

### III. OTRAS DISPOSICIONES

#### MINISTERIO DE FOMENTO

**2948** *Resolución de 12 de julio de 2016, de la Autoridad Portuaria de Sevilla, por la que se publica el Convenio de investigación con la Universidad de Málaga, para la elaboración de un «Modelo hidrodinámico numérico tridimensional del estuario del Guadalquivir y zonas aledañas».*

De acuerdo con lo dispuesto en el art. 8.2 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, procede la publicación, en el «Boletín Oficial del Estado», del Convenio de investigación entre la Universidad de Málaga y la Autoridad Portuaria de Sevilla para la elaboración de un «Modelo hidrodinámico numérico tridimensional del estuario del Guadalquivir y zonas aledañas», que figura como anexo a esta Resolución.

Sevilla, 12 de julio de 2016.—El Presidente de la Autoridad Portuaria de Sevilla, Manuel Gracia Navarro.

#### ANEXO

#### **Convenio de investigación entre la Universidad de Málaga y la Autoridad Portuaria de Sevilla para la elaboración de un «Modelo hidrodinámico numérico tridimensional del estuario del Guadalquivir y zonas aledañas»**

En Sevilla, a 25 de enero de 2016.

#### REUNIDOS

De una parte, la Universidad de Málaga, en lo sucesivo UMA, con CIF Q-2918001-E y domicilio social en Málaga, avda. de Cervantes, n.º 2, y en su nombre y representación el Excmo. Sr. don José Ángel Narvárez Bueno, con DNI 24.824.890-R, como Rector Magnífico de la Universidad de Málaga, actuando en nombre y representación de dicha Institución, en ejercicio de las atribuciones que tiene conferidas en el artículo 20.1 de la Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades y en el artículo 32.1 de los Estatutos de la Universidad de Málaga, aprobados por Decreto de la Junta de Andalucía 145/2003, de 3 de junio (BOJA n.º 108, de 9 de junio de 2003).

De otra parte, la Autoridad Portuaria de Sevilla, en lo sucesivo APS, con CIF Q-4167008-D, domicilio social en Sevilla, avda. Molini, n.º 6, y en su nombre y representación don Manuel Gracia Navarro, con DNI 30.006.993-C, Presidente, de acuerdo con las funciones que tiene encomendadas por el artículo 31.2.a) del T.R. de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante, aprobado por RDL 2/2011.

Todos actuando en nombre y representación de las citadas entidades se reconocen mutua y recíprocamente con capacidad jurídica suficiente y necesaria para este acto y proceden a suscribir el presente Acuerdo y, a tal efecto,

#### EXPONEN

Primero.

La UMA es un Centro Público de Investigación de carácter multisectorial y pluridisciplinario que desarrolla actividades de investigación y desarrollo científico y tecnológico.

En dicho ámbito, la UMA cuenta con el Grupo de Investigación de Oceanografía Física (GOFIMA en lo sucesivo), creado en 1990, el cual centra su investigación en la región oceánica de las costas andaluzas, Mar de Alborán, Golfo de Cádiz y Estrecho de Gibraltar. Recientemente ha incorporado nuevas líneas de investigación enfocadas al estudio de procesos costeros y estuarinos, como por ejemplo el Estuario del Guadalquivir.

Forma parte de los Grupos Consolidados del Plan Andaluz de Investigación (RNM137) y tiene una continuada participación en Proyectos de Investigación tanto nacionales como europeos cuya área de interés es la zona mencionada. Ha colaborado con la mayor parte de los grupos de investigación nacionales y extranjeros que centran su investigación en esta área.

El grupo de trabajo estará liderado por el investigador responsable don Jesús García Lafuente (Catedrático de la Universidad de Málaga, y profesor de la ETSI de Telecomunicación) y coliderado por don Javier Delgado Cabello, profesor en la misma Universidad y Centro. Tanto el investigador responsable como el grupo de investigación cuentan con un destacable experiencia en investigación e innovación (se aporta como Anexo n.º 1 breve síntesis de la actividad desarrollada por el Grupo de Investigación de oceanografía física de la Universidad de Málaga y síntesis del CV de los investigadores responsables don Jesús García Lafuente y don Javier Delgado Cabello).

Segundo.

La APS, de conformidad con lo dispuesto en el art 24.1 del Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado, aprobado por RDL 2/2011, es un Organismo Público, con personalidad jurídica y patrimonio propios, independientes del Estado, así como plena capacidad de obrar, que en el ejercicio de sus competencias aglutina a un número importante de Administraciones y empresas marítimas-portuarias e industriales que relacionan o desarrollan su actividad en el Puerto de Sevilla, aprovechando las infraestructuras propias de la Autoridad Portuaria de Sevilla, así como las existentes en cada una de las distintas concesiones o autorizaciones administrativas otorgadas en la zona de servicio del Puerto. La Autoridad Portuaria de Sevilla tiene entre sus fines principales fomentar, con criterios de sostenibilidad, las actividades industriales y comerciales relacionadas con el tráfico marítimo o portuario y la cultura marítima, medioambiental, logística e industrial. Entre sus competencias, tiene encomendada la gestión del dominio público portuario que tiene adscrito, en cual se incluye la lámina de agua de la Ría del Guadalquivir, desde la presa de Alcalá del Río hasta Chipiona, cuyo régimen legal de planificación y utilización está previsto en el referido texto legal, donde su ubica la Canal de Navegación Eurovía Guadalquivir E-60-02.

Al respecto, se destaca que la navegación en el Guadalquivir es una actividad milenaria vinculada indisolublemente a la ciudad, y por ende a su Puerto. En este sentido, y de acuerdo con su Plan Director, la APS está impulsando la transformación del recinto portuario en Sevilla en un centro de servicios a la logística y el transporte bajo esquemas de sostenibilidad y eficiencia comodal, disponiendo, dada la naturaleza de sus activos y operaciones, de una especial capacidad para ofrecer y facilitar el asentamiento de nuevas actividades productivas de carácter logístico e industrial, para las cuales el transporte marítimo y/o la disponibilidad de espacio adecuado sea un factor de competitividad, todo ello en un marco de sostenibilidad ambiental y social.

Para ello, resulta necesario e imprescindible el continúa aumento del conocimiento científico y técnicos de dicho complejo ámbito.

Tercero.

En este sentido, resulta necesario e imprescindible para la operativa y desarrollo de las infraestructuras portuarias desarrollar, validar, calibrar y adaptar un modelo numérico tridimensional que posibilite entender e integrar la información de este complejo ecosistema y proporcione una herramienta científica y visual que permita proyectar el Estuario del Guadalquivir bajo la evolución de diferentes condiciones iniciales: variaciones de la

batimetría, variaciones de la geometría, posibilidad de inundar áreas (inclusión de llanuras mareales), variaciones en el régimen de descarga, variaciones de las condiciones atmosféricas en la desembocadura.

El modelo a elaborar (I+D+I) tiene un grado de complejidad muy alto puesto que además de su objetivo principal de simular procesos hidrodinámicos pretende ofrecer también la posibilidad de acoplar modelos de transporte de sedimento, de procesos biogeoquímicos y/o de dispersión de trazadores o de variables pasivas, con los siguientes objetivos específicos:

1. El modelo ha de contribuir a la optimización de la navegación por el estuario, prediciendo para ello el espesor de la lámina de agua en el estuario a lo largo de los ciclos mareales, pudiéndose derivar de ello el aumento de los calados disponibles para la navegación.

2. El modelo ha de evaluar las modificaciones hidrodinámicas que pudieran ser consecuencia de los cambios en la topografía y batimetría del cauce ocasionadas por los dragados de mantenimiento del estuario.

3. El modelo ha de evaluar la influencia de la posible inundación de llanos mareales (hoy día reducidos en más del 70 %) en la hidrodinámica del estuario, caso de que se adoptasen políticas de recuperación de los mismos.

4. El modelo ha de evaluar el régimen hidrodinámico en función de las descargas producidas desde la presa de Alcalá del Río.

5. El modelo ha de permitir hacer estudios predictivos sobre la evolución a largo término de la hidrodinámica del estuario bajo distintos escenarios de subida del nivel del mar debido al calentamiento global.

6. El modelo ha de poder simular la dispersión de elementos en suspensión al objeto de pronosticar la evolución de vertidos accidentales en el estuario y predecir qué zonas pudiesen verse más afectadas, para poder predecir y minimizar los dragados de mantenimiento a ejecutar.

7. El modelo ha de evaluar la evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario y el alcance de la cuña salina en su interior bajo distintos escenarios mareales, estacionales, de descargas de agua en la presa y de otros factores.

8. El modelo ha de permitir acoplar un módulo de sedimentos que permita abordar procesos de exportación/importación de sedimentos y sedimentación y la identificación de tramos más sensibles a la erosión.

9. El modelo ha de permitir acoplar un módulo biogeoquímico con el que pudiera abordarse estudios de la distribución y evolución de diferentes parámetros físico-químicos tales como oxígeno disuelto, dióxido de carbono y turbidez.

Se adjunta como Anexo n.º 2 la memoria técnica de los trabajos a realizar. Corresponde con un proyecto de I+D+i con el objeto de «Elaboración de un modelo hidrodinámico numérico tridimensional del Estuario del Guadalquivir y zonas aledañas».

Cuarto.

En dicho ámbito, la UMA y la APS comparten una firme vocación de contribuir al desarrollo de actividades de investigación y científicas que posibiliten la generación y desarrollo de nuevo conocimiento científico y soluciones innovadoras que potencien el impulso de la gestión del Puerto de Sevilla relacionada con nuevos proyectos en el ámbito portuario y todo ello en un marco de sostenibilidad ambiental.

El interés mutuo (UMA y APS) por colaborar estrechamente en materia de asesoramiento e investigación científica, ha propiciado la firma del presente acuerdo,

Quinto.

El presente convenio se suscribe de conformidad con lo preceptuado en el art 34 de la Ley 14/2011, de 1 de junio, de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, dado el contenido del mismo en I+D+i, y art 6 de la Ley 30/1992 de régimen jurídico de las Administraciones

Públicas y del Procedimiento Administrativo Común no coincidiendo con el de ninguno de los contratos regulados en la legislación sobre contratos del sector público. Artículos 4.1 r) y en el artículo 13.2.b), ambos del Texto Refundido de la Ley de Contratos del Sector Público y en el artículo 18.d) de la Ley 31/2007, de 30 de octubre.

Sexto.

Los trabajos a desarrollar se circunscribe en el ámbito del programa de investigación que se ejecuta por la Universidad de Sevilla, Laboratorio de Biología Marina (LBMUS) bajo la dirección del catedrático D. Jose Carlos García Gómez.

Séptimo.

En base a todo lo anteriormente expuesto, y dada la convergencia de propósitos, las partes acuerda suscribir el presente acuerdo para la ejecución y desarrollo del Proyecto «Elaboración de un modelo hidrodinámico numérico tridimensional del Estuario del Guadalquivir y zonas aledañas»

No se incluyen en todo caso actividades de desarrollo comercial como la producción o el suministro a gran escala para determinar la viabilidad comercial o recuperar los gastos de I+D+i, la integración o la adaptación y los ajustes y las mejoras añadidos a productos o procesos existentes.

Octavo.

Finalmente, las partes manifiestan que es su común voluntad la de consolidar una situación de colaboración, de tal manera que el presente Acuerdo debe ser interpretado en cuanto favorezca la permanencia de buena fe de esa relación, sobre las bases que aquí se establecen

En virtud de lo anterior vienen a suscribir el presente Acuerdo sobre la base de las siguientes

#### ESTIPULACIONES

Primera. *Objeto.*

El objeto del presente acuerdo es la ejecución y desarrollo del Proyecto de I+D+i «Elaboración de un modelo hidrodinámico numérico tridimensional del Estuario del Guadalquivir y zonas aledañas», adjuntándose copia a la presente como Anexo nº 2 y se da íntegramente por reproducido.

No se incluyen en todo caso actividades de desarrollo comercial como la producción o el suministro a gran escala para determinar la viabilidad comercial o recuperar los gastos de I+D+i, la integración o la adaptación y los ajustes y las mejoras añadidos a productos o procesos existentes.

Segunda. *Equipo técnico. Dirección de los trabajos.*

2.1 Las partes convienen en la necesidad de contar con medios de relación francos, directos y estables.

2.2 En este sentido, para la debida ejecución y control de las actuaciones, el equipo técnico estará dirigido por D. Jesús García Lafuente, en calidad de investigador responsable y D Javier Delgado Cabello como co-responsable, así como del personal que ellos designen del adscrito a la UMA entre los que pudieran estar interesados en participar en la ejecución del proyecto objeto del presente acuerdo, debiendo dar conocimiento del equipo de trabajo en cada momento a la APS.

2.3 Todo aviso, solicitud o comunicación que las partes deban realizarse en virtud de este acuerdo, se efectuará a las siguientes direcciones:

APS	UMA
Comunicaciones de carácter técnico.	Comunicaciones de carácter técnico.
Don Angel Pulido Hernández. Director. Avda. Molini n.º 6. 41012 Sevilla. Tfno: 954-24-73-09. E-mail: dirección@psevilla.com	Don Jesus García Lafuente. Catedrático de Universidad. ETSI Telecomunicación, Campus Teatinos s/n. 29071 Málaga. Tlfno: 952-13-27-21. E-mail: glafuente@ctima.uma.es
Comunicaciones de carácter administrativo.	Comunicaciones de carácter administrativo.
Don Joaquin Vera Sánchez. Avda. Molini n.º 6. 41012 Sevilla. Tfno: 954-24-73-06. E-mail: jvera@psevilla.com	Doña Coral Erades Pina. OTRI-Edificio Institutos Universitarios. C/. Severo Ochoa, 4. Parque Tecnológico de Málaga. 29590 Málaga. E-mail: otri@uma.es

Tercera. *Comisión de seguimiento. Presentación de informes sobre los trabajos desarrollados.*

3.1 El seguimiento de los trabajos desarrollados y resultados de los mismos se realizará a través de una Comisión de Seguimiento que se desarrollarán al menos con una periodicidad trimestral con carácter ordinario, y con carácter extraordinario cuando alguna de las partes lo solicite. Las convocatorias serán realizadas por el Presidente de la Comisión.

Dicha Comisión de seguimiento estará presidida por don Jose Carlos García Gómez, y forman parte de la misma don Jesús García Lafuente como investigador responsable, el Director de la Autoridad Portuaria de Sevilla, el Jefe del Departamento de Infraestructuras de la Autoridad Portuaria de Sevilla y don Javier Delgado Cabello como representante del grupo de investigación de la UMA.

A las sesiones de la Comisión de Seguimiento podrán asistir como asesores invitados, los técnicos o expertos que se estime conveniente por razón de las materias a tratar, por parte de cualquiera de las partes suscribientes.

3.2 La Comisión de Seguimiento podrá crear grupos de trabajo que analicen la ejecución del proyecto.

3.3 UMA presentará informes de seguimiento con periodicidad semestral, que recojan los trabajos realizados, y en su caso las conclusiones alcanzadas, soluciones y propuestas de actuación, así como un breve índice de las actividades que se desarrollaran durante el siguiente trimestre. Igualmente, emitirá con el mismo contenido un informe final con anterioridad al 30/06/2017.

Dichos documentos deberán ser titulados a nombre de la Autoridad Portuaria de Sevilla o de la persona o entidad que se designe.

Cuarta. *Derechos de los trabajos realizados.*

4.1 La totalidad de los derechos de los trabajos realizados, incluidos en todo caso los de propiedad intelectual e industrial corresponderán en proindiviso, con los siguientes porcentajes: a la APS (50 %), a UMA (50%).

4.2 Los referidos derechos y resultados podrán ser utilizados o difundidos, total o parcialmente mediante común acuerdo entre la APS y UMA. En todo caso, se autorizará expresamente a UMA, a que el resultado de los trabajos pueda ser utilizados para la enseñanza académica, para la publicación de artículos en revistas o medios de divulgación del conocimiento científico y para su difusión pública y sin restricciones ni contraprestación y a la APS la utilización, igualmente sin restricciones ni contraprestación, de los resultados

obtenidos en el diseño de operaciones, obras, infraestructuras y en la explotación, con medios propios o de terceros, en el Puerto de Sevilla, así como para su cesión sin contraprestación ni restricción a otras Administraciones Públicas europeas para el ejercicio de sus competencias propias.

Quinta. *Vigencia.*

5.1 El presente acuerdo tendrá duración desde la fecha de su firma hasta el hasta el 28 de mayo de 2017.

5.2 No obstante, el presente acuerdo podrá resolverse antes de cumplirse el período de vigencia establecido, cuando concurra alguna de las siguientes circunstancias:

- Incumplimiento por algunas de las partes de las Cláusulas del Acuerdo, lo que se comunicará por escrito, aquella que la invoque, a la otra de manera fehaciente, previa audiencia de la misma y con un mes de antelación. En especial, se subraya el incumplimiento de la obligación de que los contratos derivados que pudieran ser necesarios para la ejecución y desarrollo del proyecto no sean objeto de publicidad, concurrencia, transparencia, confidencialidad, igualdad y no discriminación y de elección de la oferta económicamente más ventajosa.

- Mutuo acuerdo de las partes.
- Imposibilidad de desarrollo del proyecto, previo informe del Comité de Seguimiento del Proyecto.

Sexta. *Resolución.*

En el supuesto de que el objeto y especificaciones del acuerdo no pudiesen llevarse a cabo por incumplimiento de los compromisos de cualquiera de las partes, la APS quedará relevada del compromiso de abonar cualquier cantidad a partir del momento de dicho incumplimiento, si es el caso, quedando obligada la UMA a restituir a las cantidades percibidas no justificadas con trabajo entregados y realizados.

En todo caso, si la imposibilidad de cumplir el objeto del acuerdo se debiese a cualquier otra causa ajena a la voluntad de UMA, se aplicará idéntica previsión en lo referido a las cantidades pendientes de abono, si bien, por lo que se refiere a las ya percibidas, no deberán ser restituidas.

Séptima. *Modificación del acuerdo.*

El presente acuerdo podrá ser modificado por mutuo acuerdo de las partes, a petición de cualquiera de ellas. Las modificaciones entrarán en vigor en la fecha en que sean acordadas por las partes.

Octava. *Aportaciones de las partes y desglose presupuestario.*

8.1 La APS aportará y abonará a UMA hasta la cantidad máxima total de 115.000 € (IVA no incluido, incluidos costes indirectos), para el desarrollo del proyecto «Elaboración de un modelo hidrodinámico numérico tridimensional del Estuario del Guadalquivir y zonas aledañas.» Se adjunta como Anexo n.º 3 Presupuesto.

8.2 La dirección de la ejecución de dichos trabajos corresponderá a los investigadores de GOFIMA D. Jesús García Lafuente como responsable y don Javier Delgado Cabello como co-responsable, quienes deberán emitir informe justificativo con carácter previo al abono por la APS de cualquier certificación relativa a los trabajos realizados, y ello sin perjuicio de cualquier otro requisito que resulte necesario acreditar al respecto ante la APS por cada uno de los adjudicatarios. GOFIMA se responsabiliza frente a la APS de los aspectos técnicos derivados de la realización de los trabajos, asumiendo las partes las obligaciones que derivan del presente convenio y de la legislación que resulta de aplicación.

8.3 El resultado de dichos trabajos se deberá integrar en cada uno de los informes semestrales e informe final a emitir de conformidad con lo previsto en el presente Acuerdo.

Las citadas cantidades no serán revisables. A todos los efectos se entenderá que los referidos importes comprenden no sólo la contraprestación o precios, sino también todos los gastos que deban realizarse para el cumplimiento del mismo, y demás tributos que sean de aplicación, salvo el IVA.

8.4 UMA facilitará los medios propios, tanto humanos como el espacio e instalaciones asignados a GOFIMA, para su destino a investigación experimental para la ejecución y desarrollo del proyecto.

Igualmente, colaborará y cooperará en toda aquella acción que se derive de las cláusulas del presente acuerdo, en orden a la consecución de los objetivos fijados en el mismo.

En el supuesto de que los resultados obtenidos no resultasen de aplicación práctica, no alcanzándose los objetivos inicialmente previstos las partes no tendrán que reclamarse en concepto alguno responsabilidades mutuas, al compartirse los riesgos y beneficios de la I+D+i «Elaboración de un modelo hidrodinámico numérico tridimensional del Estuario del Guadalquivir y zonas aledañas».

8.5 La APS facilitará sus medios propios, tanto humanos como el espacio e instalaciones para su destino a investigación experimental para la ejecución y desarrollo del proyecto. Todas las actividades del proyecto llevadas a cabo en las instalaciones de la APS estarán supeditadas a las actividades de explotación portuaria diarias.

Novena. *Condiciones de abono de las aportaciones económicas.*

9.1. La APS, con las finalidades expresadas en las cláusulas anteriores y manteniéndose las condiciones bajo las que suscriben el presente acuerdo, abonará a la UMA la cantidad anteriormente señalada de conformidad con las siguientes condiciones:

- 1 primer pago de 69.000 € (IVA no incluido) a la firma del presente convenio.
- 2 pagos de 15.400 € (IVA no incluido), previa recepción de los informes semestrales justificativos de los trabajos efectuados, debiéndose hacer constar la opinión sobre la viabilidad investigadora y científica del proyecto que se desarrolla en dicho momento.
- 1 pago de 15.200 € (IVA no incluido) previa recepción del informe final justificativo de los trabajos efectuados, y de las conclusiones de los mismos.

9.2. Los pagos se harán efectivo a UMA en el IBAN ES09 2103 0146 90 0030028643, abierta en la entidad UNICAJA a nombre de UMA, previa presentación por parte de UMA de las facturas emitidas al efecto, en el plazo legalmente previsto a tal efecto.

Décima. *Publicidad.*

Las partes se comprometen a hacer mutua mención expresa en la ejecución y desarrollo del proyecto, así como en todas aquellas actividades llevadas a cabo con relación al mismo.

Undécima. *Jurisdicción y competencia.*

El presente acuerdo tiene naturaleza administrativa de conformidad con lo preceptuado en el art 34 de la Ley 14/2011, de 1 de junio, de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, dado el contenido del mismo en I+D+i, y art 6 de la Ley 30/1992 de régimen jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, no coincidiendo con el de ninguno de los contratos regulados en la legislación sobre contratos del sector público. Artículos 4.1 r) y en el artículo 13.2.b), ambos del Texto Refundido de la Ley de Contratos del Sector Público y en el artículo 18.d) de la Ley 31/2007, de 30 de octubre. Las partes se comprometen a resolver de mutuo acuerdo en la Comisión de seguimiento las

incidencias que puedan sobrevenir en la aplicación de este acuerdo, relativas a su interpretación, cumplimiento, extinción y efectos. El orden jurisdiccional contencioso-administrativo será el competente para conocer las cuestiones litigiosas que pudieran presentarse.

Y en prueba de conformidad con lo que antecede, en ejercicio de las atribuciones de que son titulares los firmantes, y obligando con ello a las instituciones a las que representan, las partes firman por triplicado ejemplar en lugar y fecha indicados.—Por la Universidad de Málaga, José Ángel Narváez Bueno.—Por la Autoridad Portuaria de Sevilla, Manuel Gracia Navarro.

En Sevilla, a 25 de enero de 2016.

## ANEXO II

### «Modelo hidrodinámico numérico tridimensional del estuario del Guadalquivir y zonas aledañas»

#### 1. Introducción.

El estuario del Guadalquivir se localiza en la costa suroccidental de la Península Ibérica. Conectado con el Golfo de Cádiz por una única boca (Sanlúcar de Barrameda), el estuario se extiende hasta la presa de Alcalá del Río, la cual drena una cuenca de 63,822 km<sup>2</sup> y controla el 80% de las descargas de agua dulce en el estuario, dejando en sus riveras poblaciones tan importantes como Sevilla. La morfología del estuario ha evolucionado desde que se tienen registros; la actual, en grandes números, consiste en una anchura de 800 m cerca de la desembocadura que se reducen paulatinamente hasta los 150 m de la cabecera, 110 km de longitud, una profundidad media de 7.1 m, un canal de navegación central y unas riberas sin zonas intermareales apreciables.

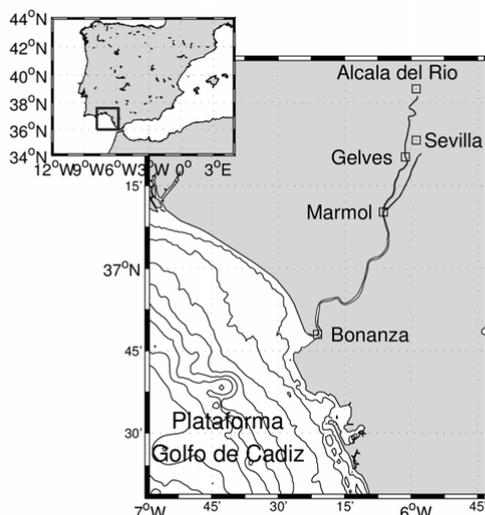


Figura 1.- Mapa de localización del área de estudio y topónimos más relevantes de la zona.

En condiciones normales, el estuario es un cuerpo de agua semicerrado, bien mezclado en la vertical, donde la fuerza de la marea proporciona suficiente energía para subir y bajar el nivel del mar entre 1 m/3,2 m (carrera de marea) en Sanlúcar de Barrameda durante mareas muertas/vivas y generar una onda que progresa hasta la cabecera, 110 km aguas arriba (Oscar Alvarez, 2001, Díez-Minguito et al., 2012, Minguito et al., 2014). Esta marea produce en el estuario y las aguas costeras adyacentes velocidades de

corriente elevadas (Díez-Minguito et al., 2012), gran cantidad de materia en suspensión que dan lugar a niveles de turbidez elevados (Caballero et al., 2015, Informe final APS 2011 e Informe Anual 2015) y una alta productividad biológica en la parte baja del estuario (Navarro & Ruiz, 2006).

La dinámica mareal enmarca la interacción no lineal de procesos físicos, químicos y biológicos. Es difícil examinar, entender o predecir su evolución mediante mediciones de campo tomadas en un momento dado o en un conjunto limitado de estaciones de vigilancia dada la variabilidad temporal y espacial de los diferentes parámetros característicos. Existen modelos hidrodinámicos 1D (Álvarez et al., 2001) y 2D en diferencias finitas (Periañez y Abril, 2014) y elementos finitos (Ortiz, et al. 2006) que palían las mencionadas limitaciones temporales y espaciales de las observaciones, pero que no son lo suficientemente complejos para desenmarañar la dinámica asociada al rango temporal de la marea o porque la resolución espacial no incorpora detalles de la batimetría y riberas que tanto influyen y determinan el movimiento de las masas de agua.

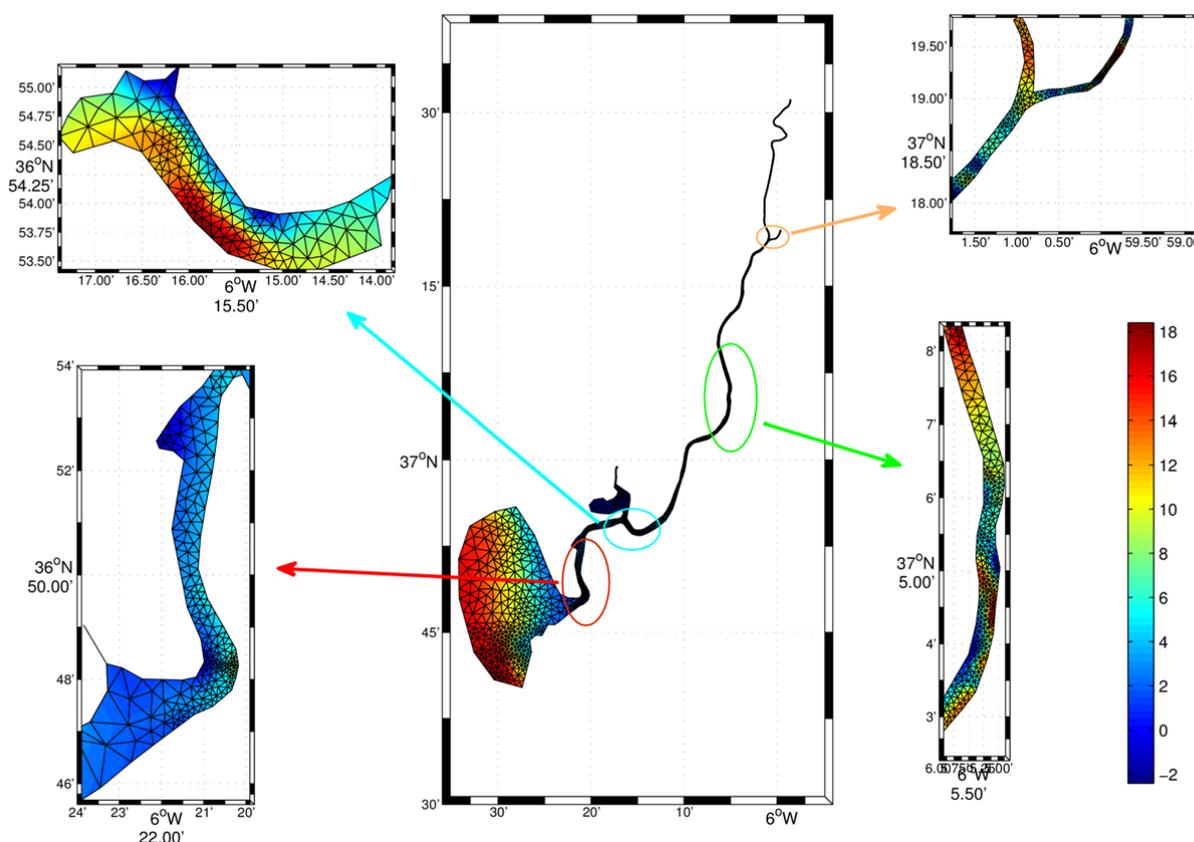


Figura 2.- Batimetría y mallado de discretización del modelo base del estuario del Guadalquivir. Las diferentes figuras anexas amplían la zona indicada en la imagen central.

El grupo de investigación de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, ha participado en iniciativas anteriores de adquisición de datos y descripción de los mismos, especialmente en la zona de la desembocadura (Informe final APS 2011 y García-Lafuente et al. 2012). Consecuencia de esta iniciativa el Grupo creó una nueva línea de estudio en modelización numérica tridimensional de estuarios (Figura 2), bajo la dirección del Dr. Javier Delgado, centrándose tanto en el Guadiana como el Guadalquivir. En la actualidad el Grupo tiene desarrollado un modelo base del estuario del Guadalquivir (SHYFEM, Umgiesser 2000, Umgiesser 2004) y trabaja en la adaptación de otros modelos (FVCOM, Mohid) al objeto de comparar los resultados producidos por ellos. Sin embargo el primero de estos modelos se encuentra en estado mucho más elaborado y está reproduciendo bien el comportamiento de todo el estuario el forzamiento mareal (Figura 3). Este modelo

fue mostrado a la Autoridad Portuaria de Sevilla en una reunión mantenida en su sede el 18 de Marzo de 2015, quién manifestó su interés en aplicarlo a estudios de diversos procesos en el estuario, los cuales quedan recogidos en detalle en el presente anexo técnico.

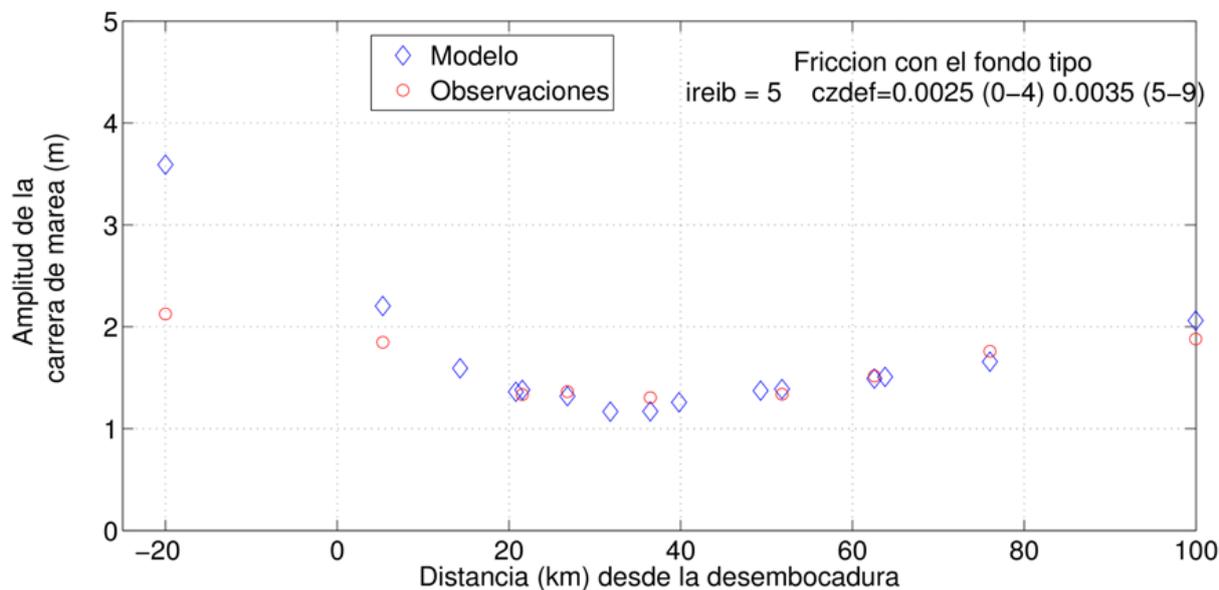


Figura 3: Carrera de marea obtenida con el modelo de mareas y el observado (valores tomados de la bibliografía)

## 2. Objetivos.

### 2.1 Objetivo principal.

Validar, calibrar y adaptar un modelo numérico tridimensional que ayude a entender e integrar la información de este complejo ecosistema y proporcione una herramienta científica y visual que permita proyectar el estuario bajo la evolución de diferentes condiciones iniciales: variaciones de la batimetría, variaciones de la geometría, posibilidad de inundar áreas (inclusión de llanuras mareales), variaciones en el régimen de descarga, variaciones de las condiciones atmosféricas en la desembocadura.

### 2.2 Objetivos específicos.

El modelo a elaborar tiene un grado de complejidad alto puesto que además de su objetivo principal de simular procesos hidrodinámicos pretende ofrecer también la posibilidad de acoplar modelos de transporte de sedimento, de procesos biogeoquímicos y/o de dispersión de trazadores o de variables pasivas. Se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. El modelo ha de contribuir a la optimización de la navegación por el estuario, prediciendo para ello el espesor de la lámina de agua en el estuario a lo largo de los ciclos mareales.
2. El modelo ha de evaluar las modificaciones hidrodinámicas que pudieran ser consecuencia de los cambios en la topografía y batimetría del cauce ocasionadas por los dragados de mantenimiento del estuario.
3. El modelo ha de evaluar la influencia de la posible inundación de llanos mareales (hoy día reducidos en más del 70%) en la hidrodinámica del estuario, caso de que se adoptasen políticas de recuperación de los mismos.

4. El modelo ha de evaluar el régimen hidrodinámico en función de las descargas producidas desde la presa de Alcalá del Río.

5. El modelo ha de permitir hacer estudios predictivos sobre la evolución a largo término de la hidrodinámica del estuario bajo distintos escenarios de subida del nivel del mar debido al calentamiento global.

6. El modelo ha de poder simular la dispersión de elementos en suspensión al objeto de pronosticar la evolución de vertidos accidentales en el estuario y predecir qué zonas pudiesen verse más afectadas.

7. El modelo ha de evaluar la evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario y el alcance de la cuña salina en su interior bajo distintos escenarios mareales, estacionales, de descargas de agua en la presa y de otros factores.

8. El modelo ha de permitir acoplar un módulo de sedimentos que permita abordar procesos de exportación/importación de sedimentos y sedimentación y la identificación de tramos más sensibles a la erosión. No obstante el desarrollo de un modelo calibrado y validado de transporte está más allá de los objetivos del proyecto el cual que se limitaría a abordar los primeros desarrollos, dejando su refinamiento y calibración para actuaciones futuras.

9. El modelo ha de permitir acoplar un módulo biogeoquímico con el que pudiera abordarse estudios de la distribución y evolución de diferentes parámetros físico-químicos tales como oxígeno disuelto, dióxido de carbono y turbidez.

Una discusión más detallada sobre estos objetivos, las limitaciones que puedan existir para su consecución, el grado de logro esperable de los mismos y otros aspectos relevantes se explican a continuación.

### 3. Metodología.

El proyecto se plantea a dos años de duración. La implementación y adaptación del modelo 3D se llevará a cabo en dos fases diferenciadas, que pudieran corresponderse con cada una de las dos anualidades aunque no necesariamente se plantee en esos términos.

Las fases comprenden los desarrollos de las versiones barotrópica y baroclínica del modelo. Además de ser un procedimiento muy usual en el desarrollo de modelos numéricos, se procede de esta manera porque el desarrollo de la parte barotrópica da respuesta satisfactoria a la mayor parte de los problemas relacionados estrictamente con la hidrodinámica y tiene tiempos de ejecución mucho menores. Esto favorece los primeros pasos de refinamiento del dominio espacial basado en batimetrías de alta calidad del estuario y en evaluar la sensibilidad del modelo a cambios batimétricos reales (dragados) o ficticios (apertura de llanuras mareales, por ejemplo). La segunda se centra en la adaptación y calibración del modelo baroclino, el cual tiene que producir los mismos resultados que el barotrópico en aquellos procesos de naturaleza barotrópica (la marea en el estuario, por ejemplo) y además ser capaz de describir la estructura tridimensional de las variables en el estuario, aspecto básico para el análisis del tapón salino entre otros procesos.

En la siguiente sección 3.1 se detallan las actuaciones a seguir para desarrollar ambos modelos, comenzando por el barotrópico, y en la 3.2 se comentan los hitos que se irían consiguiendo en relación con los objetivos específicos previstos.

#### 3.1. Desarrollo de los modelos.

Se describen a continuación las tareas a llevar a cabo en esta fase para la adaptación y validación- calibración de ambos modelos.

##### 3.1.a Fase 1: Modelo barotrópico.

Creación del dominio numérico (generación de la malla).

La generación de la malla es una tarea delicada y laboriosa, que debe ser hecha con esmero puesto que la calidad de los resultados que proporcione el modelo descansa en la

calidad de la malla, especialmente en un dominio tan irregular como el estuario del Guadalquivir.

Para generarla se emplearía la mejor de las batimetrías de las que actualmente se disponga. Previsiblemente, esta información provendrá de la propia Autoridad Portuaria de Sevilla. Dado que el tramo alto del estuario entre Sevilla y Alcalá del Río no es navegable para barcos de calado puede que la información batimétrica en ese tramo final sea escasa. Sin embargo el tramo es importante puesto que la marea es reflejada en la presa de Alcalá del Río e interfiere con la onda incidente, afectando al patrón global de la marea en el estuario. Por ello, caso de no disponer de una buena batimetría allí, se deberían propiciar actividades encaminadas a conseguirla.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Este levantamiento batimétrico no está contemplado en el presente proyecto.

Con la batimetría suministrada se realizará la discretización espacial del dominio, que tendrá una densidad de puntos adecuada para resolver los procesos de interés en el estuario. Dada la asimetría ancho/largo del río, la resolución espacial sería diferente en ambas direcciones, mayor en la transversal como es lógico. Pero la técnica de elementos/volúmenes finitos que utiliza el modelo no permite triangularizaciones muy asimétricas (ver ejemplo en la Figura 2), por lo que la resolución final en ambas direcciones será comparable, con paso de malla estimado de entre 50-200m dependiendo de las zonas. Decir también que los datos batimétricos requieren cierto preprocesado, como la interpolación de la información batimétrica a los puntos de malla, su suavizado en las regiones con gradientes espaciales elevados (preservando el volumen), generación de una mayor densidad de puntos de malla en lugares con gradientes importantes o en las riberas, etc.

Forzamientos en los contornos.

El estuario del Guadalquivir está forzado por las mareas, en primer lugar, las descargas de agua dulce en la presa de Alcalá del Río, otros procesos oceánicos en su desembocadura y el forzamiento radiativo (ciclos solares) y mecánico (cizalla del viento) en su superficie a lo largo del cauce.

El forzamiento mareal es de carácter determinista y predecible (marea oceánica), su inclusión en el modelo es relativamente simple y, una vez hecha, no tiene que ser modificada. Se implementará imponiendo en la boca del estuario la oscilación del nivel del mar causada por los armónicos de marea más influyentes presentes en el potencial generador de mareas: constituyentes M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y K<sub>2</sub> dentro de la banda de frecuencias semidiurna, y K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub> y Q<sub>1</sub> en la diurna. Pueden añadirse más, aunque no parece que sea necesario en principio. Se estudiaría la conveniencia o no de añadir alguna de las constituyentes no lineales no incluidas en el potencial generador de mareas (M<sub>4</sub>, MS<sub>4</sub>, M<sub>6</sub>...) en el forzamiento.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> La dinámica no lineal en el propio estuario va a generar estas componentes no lineales en su interior. Lo que se debe valorar es si la inclusión de las mismas en el forzamiento va a mejorar o no los resultados. Se hace este comentario porque, aunque la respuesta intuitiva es que debe mejorarla, en la práctica no resulta tan evidente dado que las componentes no lineales en el océano abierto, que son las que entrarían como forzamiento, son muy débiles y no tienen unas constantes armónicas tan bien definidas como las de origen directamente astronómico.

El resto de los forzamientos no son deterministas y para su incorporación al modelo se debe recurrir a otras fuentes (la AEMET para datos en tiempos cuasi-real, o datos históricos en la propia Agencia u otras bases de datos –i.e. Puertos del Estado- para la marea meteorológica y el forzamiento a través de la superficie libre, la Confederación Hidrográfica para las descargas del río desde la presa de Alcalá del Río).

#### Validación-calibración.

El último paso concierne a las tareas de calibración/validación. Para ello es necesario disponer de datos. Se contactaría con las instituciones mencionadas en el apartado anterior para obtener datos reales con que forzar el modelo y se recurriría a redes de medida o a campañas de campo a realizar expresamente en el marco del proyecto para obtener esa necesaria información.

La situación más favorable sería la de desarrollar campañas específicas de medida en el marco del presente proyecto y por ello se proponen la realización de dos campañas, que pudieran ser ampliadas a alguna más. Estarían supeditadas a la disponibilidad de instrumentos de medida y al correcto funcionamiento de los mismos. En la reunión con la Autoridad Portuaria mantenida en Sevilla se informó de la existencia de un depósito de instrumental científico propiedad del Puerto de Sevilla que pudiera ser utilizados al efecto.<sup>3</sup> Serían necesarios mareógrafos y alguna sonda multiparamétrica.

<sup>3</sup> El Grupo de Oceanografía Física, en función de sus compromisos, podría poner a disposición del proyecto parte de su instrumental (sensores de temperatura/salinidad) durante alguna de esas campañas.

Puesto que la red de Nivel del Mar de Puertos del Estado tiene mareógrafos en Bonanza y Sevilla (esclusa) esos puntos estarían bien cubiertos. Durante las campañas previstas, de dos meses de duración cada una, se desplegarían mareógrafos en posiciones intermedias entre esas dos estaciones de referencia en la primera de ellas, y en el tramo final del estuario entre Sevilla y Alcalá del Río, históricamente menos medido, durante la otra.

Independientemente de la viabilidad de estas campañas de campo, o en la situación más desfavorable de no poder utilizar el instrumental mencionado, se recopilarían datos históricos de campañas realizadas en proyectos anteriores (Informe final APS 2011 y Navarro et al. 2011) y una revisión bibliográfica en la zona que ampliara el conjunto de observaciones con las que refrendar el modelo. Esta tarea precisa del conocimiento de la batimetría/morfología del río en la época en que fueron tomados los datos o, al menos, la mejor aproximación disponible de esa situación. A tal efecto se cuenta con la existencia de dicha información en los archivos del Puerto de Sevilla, que sería facilitada para las mencionadas tareas de calibración.

#### 3.1.b Fase 2: Modelo baroclino.

La descripción de esta segunda fase sigue las pautas previas, exponiendo sólo los aspectos novedosos y específicos de este modelo no comentados en el anterior.

#### Creación del dominio numérico (generación de la malla).

El mallado horizontal, aspecto básico de la malla, se ha realizado ya en la fase previa. El modelo baroclino requiere establecer niveles de profundidad para resolver la estructura vertical del flujo y esta sería la única cuestión pendiente. Seis niveles es un número adecuado dada la profundidad media del estuario, que equivaldría a una resolución vertical de entre 1 y 2 m en la mayor parte del dominio. Puede que el modelo baroclino precise ampliar el dominio por la zona de la plataforma continental. Ello, junto con la inclusión de nuevos parámetros y el considerable aumento del número de elementos (nodos) del mallado, requerirá que el modelo se ejecute en el sistema de supercomputación de la UMA, lo que reducirá la portabilidad que tiene el modelo barotrópico.

#### Forzamientos en los contornos.

El básico sigue siendo el mismo que el del modelo barotrópico (mareal, con los armónicos más importantes), aunque eventualmente se puede refinar la estructura hidrológica en el contorno abierto imponiendo perfiles termohalinos importados de climatologías o de datos históricos. Esta imposición pudiera tener algún efecto sobre la penetración del tapón salino en el estuario aunque los límites razonables entre los que se

mueve la salinidad en la desembocadura permiten adelantar un efecto prácticamente ignorable. Sin ser determinante, la cizalla del viento en la superficie es el forzamiento externo con mayor trascendencia en la estructura vertical de la columna de agua que resuelve el modelo baroclino por lo que se le prestará una atención especial.

#### Validación-calibración.

Las tareas previas de calibración/validación son aplicables a este caso y todo el acervo de datos empleado entonces es útil y necesario ahora. La calibración de este modelo requiere datos de temperatura y salinidad en distintos puntos del estuario y a distintos niveles de profundidad. Habría que recurrir a datos históricos de observaciones en el estuario (Informe final APS 2011 y Navarro et al. 2011). De no existir tales datos o ser de calidad deficiente, habría que realizar campañas de medida, que pueden coincidir en el tiempo con las proyectadas en la Fase 1. Como ya se ha comentado, su realización estaría supeditada a la disponibilidad de instrumentación. Ya que el objetivo principal del modelo baroclino es el estudio del tapón salino, el esfuerzo experimental se centraría en la parte baja del estuario donde el efecto de la salinidad es más notorio.

#### 3.2 Hitos en relación con los objetivos previstos.

El producto principal de la primera fase es el modelo barotrópico capaz de reproducir la propagación de la marea en el estuario. Además de ser la piedra angular de los desarrollos posteriores, se obraría con la intención de generar una herramienta cuyo costo computacional se mantenga en unos límites tales que hagan posible iterar el modelo en ordenadores sin demasiadas exigencias computacionales (PC normales con varios núcleos y sistema operativo Linux) para que pueda ser ejecutado prácticamente en cualquier lugar. Constituiría una herramienta de gestión accesible incluso con limitados recursos de cálculo.

Disponer del modelo barotrópico calibrado permite acometer un buen número de los objetivos específicos enumerados en el epígrafe 2.2, los cuales se irían abordando paralelamente al desarrollo y depuración del modelo en la medida que ello sea posible. Disponer del modelo baroclino calibrado permite matizar y mejorar algunas particularidades de esos objetivos específicos no resueltos por el barotrópico y llevar adelante aquéllos que solo pueden acometerse con el modelo baroclino. Se comentan a continuación estos aspectos siguiendo siempre la misma estructura: se comienza analizando las posibilidades y logros esperables con el modelo barotrópico y se matizan éstos o se comentan los nuevos a conseguir con el baroclino. El orden que se sigue es el mismo que aparece en el listado de objetivos en el epígrafe 2.2.

3.2.1 Objetivo #1 Predicción del espesor de la lámina de agua en cualquier instante y lugar del estuario.

#### Aportaciones modelo barotrópico.

Se diseñaría una sencilla aplicación *ad hoc* para hacer la predicción, intentando ajustarse a las necesidades del usuario. Respecto a este punto deben hacerse algunas consideraciones importantes.

- En primer lugar, el modelo proporciona el nivel del agua instantáneo respecto a un nivel medio, que coincide con la media a largo término y que internamente se toma como 0. Pero el espesor de la lámina de agua implica conocer la distancia a la que el nivel medio se encuentra del fondo. La batimetría del estuario estará hecha con respecto a un cero de referencia que, en el ámbito de la navegación, sería el del puerto (en la parte exterior de la esclusa, que es donde comienza realmente la navegación por el estuario). Convertir la altura de la superficie en espesor de la lámina supone conocer la distancia entre el cero al que está referida la batimetría y el nivel medio al que lo está la predicción mareal<sup>4</sup>. Esa distancia, de importancia crítica, debe obrar en posesión de quienes levantan periódicamente las batimetrías del estuario. De no existir o de hacerlo con una elevada

incertidumbre, su obtención o mejora de precisión escapa a las actuaciones contempladas en este proyecto, y los cálculos de espesor de lámina de agua que se ofrezcan estarán necesariamente sujetos a este error<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Es decir, la predicción podría decir cosas como «+36cm a las 12:30 GMT del día ...» o «-65 cm a las 23:10 del día...» etc. Estarían referidos al 0 de nivel medio a falta de tener otra referencia. Pasar de esos valores a espesor de la lámina implica añadir la batimetría en el punto de predicción y la distancia entre el cero de referencia batimétrico y el nivel medio.

<sup>5</sup> Nótese que el no conocimiento de esa distancia también repercute en el modelo numérico, el cual está simulando un estuario cuya profundidad no está definida con precisión.

- En segundo lugar, esa herramienta de predicción trabajaría exclusivamente con la parte determinista del nivel del mar, es decir, la marea astronómica. El nivel real debe incluir la marea meteorológica. Dependiendo de la capacidad computacional, esa corrección puede hacerse ejecutando el modelo con los forzamientos meteorológicos que existan en el momento de la predicción (alto coste computacional) o añadiendo a los resultados de la predicción astronómica términos correctores (bajo coste computacional). Estos términos, que estarían tabulados, habrían sido obtenidos como valores medios durante un número significativo de simulaciones de eventos correspondientes a distintas situaciones meteorológicas.

- En tercer lugar, el modelo barotrópico predecirá también las corrientes mareales, que serán ofrecidas a través de la misma aplicación sencilla comentada anteriormente. De nuevo hay que mencionar que las corrientes predichas de esta forma no contemplan ni las descargas de agua que pudieran darse en la presa de Alcalá del Río, ni el efecto de la marea meteorológica que, aunque se anticipa ha de ser débil, podría incorporarse a la predicción de la misma forma tabulada que se haría para el espesor de la lámina

En este punto conviene remarcar que lo arriba ofertado dista mucho de la idea de un modelo operacional en sentido estricto, es decir un modelo que incluya todos los forzamientos y ofrezca un pronóstico validado en ventanas temporales de unos pocos días. Solamente se ofrece la predicción mareal que puede diferir de la situación real en tanto que no contempla otros forzamientos. Se quiere mencionar, no obstante, que este modelo dinámico sí puede servir de base en un futuro sistema operacional, el cual debe descansar en equipos expertos. En España, Puertos del Estado es quien cuenta con más experiencia en este tipo de desarrollos y se deja abierta la posibilidad de una futura colaboración con esta entidad para ensamblar el modelo en modo operacional.

Aportaciones modelo baroclino.

El espesor de la lámina de agua dado por el modelo barotrópico no se modifica por el cambio de geometría/resolución espacial de este modelo, pero podría cambiar al incluir la salinidad y la temperatura en el modelo al afectar a la densidad. Es un punto que habrá que contrastar, aunque se anticipa que la modificación será tan mínima (prácticamente inapreciable) que puede considerarse que este objetivo se satisfaría con el modelo barotrópico.

3.2.2 Objetivo #2. Modificaciones hidrodinámicas consecuencia de los dragados de mantenimiento del estuario.

Aportaciones modelo barotrópico.

La comparación de las salidas del modelo ejecutado con distintas batimetrías, por ejemplo las correspondientes a situaciones pre y post-dragado de mantenimiento, permitirá cuantificar los cambios producidos por esa actuación, identificar las zonas más sensibles o afectadas por la misma o dar cotas superiores a esos cambios. El grado de detalle con que pueden valorarse los cambios será aproximadamente el del mallado del dominio (80-150m, algo menores tal vez en algunas zonas internas). Estas comparaciones son un buen ejercicio para estudiar la sensibilidad del río a las actuaciones que se hagan sobre él, incluido un hipotético dragado en profundidad. Nótese que con este modelo sólo pueden hacerse valoraciones hidrodinámicas.

Aportaciones modelo baroclino.

Los mismos argumentos expuestos en el punto 3.2.1 anterior son aplicables en lo concerniente a la parte hidrodinámica, aunque se harán las pruebas para comprobar que es así. El modelo baroclino sí permite investigar cambios en las propiedades termohalinas producidas por los dragados, en particular los posibles cambios de posición que pudiera sufrir el tapón salino, que será la mayor aportación del modelo a este objetivo

3.2.3 Objetivo#3. Influencia de la posible inundación de llanos mareales en la hidrodinámica del estuario.

Aportaciones modelo barotrópico.

El objetivo es en realidad una variante del anterior, pues no deja de ser una comparación de resultados producidos por simulaciones con y sin llanos inundables en el dominio. Aun cuando no llegue a darse la situación de recuperación de llanuras marismales inundables, la simulación es un desafío importante para el modelo que ha de resolver la inundación de zonas secas que luego se vacían (suele dar problemas en los códigos numéricos). El cómo este sumidero temporal de agua puede afectar a la propagación de la onda mareal es un interesante reto en el estudio del estuario que se analizará en el marco de este modelo.

Aportaciones modelo baroclino.

Realmente es el modelo barotrópico el que responde a la mayoría de las expectativas de este objetivo. El baroclino investigaría el comportamiento del tapón salino, es decir, la mayor o menor penetración de la salinidad caso de que existiesen esas nuevas llanuras inundables.

3.2.4 Objetivo #4. Influencia de las descargas de la presa de Alcalá del Río en el régimen hidrodinámico del estuario.

Aportaciones modelo barotrópico.

La situación real depende del conocimiento previo del tamaño de las descargas que se vayan a hacer y durante cuánto tiempo se mantendrían. Esa información tiene que ser proporcionada por las autoridades responsables. Y no solamente en los casos extremos en que la presa alivie por razones de seguridad, sino en situaciones normales (caudal usual y su variabilidad, caudal ecológico). A nivel científico es interesante saber a partir de qué descarga la marea pudiera quedar bloqueada y no progresar aguas arriba y en qué punto del estuario ocurriría este bloqueo. Estas eventuales situaciones de elevada descarga son propicias para la evacuación de sedimentos, un problema que podría ser abordado por el modelo.

Aportaciones modelo baroclino.

Además de estos aspectos puramente hidrodinámicos, la descarga de agua dulce desplaza hacia el exterior el tapón salino. Este desplazamiento se analizaría con este modelo a fin de proporcionar unos rangos de distancias medidas desde la desembocadura más allá de las cuales la probabilidad de encontrar aguas por encima de cierta salinidad sea menor que el valor de la probabilidad especificado. A nivel científico es interesante saber a partir de qué descarga el estuario pasa de ser tipo verticalmente homogéneo (al que pertenece el del Guadalquivir, que está movido principalmente por la marea oceánica) a tipo de cuña salina en los que la descarga del río domina sobre el efecto de las mareas (Ebro, Nilo, Mississippi, por poner algunos ejemplos). Estas situaciones de elevada descarga se relacionarían con el bloqueo de la onda de marea y, como ya se ha dicho, son propicias para la evacuación de sedimentos.

3.2.5 Objetivo #5. Evolución de la hidrodinámica del estuario bajo escenarios de subida del nivel del mar debido al calentamiento global.

Aportaciones modelo barotrópico.

Formalmente y aunque las causas son bien distintas, este objetivo no difiere del número 2 comentado en 3.2.2. Equivaldría a realizar un dragado constante de espesor igual al aumento del nivel del mar que se esté considerando bajo el correspondiente escenario.

Aportaciones modelo baroclino.

El aspecto nuevo a abordar con este modelo sería la simulación de escenarios con estructuras termohalinas oceánicas distintas a la actual y que pudieran tener repercusión sobre la distribución de propiedades de las aguas del estuario. Su posible efecto sería muy poco importante en cualquier caso.

3.2.6 Objetivo #6. Dispersión de elementos en suspensión, vertidos y zonas que pudieran verse afectadas.

Aportaciones modelo barotrópico.

Se desarrollaría o adaptaría un modelo de dispersión con el que acometer este objetivo. En su desarrollo se puede trabajar con situaciones hipotéticas representativas de incidentes ocurridos en los últimos tiempos, si los hubiere. Se determinarían parámetros que den la extensión afectada por el vertido en función del tiempo, caso de no emprenderse ninguna medida mitigadora, y lugares particularmente sensibles donde se puedan acumular vertidos por falta de una renovación de agua adecuada (situación poco probable con una estructura tan canalizada como es el estuario). En una situación real, la simulación debe contar con los forzamientos en el momento de ocurrencia, lo cual supone implicar a los organismos responsables de su estudio o control. La descarga de la presa es un factor de importancia mayor, pero los campos de vientos (AEMET) no lo son menos.

Aportaciones modelo baroclino.

El modelo baroclino no aporta novedades a este objetivo.

3.2.7 Objetivo #7. Evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario y el alcance de la cuña salina.

Aportaciones modelo barotrópico.

No procede. Ha de abordarse con el modelo baroclino.

Aportaciones modelo baroclino.

Es claramente el objetivo a tratar con este modelo y casi su razón de ser. El modelo deberá dar un patrón medio del gradiente horizontal salino a lo largo del estuario y cómo ese gradiente se ve afectado por los distintos procesos físicos que en él ocurren. La marea produce desplazamientos de varios km de las aguas en el río con periodicidad semidiurna advectando el tapón salino. Esos desplazamientos serán más pronunciados en mareas vivas y estarán muy condicionados por el caudal de descarga del río. Aunque en menor medida, en ciertos lugares y en determinados momentos de los ciclos mareales aparecerá una cierta estratificación vertical, que también tendrá una naturaleza fluctuante y que puede afectar a procesos biogeoquímicos puntualmente. Analizar la estructura espacial media y evaluar y acotar sus posibles fluctuaciones es el objetivo principal del modelo baroclino.

3.2.8 Objetivo #8. Primeros desarrollos de un modelo de exportación/importación de sedimentos.

Aportaciones modelo barotrópico.

Este objetivo es más del ámbito del modelo baroclino ya que la distribución horizontal de densidad en el estuario puede influenciar las velocidades de sedimentación y el transporte de sedimentos.

Aportaciones modelo baroclino.

Se harían los primeros desarrollos para acoplar a este modelo otro de transporte de sedimentos. Se debe decir, no obstante, que la tarea de acoplar ambos modelos es exigente en tiempo y contiene bastantes aspectos que resolver para ser precisos (proceso de calibración). Entre otras cosas se requiere un conjunto consistente de datos experimentales (tipo de sedimento y granulometría) lo que requiere la participación de otros grupos de investigación actualmente implicados en el estudio del estuario (grupo de sedimentología de la Universidad de Huelva, que investiga no sólo la composición sino el origen de los sedimentos en el estuario). También se debe analizar los efectos de la interpolación de la batimetría y las posibles desviaciones en el campo de velocidad y transporte de agua, dado que, la dinámica del sedimento queda condicionada por dicho campo de velocidad y esto favorece la amplificación de errores. Por todo ello, este objetivo sólo contempla los primeros desarrollos que deberían ser completados en el futuro.

3.2.9 Objetivo #9. Módulo biogeoquímico para estudios de distribución y evolución de parámetros físico-químicos.

Aportaciones modelo barotrópico.

Este objetivo se consigue más satisfactoriamente con el modelo baroclino.

Aportaciones modelo baroclino.

En la misma línea del objetivo anterior, se darían pasos para acoplar este modelo con un buen modelo biogeoquímico. Se debe decir, no obstante, que la tarea de acoplar ambos modelos en un estuario de características tan especiales como el del Guadalquivir es exigente en tiempo y contiene bastantes aspectos complejos que resolver. Entre otras cosas se requiere un consistente conjunto de datos experimentales interdisciplinarios (que no se tomarían en el marco del presente proyecto) lo que implicaría la participación de otros grupos de investigación. Por todo ello, este objetivo queda aquí reflejado más como una declaración de intenciones de estudio de este interesante e importante tópico para la salud del estuario que cómo un compromiso formal, y se abordará en la medida que el tiempo y las posibilidades lo permitan.

4. Temporización.

4.1 Priorización de objetivos.

Dado el importante número de objetivos, se cree interesante agruparlos por prioridades a la hora de acometerlos. El establecimiento de esta priorización está determinada por el orden cronológico en el desarrollo de los modelos y, cuando no es así, se constituye en función de los aspectos prácticos que más puedan interesar a la Autoridad Portuaria. Añadir que casi todos los objetivos son abordados por uno y otro modelo, pero que la mayor parte del peso recae sobre uno de ellos. Lógicamente, ese modelo en el objetivo correspondiente tiene la prioridad.

La agrupación priorizada que se propone es:

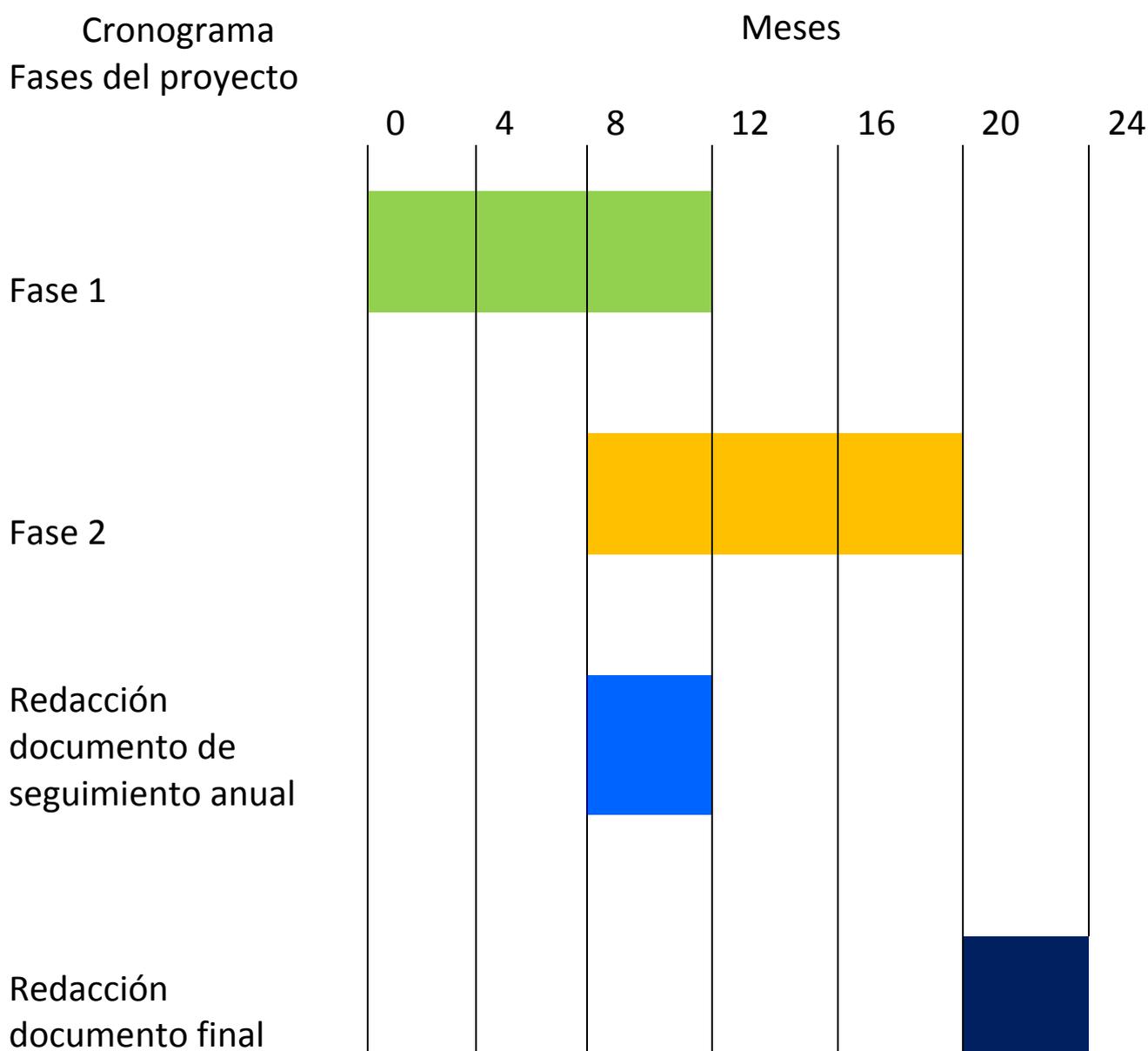
Objetivos de mayor prioridad, en los que se pondrá mayor énfasis en su desarrollo: 1, 2, 4, 7.

Objetivos de prioridad intermedia, pero que serán abordados en mayor o menor medida: 3, 5, 6, 8.

Objetivo al que se renunciaría por falta de tiempo (muy interesante pero podría posponerse): 9.

#### 4.2 Calendario.

Las distintas fases descritas en apartados anteriores quedan reflejados en la siguiente tabla donde se detalla un horizonte temporal de 2 años. Es difícil cuantificar en el tiempo que se empleará en cada objetivo por eso se detalla de manera general. El trabajo de campo, importante pero no imprescindible para la calibración/validación del modelo, no se refleja en el cronograma por las dificultades expuestas; en cualquier caso, se intentará adelantar tanto como sea posible.



## Referencias.

Isabel Caballero, Edward P. Morris, Javier Ruiz, Gabriel Navarro, Assessment of suspended solids in the Guadalquivir estuary using new DEIMOS-1 medium spatial resolution imagery, *Remote Sensing of Environment*, Volume 146, 25 April 2014, Pages 148-158, ISSN 0034-4257, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.047>.

Contreras, E. and Polo, M. J.: Measurement frequency and sampling spatial domains required to characterize turbidity and salinity events in the Guadalquivir estuary (Spain), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2581-2589, doi:10.5194/nhess-12-2581-2012, 2012.

Díez-Minguito, M., A. Baquerizo, M. Ortega-Sánchez, G. Navarro, and M. A. Losada (2012), Tide transformation in the Guadalquivir estuary (SW Spain) and process-based zonation, *J. Geophys. Res.*, 117, C03019, doi:10.1029/2011JC007344.

Díez-Minguito M., E. Contreras, M. J. Polo, and M. A. Losada (2013), Spatio-temporal distribution, along-channel transport, and post-riverflood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (SW Spain), *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 2267–2278, doi:10.1002/jgrc.20172.

Navarro, G., & Ruiz, J. (2006). Spatial and temporal variability of phytoplankton in the Gulf of Cádiz through remote sensing images. *Deep-Sea Research II*, 53, 1241–1260.

García-Lafuente J., Delgado J., Criado-Aldeanueva F., Bruno M., Del Río J., Vargas J.M. 2006. Water mass circulation on the continental shelf of the Gulf of Cadiz. *Deep-Sea Res. Pt II*, 53: 1182-1197.

García-Lafuente J., Delgado J., Navarro G., Calero C., Díez-Minguito M., Ruiz J., Sánchez-Garrido J.C, About the tidal oscillations of temperature in a tidally driven estuary: The case of Guadalquivir estuary, southwest Spain, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 111, 1 October 2012, Pages 60-66, ISSN 0272-7714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.06.007>.

Losada Rodríguez M., Ruiz J. y col. Informe final presentado a la Autoridad del Puerto de Sevilla 2011: «Propuesta metodológica para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de las actuaciones humanas en el estuario del Guadalquivir» en la Casa de la Ciencia de Sevilla».

Jose Carlos García y col. Informe presentado a la Autoridad del Puerto de Sevilla 2015: «Desarrollo de actividades científicas y docentes vinculadas al acuario de puerto de Sevilla y al estuario del río Guadalquivir y zonas marinas aledañas en orden a la generación y desarrollo de conocimiento y soluciones innovadoras que potencien el impulso de la gestión relacionada con nuevos proyectos en un marco de sostenibilidad ambiental».

Gabriel Navarro, Javier Ruiz, Spatial and temporal variability of phytoplankton in the Gulf of Cádiz through remote sensing images, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Volume 53, Issues 11–13, June 2006, Pages 1241-1260, ISSN 0967-0645, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.04.014>.

Navarro, G., Gutiérrez F.J., Díez-Minguito M., Losada M.A., and Ruiz J. Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: a challenge for a real-time telemetry. *Ocean Dyn.*, 61, 6, 2011, pages 753-765, doi 10.1007/s10236-011-0379-6

Ortiz, P., Zienkiewicz, O. C. and Szmelter, J. (2006), Hydrodynamics and transport in estuaries and rivers by the CBS finite element method. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 66: 1569–1586. doi: 10.1002/nme.1695

Álvarez O., Tejedor B. and Vidal J. La dinámica de marea en el estuario del Guadalquivir: un caso peculiar de «resonancia antrópica». *Física de la Tierra*, 2001, 13, 11-14.

R. Periañez, J.M. Abril, A numerical modeling study on oceanographic conditions in the former Gulf of Tartessos (SW Iberia): Tides and tsunami propagation, *Journal of Marine Systems*, Volume 139, November 2014, Pages 68-78, ISSN 0924-7963, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.05.020>.

Umgiesser, G., 2000. Modeling the residual current in the Venice Lagoon. Interaction between Estuaries, Coastal Seas and Shelf Seas, pp. 107-124.

Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems*.

## ANEXO III

## Desglose presupuesto económico aportación Autoridad Portuaria de Sevilla

Tarea	Presupuesto - Euros
Trabajos del equipo de investigación:	
Sueldos (contratación doctores durante ejecución trabajos exclusiva dedicación) . . . .	78.000
Subtotal . . . . .	78.000
Trabajos del equipo de gestión de Proyecto y Consultoría:	
Importe administración coordinación Universidad de Málaga (15% de total). . . . .	17.250
Subtotal . . . . .	17.250
Trabajo de equipo de desarrollo, pruebas e implantación:	
Trabajos de campo (fondeo): incluye dietas y desplazamiento, material fungible de fondeo, pequeñas reparaciones y otro material fungible . . . . .	4.500
Seguros embarque de personal . . . . .	1.000
Viajes para reuniones de trabajo . . . . .	2.000
Asistencia reuniones científicas difusión resultados . . . . .	3.000
Subtotal . . . . .	10.500
Material inventariable, licencias para los desarrollos, costes publicación y otros:	
Estación de trabajo + memoria almacenamiento masivo. . . . .	4.750
Costes publicaciones de difusión . . . . .	1.500
Contribución uso software licenciado . . . . .	2.500
Otros materiales . . . . .	500
Subtotal . . . . .	9.250
Total . . . . .	115.000

La contribución económica que realiza la Universidad de Málaga proviene de:

Participación en el desarrollo de los trabajos a tiempo parcial, según estado de ejecución, de un Catedrático de Universidad (D. Jesús García Lafuente), un Profesor Titular (D. Javier Delgado Cabello), un Profesor Contratado Doctor con contrato indefinido y personal de servicios del Departamento. (Departamento: Grupo de Investigación de Oceanografía Física. Grupo Consolidados del Plan Andaluz de Investigación – RNM137).

Tiempo de computación en el Centro de Supercomputación y Bioinformática de la Universidad de Málaga y uso de diverso software bajo licencia. Estimado: 30.000 €.