de altas presiones (-15 a -3 cm), generalmente más estables, como el de bajas presiones (3 a 18 cm), representadas con colores fríos y cálidos respectivamente en la Figura 3. Asimismo, también se representan, en la misma franja de colores, los posibles eventos extremos de altas y bajas presiones, con amplitudes de -60 a -30 y +30 a +60 cm, respectivamente.

El análisis de sensibilidad de la duración de Δ_c, correspondiente al segundo conjunto de experimentos, toma como referencia 4 amplitudes constantes: A=-12cm y A=-6cm, A=+12cm y A=+6cm y aplica distintos valores de Δ_c desde 2 hasta 6 días con paso de 1 día. Se obvia Δ_c= 3, puesto que es la duración empleada en el primer conjunto de experimentos. La Figura 4 muestra los perfiles empleados en el primer análisis de sensibilidad.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

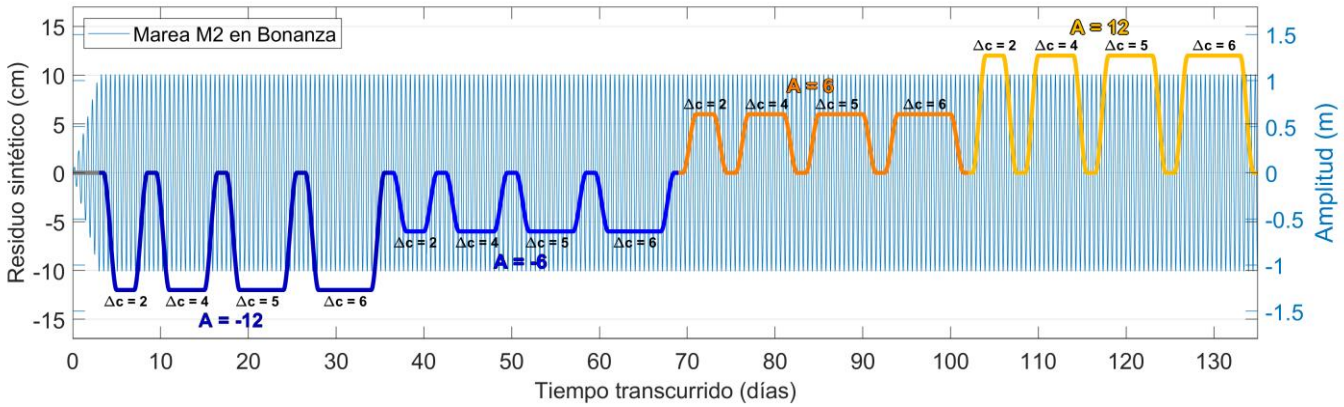

Figura 4. Prototipos de marea meteorológica oceánica en cm del primer análisis de sensibilidad para las 4 A seleccionadas (eje izquierdo), siendo azul el prototipo de residuo meteorológico mínimo (A = -12 cm) y amarillo el máximo (A = 12 cm). Para cada valor de A, se muestran los 4 experimentos de la duración de Δc en días. En gris, se muestran los tres primeros días de la simulación correspondientes al periodo de "spin-up". Se representa la serie modificada del nivel del mar en Bonanza en el periodo 18/08/2019 – 31/12/2019.

Considerando las 4 variaciones de Δ_c impuestas en el segundo conjunto de experimentos y manteniendo los valores de Δ_u y Δ_d con respecto al experimento anterior (2 días en ambos casos), se obtienen 4 duraciones distintas para cada prototipo de marea meteorológica sintetizada, t = 6, 8, 9 y 10 días, que corresponden a los Δ_c = 2, 4, 5 y 6 días, respectivamente. Esto, sumado a las 4 amplitudes de A añade un tiempo de simulación de 135 (3 días de "spin-up" + 4 A × (6+8+9+10) t) días. La frecuencia de escritura de las salidas y el periodo de ajuste del modelo con respecto al primer conjunto de experimentos se mantiene.

El tercer y último conjunto de experimentos conserva las amplitudes del segundo (-12 a 12 cm, con pasos de 6 cm) y la duración de Δ_c del primero (3 días), pero varía los días de rampa Δ_u y Δ_d de 1 a 2.5 días, con paso de 0.5 días. Se obvia Δ_u y Δ_d = 2, puesto que es el calculado en el primer conjunto de experimentos. La Figura 5 muestra los prototipos de las mareas meteorológicas consideradas en este caso.

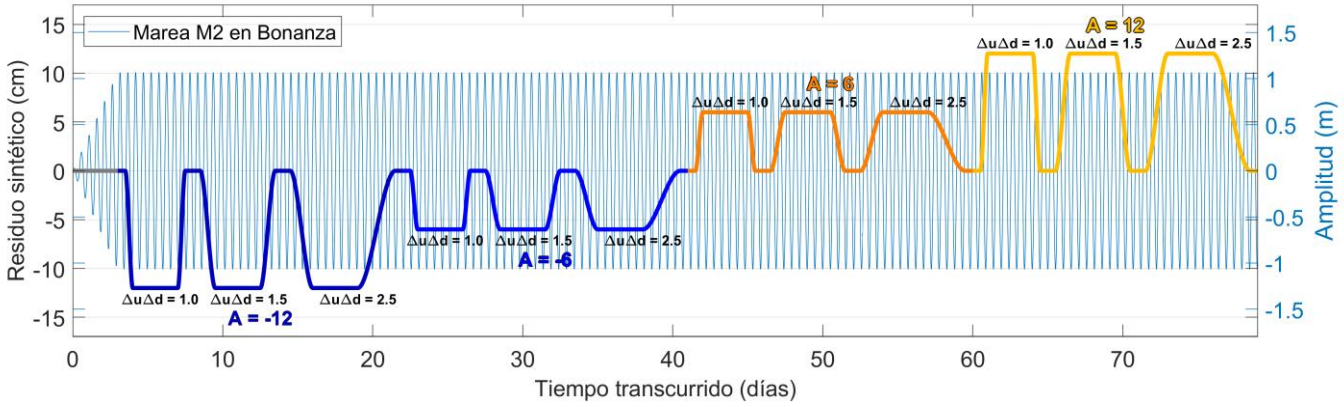

Figura 5. Como en la Figura 4, para el segundo análisis de sensibilidad de la duración de Δu y Δd. El periodo del nivel del mar representado en este caso comprende el periodo temporal del 13/10/2019 al 31/12/2019.

Siguiendo el mismo procedimiento que en el análisis de sensibilidad anterior, las 3 variaciones de Δ_u y Δ_d y los 4 valores de A, modifican la duración de cada prototipo de marea meteorológica 3 veces, obteniéndose , 5, 6 y 8 días para cada una, correspondientes a los Δ_u y Δ_d de 1, 1.5 y 2.5 días respectivamente. Esto añade al modelo un tiempo adicional de ejecución de 79 (3 días de "spin-up" + 4 A × (5+6+8) t) días.

En el primer conjunto de experimentos se ha estimado una función ganancia en amplitud $G(A,x)$ y otra de diferencia de fase (retraso) $\Delta T(A,x)$ de la siguiente manera. Se fuerza el modelo numérico con la marea

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

astronómica y, tras el periodo de spin-up, se añade la función meteorológica sintetizada hasta alcanzar de nuevo el estado estacionario una vez que se haya propagado y desaparecido. En esta serie generada se elimina la marea astronómica en cada punto x de control seleccionado, con lo que emergerá el patrón de perturbación en ese punto. Se mide la amplitud de la perturbación en la meseta , $a(x)$, y el instante de tiempo en que comienza a manifestarse la perturbación,t y con ellos se estima el ratio adimensional $a(x)/A$ para la función ganancia G, y la diferencia $t(x) - t0$ para el retardo o desfase ΔT. El procedimiento se repite para cada una de las amplitudes A seleccionadas, con lo que se obtendrán las funciones de dos variables G y ΔT. Para el segundo y tercer tipo de experimentos en los que se mantiene A constante y se varía Δ_c y $\Delta_u - \Delta_d$ el procedimiento es similar, obteniéndose en este caso funciones ganancia y retrasos $G(\Delta_c, x)$ y $\Delta T\ (\Delta_c, x)$.

2.2. Resultados

Primer conjunto de experimentos: análisis de la respuesta de distintos valores de A en el estuario

Una vez obtenidas las salidas del modelo, lo primero que se ha comprobado es la correlación entre el conjunto A implementado en el modelo (ver perfil de la Figura 2) y la serie de residuo extraída de la simulación. Este último ha sido comparado considerando la aplicación o no de un filtrado paso-bajo de periodicidad diaria que elimina las oscilaciones residuales a escala mareal (Godin, 1972), con el fin de identificar la serie de residuo sintetizada más ajustada al perfil original. La Figura 6 proporciona una comparación entre ambas series en el PK de Bonanza, ubicado en la desembocadura.

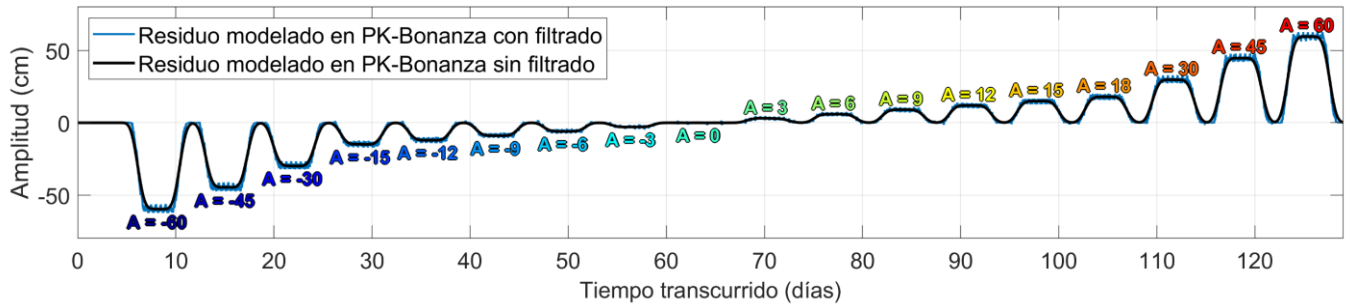

Figura 6. Prototipos de marea meteorológica oceánica sintetizada (representados también en la Figura 2) frente al residuo modelado en cm con la aplicación (línea negra) o no (línea azul) de un filtrado de paso bajo (Godin, 1972) que elimina las oscilaciones de periodicidad mareal.

El resultado de la comparación de la Figura 6 muestra, a simple vista, una alta correlación entre la serie de residuo *input* (implementada a la simulación del modelo) y *output* (extraída de la simulación del modelo) en el periodo completo de la simulación. La comparación entre el residuo modelado con y sin la aplicación del filtro paso-bajo refleja, como es esperable, una mayor variabilidad en la serie no filtrada y, por tanto, una mayor correlación considerando el residuo filtrado.

Con el fin de proporcionar una estadística complementaria, se han calculado los coeficientes de correlación de Pearson (*p)* y el error cuadrático medio (*root-mean-square-error*, rmse de aquí en adelante) entre la serie *input* y *output* en la totalidad de los puntos seleccionados para el estudio. La Tabla 1 muestra los valores que adoptan estos parámetros para cada estación.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

Tabla 1. Índices de correlación de Pearson (ρ) y error cuadrático medio (rmse, en cm) entre la serie del residuo sintetizado implementado a la simulación y la serie de residuo modelado. Las estadísticas se muestran para el residuo al que se le ha aplicado un filtro para suprimir las oscilaciones a escala mareal y para el residuo no filtrado.

	Residuo sintetizado *input* vs. *output*			
	Filtrado		No Filtrado	
	P	rmse (cm)	ρ	rmse (cm)
Chipiona	1	0.002	1	0.11
Bonanza	1	0.17	0.998	0.51
Salinas	0.999	0.29	0.996	0.65
Puntalete	0.999	0.36	0.995	0.75
Gola	0.998	0.47	0.992	0.95
Canal Nuevo	0.997	0.55	0.992	0.95
Lisa	0.996	0.69	0.991	1.01
Olivillos	0.995	0.74	0.99	1.08
Majano	0.995	0.77	0.987	1.25
Esclusa	0.994	0.83	0.982	1.43

La Tabla 1 confirma la alta correlación entre la serie *input* y *output* para todas las estaciones, con una ligera mejora en el caso del residuo modelado filtrado (Godin, 1972). A pesar de esta preponderancia, cabe destacar que las diferencias entre las series filtrada y no filtrada oscilan en torno a la segunda cifra decimal, un valor muy poco relevante, por lo que se podría considerar que ambas se ajustan de forma muy satisfactoria al conjunto de amplitudes implementadas. En ambos casos, los resultados de los índices demuestran una correlación máxima en las estaciones próximas a la desembocadura y, consecuentemente, un ligero empeoramiento gradual conforme la estación se aleja de la boca del estuario. Esto sugiere a su vez un leve desfase entre el residuo implementado en el contorno abierto del dominio y el extraído en la cabecera, detalle que será estudiado más adelante. El rmse muestra una disminución del orden de una cifra decimal en la comparación con el residuo filtrado en todas las estaciones, lo que a su vez confirma el alto valor de correlación con esta serie. Debido a la ligera mejora observada tanto en los índices de correlación como en el rmse para el caso de la comparación con el residuo filtrado, se ha optado por emplear esta serie en los cálculos de ganancia y desfase.

Para llevar a cabo el cómputo de ambas funciones, lo primero que se ha hecho ha sido localizar los puntos de comienzo y fin del plateau en los residuos modelados para cada punto x. Puesto que el índice de correlación y el rmse entre la serie input y el residuo modelado en Chipiona es de 1 y 0.002 cm para el caso filtrado, se ha tomado esta serie como referencia para el cálculo de $a(x)$ y t en el resto de las estaciones. La Figura 7 muestra una comparativa entre el residuo extraído de Chipiona y Esclusa, así como una esquematización del cálculo de las funciones de desfase y ganancia en estas estaciones.

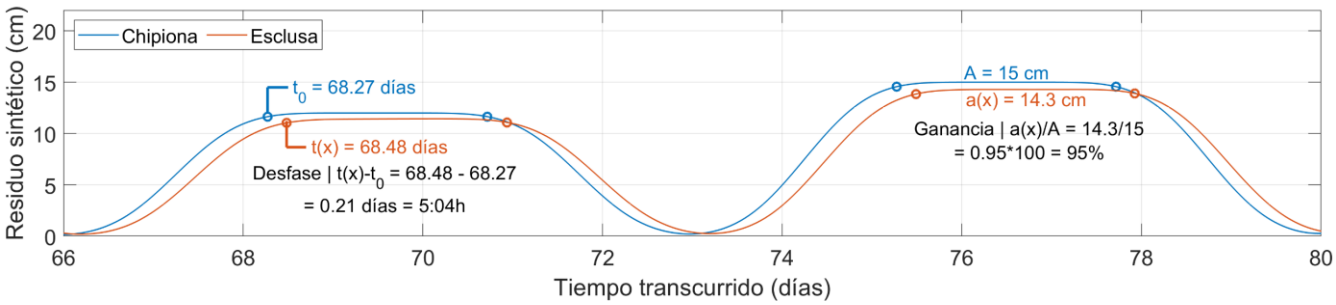

Figura 7. Subserie (14 días) de marea meteorológica extraída del modelo en el PK-Chipiona (azul) y PK-Esclusa (naranja). Para cada serie se muestran, con círculos indicados en el mismo color que la estación a la que pertenecen, los puntos de comienzo y fin del plateau (Δc). En el prototipo de marea meteorológica de 12 cm y 15 cm se esquematiza el cálculo del tiempo de desfase y función de ganancia, respectivamente.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

Se pueden extraer dos aspectos clave de la comparación entre el residuo modelado en Chipiona y Esclusa (Figura 7): por un lado, la diferencia temporal entre las respuestas meteorológicas de ambas series y por otro, la diferencia de amplitud alcanzada para cada perturbación.

Como es esperable por la distancia existente entre ambos PKs, la respuesta del modelo a un residuo impuesto en la desembocadura no se refleja de forma inmediata en la cabecera, sino que éste experimenta un desfase debido a la propagación de la onda de marea meteorológica que arrastra la perturbación meteorológica. Este tiempo de desfase puede ser considerado de forma equivalente a los tiempos de traspaso de la marea meteorológica, es decir, el intervalo de tiempo necesario para que el residuo meteorológico recorra cierto tramo del río. Para el caso específico representado en la Figura 7, el desfase entre el comienzo de la perturbación en Chipiona (68.02 días) y el comienzo en la Esclusa (68.25 días) es de 0.23 días, lo que equivale a 5:52h, valor de desfase que resulta esperable en concordancia con estudios preliminares en el estuario aplicados a marea astronómica (Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019).

Por otro lado, en el cálculo de la función de ganancia, es especialmente importante cuantificar el valor de la amplitud alcanzada en la perturbación para cada localidad ($a(x)$). En condiciones ideales, la función de ganancia adopta un valor de 1, lo que refleja que la correlación entre el residuo implementado y la respuesta del modelo es máxima. En el caso representado (Figura 7), la amplitud alcanzada en la perturbación en la Esclusa es de 14.8 cm, mientras que en Chipiona es 15, lo cual da como resultado una ganancia de 0.98 (98%).

En el cálculo de ambos parámetros, hay dos situaciones que han de ser estudiadas en detalle: la posible diferencia entre valores de amplitud y entre tiempos de desfase en un mismo punto x, y la comparación entre los valores de amplitud y desfase recogidas en distintas localidades. En base a estudios previos del comportamiento de la marea meteorológica en el estuario (ST320, Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020a) es lógico afirmar que el tiempo de desfase es menor cuanto mayor es la cercanía a la desembocadura. También es razonable deducir que el desfase entre estaciones disminuye con las amplitudes de la marea meteorológica más altas, puesto que es cuando la cercanía con el fondo es menor. En ese caso, la fricción con el fondo actúa acentuando este comportamiento, puesto que su efecto, siempre retardador, es menor cuanto mayor es el espesor de la lámina de agua. Por otro lado, dado el elevado índice de correlación entre la serie implementada y modelada en Chipiona, es esperable que la ganancia en esta estación sea máxima y disminuya en los PKs más lejanos a la desembocadura. En cambio, la diferencia entre las dos $a(x)$ representadas en la Figura 7 sugieren que la función de ganancia se comporta de forma homogénea en un mismo punto, independientemente del valor de A especificado.

El cálculo de la función de ganancia y desfase en el resto de las estaciones se ha llevado a cabo siguiendo el mismo procedimiento que el esquematizado en la Figura 7. La Figura 8 muestra un diagrama de barras de la evolución de la función de ganancia en el estuario.

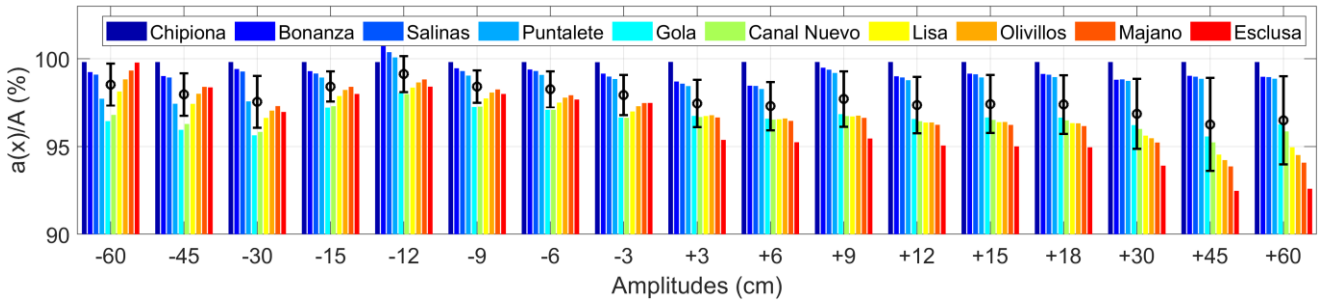

Figura 8. Ratio entre la amplitud del residuo alcanzado en la meseta ($a(x)$) y la amplitud sintetizada definida en los prototipos de marea meteorológica (A) para todos los puntos kilométricos y amplitudes. Para cada amplitud se muestran los promedios y las barras de error con un punto y línea negra, respectivamente. Para facilitar la interpretación, se representan la parte baja del estuario (Chipiona-Gola) en colores fríos y la parte alta (Gola-Esclusa) en colores cálidos.

Lo más destacable de la Figura 8, son los elevados porcentajes alcanzados en la totalidad de las ganancias, situándose el 94% de los ratios $a(x)/A$ por encima de una ganancia del 95%, y el 100% por encima del 90%. Por otro lado, se observa un patrón de variación de las ganancias a lo largo del río, claramente distinto para el conjunto

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

de residuos negativos y positivos. En el caso de las amplitudes negativas, el patrón de las ganancias a lo largo de las estaciones presenta un mínimo en la parte central del estuario, emulando la variación de la amplitud de la M2 en el estuario (Figura 9).

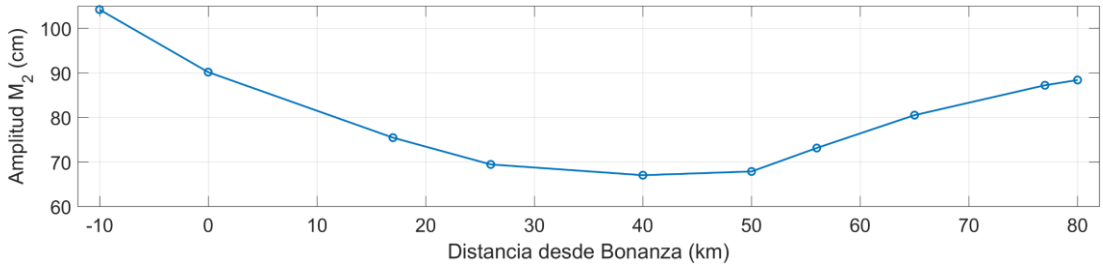

Figura 9. Valor de la amplitud de la M2 en cm calculados en los puntos del modelo de los que se han extraído las series del nivel del mar.

Por su exposición al océano abierto, la desembocadura del Guadalquivir registra el máximo valor de amplitud de la M2, porcentaje que decae en dirección a la cabecera principalmente debido al efecto de la fricción. Este hecho es el que hace que el valor del ratio entre las amplitudes $a(x)$ y A en Chipiona en la totalidad de los ejemplos de la Figura 8 sea muy cercano al 1 y, por tanto, la ganancia máxima, mientras que en las estaciones contiguas (Bonanza-Salinas-Puntalete), esta función decaiga por disipación de energía. Este patrón de disminución se mantiene en la casi totalidad de los casos de amplitud analizados (el caso de A = -12 cm es una excepción).

Ya en el centro del estuario, el rango mareal de la M2 llega a una situación "hipo-síncrona" en la que el efecto de la fricción supera al de la convergencia y la amplitud mareal disminuye. Este patrón parece estar amplificado por los residuos negativos (que inevitablemente favorecen la interacción topografía-dinámica del río). En el caso de los residuos positivos, en cambio, prevalece el efecto lineal de la fricción a lo largo del cauce, que lleva las ganancia a decrecer progresivamente de la desembocadura a la cabecera.

Aunque es cierto que estos dos tipos de patrones diferencian netamente los residuos negativos de los positivos, las consideraciones previas han de tomarse con cierta cautela, dado el muy escaso margen de variabilidad de las ganancias, en términos absolutos. La máxima variación de este parámetro no llega al 8% de su valor máximo, lo cual resta importancia a las discrepancias discutidas anteriormente. No obstante, se prevé reforzar el análisis de cara a las tareas previstas en la Actividad 4.

La Figura 10 muestra un diagrama de la evolución de los desfases desde el PK-Chipiona, calculados como la diferencia entre el tiempo de comienzo de la perturbación en Chipiona (t_0) y en el resto de las estaciones ($t(x)$).

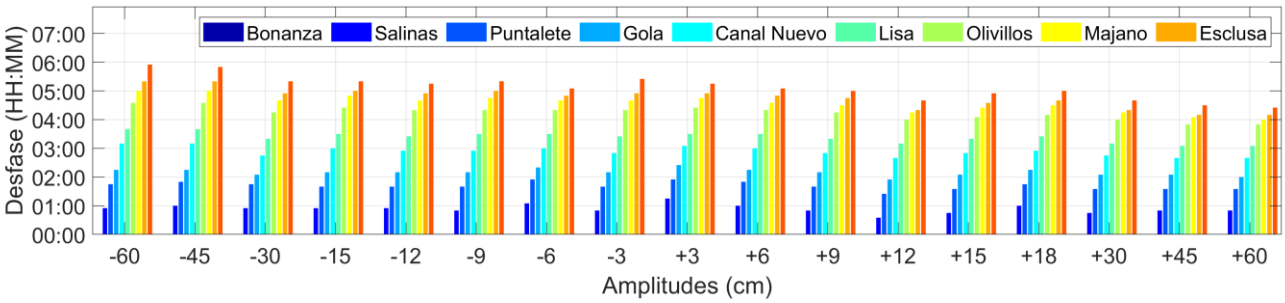

Figura 10. Tiempos de desfase entre Chipiona y el resto de los puntos kilométricos en formato HH:MM.

Como era esperable, el desfase entre PKs demuestra en la totalidad de casos, una tendencia de aumento, siendo el valor entre Chipiona y Bonanza mínimo y, entre Chipiona y Esclusa máximo: un reflejo claro de la propagación de la onda de marea hacia la cabecera. Por otro lado, la tendencia de los gráficos de barras representados en la Figura 10 confirma el razonamiento anterior. En general, excepto anomalías aisladas, como los casos de -3 y +12 cm, la tendencia (muy débil) es a disminuir el desfase con la amplitud. Las amplitudes más negativas son las que muestran los desfases mayores (por favorecer el efecto de la fricción) y a medida que la amplitud aumenta (disminuye en las negativas) el desfase decrece ligeramente.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

Segundo conjunto de experimentos: análisis de sensibilidad de la duración de Δc:

Puesto que los perfiles de la marea meteorológica en los dos análisis de sensibilidad contemplados son de la misma índole que el primer experimento, y únicamente se alteran las variaciones de la duración de la meseta Δc y de las rampas Δu y Δd, se asume que la serie de residuo modelado más ajustada al perfil original de experimentos (Figura 5) es el que considera la aplicación del filtrado paso-bajo (Godin, 1972). Por ello, se ha optado de nuevo por emplear esta serie en el procesado de los resultados. Del mismo modo que en el primer conjunto de experimentos, los resultados del modelo se han empleado para el cálculo de las funciones de ganancia y desfase.

El cálculo de la función de ganancia y desfase en esta sección se ha llevado a cabo siguiendo el mismo procedimiento que en experimento anterior. La Figura 11 muestra un diagrama de barras de la evolución de la función de ganancia para las 4 amplitudes (-12,-6,+6,+12 cm) y las 4 duraciones de plateau (1,2,4,5 días) escogidas.

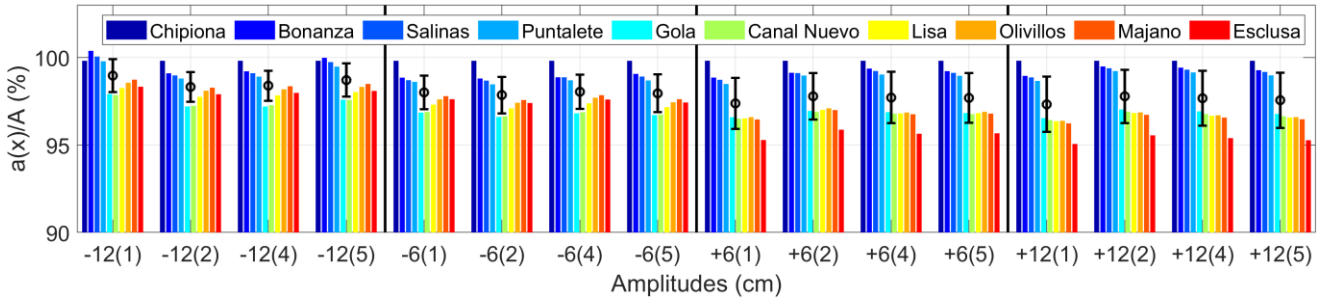

Figura 11. Ratio entre la amplitud del residuo alcanzado en la meseta ($a(x)$) y la amplitud sintetizada definida en los prototipos de marea meteorológica (A) para todos los puntos kilométricos, duración, y amplitudes. Para facilitar la interpretación, se representan la parte baja del estuario (Chipiona-Gola) en colores fríos y la parte alta (Gola-Esclusa) en colores cálidos. En las etiquetas del eje x se muestra la amplitud de la señal sintetizada (con su signo) y la duración en días de la meseta entre paréntesis.

La Figura 11 refleja el mismo patrón de ganancia que se mostraba en el primer conjunto de experimentos para los residuos negativos y positivos (Figura 8), lo que sugiere que el modelo no es sensible a las variaciones de la duración de la rampa. De la misma forma que en el caso anterior, en los residuos negativos se muestra un patrón en forma de "V" que recuerda a la forma de la amplitud de la M2, y en los residuos positivos un decaimiento de todas las ganancias desde Chipiona hasta la Esclusa, sin una recuperación de la ganancia en la parte alta. Por otro lado, los valores promedio y las desviaciones estándar mantienen el mismo comportamiento que en el caso anterior. Por tanto, en base a las funciones de ganancia obtenidas de este análisis, es razonable afirmar que el modelo responde igualmente a la totalidad de las duraciones especificadas.

La Figura 12 muestra el cálculo de los desfases desde Chipiona para los 4 experimentos seleccionados.

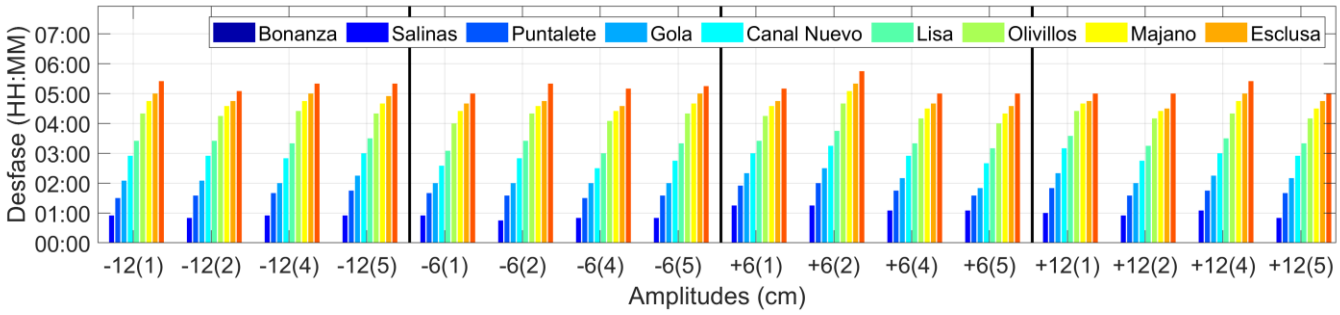

Figura 12. Tiempos de desfase entre Chipiona y el resto de los puntos kilométricos en formato HH:MM.

Dado que en el cálculo de las ganancias ya se había mostrado que el modelo es poco sensible a las variaciones de la duración de la rampa, es esperable que la variación entre los desfases calculados en el primer conjunto de experimentos y el primer análisis de sensibilidad sea mínima. Del mismo modo que en el caso anterior, los desfases entre puntos kilométricos muestran una tendencia de aumento, siendo el desfase entre Chipiona y Bonanza mínimo

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

y entre Chipiona y Esclusa máximo. Por otro lado, al haber contemplado valores de residuo de poca amplitud, el aumento del desfase con la disminución del residuo no es destacable, no apreciándose diferencia entre las amplitudes negativas y positivas.

Tercer conjunto de experimentos: análisis de sensibilidad de la duración de Δu y Δd:

Las Figura 13 y Figura 14 muestran las gráficas de la función de ganancia y desfase calculados en el segundo análisis de sensibilidad, respectivamente.

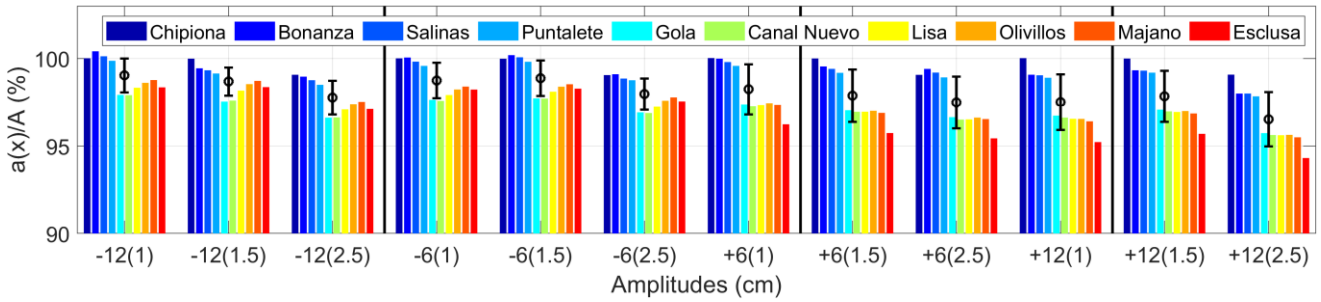

Figura 13. Igual que en la Figura 11 para el segundo análisis de sensibilidad.

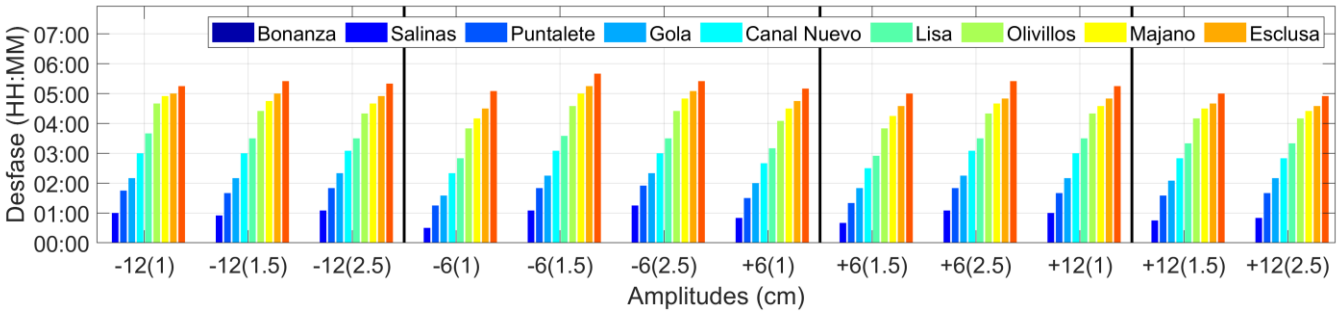

Figura 14. Igual que en la Figura 12 para el segundo análisis de sensibilidad.

Del mismo modo que el modelo no era sensible a las variaciones de plateau, tampoco lo es a las variaciones de rampa. Por tanto, las funciones de ganancia y desfase no se ven modificadas con respecto a los experimentos anteriores.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

3. DESCARGAS DE AGUA DULCE

3.1. Planteamiento de los experimentos

A diferencia del análisis previo, donde el objetivo era implementar una serie de marea meteorológica sintetizada en el modelo bajo distintas condiciones temporales, y estudiar su respuesta en términos de residuo meteorológico, el objetivo en este último conjunto de experimentos es implementar un caudal sintetizado asociado a causas puramente antrópicas, y estudiar la repuesta del modelo. Por ende, a lo largo de esta sección se entiende por residuo aquel que se origina a causa de las descargas y no como consecuencia de un forzamiento meteorológico-oceánico.

Para el estudio de la respuesta del modelo a las descargas de agua dulce el procedimiento es similar al que se ha descrito hasta ahora. Siguiendo el mismo esquema que en el estudio anterior, se han sintetizado distintos caudales de agua dulce (denominados Q en este caso), siempre de valor positivo, cuyo perfil temporal es de la misma índole que en el caso meteorológico-oceánico (ver Figura 2). Estos han sido implementados en la presa de Alcalá del Río, debido a su mayor importancia en cuanto a aporte de agua dulce con respecto al resto de presas del Guadalquivir (ver ST321 para más detalles sobre las presas disponibles, Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020b). En la distribución cumulativa empírica de los aportes de esta presa, representada en la Figura 15 del informe ST321 (Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020b), se muestra que el percentil 75 es 54 m^3/s, lo que significa que al menos durante tres cuartos del tiempo, la presa proporciona un caudal por debajo de este valor. Por tanto, con el fin de seleccionar un caudal sintetizado lo más próximo al régimen normal de la presa, y así proporcionar un estudio de respuesta a las descargas lo más ajustado posible a la realidad, se han escogido los valores de caudal de 0 a 60 m^3/s con un intervalo de 15 m^3/s. En la Figura 15 se esquematizan los perfiles simplificados en base a esta serie de caudal.

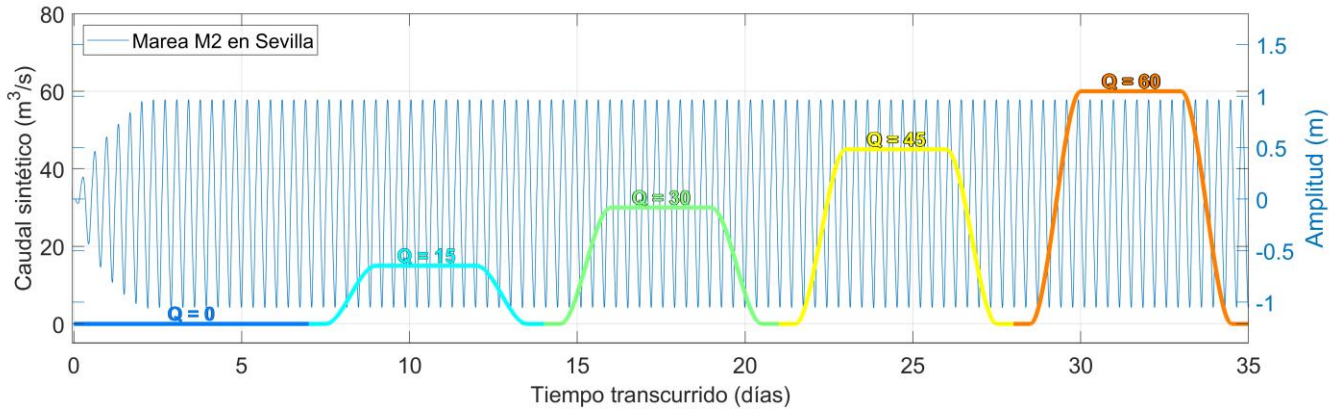

Figura 15. Prototipos de descargas de agua dulce en m^3/s en cm para las 5 Q seleccionadas (eje izquierdo), siendo azul el prototipo de caudal mínimo (Q = 0 cm, descarga nula) y naranja el máximo (Q = 60 m^3/s), frente a la serie del nivel del mar en el mareógrafo de Sevilla. El periodo del nivel del mar representado comprende el intervalo temporal del 26/11/2019 al 31/12/2019.

La serie implementada en el modelo y representada en la Figura 15 está precedida, al igual que en el caso anterior, por un periodo de ajuste del modelo a las condiciones astronómicas y de descargas impuestas de 3 días.

3.2. Resultados

Del mismo modo que en el conjunto de experimentos meteorológicos, lo primero que se ha de hacer al obtener las salidas del modelo, es hacer una comparación correlativa entre el perfil implementado en la simulación y la serie de residuo modelada, con la aplicación o no de un filtrado de paso-bajo (Godin, 1972) que elimine las oscilaciones mareales de periodicidad diaria. La Figura 16 compara la serie temporal de ambos residuos en el PK-Esclusa, ubicado en las inmediaciones de la cabecera.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

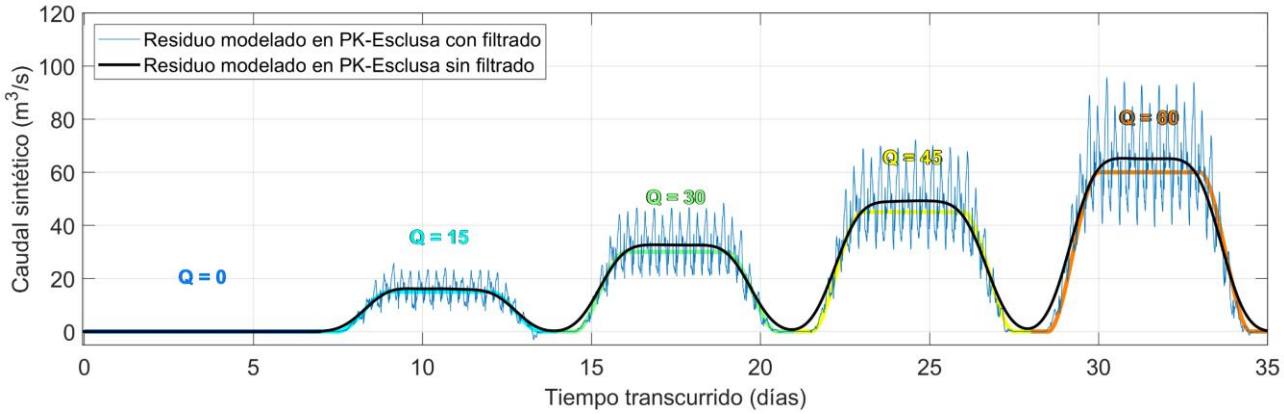

Figura 16. Prototipos de caudal sintetizado (representados también en la Figura 15) frente al residuo modelado en cm con la aplicación (línea negra) o no (línea azul) de un filtrado de paso bajo (Godin, 1972) que elimina las oscilaciones de periodicidad mareal.

La Figura 16 confirma, a simple vista, la mayor variabilidad en la serie no filtrada con respecto a la serie filtrada. En términos generales, se puede decir que el nivel de correlación en ambos casos es elevado. No obstante, dado que el residuo al que se le está aplicando el procesado está enmascarado por una variación de origen no físico, el ajuste de la serie filtrada al perfil original empeora en comparación con la observada en el caso anterior.

En el estudio de respuesta del modelo a las descargas, hay un aspecto clave que ha de tenerse en cuenta. Mientras que en el caso anterior se imponía un forzamiento meteorológico en la desembocadura y se determinaba su respuesta a lo largo del estuario en dirección a la Esclusa, en este caso, se impone un forzamiento de descargas en la cabecera y se pretende evaluar su respuesta a lo largo del estuario en dirección a Chipiona. En base a este hecho, es esperable que el máximo valor de correlación entre la serie implementada y modelada se encuentre en las estaciones más próximas a la parte alta del estuario. La Tabla 2 resume los coeficientes de correlación entre ambas series que corroboran este razonamiento. Para determinar la serie de residuo más ajustada al perfil original, se muestran las comparaciones con y sin la aplicación del filtrado paso-bajo.

Tabla 2. Índices de correlación de Pearson (ρ) y error cuadrático medio (rmse, en cm) entre la serie del caudal sintetizado implementado a la simulación y la serie de residuo modelado. Las estadísticas se muestran para el residuo al que se le ha aplicado un filtro para suprimir las oscilaciones a escala mareal y para el residuo no filtrado.

	Residuo sintetizado *input* vs. *output*			
	Filtrado		**No Filtrado**	
	P	**rmse (cm)**	**P**	**rmse (cm)**
Chipiona	0.03	0.43	0.01	0.01
Bonanza	0.53	0.43	0.45	0.17
Salinas	0.63	0.43	0.68	0.19
Puntalete	0.70	0.42	0.72	0.22
Gola	0.80	0.42	0.79	0.28
Canal Nuevo	0.84	0.42	0.84	0.32
Lisa	0.91	0.43	0.92	0.32
Olivillos	0.93	0.43	0.95	0.29
Majano	0.94	0.44	0.96	0.28
Esclusa	0.97	0.45	0.96	0.47

Como era esperable, los coeficientes de la Tabla 2 reflejan un alto nivel de correlación en las estaciones más próximas a la cabecera del estuario, alcanzándose en la Esclusa el valor máximo, con un índice de 0.97 en el caso

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

filtrado y 0.96 en el no filtrado. Desde la cabecera en dirección a la desembocadura, las correlaciones experimentan un considerable decaimiento de su índice a consecuencia de la distancia entre la fuente de variación y el PK. La mínima correlación se alcanza en Chipiona, donde el coeficiente es de 0.03 en el caso del residuo filtrado y 0.01 en el no filtrado, cifras muy poco relevantes en la comparación entre PKs y que pueden considerarse como correlación nula. Como se ha mencionado antes el rmse resulta, en promedio, mayor en el residuo filtrado que en el no filtrado. No obstante, en base a los índices de correlación más elevados presentados por la serie filtrada, y con el fin de mantener cierta coherencia metodológica con el análisis anterior, para el cálculo de ganancia y desfase se ha optado por emplear la serie filtrada.

La Figura 17 refleja la pérdida progresiva de amplitud del residuo desde la estación de la Esclusa hasta Chipiona.

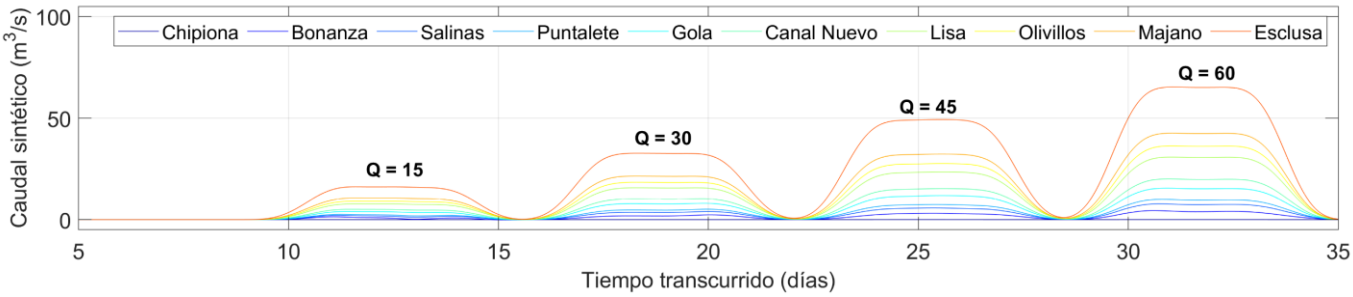

Figura 17. Perfiles del residuo extraído del modelo en los 10 PKs para los 4 valores de Q en m^3/s implementados en el modelo.

Los perfiles representados en la Figura 17 confirman la influencia que tiene la distancia entre la fuente de variación, en este caso Alcalá del Río, y un punto cualquiera del estuario, en este caso los PKs, en la respuesta del modelo. Esclusa, al ser la estación más cercana a Alcalá del Río, muestra el mayor valor de amplitud. A partir de Esclusa, las amplitudes disminuyen considerablemente, llegando a una amplitud nula en Chipiona.

En base a la información recopilada, es razonable afirmar que la ganancia alcanzará su máximo valor en la cabecera y el mínimo en la desembocadura. La forma en la que se cuantifica la ganancia en este experimento sigue el mismo procedimiento que el conjunto de experimentos anterior (ver Figura 7), pero cambian sus dimensiones. En el caso anterior se hacía un cálculo de ratio entre el nivel implementado y el extraído del modelo en cm, por lo que se obtenía una función adimensional, mientras que, en este caso, el ratio se ha de calcular entre el nivel extraído del modelo en cm, y el valor del caudal original en m^3/s, con lo cual se obtiene un ratio cuyas unidades son cm/m^3s^{-1}. Por otro lado, en lugar de tomar la estación de Chipiona como referencia para el cálculo con respecto a otros PKs, por los motivos expuestos, se ha tomado como referencia un punto extraído en el nodo del dominio más cercano a la presa de Alcalá del Río y, por tanto, al origen de las descargas de agua dulce.

La Figura 18 muestra la evolución espacial que sigue la función de ganancia originada por las descargas en el estuario.

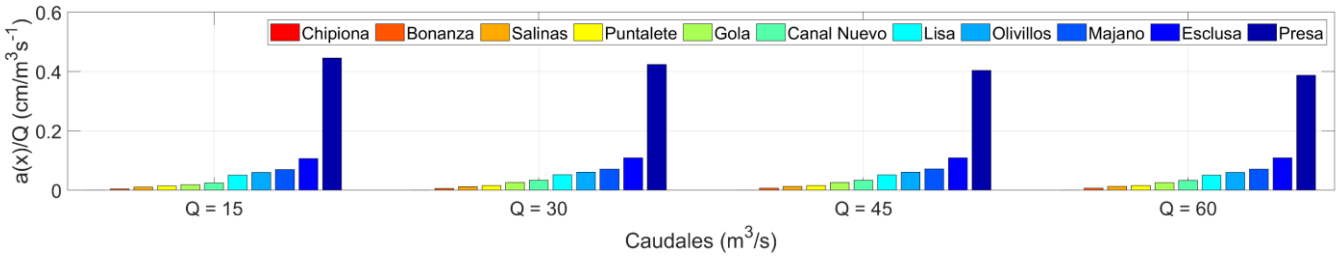

Figura 18. Diagrama de barras del ratio entre la amplitud alcanzada en la meseta ($a(x)$) en cm y el caudal sintetizado en m^3/s.

El patrón de disminución de la ganancia con la distancia desde la Presa, es idéntico para todos los caudales analizados, hecho que refleja la independencia de la amplitud de la descarga con la respuesta que se observa a lo

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

largo del cauce. Los valores oscilan desde 0.1 cm/m^{3}s^{-1} en la Esclusa, donde un caudal de 60 m^3/s genera un residuo de 6 cm, hasta los 0.016 cm/m^{3}s^{-1} en Puntalete, donde no se supera el cm de residuo con el mismo caudal.

El cálculo del tiempo de desfase entre la Presa y el resto de los PKs tiene una dificultad añadida en los puntos más cercanos a la desembocadura, que es la pérdida de la forma del perfil y, por tanto, la dificultad para localizar el momento en el que comienza a manifestarse la perturbación. La Figura 17 permite comprobar que las últimas 3 estaciones antes de llegar a la desembocadura, presentan un perfil de forma prácticamente plana, sin apenas indicios de rampa. Por tanto, las estaciones de Chipiona a Salinas, no se han considerado. Por otro lado, con las ganancias calculadas, el caudal de 15 m^3/s presenta residuos que, en el mejor de los casos, apenas superan 1.5 cm (Bonanza), la señal queda enmascarada por la marea y, por tanto, no se ha calculado el desfase para este valor del caudal. La Figura 19 muestran el patrón de variación del desfase en función del caudal.

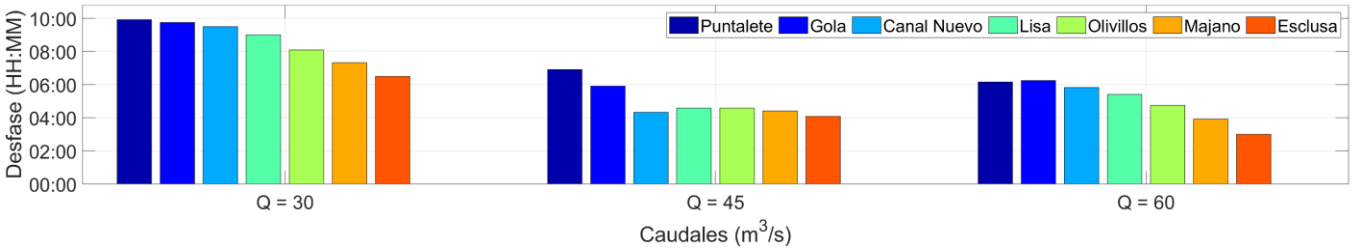

Figura 19. Tiempos de desfase entre la presa de Alcalá del Río y el resto de los puntos kilométricos hasta Puntalete en formato HH:MM.

La tendencia de desfase en aumento en las estaciones conforme éstas se alejan del punto inicial (Figura 19), es la misma que se observa en la Figura 10 para el caso meteorológico-oceánico. Como es esperable, el PK-Esclusa, por ser la estación más cercana a la Presa, presenta el mínimo retraso. El patrón para los caudales 30, 45 y 60 m^3/s es muy similar, y las pequeñas discrepancias se deben muy probablemente a distorsiones locales del frente (bore) de descarga que interacciona con la onda de marea.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

4. CONCLUSIONES DE LA 33

Con el objeto de aplicar el modelo hidrodinámico del Guadalquivir como una herramienta de predicción de la altura de la superficie libre, se ha llevado a cabo una segunda aplicación de éste, en el que se ha estudiado su respuesta a distintos valores de amplitud meteorológica-oceánica y caudal sintetizadas.

Se han llevado a cabo dos conjuntos de experimentos y dos análisis de sensibilidad. Para cada conjunto, se han escogido 18 amplitudes de residuo sintetizado implementadas en la desembocadura, que oscilan desde altas (residuos negativos) hasta bajas presiones (residuos positivos) y 5 caudales sintetizados implementados en la cabecera de valor siempre positivo. El perfil o prototipo en ambos casos se ha diseñado de la misma manera: se comienza por una rampa ascendente (o descendente en ciertos casos del conjunto meteorológico, dependiendo del valor que tenga éste) de 2 días de duración a la que le sigue un periodo de meseta de 3 días, considerada como tiempo de efecto de la perturbación constante. A la meseta le sigue otro periodo de rampa descendente, de la misma índole que la primera (o ascendente, por el mismo motivo mencionado) de 2 días. En total se han considerado 7 días de perfil para ambos casos.

De manera adicional, se han llevado a cabo dos análisis de sensibilidad del residuo meteorológico sintetizado donde se han variado los días de rampa de 1 a 2.5 días, con paso 0.5 días, y los días de rampa de 2 a 6 días, con paso de 1 día. En ambos se han obviado las duraciones ya calculadas en el primer conjunto de experimentos.

En los dos conjuntos de experimentos, se ha encontrado una alta correlación entre el residuo implementado en el modelo y el residuo extraído de la simulación. Se ha comparado el residuo modelado procesado con y sin la aplicación de un filtro de paso-bajo, y se ha encontrado que el filtrado presentaba un mayor nivel de correlación.

Con este residuo se ha calculado, por un lado, la función de ganancia, como el ratio entre la amplitud alcanzada en la perturbación ($a(x)$) y la amplitud sintetizada implementada en el modelo (A) y, por otro, el tiempo de desfase, calculado como la diferencia entre el tiempo inicial en el que se manifiesta la perturbación en el punto donde se implementa el forzamiento (t_0) y el tiempo en el que se manifiesta la perturbación en el resto de puntos seleccionados para el estudio ($t(x)$).

En ambos conjuntos de experimentos, el valor de la ganancia en el punto de comienzo de la perturbación (Chipiona para el residuo meteorológico y Presa de Alcalá del Río para las descargas) es máxima y ésta decae conforme la estación se aleja. El tiempo de desfase en ambos casos muestra una tendencia de aumento, con un mayor desfase en las estaciones más lejanas y de menor amplitud, por su menor cercanía con el fondo en este caso.

Finalmente, para cada análisis de sensibilidad se ha podido comprobar que el modelo responde con igual eficacia que en el primer experimento, independientemente de la duración del plateau y de la rampa especificados.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PILOTO

El piloto propuesto por GOFIMA está dirigido a proporcionar una corrección del nivel del río simulado por el modelo numérico, basada en el efecto combinado de la marea meteorológica y las descargas de agua dulce. En base a los análisis llevados a cabo en las anteriores tareas del proyecto (ST320 (Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020a), ST321 (2020b) y ST322 (2020c), se ha podido establecer con muy buen margen de precisión la relación entre los dos forzamientos citados y el residuo del nivel del río, a lo largo del cauce. El objetivo final es implementar una herramienta que sea capaz de prescribir el residuo del nivel del río a lo largo de la vía navegable, a partir de las predicciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología, y sumar este término a la predicción astronómica del modelo numérico, proporcionando un valor final del espesor de la lámina de agua corregido por estos fenómenos.

En las secciones anteriores se ha podido evaluar la variabilidad de las ganancias entendidas como ratio entre la señal forzante y el residuo medido, en función tanto de la propia magnitud del forzamiento, como de la distancia de éste al PK de interés. Las especificaciones técnicas que siguen a continuación se aplican al residuo meteorológico impuesto en la desembocadura, aunque el enfoque es directamente extensible a las descargas de agua dulce en la presa.

En el entregable 3.2.0 se establecía una relación directa entre la variación de presión atmosférica y el efecto que ésta provocaría en términos de bajada o subida del nivel medio del mar (ST320; Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020a). Este fenómeno se conoce como efecto del barómetro invertido y prescribe una bajada (subida) del nivel del mar de 1 cm para cada mb de subida (bajada) de presión, aproximadamente. En ese documento se comprobaba también que el efecto debido al arrastre directo del viento en la superficie del mar era despreciable respecto al efecto barométrico, y se obtenía la mejor estima de la ecuación de transformación de presión atmosférica p (mb) a residuo meteorológico r (cm):

$$r = -0.87p + 882.79$$

con un R^2 de 0.88. El valor del coeficiente -0.87 cm/mb, está muy próximo al -1 cm/mb teórico.

Una vez derivado el residuo a partir de la presión atmosférica se ha estudiado su evolución a lo largo de la vía navegable, estimando el factor ganancia como una función $G(x, A)$ donde x es la distancia del PK a la desembocadura (Chipiona se fija como PK0 de referencia para la corrección por forzamiento meteorológico) y A es la amplitud del propio residuo.

Sobre el conjunto de resultados obtenidos en las simulaciones iterativas descritas en la sección 2, se van a realizar una serie de ajustes de mínimos cuadrados de funciones polinomiales de orden m (posiblemente de 3º o 4º grado):

$$Y = f(x) = c_1 x^m + \cdots + c_m x + c_{m+1}$$

para establecer una matriz de $m + 1$ coeficientes por n valores de amplitud A de la señal forzante:

$$M = f(A) = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{m+1,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1,n} & \cdots & c_{m+1,n} \end{bmatrix}$$

Las $m + 1$ series de coeficientes serán sometidas a otros ajustes de mínimos cuadrados para establecer $m + 1$ funciones analíticas de variación de los coeficientes con la amplitud A (Figura 20).

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

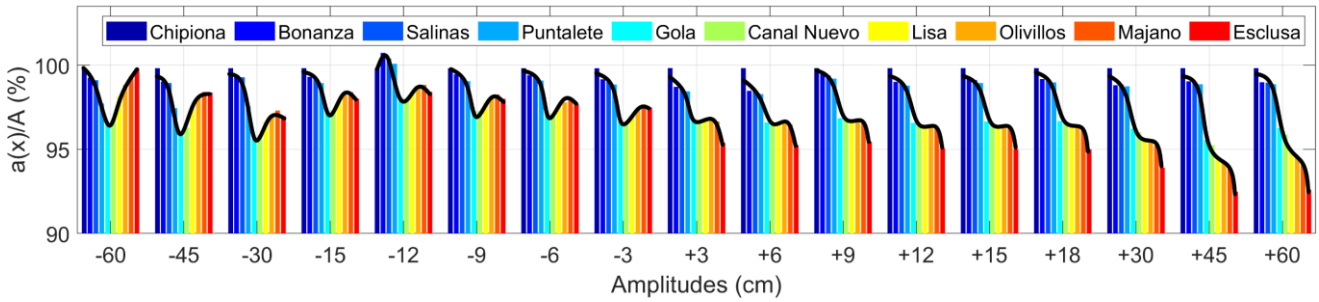

Figura 20. Ejemplo de funciones polinomiales de 4º grado (líneas gruesas negras) ajustadas a las ganancias calculadas en la Figura 8.

El resultado final es una única función analítica $R = f(x, A)$ continua, que prescribe el valor del residuo estimado a una distancia x de la desembocadura, dada una amplitud A del residuo meteorológico.

Esta función R, evaluada para la serie de amplitudes predichas por los modelos atmosféricos de la AEMET en el horizonte temporal correspondiente (generalmente 72 h), devolverá los residuos meteorológicos del nivel del río, en los PK requeridos. Estos valores se sumarán a la predicción astronómica del modelo numérico del río para proporcionar la mejor estima del espesor de la lámina de agua afectado por la marea meteorológica (Figura 21).

Figura 21. Esquema funcional del piloto.

El mismo enfoque se aplicará a los datos de descargas de aguas dulces en la presa, siempre y cuando se pueda disponer de predicciones de caudales en el mismo horizonte temporal que las predicciones meteorológicas. Los aspectos técnicos de la implementación del piloto se detallarán en la Actividad 4.

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.

6. BIBLIOGRAFÍA

Godin, G. (1972) The analysis of tides . University of Toronto Press, Toronto, Canadá, 264 pp.

Grupo de Oceanografía Física (2017). Oscilaciones (mareales) del nivel del Río con respecto al cero de Alicante. Autoridad Portuaria de Sevilla, 12 pp.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2019). Actividad 2 - Nota Técnica. Cálculo de los traspasos en la vía navegable. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2020a). Actividad 3 – Subtarea 3.2.0. Descripción y Estimación de la Marea Meteorológica. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2020b). Actividad 3 – Subtarea 3.2.1. Validación/ calibración del modelo numérico incluyendo los efectos de las mareas astronómica, meteorológica y descargas. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2020c). Actividad 3 – Subtarea 3.2.2. Predicción del espesor de lámina de agua en distintos puntos del estuario y para periodos de tiempo seleccionados. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

Sistema Portus, Puertos del Estado, https://www.portus.puertos.es

Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.