



MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE

DIRECCIÓN GENERAL  
DE OBRAS HIDRÁULICAS  
Y CALIDAD DE LAS AGUAS

CONFEDERACIÓN  
HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

CLAVE:

**08.803-190/0411**

TIPO:

**ESTUDIO**

REF. CRONOLÓGICA:

**07/04**

TÍTULO DEL ESTUDIO:

**ESTUDIO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE L'ALBUFERA DE VALENCIA**

FASE:

**2**

**MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO  
DE ESTUARIO**

ACTIVIDAD:

**ME2/02**

**MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA  
DETALLADA**

SUBACTIVIDAD:

**3**

**CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN,  
VALIDACIÓN**

TÍTULO DEL DOCUMENTO:

**CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y TRANSFERENCIA DE LOS MODELOS  
DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS. DELFT-3D. FASES 3 Y 4**

CÓDIGO: **7241-ES-WL-ME2/02/3-009**



CONSULTOR:



TYPESA

AUTOR:

**Miguel Mondría García**

DIRECCIÓN ESTUDIO:



wl | delft hydraulics

**Dirk Schwanenberg**

**Enrique Cifres Giménez**



<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1.	INFORMACIÓN GENERAL	3
1.2.	OBJETIVOS	3
1.3.	ACERCA DE ESTA MEMORIA	4
<b>2.</b>	<b>DATOS Y MÉTODOS</b>	<b>7</b>
2.1.	DATOS	7
2.2.	SELECCIÓN DE MÓDULOS DE DELFT3D	7
2.3.	DOMINIO Y MALLA DE CÁLCULO	10
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS PRELIMINARES</b>	<b>13</b>
3.1.	ESCALAS DE TIEMPO	13
3.2.	BALANCE SIMPLIFICADO DE SEDIMENTOS	14
3.3.	ALTURAS MÁXIMAS DE OLA	17
3.4.	CORRIENTES DE DENSIDAD	19
3.5.	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS ORGÁNICOS	19
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS CON DELFT3D</b>	<b>21</b>
4.1.	EFFECTO DEL VIENTO (MODELO A)	21
4.1.1.	VIENTO SOBRE FONDO FIJO HORIZONTAL, SIN OLAS (CASO 1)	21
4.1.2.	VIENTO SOBRE FONDO FIJO, SIN OLAS (CASO 2)	21
4.1.3.	VIENTO SOBRE FONDO FIJO (CASO 3 Y 3B)	23
4.1.4.	VIENTO DÉBIL SOBRE FONDO FIJO (CASO 4)	25
4.1.5.	VIENTO SOBRE FONDO MÓVIL (CASO 5, 5B, 5C)	27
4.1.6.	VIENTO QUE SE ALTERNA SOBRE FONDO FIJO (CASO 6)	30
4.1.7.	VIENTO QUE SE ALTERNA SOBRE FONDO MÓVIL (CASO 7)	31
4.1.8.	INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD (CASO 8)	31
4.1.9.	EFFECTO POR LOS APORTES MEDIOS QUE LLEGAN AL LAGO(CASO 9A Y CASO 9D)	31
4.2.	EFFECTO DE UNA RIADA EN EL BARRANCO DEL POYO (MODELO B)	34
4.2.1.	CONDICIONES DE CONTORNO	34
4.2.2.	EFFECTO DE UNA AVENIDA, SIN VIENTO (CASO 11)	36
4.2.3.	EFFECTO DE UNA AVENIDA, CON VIENTO (CASO 12)	39
4.2.4.	EFFECTO DE LA AVENIDA DE OCTUBRE DE 2000, CON VIENTO SOBRE FONDO MÓVIL (CASO 13, 13B Y 13C)	41
4.3.	EFFECTO DE UNA AVENIDA, CANAL DRAGADO (CASO 14)	47
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>51</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>
	<b>APÉNDICE A. VALORES GENERALES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO</b>	<b>55</b>
	<b>APÉNDICE B. DATOS</b>	<b>57</b>
B.1.	TOPOGRAFÍA DEL FONDO	57
B.2.	ENTRADAS Y NIVELES DE AGUA	57
B.3.	VIENTO	60
B.4.	SEDIMENTOS	62
B.5.	OLAS	63



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. INFORMACIÓN GENERAL

Técnica y Proyectos, S.A. (TYPESA) es la empresa adjudicataria por parte del Ministerio de Medio Ambiente de España del proyecto "Estudio para la integración de la red de drenaje en el Desarrollo Sostenible de L'Albufera de Valencia". WL | Delft Hydraulics (WL) asiste a TYPESA en la subactividad "Construcción, validación y transferencia del modelo matemático". El período de ejecución (Fases 1 - 4) para la estructuración de estos modelos es de nueve meses, contando a partir del 15 de enero de 2003. También forma parte del proyecto un soporte técnico adicional de dos años para los modelos (Fase 5) al terminar la asistencia. El programa de la asistencia de WL es:

**TABLA 1. PROGRAMA DE TRABAJOS: FASES.**

Fase	Período de ejecución
1 - Especificaciones técnicas, transferencia de licencias y formación básica	15.1.2003 – 15.3.2003
2 - Recepción e integración de datos	15.3.2003 – 15.6.2003
3 - Construcción, calibración y validación de los modelos	15.6.2003 – 15.9.2003
4 - Transferencia de los modelos, asistencia en Valencia y formación avanzada	1.8.2003 – 15.10.2003
5 - Soporte técnico	15.10.2003 – 15.10.2005

El informe resume la construcción del modelo hidrodinámico y transporte de sedimento con el software SOBEK Rural. El trabajo ha sido realizado por Eelco Verschelling, Dirk Schwanenberg y Joost Icke.

Todos los trabajos objeto del contrato se realizan bajo la dirección de Enrique Cifres Giménez de la Confederación Hidrográfica del Júcar

### 1.2. OBJETIVOS

Según los pliegos del contrato principal entre TYPESA y el Ministerio de Medio Ambiente de España (p.11) constituye el objeto inmediato de la asistencia técnica:

*“...el análisis de del impacto sobre la Albufera de Valencia de las actuaciones sobre la red de drenaje previstas por la Confederación Hidrográfica del Júcar que pueden afectarla en su evolución futura, proponiendo las medidas complementarias necesarias para garantizar el desarrollo sostenible de la laguna y su entorno.*

*Además, el estudio debe recopilar y aglutinar en conocimiento de la Albufera que se deriva de los numerosos estudios e investigaciones realizados en el pasado, y elaborar herramientas metodológicas para el análisis de la laguna y de su entorno desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, que permitan en el futuro analizar desde estos puntos de vista cualquier actuación que se proponga.”*

Los modelos matemáticos y numéricos que serán aplicados durante el proyecto por parte de WL ayudarán a tener una visión más precisa del comportamiento del sistema, tanto desde un punto de vista cualitativo como cuantitativo.

El principal objetivo del estudio disponible es la construcción, calibración y validación de un modelo basado en el software DELFT3D destinado a la simulación de la hidrodinámica del lago. El modelo se utilizará para estudiar el efecto morfológico que los eventos de tormenta tienen sobre el lago teniendo en cuenta tanto los efectos producidos por los aportes considerables de sedimentos que se producen en las avenidas del barranco de Massanassa o por los efectos de resuspensión y redistribución del sedimento inducida por las olas en eventos de vientos fuertes.

Un mejor entendimiento de los procesos morfológicos del lago durante eventos de inundación es de gran utilidad para evaluar las medidas que deben conducir a tasas de sedimentación sostenibles entre las que pueden citarse a priori el establecimiento de un protocolo de gestión de las avenidas o la constitución de canales preferentes de flujo mediante dragado.

### 1.3. ACERCA DE ESTA MEMORIA

El Parque Natural de L'Albufera, declarado como tal en 1986, ocupa una superficie de 21.200 hectáreas situada en el sector sur-oriental de la plana de Valencia. El elemento más característico de este territorio es una gran laguna somera de 2433,2 hectáreas de superficie libre cubierta por las aguas<sup>1</sup> y 0.882 m de profundidad media, y en la que aparece una serie de islas y orillas de vegetación palustre denominadas mates. El humedal recibe aportes de distintos orígenes y características. Por su parte, el lago está sometido a un proceso de aterramiento provocado principalmente por los sedimentos aportados por las avenidas, entre otros, de los barrancos del Poyo ó Massanassa y Beniparrell. Se buscan posibles soluciones para mitigar o terminar el citado proceso. En este contexto, WL | Delft Hydraulics realiza un estudio de modelación como subcontratista de TYPESA, que incluye la construcción de un modelo basado en Sobek y un modelo basado en Delft3D. Este informe se centra en la construcción y análisis de resultados basados en el modelo tridimensional construido con Delft3D.

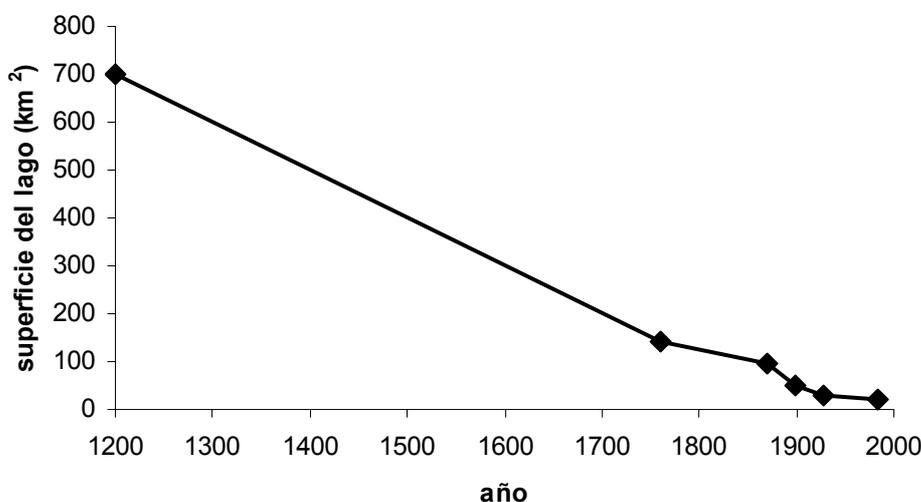


Figura 1. Evolución histórica de la superficie del lago (Benet Granell, 1983).

El modelo Delft3D se construye con los objetivos siguientes:

<sup>1</sup> Superficie libre de las aguas, descontando islas, obtenida por técnicas de restitución fotogramétrica a partir de un vuelo a escala 1:8.000 (marzo de 2003)

<sup>2</sup> Profundidad obtenida por batimetría con ecosonda (febrero de 2003) para la altura media de la lámina de agua a lo largo del año estimada en 0,25 m sobre el nivel medio del mar.

- entender los procesos que afectan la sedimentación en el lago;
- desarrollar una herramienta que sirva para evaluar diversas estrategias destinadas a atenuar la sedimentación en el lago, especialmente estrategias basadas en la operación de las aperturas de las golas y analizar la eficacia de estrategias basadas en el dragado.

Los procesos principales que afectan la sedimentación son la afluencia de sedimentos a través de los barrancos, la producción de sedimentos orgánicos por algas y vegetación y la redistribución de sedimentos en el lago por la acción de olas y corrientes. Las olas y las corrientes son causadas sobre todo por el viento. Es útil observar que la disminución de la superficie del lago en la Figura 1 no se debe sólo a la sedimentación. Esta disminución se ha ocasionado principalmente ganando terreno para el cultivo del arroz (Benet Granell, 1983).

El trabajo ha sido realizado por Simone van Schijndel, Astrid Blom y Erik Mosselman bajo supervisión de Dirk Schwanenberg.



## 2. DATOS Y MÉTODOS

### 2.1. DATOS

Los datos del partida del estudio han sido responsabilidad de TYPESA. Su adquisición, proceso y revisión por parte de WL| Delft Hydraulics fue objeto de la fase 2 de los trabajos. TYPESA ha elaborado una base de datos que incluye la trazabilidad de los mismos y que podrá consultarse en la edición digital del estudio final. El Apéndice B describe los datos principales, es decir la batimetría del fondo, los caudales de entrada , los niveles de la lamina de agua en las golas que conectan el lago con el mar, las velocidades y direcciones del viento y la distribución y composición del sedimento . No se dispone de datos medidos de las velocidades del agua durante un evento significativo, o de mediciones de las alturas de ola durante un evento de viento fuerte. Disponer de estos datos sería interesante para calibrar la hidrodinámica del lago.

### 2.2. SELECCIÓN DE MÓDULOS DE DELFT3D

Se usa el modelo Delft3D para simular el desarrollo morfológico, incorporando el barranco del Poyo o de Massanassa, el lago y las tres golas que conectan el lago con el mar. En la selección del método para modelar los procesos, es importante distinguir entre el transporte limitado por la capacidad del flujo (carga del material del fondo del barranco) y el transporte de material en suspensión limitado por la oferta de material (carga de lavado). El material de la carga de lavado es mucho más fino que el material del fondo del barranco. El transporte del material del fondo del barranco tendrá una repercusión importante sobre la morfología del barranco y se depositará en el lago en forma de un delta. El transporte de la carga de lavado no tiene apenas influencia en la morfología del barranco, pero en principio puede sedimentarse en cualquier lugar del lago. Esta sedimentación ocurrirá especialmente en sitios de baja velocidad del flujo. El transporte del material del fondo del barranco consiste en arrastre de fondo y carga en suspensión. La carga en suspensión tiene una reacción retrasada con los cambios de velocidad del flujo. Esta adaptación retrasada se puede ignorar cuando la escala característica de longitud sea menor que dos o tres veces el tamaño de una célula de calculo.

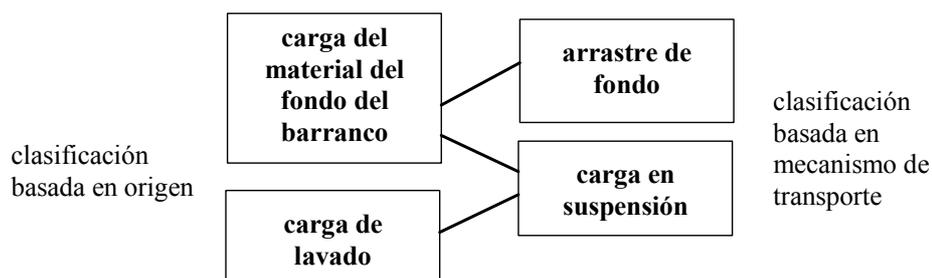


Figure2. Clasificación del transporte de sedimento.

La Figura 2 ofrece una representación de los módulos de Delft3D. La carga del transporte del material del fondo del barranco (arrastre de fondo y carga en suspensión) se puede simular con los módulos Sediment on-line, SED y TRANSPORT. Dentro el módulo TRANSPORT, el submódulo TRSTOT calcula el arrastre de fondo y la carga en suspensión sin adaptación retrasada, mientras que el submódulo

TRSSUS calcula la carga en suspensión con adaptación retrasada. Sin embargo, la carga de lavado (sedimentos cohesivos y no cohesivos) se puede simular solamente con los módulos Sediment on-line y SED, no con el módulo TRANSPORT. Los cambios morfológicos, es decir, la actualización del nivel del fondo, se pueden simular con los módulos Sediment on-line y BOTTOM. Los módulos TRANSPORT (con TRSTOT y TRSSUS) y BOTTOM son partes del módulo MOR. La selección de los módulos depende de las escalas de tiempo en las cuales se simulan los procesos, porque el módulo Sediment on-line actualiza el nivel del fondo con un intervalo temporal igual al intervalo temporal del cálculo del flujo, mientras que el módulo BOTTOM lo actualiza con un intervalo temporal mucho mayor. Así, se presentan métodos diferentes para simulaciones a corto plazo y simulaciones a largo plazo. La Figura 3 demuestra la configuración de módulos en simulaciones a corto plazo (horas, días). Se simulan todos los modos de transporte simultáneamente en Sediment on-line. Este módulo también actualiza el nivel del fondo. El módulo MOR sigue siendo necesario como módulo de conducción para calcular las olas simultáneamente (módulo WAVE). La Figura 4 demuestra la configuración de módulos en simulaciones a largo plazo (meses, años). Los módulos TRANSPORT y BOTTOM (partes de MOR) calculan la carga del transporte del material del fondo del barranco y la actualización del nivel del fondo en el lago. El módulo SED calcula la carga de lavado, pero sin posibilidad de actualizar el nivel del fondo automáticamente sobre la base de las tasas correspondientes de erosión y de sedimentación. Esto significa que las tasas de erosión y de sedimentación relacionadas con la carga de lavado deben ser agregadas off-line con las tasas calculadas por el módulo MOR.

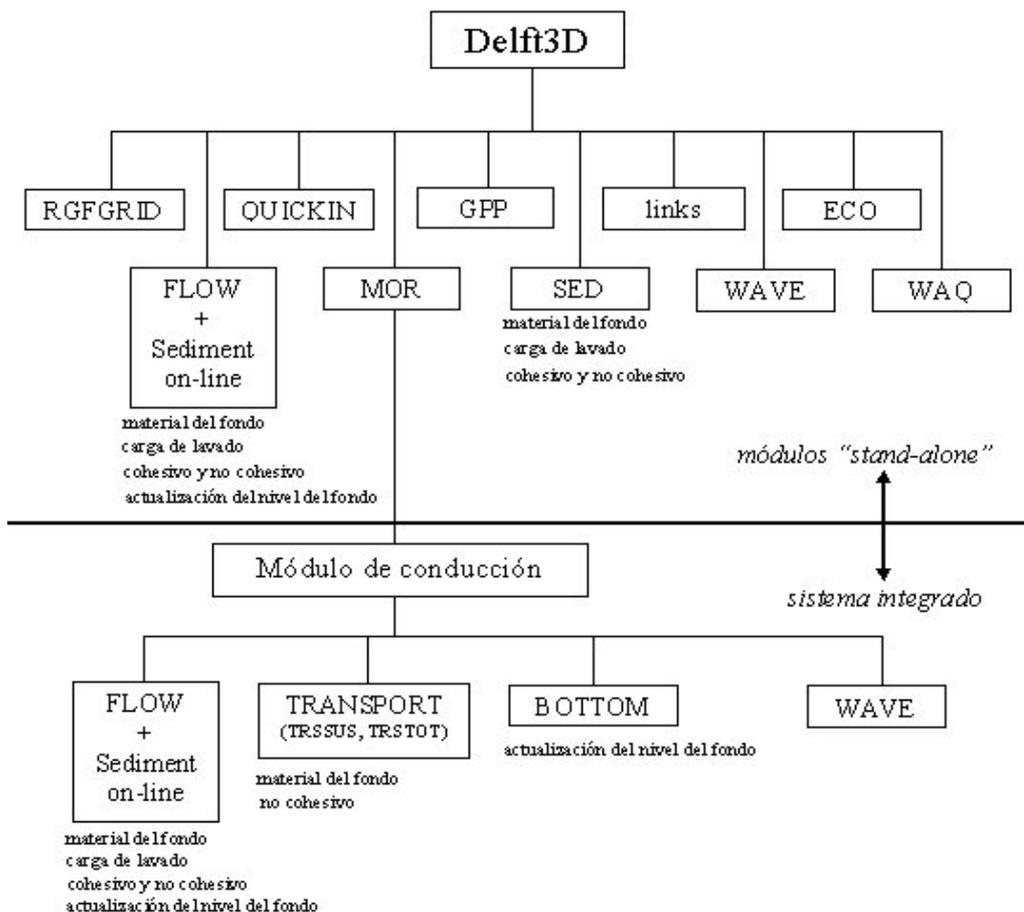


Figura 2. Módulos de Delft3D

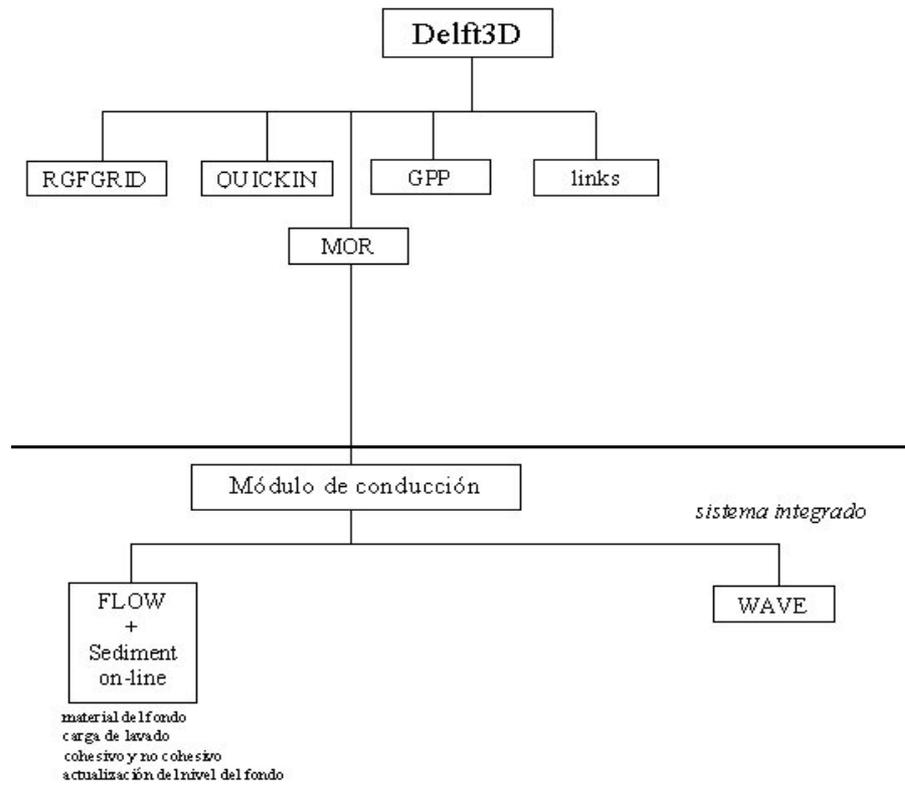


Figura 3. Configuración de módulos en simulaciones a corto plazo (horas, días)

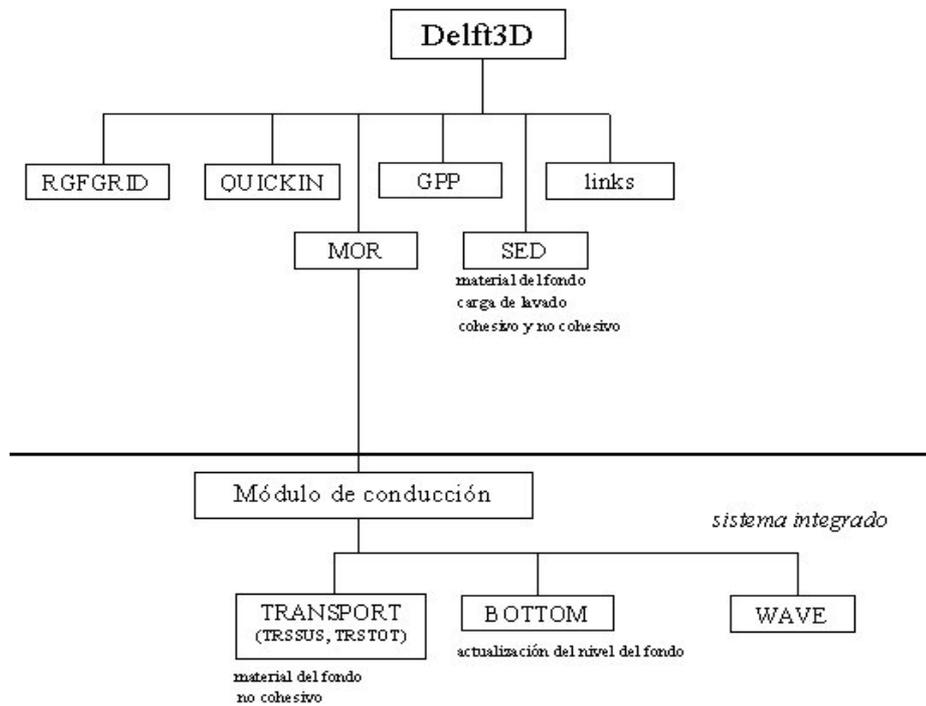


Figura 4. Configuración de módulos en simulaciones a largo plazo (meses, años)

### 2.3. DOMINIO Y MALLA DE CÁLCULO

El estudio con Delft3D se ha basado en la construcción de dos modelos. Se construye el primer modelo con tamaños de celda de 100 a 125 metros sin el barranco y sin las golas. Este modelo hidromorfológico de malla gruesa se llama el “Modelo A” (Figura 5). Se utiliza para describir los procesos generales del lago. Con este modelo, se evalúan el movimientos de agua y el desarrollo de las olas. Se tiene en cuenta la influencia de los flujos de entrada y de salida a través de las descargas laterales en los límites. El “Modelo B” (Figura 5) se amplía con una parte del Barranco del Poyo y tiene una malla fina en el área de la desembocadura del Poyo, con tamaños de célula de 25 metros. De esta forma, es posible modelizar la morfología causada por el flujo de entrada del barranco durante periodos de descarga alta. La gola de Pujol no se ha modelizado por separado, pero su influencia se ha tenido en cuenta a través de un flujo de salida como condición de contorno.

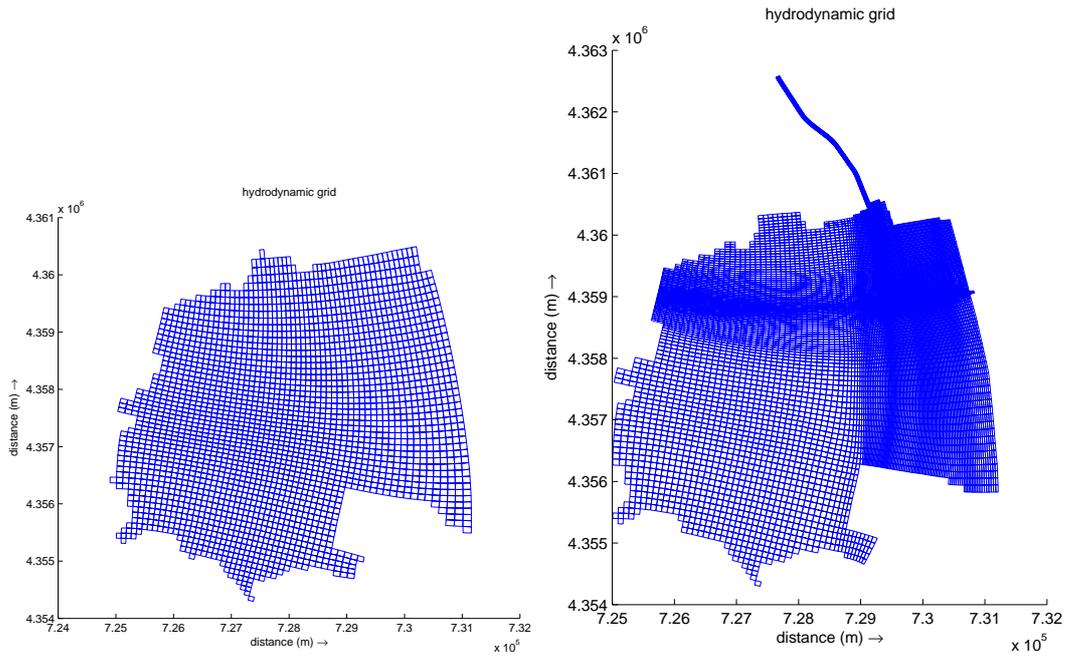


Figura 5. Modelos A y B, mallas de los cálculos

El modelo A no requiere el intercambio de datos con Sobek, pero el modelo B sí requiere tal intercambio.



### 3. ANÁLISIS PRELIMINARES

#### 3.1. ESCALAS DE TIEMPO

Duración característica de una riada:  $T_d = 6$  horas.

Tiempo de relleno hidrodinámico:

$$T_r = \frac{V_A}{Q_b} = \frac{A_A h_A}{Q_b} \quad (3.1)$$

donde  $T_r$  es el tiempo de relleno hidrodinámico,  $V_A$  es el volumen del lago,  $Q_b$  es el caudal del barranco,  $A_A$  es el área del lago y  $h_A$  es la profundidad media del lago. Con  $A_A = 23 \text{ km}^2 = 23 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ ,  $h_A = 1,0 \text{ m}$  y una riada de  $Q_b = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtiene  $V_A = 23 \cdot 10^6 \text{ m}^3 = 23 \text{ hm}^3$  y  $T_r = 115000 \text{ s} = 32 \text{ horas} = 1,3 \text{ día}$ . Es decir, con un caudal de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , el volumen del lago se llena de agua en un poco más de un día. Este tiempo resulta igual a 5 veces la duración de una riada ( $T_r/T_d = 32/6 \approx 5$ ).

Tiempo de vaciamiento hidrodinámico:

$$T_v = \frac{V_A}{Q_g} = \frac{A_A h_A}{Q_g} \quad (3.2)$$

donde  $T_v$  es el tiempo de vaciamiento hidrodinámico y  $Q_g$  es el caudal de las golas. Con  $Q_g = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtiene  $T_v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ s} = 639 \text{ horas} = 27 \text{ días}$ . Es decir, con un caudal de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  a través de las golas, el volumen del lago se vacía en un poco menos de un mes.

Tiempo de decantación:

$$T_s = \frac{V_A}{A_A w_s} = \frac{h_A}{w_s} \quad (3.3)$$

donde  $T_s$  es el tiempo de decantación y  $w_s$  es la velocidad de caída de los sedimentos. TABLA 2 presenta algunos valores para sedimentos diversos.

**TABLA 2. TIEMPOS DE DECANTACIÓN PARA SEDIMENTOS DIVERSOS.**

Limite superior de la clase	Tamaño (mm)	Tamaño (micron)	Velocidad de caída:	Velocidad de caída:	Tiempo de decantación:
			ws (m/s)	ws (m/día)	Ts (minutos)
Arena fina	0,25	250	0,033	2870	0,5
Arena muy fina	0,125	125	0,012	1075	1,3
Limo grueso	0,062	62	0,003	294	4,9
Limo medio	0,031	31	0,001	74	19,5
Limo fino	0,016	16	0,000	20	72,0
Limo muy fino	0,008	8	0,000	5	288,0

### 3.2. BALANCE SIMPLIFICADO DE SEDIMENTOS

El balance de sedimentos expresa que la cantidad de sedimento en el agua del lago cambia por el efecto neto de las entradas y las salidas del sedimento:

$$\frac{d(\text{sedimentos en agua})}{dt} = \text{entrada barranco} - \text{salida golos} - \text{sedimentación} \quad (3.4)$$

$$\frac{dV_A c_A}{dt} = Q_b c_b - Q_g c_A - A_A w_s c_A \quad (3.5)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $c_A$  es la concentración de sedimentos en el lago y  $c_b$  es la concentración de sedimentos en el barranco. Es posible realizar un análisis simplificado cuando se asume que el volumen del lago ( $V_A$  y por consiguiente  $A_A$  y  $h_A$ ) y los caudales ( $Q_b$  y  $Q_g$ ) son constantes:

$$\frac{dc_A}{dt} + \left( \frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_s} \right) c_A = \frac{c_b}{T_r} \quad (3.6)$$

Esta ecuación de relajación describe la adaptación retardada de la concentración de sedimentos en el lago a la concentración en el agua del barranco. Si el agua del barranco está clara ( $c_b = 0$ ), el agua del lago se clarifica gradualmente también por decantación y por la salida de sedimentos a través de las golos. Esta situación es descrita por la solución homogénea de la ecuación (3.6):

$$c_A(t) = c_A(t_0) \exp\left(-\frac{t}{T_v} - \frac{t}{T_s}\right) \quad (3.7)$$

La relajación es gobernada por una escala de tiempo combinada:

$$T_c = \frac{1}{\frac{1}{T_v} + \frac{1}{T_s}} = \frac{T_v T_s}{T_v + T_s} \quad (3.8)$$

Si la velocidad de caída es igual a cero ( $w_s = 0$ ), el tiempo de decantación es infinitamente largo ( $T_s = \infty$ ). Por lo tanto la escala de tiempo combinada iguala el tiempo de vaciamiento hidrodinámico ( $T_c = T_v$ ). Esto significa que la concentración disminuye solamente por la salida de sedimentos a través de las golgas. Si el caudal a través de las golgas es igual a cero ( $Q_g = 0$ ), el tiempo de vaciamiento hidrodinámico es infinitamente largo ( $T_v = \infty$ ) y la escala de tiempo combinada iguala el tiempo de decantación ( $T_c = T_s$ ). Esto implica que la concentración disminuye solamente por decantación.

La

TABLA 3 da valores de la escala de tiempo combinada para sedimentos diversos, asumiendo  $Q_g = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $A_A = 23 \text{ km}^2$  y  $h_A = 1,0 \text{ m}$ . Demuestra que la escala de tiempo combinada es prácticamente igual al tiempo de decantación para todos los sedimentos. Esto significa que el efecto de un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a través de las golgas es insignificante. Este caudal podría solamente tener un efecto significativo si tuviera una concentración de sedimentos más alta que el lago (por ejemplo por corrientes de densidad, véase la sección 3.6).

**TABLA 3. VALORES DE LA ESCALA DEL TIEMPO COMBINADA PARA SEDIMENTOS DIVERSOS.**

Limite superior de la clase	Tamaño (mm)	Tamaño (micron)	Velocidad de caída:	Tiempo de decantación:	Escala de tiempo combinada:
			ws (m/día)	Ts (minutos)	Tc (minutos)
Arena fina	0,25	250	2870	0,5	0,5
Arena muy fina	0,125	125	1075	1,3	1,3
Limo grueso	0,062	62	294	4,9	4,9
Limo medio	0,031	31	74	19,5	19,4
Limo fino	0,016	16	20	72,0	71,9
Limo muy fino	0,008	8	5	288,0	286,0

La tasa de sedimentación es calculada aproximadamente por

$$\frac{dz_b}{dt} = w_s c_A = w_s c_A(t_0) \exp\left(-\frac{t}{T_c}\right) \quad (3.9)$$

donde  $z_b$  es el nivel del fondo.

Corrientes inducidas por el viento

El viento produce una tensión de corte en la superficie del agua:

$$\tau_{\text{viento}} = c_1 \rho_{\text{aire}} U^2 \quad (3.10)$$

donde  $\tau_{\text{viento}}$  es la tensión de corte debida al viento,  $c_1$  es un coeficiente con valor  $c_1 = 0,0033$ ,  $\rho_{\text{aire}}$  es la densidad del aire ( $= 1,2 \text{ kg/m}^3$ ) y  $U$  es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie del agua. Esta tensión de corte causa una elevación de la superficie del agua viento abajo. La Figura 6a demuestra que el equilibrio se describe por la ecuación siguiente:

$$\tau_{\text{viento}} \Delta x = \frac{1}{2} \rho_{\text{agua}} g (h_A + \Delta h_A)^2 - \frac{1}{2} \rho_{\text{agua}} g h_A^2 \quad (3.11)$$

donde  $\Delta x$  es el paso espacial,  $\rho_{\text{agua}}$  es la densidad del agua ( $= 1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  es la aceleración debida a la gravedad,  $h_A$  es la profundidad y  $\Delta h_A$  es la sobrelevación del nivel de agua causada por el viento.

Descuidando  $(\Delta h_A)^2$  porque es mucho más pequeño que  $h_A$ , se obtiene la relación siguiente para la sobrelevación debida al viento:

$$\Delta h_A = \frac{c_1 \rho_{\text{aire}} U^2}{\rho_{\text{agua}} g h_A} \Delta x = 4 \cdot 10^{-6} \frac{U^2}{g h_A} \Delta x \quad (3.12)$$

La TABLA 4 da valores para el lago ( $\Delta x = 6 \text{ km}$ ,  $h_A = 1 \text{ m}$ ) y la TABLA 5 para la Gola del Pujol ( $\Delta x = 500 \text{ m}$ ,  $h_A = 2 \text{ m}$ ).

**TABLA 4. SOBREVOLACIÓN DEL NIVEL DE AGUA DEBIDA AL VIENTO EN EL LAGO PARA DIVERSAS VELOCIDADES DEL VIENTO.**

Velocidad del viento (m/s)	1	2	5	10	20
Sobrelevación (mm)	2,5	9,8	61	245	980

**TABLA 5. SOBREVOLACIÓN DEL NIVEL DE AGUA DEBIDA AL VIENTO EN LA GOLA DEL PUJOL PARA DIVERSAS VELOCIDADES DEL VIENTO.**

Velocidad del viento (m/s)	1	2	5	10	20
Sobrelevación (mm)	0,1	0,4	2,5	10	40

Las tablas demuestran que, bajo condiciones normales, la sobrelevación es significativa en el lago pero insignificante en la Gola del Pujol. Los vientos fuertes tienen siempre un efecto apreciable. En el último caso, es útil observar que no se conocen exactamente las velocidades del viento, debido por lo menos a dos razones: (1) las estaciones de medición del viento no están cerca de las golas, de modo que los vientos medidos no son necesariamente representativos, (2) las velocidades del viento representativas en las fórmulas son un promedio de las velocidades medidas. Este promedio no es una buena representación porque la relación entre las velocidades del viento y las sobrelevaciones no es lineal. La ecuación 3.12 demuestra que un error del 20% en la velocidad del viento conduce a un error del 40% en la sobrelevación.

La sobrelevación causa una corriente que se manifiesta sobre todo cerca del fondo. La tensión de corte causa una contracorriente cerca de la superficie del agua (Fig. 3.1.b).

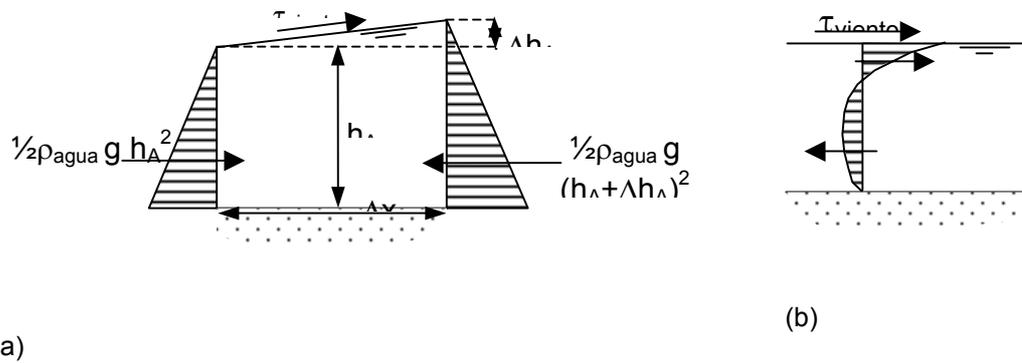


Figura 6. Elevación de la superficie del agua (a) y corriente de circulación (b) debidas al viento

### 3.3. ALTURAS MÁXIMAS DE OLA

Las alturas máximas de ola se calculan con el método del Shore Protection Manual (US Army CERC, 1977). Profundidad no dimensional:

$$d_* = \frac{gh_A}{U^2} \quad (3.13)$$

donde  $d^*$  es la profundidad adimensional,  $g$  es la aceleración debido a la gravedad y  $U$  es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie de la tierra. Si la velocidad del viento es igual a 5 m/s (18 km/h), la profundidad adimensional resulta igual a 0,39. Si la velocidad del viento es igual a 15 m/s (54 km/h), la profundidad no dimensional resulta igual a 0,044.

Esquematisando el lago como un círculo con diámetro  $D = 5,4$  km, el fetch eficaz  $F_{ef}$  se calcula como

$$F_{ef} = \frac{\int_{-\pi/4}^{\pi/4} D \cos^2 \alpha \, d\alpha}{\int_{-\pi/4}^{\pi/4} \cos \alpha \, d\alpha} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) D = 0,91 D = 4,9 \text{ km} \quad (3.14)$$

El fetch expresa el largo del contacto con el viento. El fetch eficaz no dimensional es:

$$F_* = \frac{gF_{ef}}{U^2} \quad (3.15)$$

donde  $F^*$  es el fetch eficaz adimensional. Si la velocidad del viento es igual a 5 m/s (18 km/h), el fetch eficaz no dimensional resulta igual a 1923. Si la velocidad del viento es igual a 15 m/s (54 km/h), el fetch eficaz no dimensional resulta igual a 214.

Fórmula de Bretschneider para el crecimiento de las olas:

$$H_* = 0,283 \tanh(0,53d_*^{0,75}) \tanh \left[ \frac{0,0125F_*^{0,42}}{\tanh(0,53d_*^{0,75})} \right] \quad (3.16)$$

donde  $H^*$  es la altura de ola no dimensional. Si la velocidad del viento es igual a 5 m/s (18 km/h), la altura de ola no dimensional resulta igual a 0,060. Si la velocidad del viento es igual a 15 m/s (54 km/h), la altura de ola no dimensional resulta igual a 0,014. La altura de ola factual se calcula como

$$H_s = \frac{H_* U^2}{g} \quad (3.17)$$

donde  $H_s$  es la altura de ola significativa en metros. Si la velocidad del viento es igual a 5 m/s (18 km/h), la altura de ola máxima resulta igual a 0,15 m. Si la velocidad del viento es igual a 15 m/s (54 km/h), la altura de ola significativa máxima resulta igual a 0,32 m.

Estas alturas de ola significativas máximas ocurren cerca de las orillas viento abajo. Los valores son representativos para el lago, aunque son sobrestimaciones por tres razones:

- 1) Las zonas locales menos profundas y los islotes limitan el crecimiento de las olas;
- 2) El *fetch* eficaz calculado con el método del Shore Protection Manual es una sobrestimación (Seymour, 1977);
- 3) Los valores asumen que la duración de los vientos es suficientemente larga para alcanzar los valores calculados.

Las alturas de ola significativas son valores máximos del promedio de los 33 por ciento más altos de las olas. Tienen importancia porque se corresponden bien con los valores estimados por un observador experto. Otra altura de ola representativa es el valor "root-mean-square" (rms) definido por

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_n^2} \quad (3.18)$$

en el que  $N$  es el número total de olas. Esta altura de ola tiene una relación directa con la energía de las olas. Si el espectro de las olas es estrecho, la probabilidad de que se exceda una altura de ola es dada por una distribución de Rayleigh:

$$p = P\{H \geq H_p\} = \exp \left[ -\left( \frac{H_p}{H_{rms}} \right)^2 \right] = \exp \left[ -2 \left( \frac{H_p}{H_s} \right)^2 \right] \quad (3.19)$$

La implicación que  $H_s = H_{rms}\sqrt{2} = 1,41 H_{rms}$  se puede probar por cálculos numéricos. La distribución de Rayleigh implica que la altura de ola siguiente es excedida solamente por el 1% de las olas:

$$H_{0,01} = H_{rms} \sqrt{\ln \frac{1}{0,01}} = 2,15 H_{rms} \quad (3.20)$$

**TABLA 6. ALTURAS DE OLA MÁXIMAS.**

Velocidad del viento			Alturas máximas de ola (m)		
(m/s)	(km/h)	(Beaufort)	root-mean-square	significativas	excedidas por 1%
5	18	3	0,11	0,15	0,23
10	36	5	0,18	0,25	0,38
15	54	7	0,23	0,32	0,49
20	72	8	0,27	0,38	0,57

### 3.4. CORRIENTES DE DENSIDAD

Las corrientes de densidad con altas concentraciones de sedimento son muy eficaces para el barrido de sedimentos de las presas. La diferencia principal entre las presas y la Albufera es que el agua en las presas es muy profunda.

La experiencia muestra que, generalmente, un lago como la Albufera tiene demasiada poca profundidad y que el sedimento en suspensión está demasiado mezclado verticalmente para que se produzca este fenómeno. En situaciones altamente idealizadas, pueden darse corrientes de densidad, pero normalmente suele haber demasiadas perturbaciones que desestabilizan la estratificación asociada con las corrientes de densidad. El fenómeno de las corrientes de densidad entre la desembocadura del barranco del Poyo y la gola de Pujol en avenidas extraordinarias forma parte del objeto de este trabajo.

### 3.5. PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS ORGÁNICOS

La composición del fondo demuestra que la producción de sedimentos orgánicos por algas y vegetación es un factor importante, pero esta producción funciona en escalas temporales más largas, por lo que este factor no necesita ser considerado en los cálculos con Delft3D. La producción por vegetación parece más importante que la producción por algas, basándonos en la conclusión de Benet Granell (1983): "Contemplando el lago bajo una óptica de totalidad, los sedimentos orgánicos atribuibles al proceso eutrófico del lago son, en cuanto a volumen de aterramiento, y hasta el presente, de mínima importancia". La producción por algas se calcula con el modelo Sobek (véase el informe sobre ese modelo). Vicente & Miracle (1992) mencionan una biomasa de fitoplancton de 30 a 300 mg/l (peso en fresco). Dicen que más de una cuarta parte de esta biomasa de algas no se reciclará y se depositará como sedimento.



## 4. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS CON DELFT3D

### 4.1. EFECTO DEL VIENTO (MODELO A)

#### 4.1.1. Viento sobre fondo fijo horizontal, sin olas (Caso 1)

En una situación con un fondo horizontal, la configuración del flujo está principalmente dominada por la dirección del viento. La

Figura 7 muestra la configuración circulante del flujo en dirección vertical, donde el agua en la superficie fluye en la misma dirección que el viento y el agua en el fondo en la dirección opuesta. No se ve ninguna configuración grande del flujo en dirección horizontal y, por consiguiente, esta situación no es representativa del movimiento del agua en la Albufera.

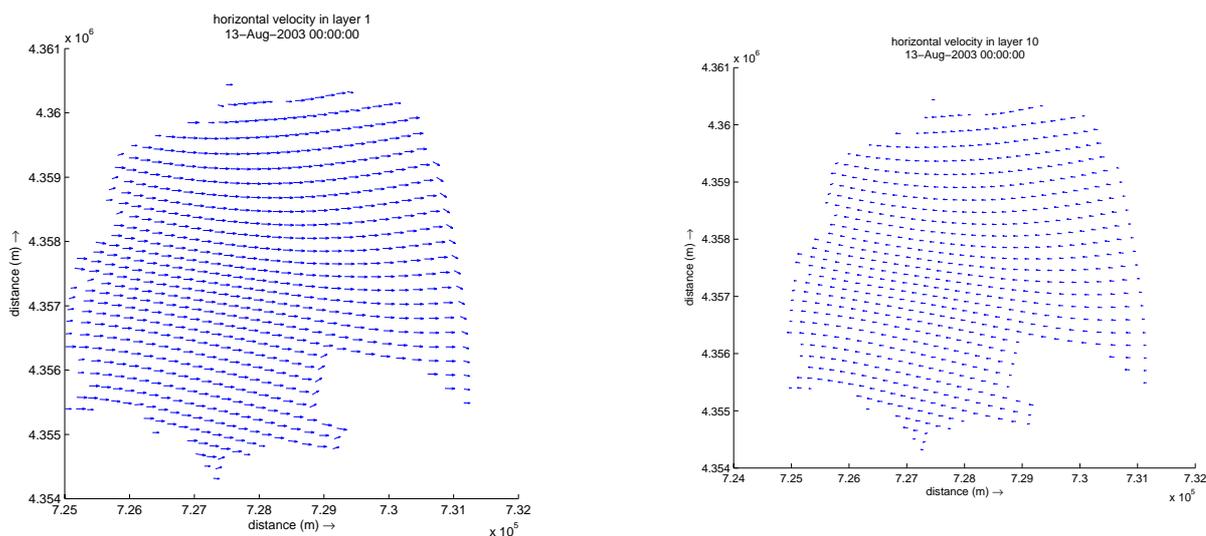


Figura 7. Configuración del flujo en la superficie y el fondo para fondo horizontal y viento del oeste (4 m/s).

#### 4.1.2. Viento sobre fondo fijo, sin olas (Caso 2)

Cuando se aplica una batimetría realista para la Albufera en el modelo Delft3D, la configuración del flujo cambia drásticamente. La

Figura 8 muestra grandes flujos horizontales circulantes en combinación con un movimiento circulante vertical. Las velocidades en la superficie son relativamente altas comparadas con las velocidades en el fondo, y la influencia de las islas y la batimetría es claramente visible. La configuración del flujo se corresponde con la que puede esperarse en un sistema lacustre y el orden de magnitud de las velocidades se corresponde con las observaciones (no mediciones) in situ. Con un viento de 4 m/s, dura aproximadamente entre 3 y 4 horas antes de que el movimiento del agua pasa de agua llana a la configuración del flujo que se muestra a continuación.

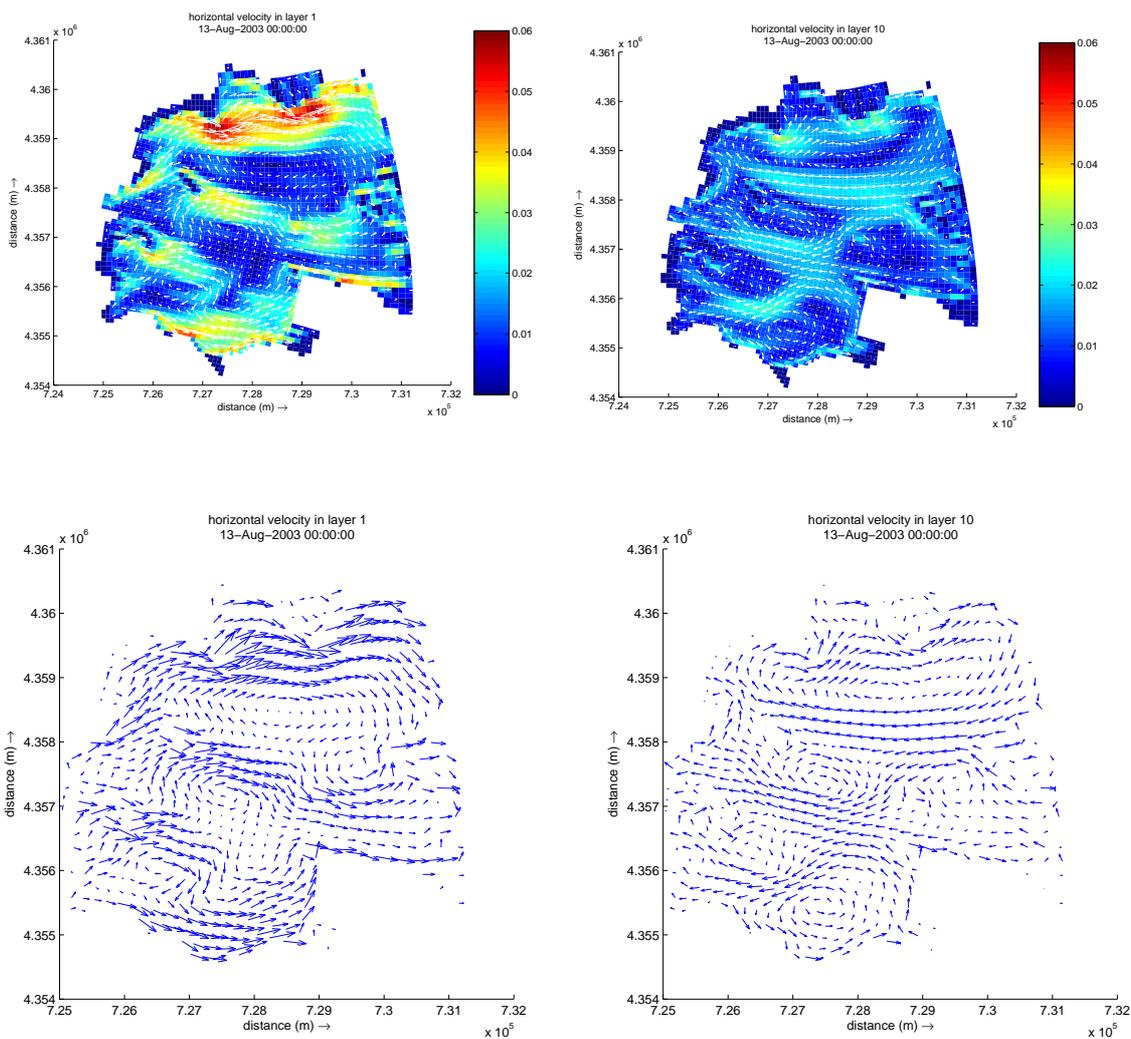


Figura 8. Configuración del flujo [m/s] en la superficie y el fondo para una batimetría realista y viento del oeste (4 m/s).

#### 4.1.3. Viento sobre fondo fijo (Caso 3 y 3b)

En un sistema como la Albufera, el efecto de las olas en los movimientos del agua es significativo. La configuración del flujo cambia ligeramente, pero el mayor efecto es visible en las velocidades del flujo y en la fricción sobre el fondo. Esta última es de gran importancia para el proceso de resuspensión en el lago. La

Figura 9 muestra a la izquierda la configuración del flujo y las velocidades y a la derecha la altura significativa de las olas (caso 3). No se dispone de mediciones de altura de las olas, pero los valores calculados de 0,15 m en la esquina oriental del lago se corresponden con observaciones in situ y los análisis preliminares. Asimismo, la configuración de los valores de la altura de las olas es la que puede esperarse. Para subrayar el efecto de las olas, estos cálculos se realizaron con una velocidad del viento algo más alta (7 m/s).

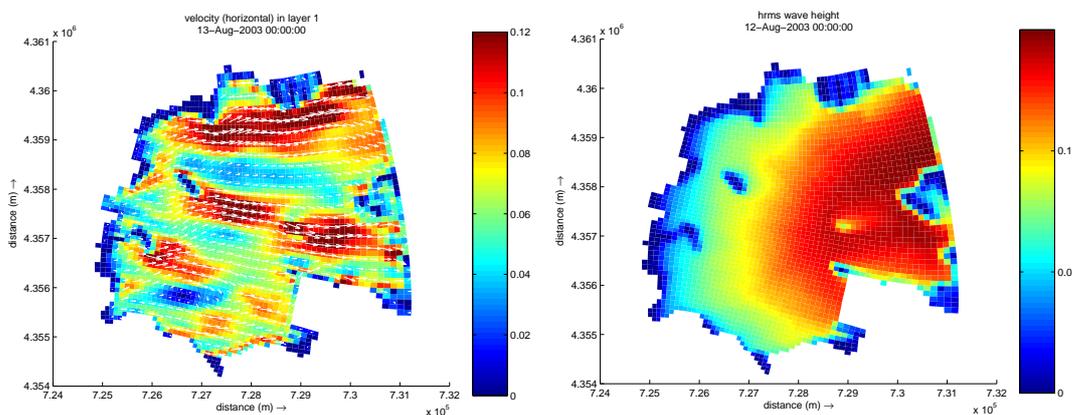


Figura 9. Izquierda: configuración del flujo [m/s] en la superficie para batimetría realista y viento del oeste (7 m/s) con olas. Derecha: altura significativa de las olas.

En el caso 3b se simula la misma situación pero con golgas abiertas. La condición inicial es un nivel de agua constante de 0.20 m en el lago y en el mar. El viento del oeste de 7 m/s produce un gradiente hidráulico en el lago que genera un incremento del nivel del agua en el este del lago (Figura 9) resultando un flujo de salida hacia el mar. El período de simulación es de un día.

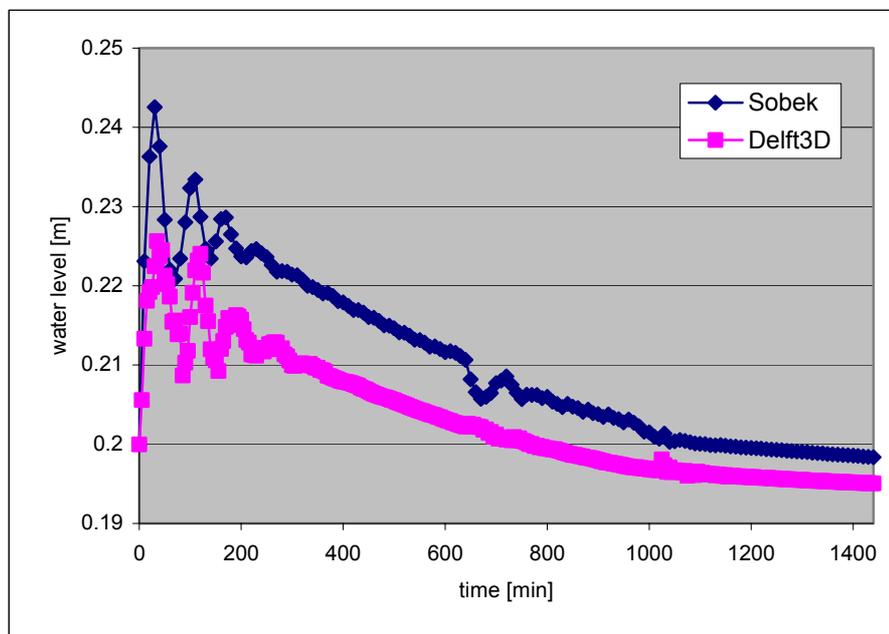


Figura 10. Niveles de Agua (Sobek y Delft3D) en el lado este del lago junto a la Gola de Pujol como resultado de un viento del oeste de 7 m/s

Las condiciones de contorno en términos de caudal (Figura 11) han sido tomadas del modelo Sobek construido en actividades precedentes. En la Figura 10 puede observarse que ambos modelos propor-

cionan valores similares de los niveles de agua en las proximidades de la gola de Pujol incluyendo sus fluctuaciones. Los niveles son en general menores en el modelo tridimensional Delft3D que en el modelo Sobek. Probablemente este hecho se debe al efecto del grado adicional de libertad en el flujo del modelo Delft3D (variación en la dirección vertical).

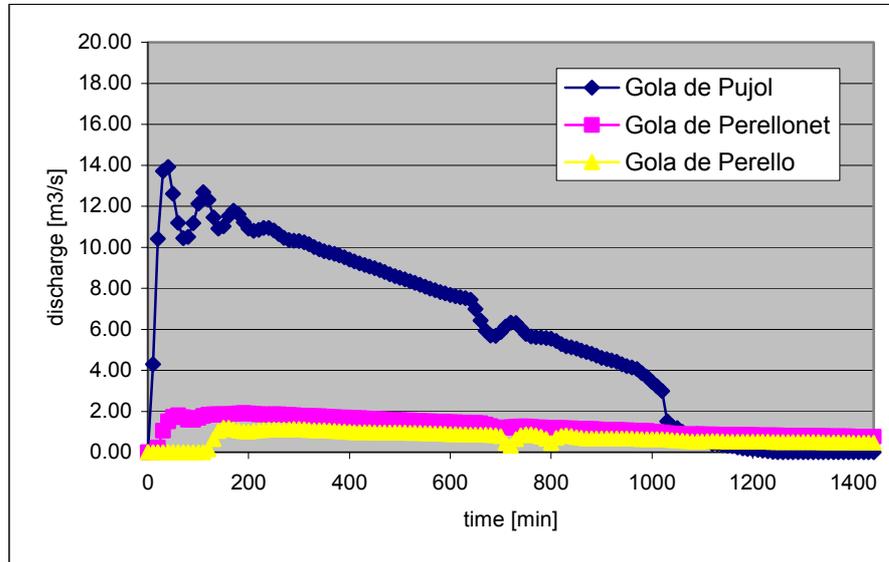


Figura 11. Caudal de salida a través de las Golas de Pujol, Perellonet y Perelló como resultado de un viento de 7 m/s del oeste.

#### 4.1.4. Viento débil sobre fondo fijo (Caso 4)

Para poder comparar una situación con olas y una situación sin olas y mostrar la diferencia en velocidad del viento, el Caso 4 describe la situación con una velocidad de 4 m/s. La diferencia en velocidad del viento es inmediatamente visible en las velocidades del flujo y en la altura de la ola en la

Figura 12. Para facilitar la comparación, la Figura 11 y la

Figura 12 tienen la misma escala. Las alturas significativas de la ola disminuyen de 5 a 10 cm y las velocidades se reducen también a la mitad. No obstante, la configuración de las velocidades sigue siendo exactamente la misma.

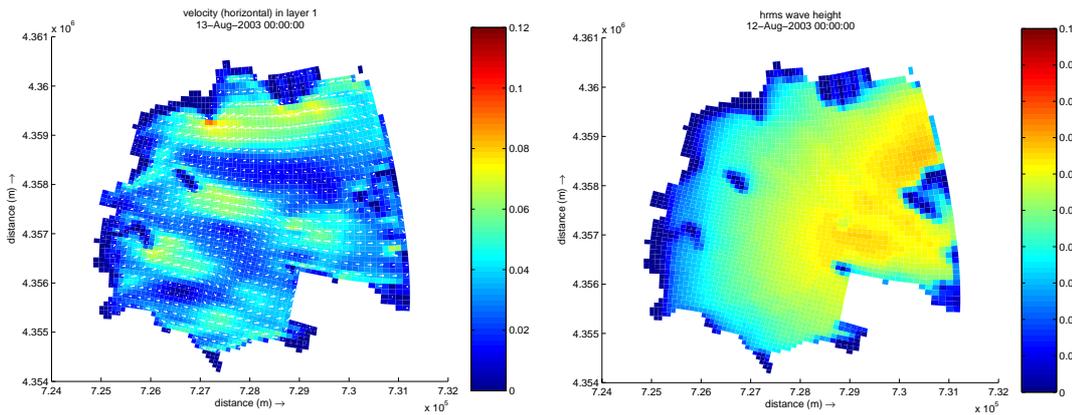


Figura 12 Izquierda: configuración del flujo [m/s] en la superficie para batimetría realista y viento del oeste (4 m/s) con olas. Derecha: altura significativa de las olas.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las olas tienen una influencia significativa en la morfología porque aumentan la fricción en el fondo, ocasionando una mayor resuspensión de sedimentos. La

Figura 13 muestra las diferencias en fricción del fondo. La configuración cambiante muestra también que las olas tienen una influencia en la configuración de la morfología.

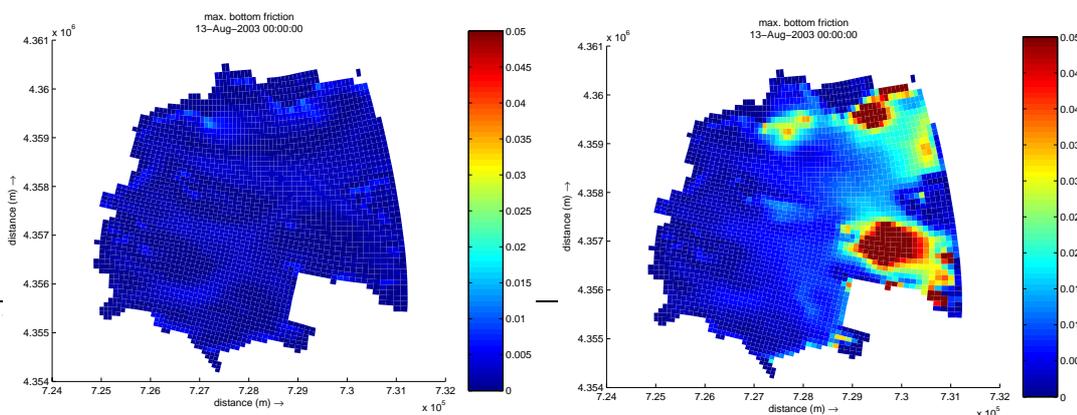


Figura 13. Fricción del fondo [N/m<sup>2</sup>] para una situación sin olas (Caso 2) y con olas (Caso 4).

#### 4.1.5. Viento sobre fondo móvil (Caso 5, 5b, 5c)

Para evaluar la morfología en el lago durante un evento de tormenta, se ha realizado un cálculo para una situación con el viento viniendo del oeste a una velocidad de 7 m/s. Las posibilidades de calibrar los resultados de un cálculo de este tipo son limitadas, pero la configuración existente de la batimetría da una idea de lo que serían los resultados. En este cálculo, se han introducido tres fracciones de sedimentos en el fondo del lago. Cada una de estas fracciones estaba presente en una capa de 30 cm. El Apéndice B describe las características de este sedimento. Debido al movimiento del agua y a las olas, este sedimento queda en suspensión y es transportado a través del sistema, traduciéndose en un modelo determinado de erosión y sedimentación. La

Figura 14 muestra este modelo. En este caso, la erosión sólo es visible porque el resto del sedimento sigue estando en suspensión, probablemente debido a las velocidades relativamente altas producidas por estas condiciones de viento y olas. El otro gráfico de la

Figura 14 muestra un ejemplo de la visualización de la distribución de sedimentos en el lago. Este gráfico muestra la concentración de la fracción del sedimento muy fino en la superficie, en kg/m<sup>3</sup>. El comportamiento de las fracciones de sedimento por separado puede evaluarse mejor con Quickplot.

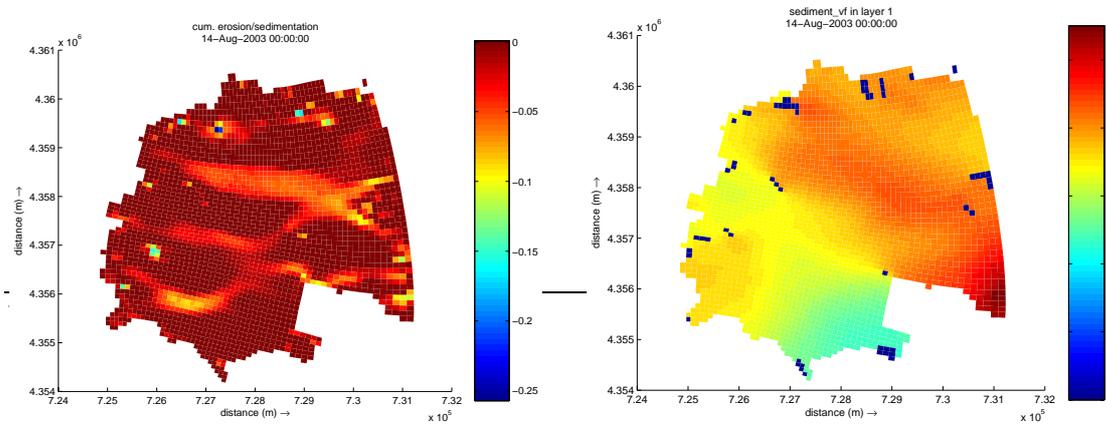


Figura 14. Configuración de la erosión [m] después de dos días y concentración del sedimento muy fino [kg/m<sup>3</sup>] en la superficie.

El Caso 5b se corresponde con una combinación de los Casos 3b y 5 (viento de 7 m/s del oeste y olas inducidas por viento con lecho móvil). El período de simulación es nuevamente de un día. El objeto de este caso de prueba es el transporte de sedimentos a través de las tres golas. La mayor parte del sedimento es transportado a través de la gola de Pujol, la cual tiene, con mucho, el mayor caudal de salida. El transporte acumulado de sedimento se muestra en la Figura 15.

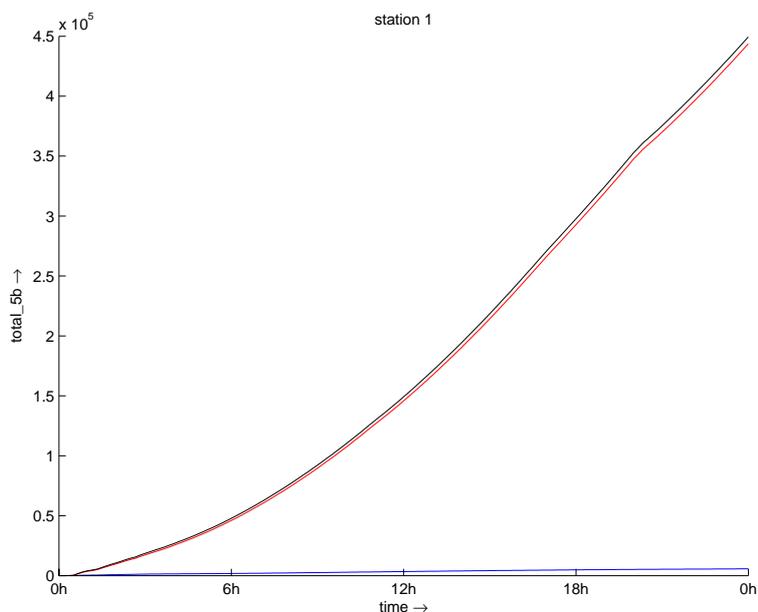


Figura 15. Transporte acumulado de sedimento (limo - azul, arcilla - rojo, total - negro) a través de la Gola de Pujol en t.

La mayor parte del sedimento resuspendido es arcilla. La cantidad total de sedimento es de 450 t al final del período de simulación de un día.

El Caso 5c se corresponde básicamente con el Caso 5b. La condición de contorno en términos de caudal se sustituye por la capacidad máxima de bombeo en las estaciones de la Gola de Pujol (31 m<sup>3</sup>/s) y de la Gola del Perellonet (15 m<sup>3</sup>/s). Este caso da una indicación de cuánto sedimento puede ser evacuado al mar si se produce una resuspensión como consecuencia del oleaje inducido por fuerte viento. El transporte acumulado de sedimento por la Gola de Pujol y la Gola de Perellonet se muestra en la Figura 16.

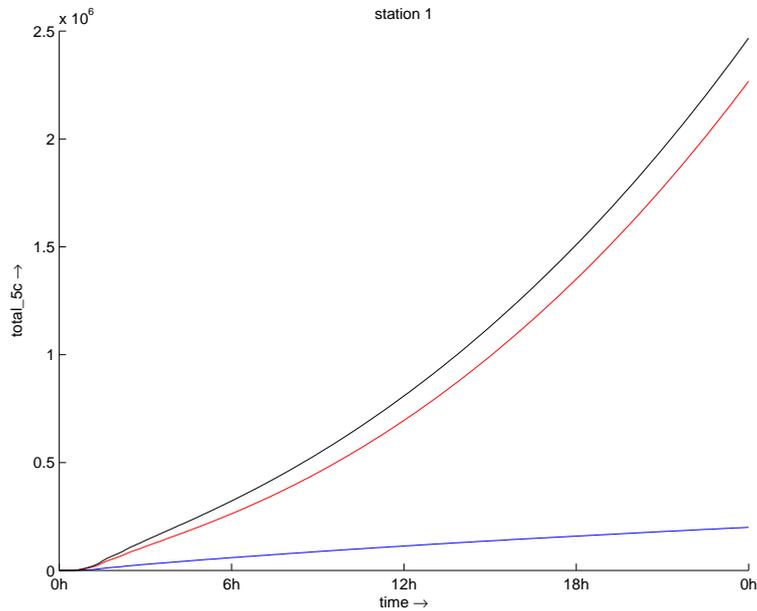


Figura 16. Transporte acumulado de sedimento (limo-azul, arcilla-rojo, total-negro) a través de la Gola de Pujol en t.

La Tabla 7 resume los resultados de los casos 5b y 5c. Podemos concluir que una cierta cantidad de sedimento puede ser evacuado al mar si a) el sedimento se resuspende en el lago y b) el transporte de agua (que contiene sedimento con una determinada concentración) es forzado por las bombas.

**TABLA 7. SEDIMENTO TRANSPORTADO A TRAVÉS DE LA GOLA DE PUJL PARA LOS CASOS 5B Y 5C.**

	Arcilla [t]	Limo [t]	Total [t]
5b	444	6	450
5c	2267	199	2466

La Figura 17 muestra el transporte a través de la Gola de Pujol para los casos 5b y 5c.

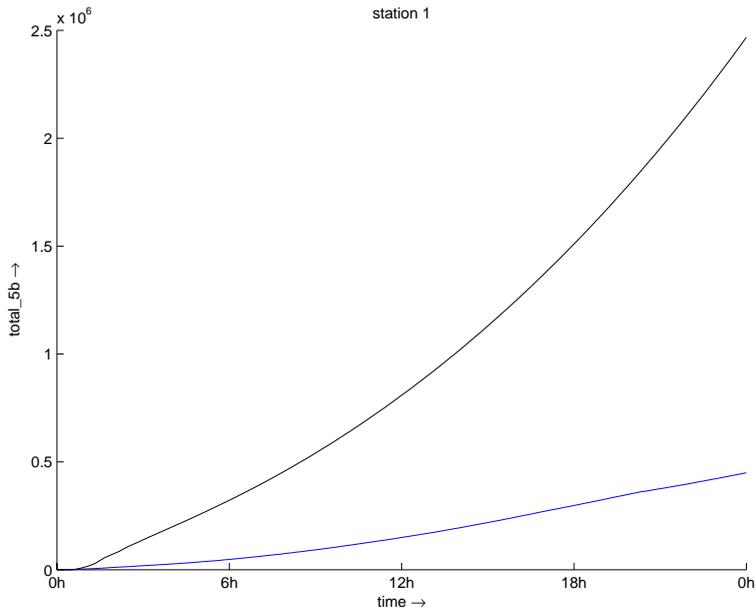


Figura 17. Transporte total acumulado de sedimento a través de la Gola de Pujol para los casos 5b (azul) y 5c (negro) en t.

#### 4.1.6. Viento que se alterna sobre fondo fijo (Caso 6)

Debido a las alternancias de dirección y velocidad que experimenta el viento, es importante conocer el tiempo de adaptación del sistema. En este cálculo, el viento que viene del oeste con una velocidad de 7 m/s cambia de rumbo hacia el norte después de un periodo de seis horas. La muestra que la configuración del flujo se ha adaptado después de un periodo de aproximadamente 4 horas.

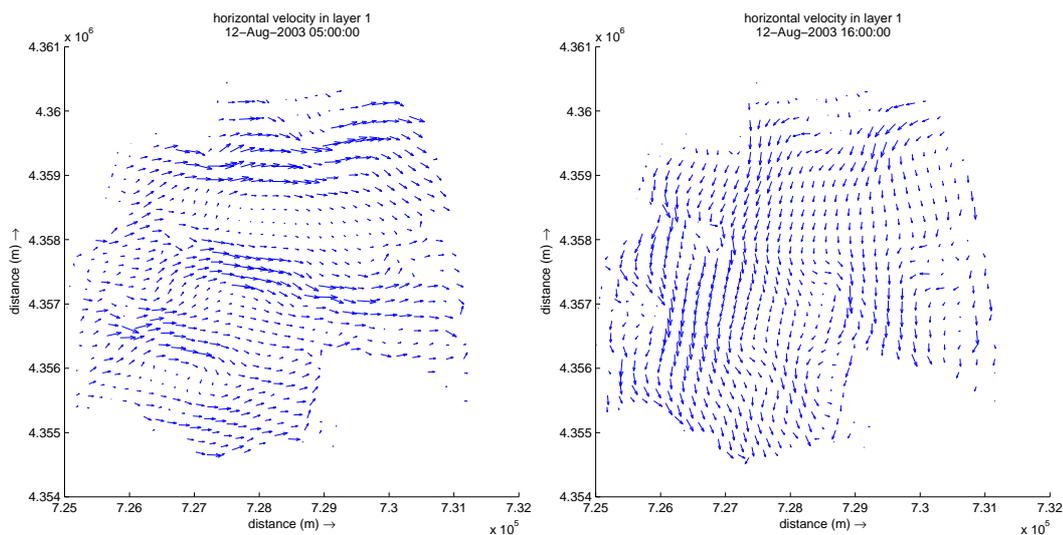


Figura 18. Dirección cambiante del viento. Izquierda: la configuración del flujo después de 5 horas. Derecha: la configuración del flujo después de 16 horas (4 horas después de cambiar el viento).

#### 4.1.7. Viento que se alterna sobre fondo móvil (Caso 7)

Este cálculo no está disponible por las limitaciones dentro de Delft3D.

#### 4.1.8. Influencia de la rugosidad (Caso 8)

El valor de rugosidad para el lago de  $n_m = 0,02 \text{ s/m}^{1/3}$  se basa en información global sobre el material del fondo del lago. No se dispone de mediciones para determinar un valor más exacto. Se corresponde con valores utilizados normalmente para sistemas como el de la Albufera. Para determinar la influencia de este valor de la rugosidad en las velocidades del flujo, se ha realizado un cálculo con un valor de rugosidad de  $n_m = 0,3 \text{ s/m}^{1/3}$ . La

Figura 19 muestra el descenso en velocidad. La influencia es significativa, y subraya la importancia de definir el valor correcto de rugosidad. Por ahora, el valor utilizado de  $n_m = 0,02 \text{ s/m}^{1/3}$  parece una buena estimación, pero cuando se disponga de información más detallada, debe ser aplicada al modelo.

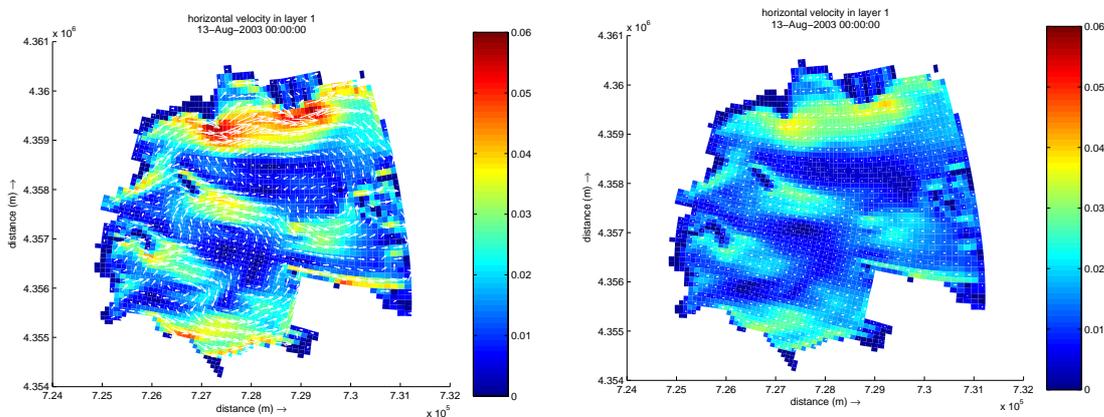


Figura 19. Influencia del valor de rugosidad en las velocidades del flujo [m/s].

#### 4.1.9. Efecto por los aportes medios que llegan al lago(Caso 9a y Caso 9d)

Además del gran flujo de entrada en el Poyo durante eventos de riada, en el lago fluyen muchos pequeños canales (acequias). Para determinar su influencia en la configuración del flujo, se ha realizado un cálculo en el que se tienen en cuenta los valores medios de estas descargas, sin la influencia del viento. La Tabla B.1 muestra los valores de estos aportes. La Figura 20 muestra que estas afluencias prácticamente no generan ningún movimiento de agua en el lago. Solo en el flujo entrante de Overa ( $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) puede verse un flujo significativo. En este cálculo, se ha dejado fuera la influencia de las golas. De la Figura 20 puede deducirse que la entrada de flujo en los límites durante condiciones de tipo medio no desempeña un papel importante para el movimiento del agua.



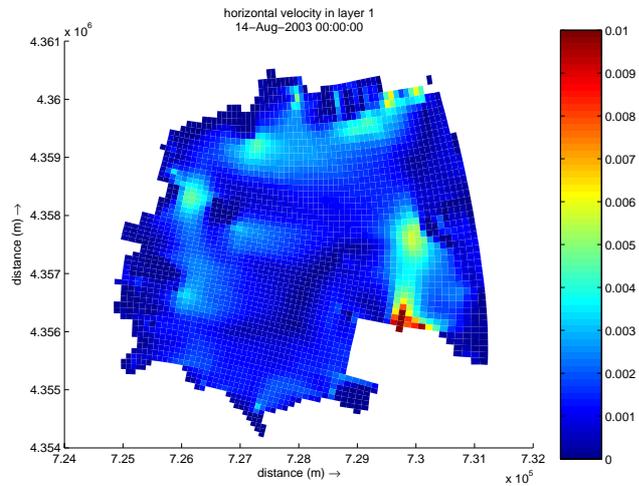


Figura 20. Velocidades del flujo [m/s] en una situación con diferentes afluencias de valores medios.

El flujo de entrada durante condiciones más extremas es diferente. La descarga máxima durante el episodio de octubre de 2000 en el flujo de entrada del Poyo se ha cifrado en 450 m<sup>3</sup>/s y el flujo pico de salida en Pujol en 75 m<sup>3</sup>/s (Ver 4.2. En el Caso 9d se ha evaluado una situación menos extrema (200 m<sup>3</sup>/s de entrada del Poyo y 40 m<sup>3</sup>/s de salida por Pujol) para comprobar si esta combinación en flujos de entrada y salida genera un flujo en dirección a Pujol.

La

Figura 21 muestra la configuración del flujo en la superficie. El gráfico de vectores muestra que existe un flujo del Poyo a Pujol, pero las velocidades son muy pequeñas. Los cálculos del evento Octubre 2000 con el modelo más detallado deben subrayar si existe influencia en la morfología.

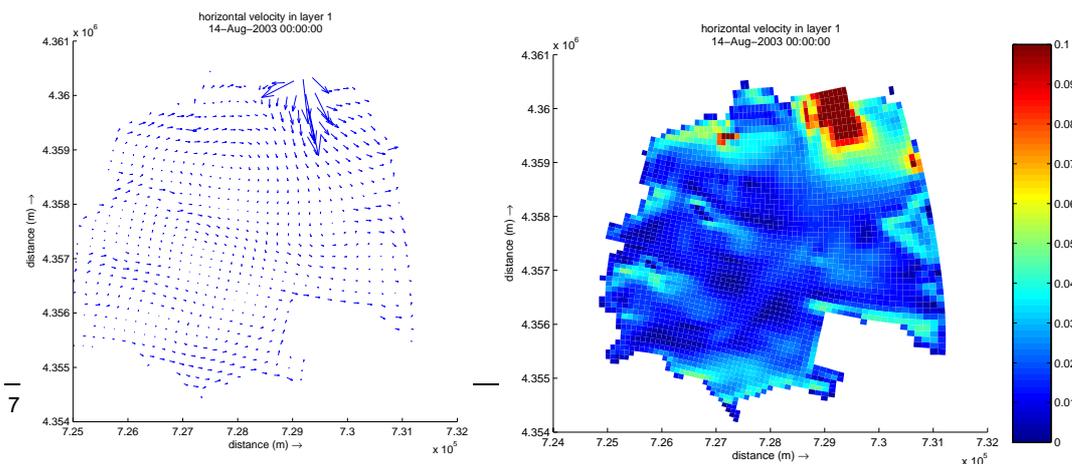


Figura21. Configuración del flujo para una situación extrema en el Poyo y Pujol, con viento del oeste (4 m/s).

## 4.2. EFECTO DE UNA RIADA EN EL BARRANCO DEL POYO (MODELO B)

Cambiar el grid de un modelo puede influir en los resultados. Para poder comparar los resultados del Modelo A y el Modelo B, debería ser semejante el movimiento del agua en ambos modelos. Para evaluar el efecto del refinado, se han comparado los resultados del Caso 10 y el Caso 4. La configuración de las velocidades y los vectores en ambos casos era similar. Tras la verificación, el modelo se cambió ligeramente para poder describir el movimiento del agua y la morfología en el Barranco del Poyo y la laguna. Todos los cálculos con este modelo se realizaron con hidrogramas de la riada de Octubre 2000. Este apéndice describe los resultados de este modelo.

### 4.2.1. Condiciones de contorno

Durante la avenida de Octubre 2000 en el lago de la Albufera, entró agua al lago no sólo a través de los diferentes barrancos (p.e. barranco del Poyo), sino también superando los diques de los arrozales inundados. El campo total de afluencia con agua entrando y saliendo de todas direcciones y las concentraciones de sedimento asociadas se tomaron del modelo Sobek (WL | Delft Hydraulics para TYP-SA, 2004). Las condiciones de contorno de este modelo se muestran en la Figura 22.

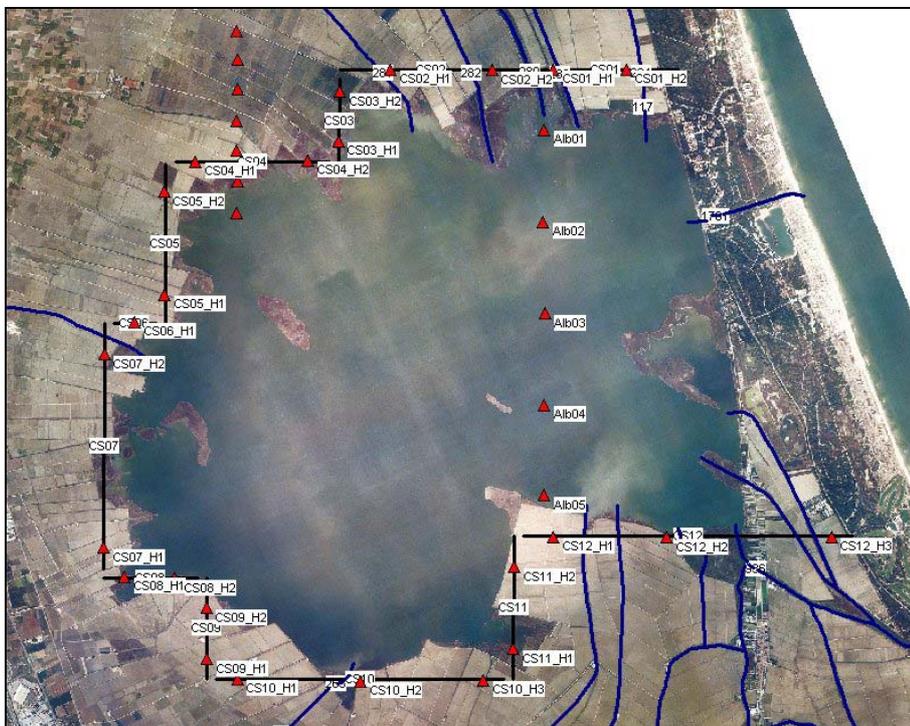


Figura 22. Obtención de condiciones de contorno para el evento Octubre 2000 en Sobek.

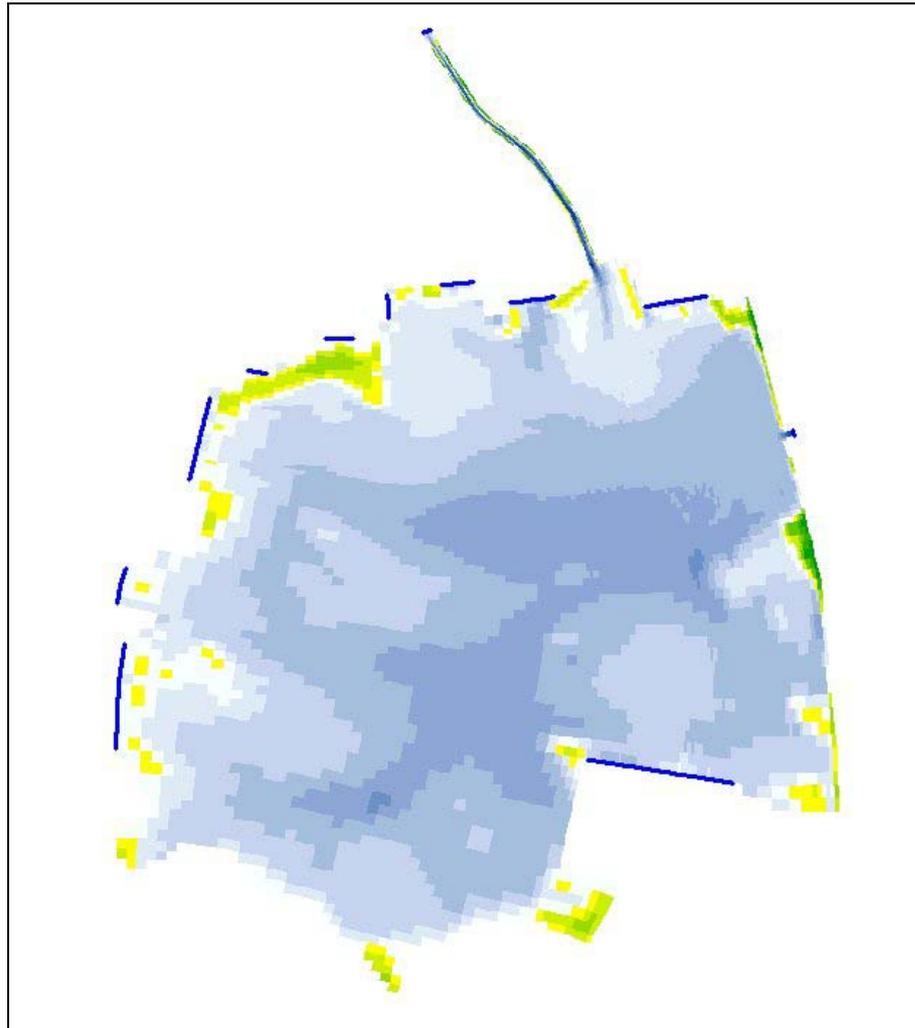


Figura 23. Aplicación de condiciones de contorno para el evento Octubre 2000 en Delft3D (líneas azul oscuro).

Las condiciones de contorno correspondientes en Delft3D se muestran en la Figura 23. Para facilitar el procesamiento de los datos, no se tuvieron en cuenta algunos flujos afluentes y efluentes menores en el sur del lago, que cubren sólo alrededor del 5 % de la de los aportes totales de agua durante el evento, siendo la cantidad de sedimento que aportan prácticamente insignificante.. Por ello, la condición de contorno en el sureste del lago (CS12) fue adaptada para compensar las condiciones no tenidas en cuenta.

En el Caso 12 y 13, se tuvo en cuenta el efecto del viento utilizando los valores medidos de las velocidades y direcciones del viento del evento Octubre 2000, mostrados en la Figura 24.

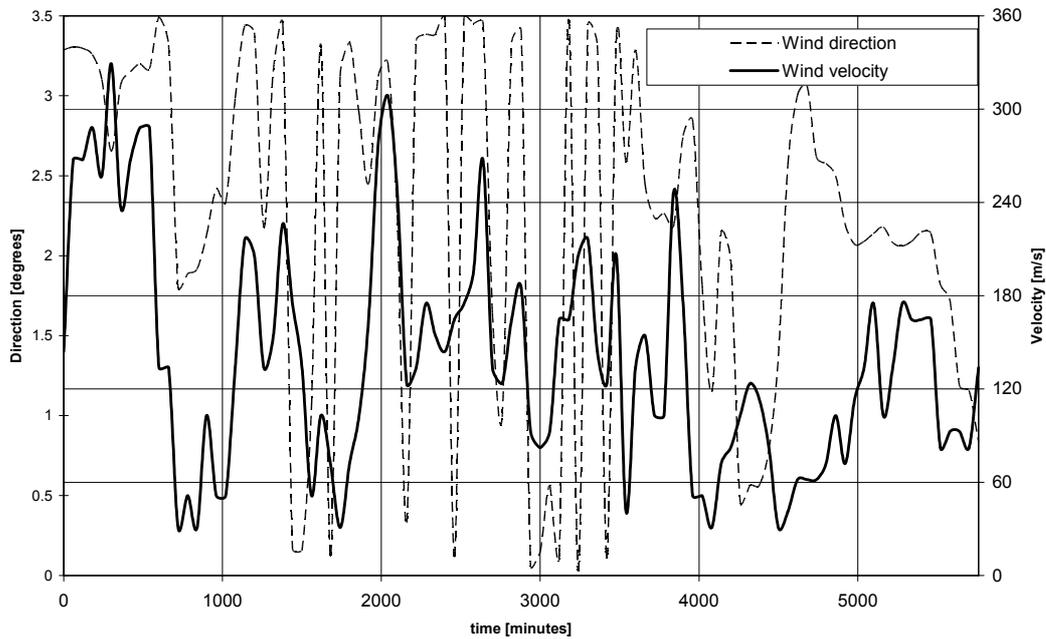


Figura 24. Dirección y velocidad del viento del evento Octubre 2000.

#### 4.2.2. Efecto de una avenida, sin viento (Caso 11)

En principio, la influencia de los flujos de salida y entrada se evalúa sin el efecto del viento y la morfología.

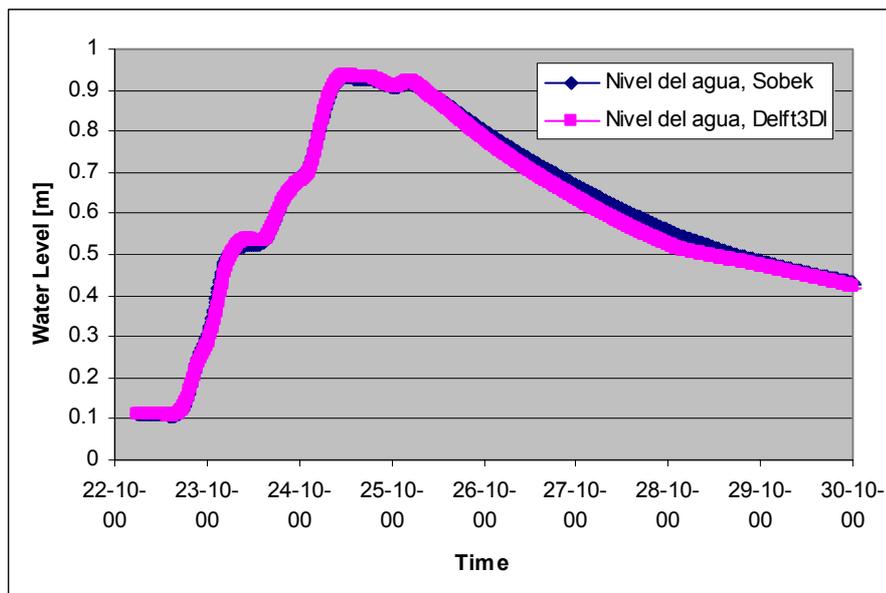


Figura 25. Niveles de agua en Sobek y Delft3D en la Gola de Pujol

El balance hídrico del modelo Delft3D fue comprobado comparando niveles de agua entre los modelos existentes en Sobek y Delft3D. La Figura 25 muestra que esos niveles de agua son prácticamente idénticos. Podemos concluir en una aplicación consecuente de las condiciones de contorno. Las condiciones límite del barranco del Poyo y la Gola de Pujol se muestran en la Figura 26. En el Poyo, la descarga máxima es de 450 m<sup>3</sup>/s y en Pujol es de 75 m<sup>3</sup>/s.

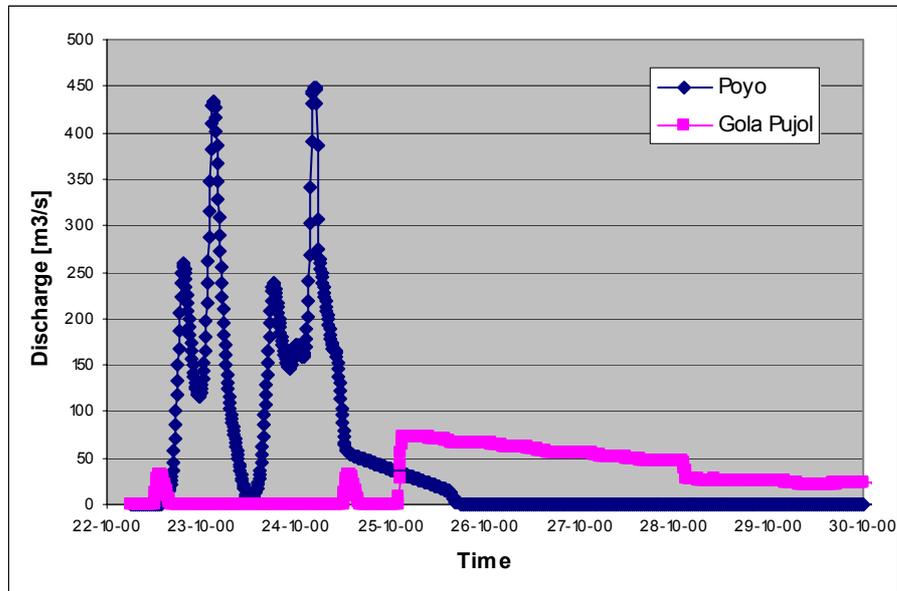


Figura 26. Niveles de agua en Sobek y Delft3D en la Gola de Pujol

Figura 27, Figura 28 y Figura 29 muestran las velocidades de flujo en un determinado paso temporal durante los cálculos que combinan el flujo de entrada de los barrancos y las salidas al mar por las golas. Sin el efecto del viento, las velocidades en el lago son limitadas, pero en el Barranco del Poyo y en Pujol, llegan hasta 2,8 m/s. No existe una relación directa visible entre el flujo de entrada y el de salida.

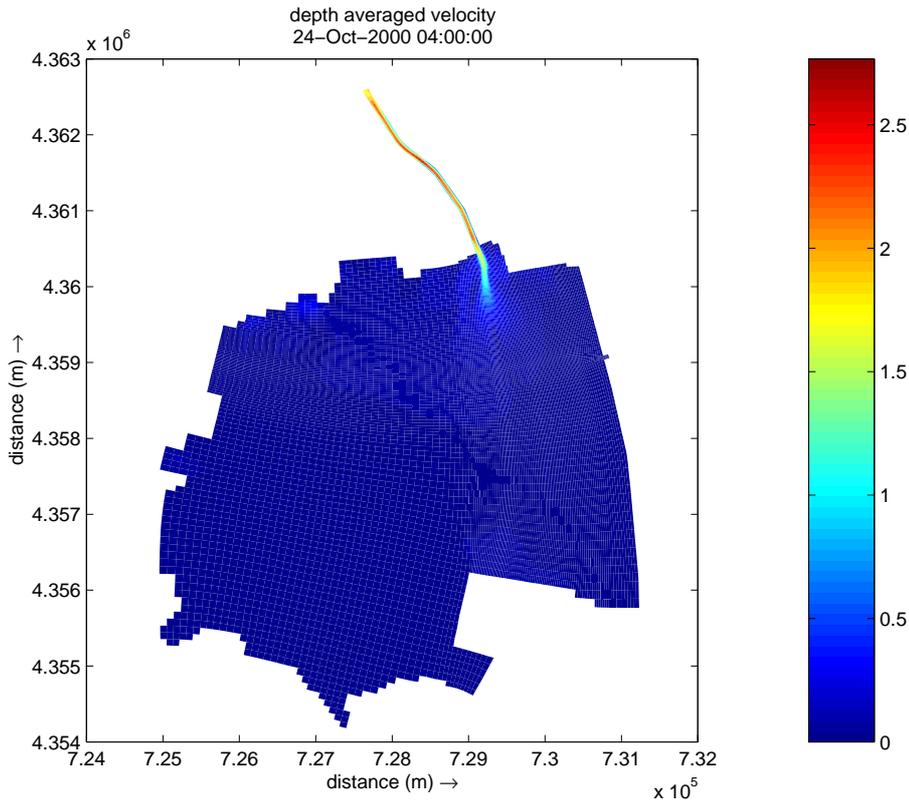


Figura 27. Velocidades del flujo [m/s] a las 4:00 del 24 de octubre de 2000

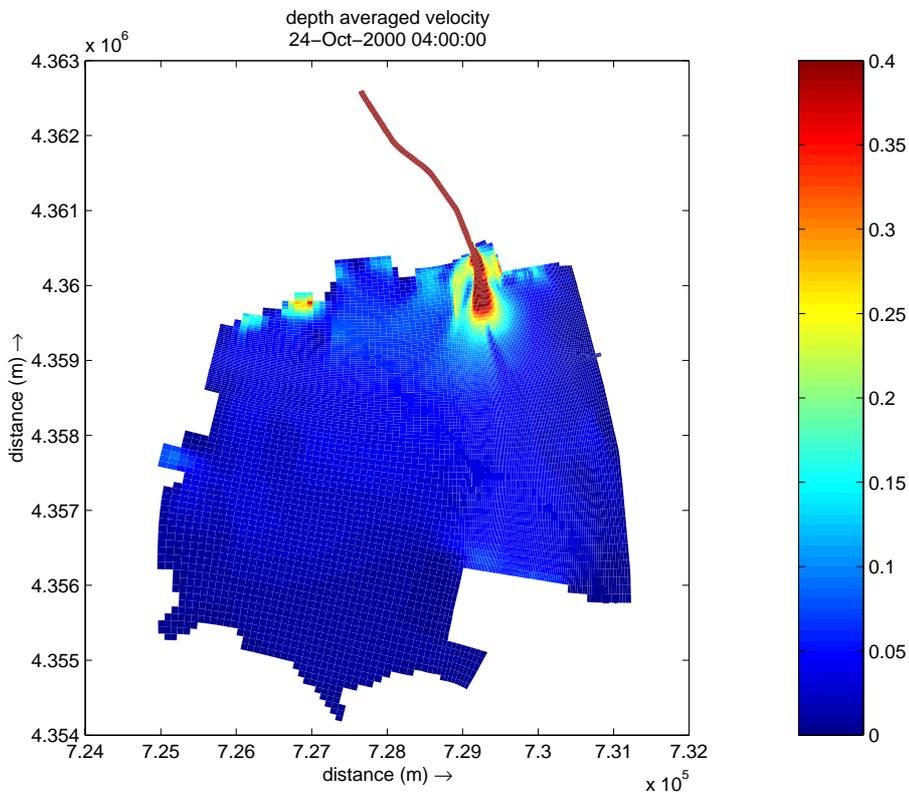


Figura 28. Velocidades del flujo [m/s] a las 8:00 del 24 de octubre de 2000 (en escala)

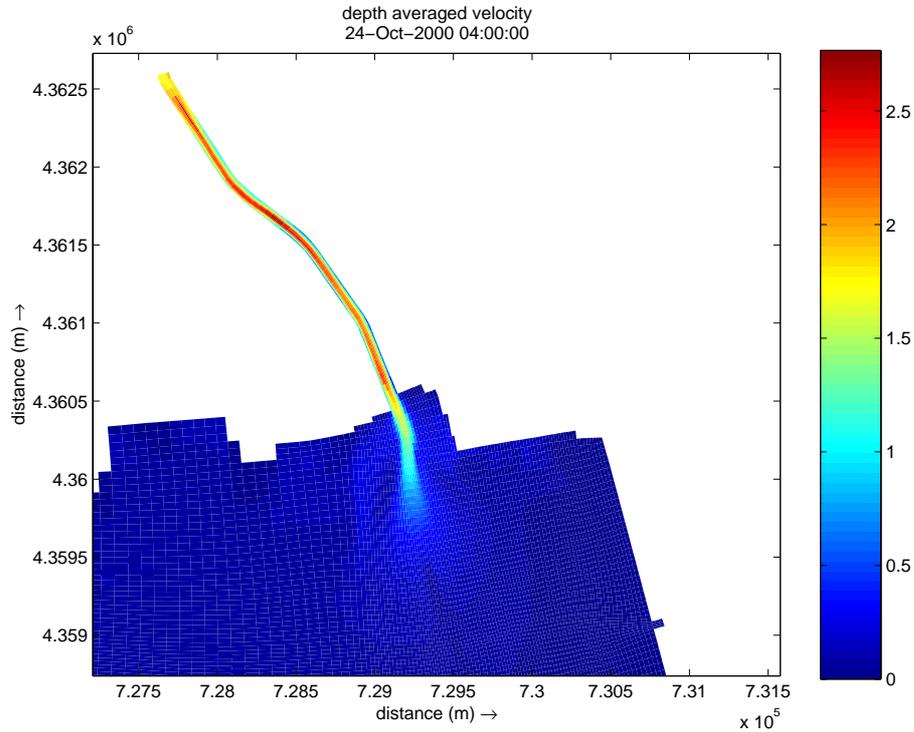


Figura 29. Velocidades del flujo [m/s] a las 8:00 del 24 de octubre de 2000 (barranco del Poyo)

#### 4.2.3. Efecto de una avenida, con viento (Caso 12)

La introducción de la influencia del viento para el evento Octubre 2000 no tiene un gran efecto debido a las velocidades relativamente pequeñas del viento. La diferencia en velocidad con una profundidad media entre la simulación sin viento (caso 11) y con viento (caso 12) es menor de 5 cm/s por todo el lago (Figura 30). En el barranco del Poyo, esta diferencia es incluso menor debido a las superiores velocidades del flujo, impulsadas principalmente por fuerzas inducidas por la pendiente del fondo (Figura 31).

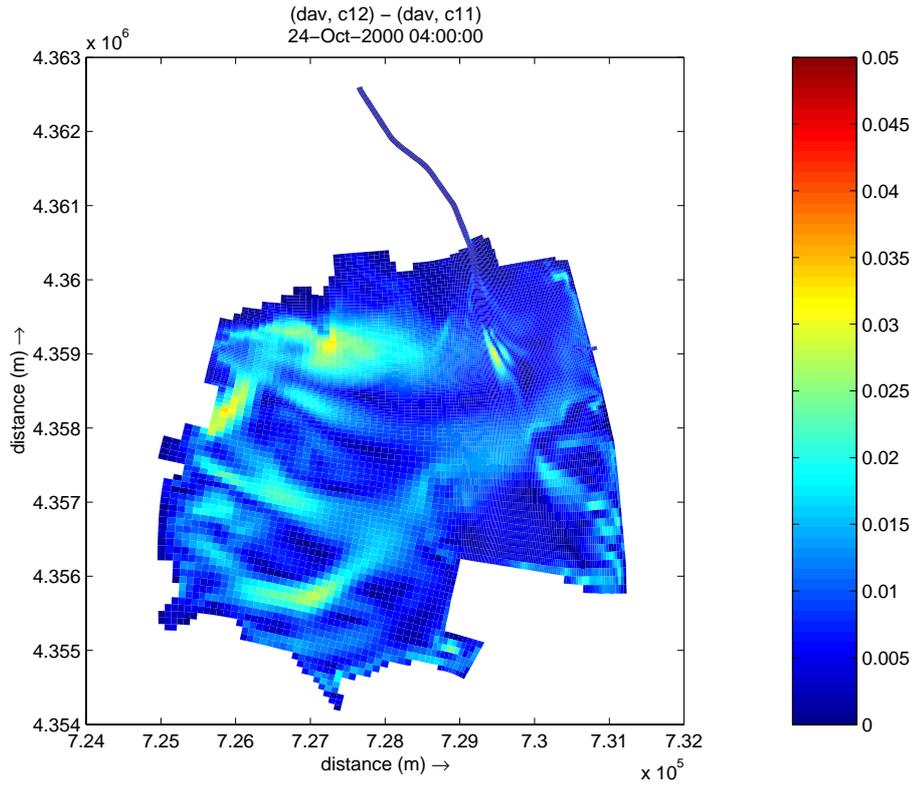


Figura 30. Diferencia [m/s] entre el caso 11 (sin viento) y el caso 12 (con viento)

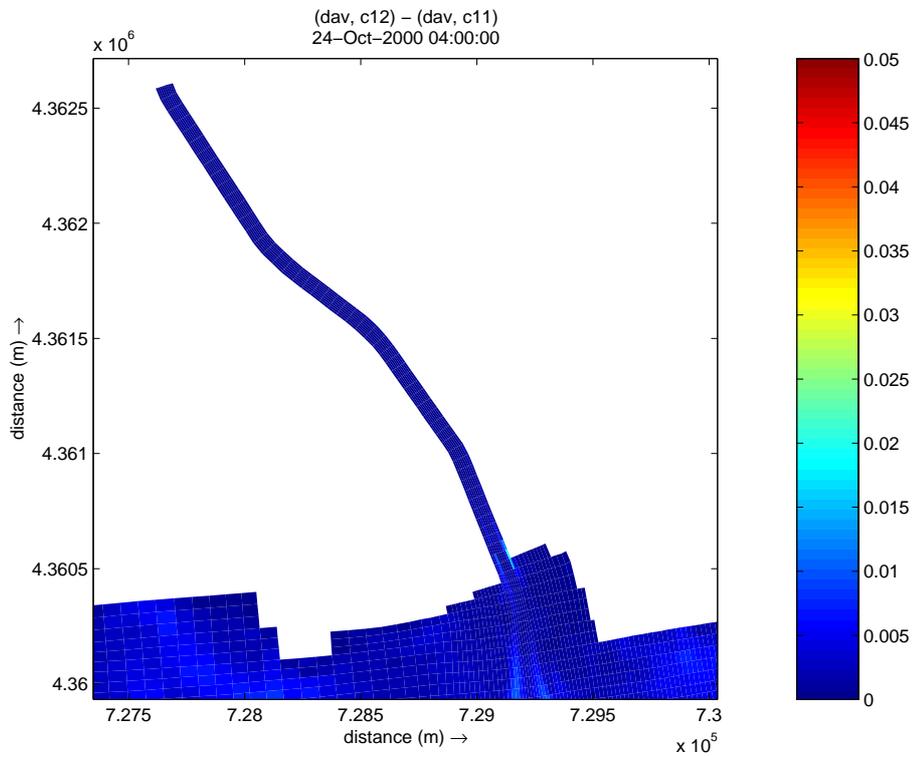


Figura 31. Diferencia [m/s] entre el caso 11 (sin viento) y el caso 12 (con viento), detalle del barranco de Poyo

#### 4.2.4. Efecto de la avenida de octubre de 2000, con viento sobre fondo móvil (Caso 13, 13b y 13c)

Este cálculo describe el evento completo Octubre 2000, con los efectos de la morfología en el lago y el flujo de entrada de sedimentos en el límite del Poyo. El efecto de las olas no se ha tenido en cuenta. En el límite del Poyo corriente arriba, se han impuesto condiciones de equilibrio para las tres fracciones. Por razones de estabilidad, el paso temporal para el cálculo morfológico se ha reducido a 1 minuto y el grid se ha hecho más grueso en una región fuera del área de interés.

Este apartado describe globalmente los resultados de este cálculo. Para evaluar el evento Octubre 2000 en mayor detalle, se ha hecho referencia a la herramienta de visualización Quickplot. Uno de los principales propósitos del modelo Delft3D era simular la morfología en la desembocadura del Poyo como resultado de las descargas. La

Figura 32 muestra la erosión y la sedimentación en la desembocadura del Poyo con una descarga reducida de sólo 50 m<sup>3</sup>/s (caso 13a). Ambos gráficos muestran el cambio en batimetría en relación con el nivel de referencia. En el Poyo, la erosión se produce por las velocidades relativamente altas (alrededor de 0.5 m/s) y cuando las velocidades pasan repentinamente a ser muy pequeñas, ocurre sedimentación en el lago. La erosión es visible en el flujo de salida cerca de Pujol.

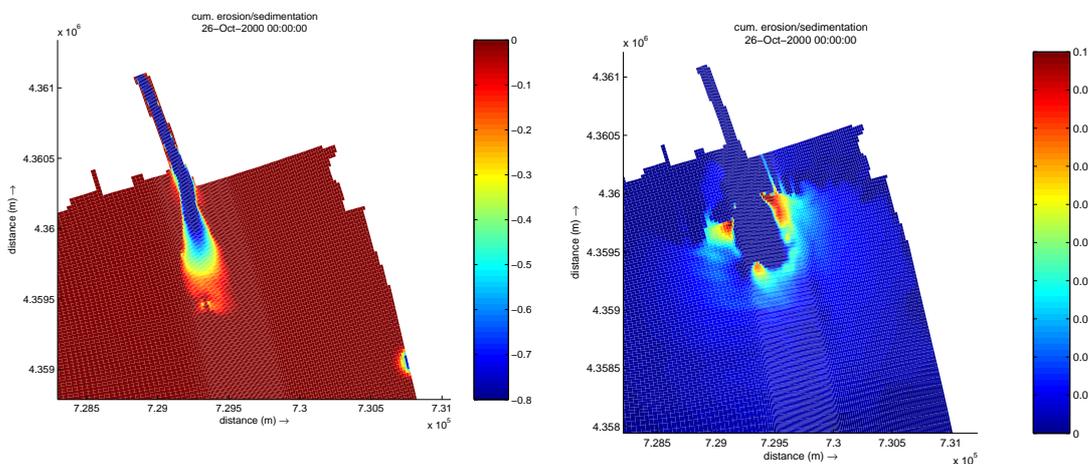


Figura 32. Erosión y sedimentación [m] en desembocadura del Poyo después del evento Octubre 2000. la

Teniendo en cuenta la descarga total del Poyo (caso 13b, con corrientes de densidad) el efecto erosivo en la desembocadura del Poyo es mucho mayor, lo que se traduce en una simulación numérica inestable. Para el siguiente análisis de la sedimentación en el lago, hemos optado por establecer como cero el espesor inicial en el fondo de las tres fracciones de sedimento.

La sedimentación acumulativa a finales del periodo de simulación, el 1 de noviembre de 2000, se muestra en la Figura 33. La mayor parte del sedimento se deposita en un radio de unos 2 km de la desembocadura del barranco del Poyo, que es el responsable del principal suministro de sedimento en

el lago. Se ha visto que los otros afluentes desempeñan sólo un papel menor en el proceso de sedimentación del lago. Esto también depende de la menor concentración de sedimento que tiene el agua que entra en el lago superando los diques que lo rodean. La mayor parte de ese sedimento ya se ha depositado en los arrozales.

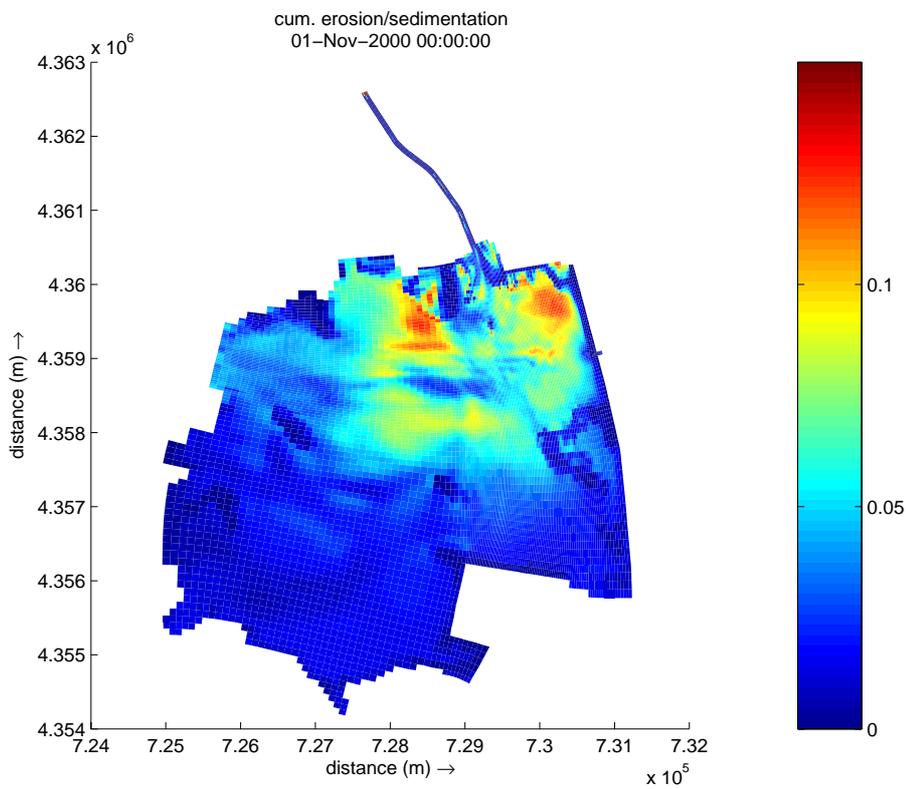


Figura 33. Sedimentación acumulada [m] en el último paso temporal (1 de noviembre de 2000)

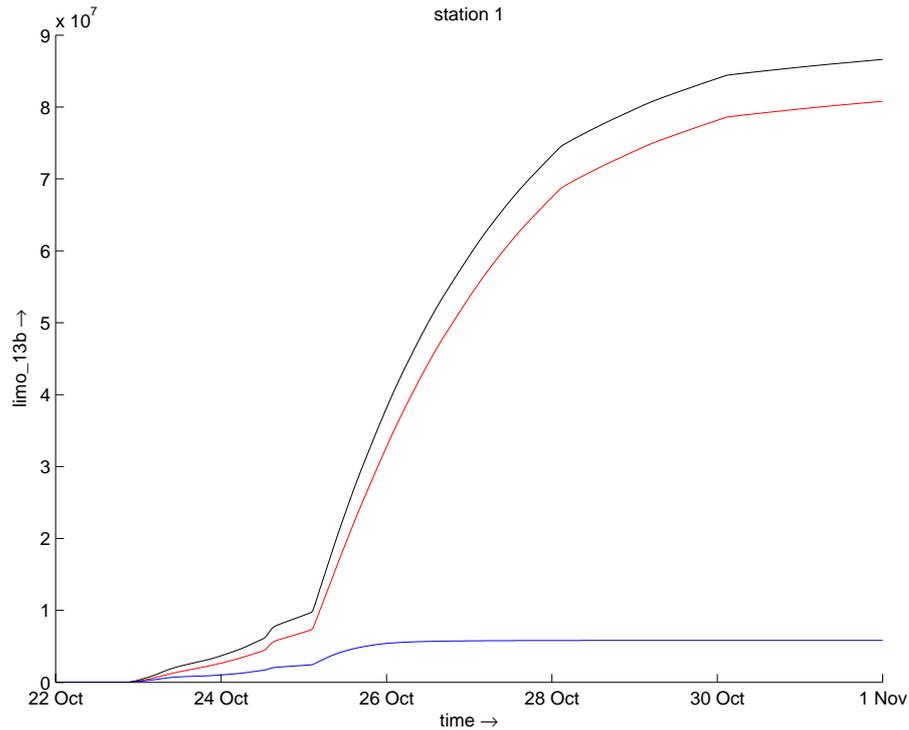


Figura 34 Flujo de entrada del barranco del Poyo (azul) y flujo de salida de la gola de Pujol (rojo) del sedimento total en suspensión [t]

La Figura 34 muestra el transporte acumulativo de sedimento por el barranco del Poyo y la Gola de Pujol. Mientras el Poyo es responsable de la mayor parte del suministro de sedimento en el lago (alrededor de 175.000 t), la Gola de Pujol sólo puede descargar en el mar una cantidad en torno a 87.000 t. Debe tenerse presente que la Gola de Pujol estuvo cerrada hasta el 25 de octubre y que hubiera tenido una mayor capacidad de descarga de sedimento con las compuertas totalmente abiertas durante todo el periodo del evento de riada. Esto último está condicionado a la situación local real del mar durante el episodio pero los datos disponibles parecen sugerir oportunidades de mejora en los sistemas de operación de compuertas.

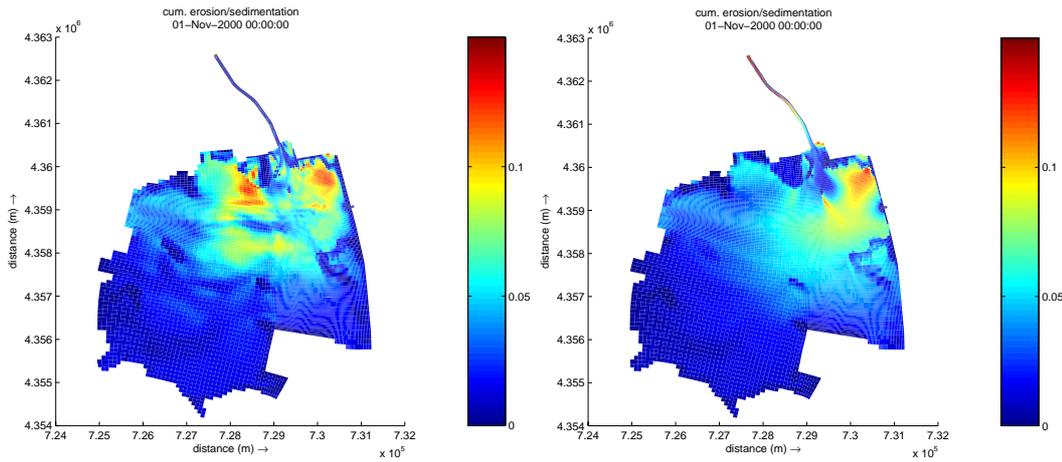


Figura 35. Sedimentación [m] para simulación, teniendo en cuenta el efecto de la densidad sobre el flujo (izquierda, caso 13b) y sin tenerlo en cuenta (caso 13c)

La Figura 35 ofrece dos resultados de sedimentación en el lago, considerando o no la densidad del sedimento en el campo de afluencia. La diferencia es bastante notable. Si se tiene en cuenta la densidad del sedimento en el campo de afluencia, aparecen dos picos significativos de sedimentación cerca de la desembocadura del barranco del Poyo. Si no se tienen en cuenta los efectos de la densidad, sólo encontramos un pico significativo en el noreste del lago.

En general se ha mostrado una buena coincidencia cualitativa entre los resultados de la simulación bidimensional con Sobek y la simulación Tridimensional con Delft 3D cuando se prescinde del efecto de las corrientes de densidad (WL | Delft Hydraulics para TYPESA, 2004). Este aspecto se ha interpretado en cierto modo como una validación del modelo y sugiere la posibilidad de utilizar el modelo Sobek (de manejo menos complejo) para estudios de alternativas. Cuando se activa el efecto de las corrientes de densidad en Delft3D la masa total evacuada por las golgas se reduce en un 10%.

**TABLA 8. SEDIMENTO TRANSPORTADO A TRAVÉS DE LA GOLA DE PUJOL PARA LOS CASOS 13B Y 15**

	Arcilla [t]	Limo [t]	Total [t]
<b>Sobek</b>			96000
<b>13b</b>	80800	5818	86618
<b>13c</b>	84520	11280	95800

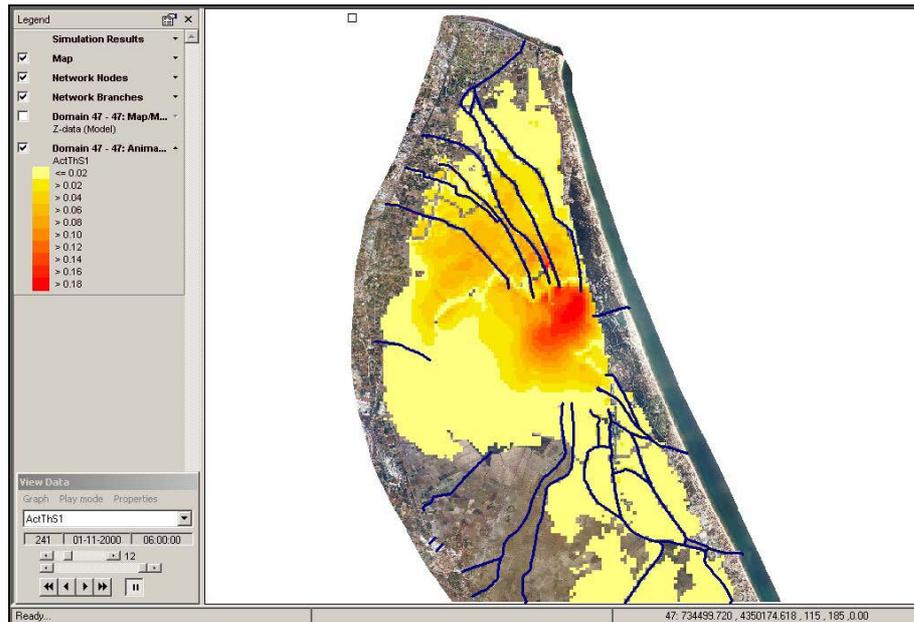


Figura 36. Sedimentación [m] simulada en Sobek el 1 de noviembre

Si observamos una sección transversal vertical en el índice  $m = 64$  del grid, podemos analizar la distribución vertical del sedimento en el barranco del Poyo y en el lago, teniendo en cuenta y sin tener en cuenta la densidad del sedimento en el campo de afluencia. Las siguientes figuras muestran la concentración del sedimento en la transacción dada para las fracciones de limo (Figura 37) y arcilla (Figura 38) en la descarga pico del barranco del Poyo el 24 de octubre, 6:00.

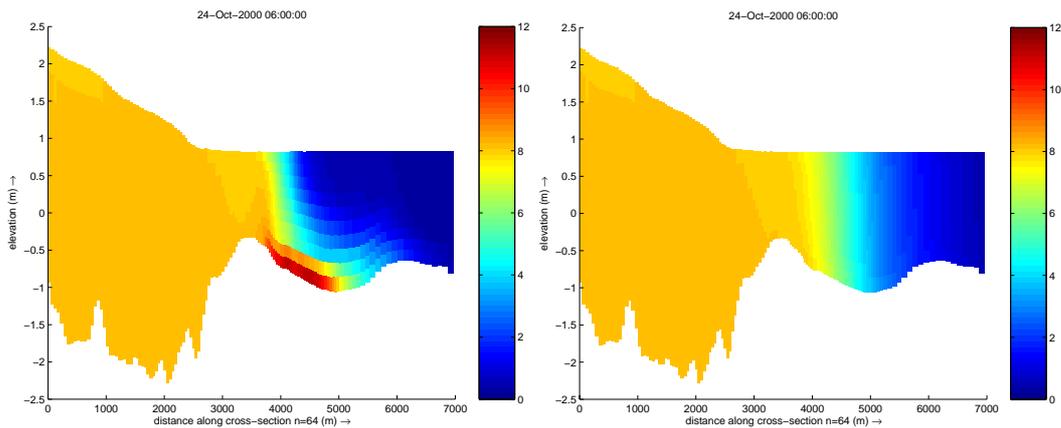


Figura 37. Concentración de sedimento (limo) [kg/m<sup>3</sup>] en una sección transversal vertical ( $m=64$ ) a través del barranco y el lago, considerando la densidad del sedimento en el campo de afluencia (izquierda, caso 13b) y sin considerarla (caso 13c), 24 de octubre, 6:00 (descarga pico)

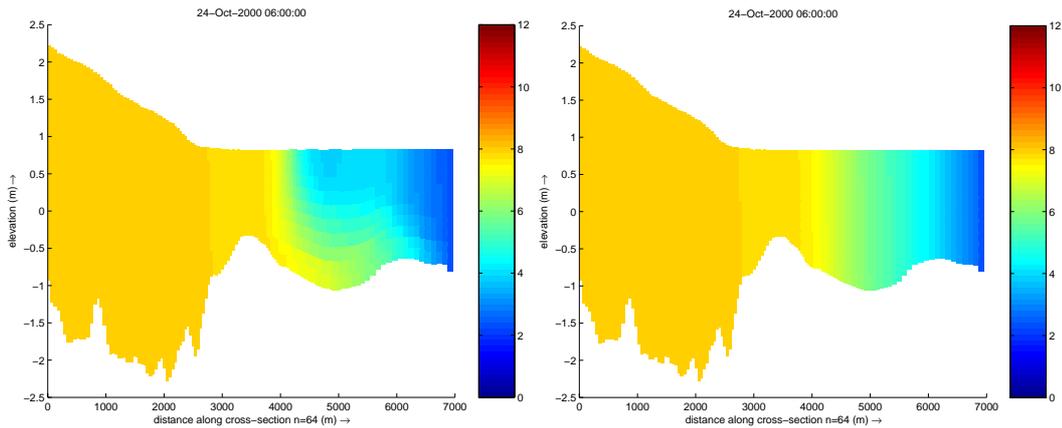


Figura 38. Concentración de sedimento (arcilla) [kg/m<sup>3</sup>] en una sección transversal vertical (m=64) a través del barranco y el lago, considerando la densidad del sedimento en el campo de afluencia (izquierda, caso 13b) y sin considerarla (caso 13c), 24 de octubre, 6:00 (descarga pico)

La concentración de limo en suspensión (Figura 37) en el barranco del Poyo, con sus altas velocidades de flujo, se traduce en una masa de agua completamente mezclada verticalmente y en una concentración casi constante que se corresponde con la concentración del límite de entrada. No se observa sedimentación de esta fracción del sedimento en el barranco. En la desembocadura del barranco puede observarse en el modelo numérico un claro desarrollo de una corriente de densidad con una estratificación del lago. La concentración en el fondo aumenta de 8 kg/m<sup>3</sup> en el barranco a 12 kg/m<sup>3</sup> en el lago, cerca de la desembocadura del barranco. La mayoría del sedimento se transporta al fondo del lago. Si no se tiene en cuenta el efecto de la densidad en la simulación, la concentración de sedimento es casi constante en la dirección vertical por lo tanto no pueden observarse ni corrientes de densidad ni estratificación.

La concentración de la fracción más fina de sedimento (arcilla, Figura 38) no produce su propia corriente de densidad o estratificación. No existe un aumento de la concentración en el lecho de la desembocadura del Poyo. No obstante, si aparecen corrientes de densidad, la concentración de arcilla seguirá también el camino de esas corrientes.

Resaltamos que pueden observarse corrientes de densidad y estratificación del lago, si no se tienen en cuenta las olas generadas por el viento. Si estas olas producen una cantidad significativa de turbulencia, la estratificación será inestable y finalmente desaparecerá, conduciendo a un perfil vertical completamente mezclado. Esto se corresponde con el caso en que se ignoran los efectos de la densidad. Podemos concluir que los dos resultados, con y sin los efectos de la densidad del sedimento, son dos extremos del flujo esperado en el lago. Sigue siendo incierto si las corrientes de densidad realmente aparecen, porque no hay muchas experiencias con una concentración realmente alta de sedimento entrando en lagos poco profundos como la Albufera. Lo que es más, no se dispone de mediciones de concentración para calibrar el modelo.

Tras estudiar el efecto de las corrientes de densidad y la estratificación, la Figura 39 ofrece una indicación de que el patrón de sedimentación en el lago es diferente para la simulación considerando y sin considerar los efectos de la densidad. Muestra las velocidades verticales en la capa superior del grid (capa 1) y en una capa cerca del fondo (capa 8).

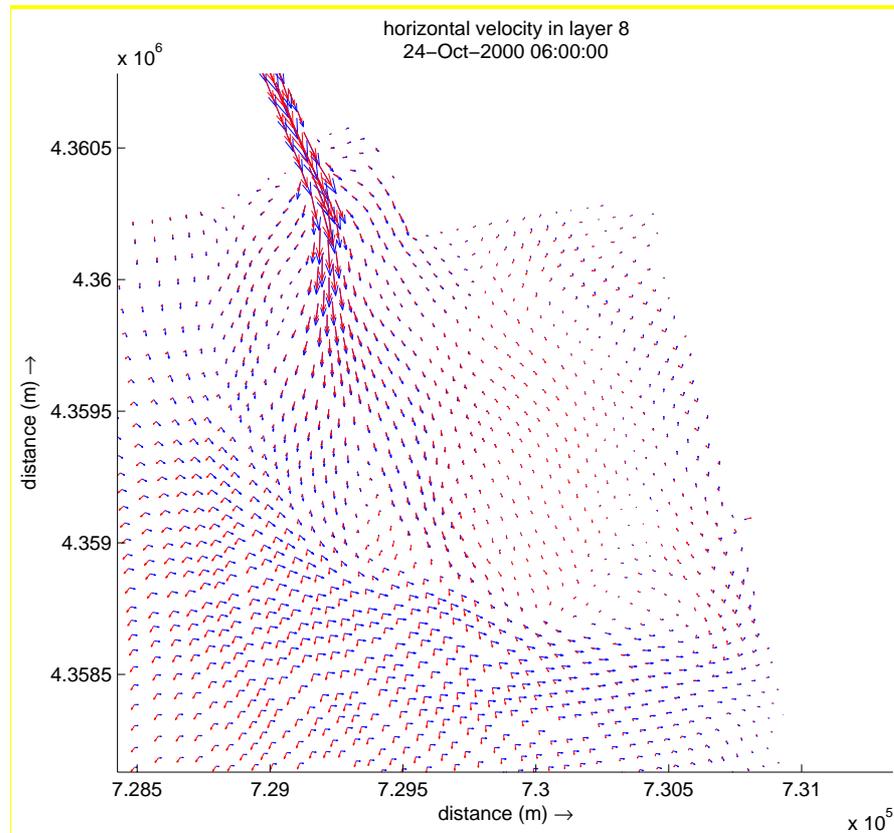


Figura 39. Velocidad en la capa superior (azul) y en la capa 8 (cerca del fondo) el 24 de octubre, 6:00 (descarga pico), demostración del efecto de la densidad en la dirección del flujo

Puede verse que las velocidades son significativamente distintas en las diferentes capas. Mientras la velocidad en el fondo se dirige más hacia el Oeste, la capa superior muestra una dirección hacia el Este del lago. Si se tienen en cuenta las corrientes de densidad, los vectores rojos determinarán el transporte de sedimento, mientras que el transporte sin los efectos de la densidad depende más de la velocidad del flujo a profundidad media.

#### 4.3. EFECTO DE UNA AVENIDA, CANAL DRAGADO (CASO 14)

Para observar el impacto de un canal dragado del barranco del Poyo a la Gola de Pujol, se modificó el nivel del fondo del lago de la forma indicada en la Figura 40.

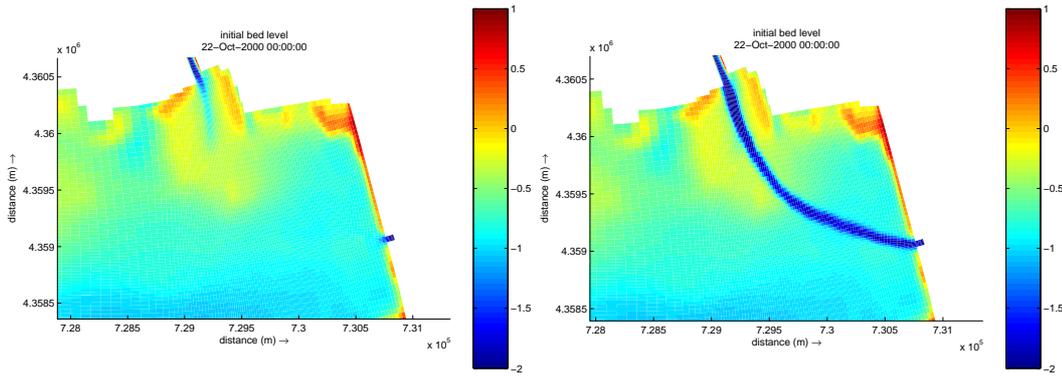


Figura 40. Nivel inicial del fondo del lago [m] cerca de la desembocadura del barranco de Poyo sin (izquierda, caso 13) y con (derecha, caso 14) un canal dragado.

La simulación incluye el impacto de la densidad del sedimento en el campo de afluencia, porque esta elección puede maximizar el efecto del canal dragado. La Figura 41 muestra el patrón de la sedimentación con y sin el canal dragado.

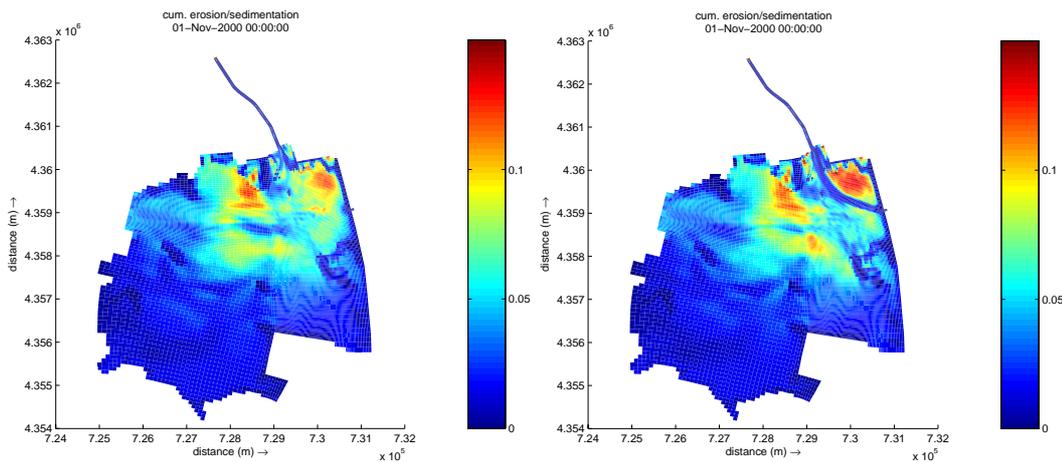


Figura 41. Comparación de la sedimentación [m] el 1 de noviembre de 2000 con (figura de la izquierda, caso 13b) y sin (figura de la derecha, caso 14) un canal dragado en el lago.

Aunque el canal dragado influye en el patrón de la sedimentación, no existe un aumento grande de la capacidad de descarga del sedimento en suspensión a través de la Gola de Pujol (Figura 41). La gran cantidad de sedimentación en el nordeste del lago está principalmente formada por un gran remolino en esta región, que produce una mayor sedimentación en su centro.

Puede concluirse que el canal investigado no mejora el problema de la sedimentación en el lago durante eventos de avenida.

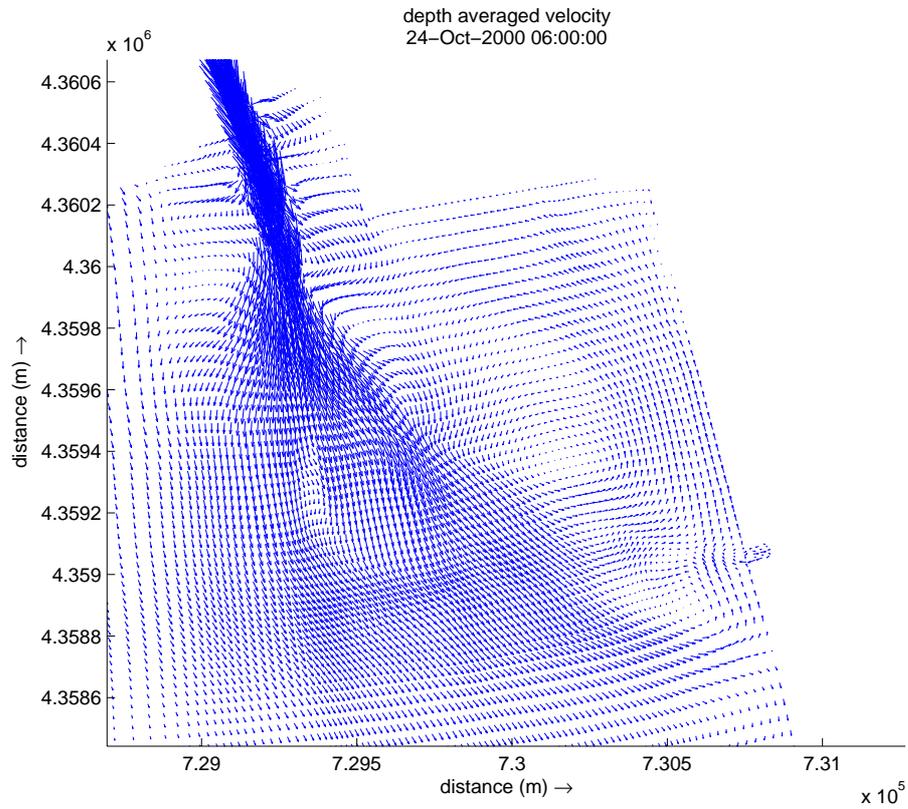


Figura 42. Velocidad a profundidad media cerca del flujo afluente del barranco de Poyo y la Gola de Pujol el 24 de octubre, 6:00:00

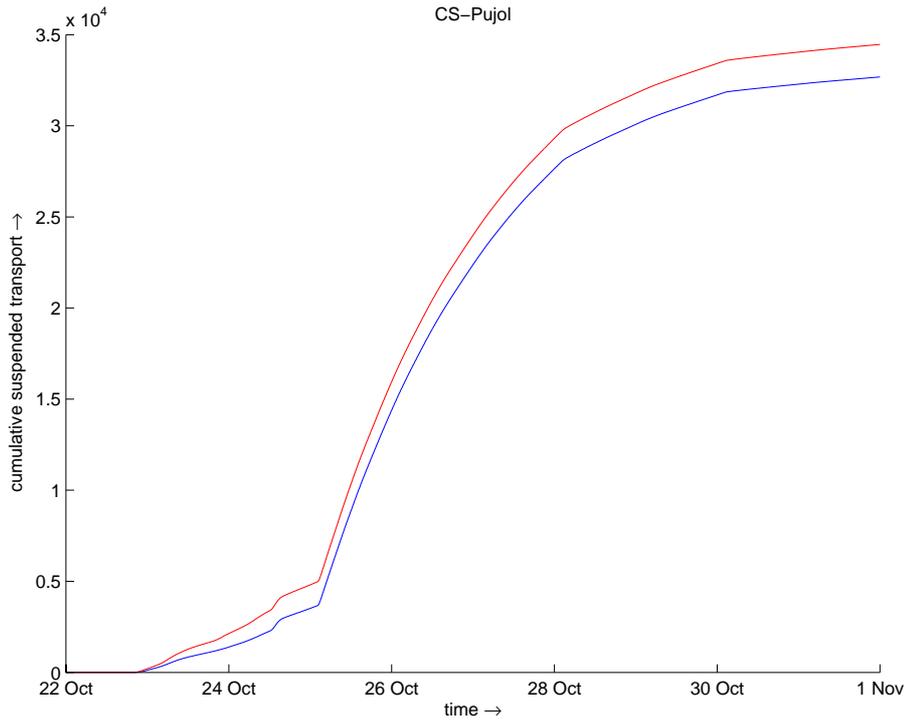


Figura 43. Sedimento [t] que abandona el lago a través de la Gola de Pujol: con (rojo) y sin (azul) un canal dragado

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se ha efectuado una serie de simulaciones cuyos resultados se recogen en el capítulo 4.1 (Comportamiento general: Modelo A) y 4.2 (Avenidas: Modelo B). Dada la carencia de mediciones que permitan contrastar la veracidad de los resultados, el modelo debe ser usado para evaluar la incidencia relativa de las avenidas y procesos que puedan afectar a la morfología de l'Albufera.

Los procesos principales que afectan a los cambios morfológicos en una escala de días son los aportes de sedimentos por los barrancos y la redistribución de sedimentos por las olas y corrientes causadas por el viento. Las corrientes causadas por los aportes ordinarios sin considerar el efecto de las olas no son significativos dada la baja velocidad de recirculación que producen. Las olas son, por tanto, una condición que sea demostrado vital necesaria para la actividad morfológica.

La composición del fondo demuestra que la producción de sedimentos orgánicos por algas y vegetación es un factor importante, pero esta producción funciona en escalas temporales más largas, por lo que este factor no necesita ser considerado en los cálculos con Delft3D.

La topografía del fondo responde a las nuevas condiciones del viento en una escala de horas. Esto implica que la topografía del fondo depende mucho en todo momento de la historia del viento durante las horas precedentes. El fondo cambia continuamente. De esta manera es difícil reconocer tendencias lentas del desarrollo en una escala de años.

Durante una riada, las velocidades del flujo son limitadas en el lago. No existe una relación directa visible entre el flujo de entrada y el de salida.

Es posible reproducir corrientes de densidad locales en el modelo, para una situación sin olas inducidas por el viento. No obstante, este fenómeno de estratificación es fácilmente perturbado por factores que producen un mezclado vertical, tal como por ejemplo las olas generadas por el viento. La experiencia de los expertos indica que el lago tiene demasiada poca profundidad y el sedimento en suspensión esta demasiado mezclado verticalmente para contar con la formación de corrientes de densidad en las estrategias para atenuar la sedimentación en el lago.

El modelo puede ser utilizado como una herramienta para la evaluación de estrategias basadas en la operación de las aperturas de las golgas y estrategias basadas en un canal dragado.

Las velocidades limitadas en el lago durante una riada y la relativa poca importancia de los fenómenos de corrientes de densidad indican que las estrategias basadas en la operación de las aperturas de las golgas no suponen la solución definitiva al problema del aterramiento del lago. Ahora bien, lo que si se establece como necesario establecer una correcta gestión de las compuertas que faciliten la evacuación del mayor número de sólidos por las golgas, principalmente por la gola de Pujol.

Se recomienda también considerar la posibilidad de una desviación de agua y sedimento en casos extremos hacia el arrozal, manteniendo el flujo a través del lago durante riadas normales para la renovación del agua.

En el capítulo 4.1, por otra parte, se ha intentado evaluar de forma preliminar la posibilidad de utilizar el mecanismo de resuspensión por efecto del viento como una medida de evacuación de sedimentos destinada a corregir los efectos de aterramiento. En la simulación 5c se reprodujo el comportamiento del sistema con un viento constante del oeste de 7 m/s y los bombeos funcionando durante 24 horas. A pesar de lo extremo de la situación, la masa total de sedimento evacuado fue modesta: apenas 2500 t. Esta simulación sugiere un campo de estudio que no debe despreciarse pero anticipa una escasa efectividad de estas medidas.

En el capítulo 4.2 se ha estudiado la influencia durante una avenida extraordinaria de un posible canal preferente de flujo Desembocadura del Poyo- Gola de Pujol constituido mediante dragado. Aunque el canal dragado influye en el patrón de la sedimentación, no se ha constatado un aumento grande de la capacidad de descarga del sedimento en suspensión a través de la Gola de Pujol. Puede concluirse que el canal investigado no mejora el problema de la sedimentación en el lago durante eventos de avenida.

En general se ha mostrado una buena coincidencia cualitativa entre los resultados de la simulación bidimensional con Sobek y la simulación Tridimensional con Delft 3D cuando se prescinde del efecto de las corrientes de densidad (WL | Delft Hydraulics para TYPESA, 2004). Este aspecto se ha interpretado en cierto modo como una validación del modelo y sugiere la posibilidad de utilizar el modelo Sobek (de manejo menos complejo) para estudios de alternativas. Cuando se activa el efecto de las corrientes de densidad en Delft3D la masa total evacuada por las golas se reduce en un 10%.

## 6. **BIBLIOGRAFÍA**

Benet Granell, J.M. (1983): *La Albufera de Valencia; Datos para una política de soluciones*. Revista de Obras Públicas, febrero-marzo 1983, pp.167-180.

Haas, F. (1919): *Las náyades de la Albufera de Valencia*. Tab. Lab. Hidrobiología, Esp. No.9.

Martín Moneris, M. (1998), *Modelación de la calidad en aguas superficiales; Aplicación al caso de la Albufera de Valencia*.

Peris, E. (...): *Caracterización de los materiales de fondo del lago de L'Albufera*.

Sanjaume, E., F. Segura, M.J. López & J. Pardo (1992): Tasas de sedimentación en l'Albufera de Valencia. Cuadernos de Geografía, Vol.51, pp.63-81.

Seymour, R.J. (1977): *Estimating wave generation on restricted fetches (Estimación de la generación de olas en fetches restringidos)*. Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol.103, No.WW2, pp.251-264.

US Army CERC (1977): *Shore Protection Manual (Manual de Protección de la Costa)*. US Army Coastal Engineering Research Center (*Centro de Investigación de Ingeniería Costera del Ejército de Estados Unidos*).

WL | Delft Hydraulics para TYPESA. (2004): *Estudio para el desarrollo sostenible de L'Albufera de Valencia, Construcción, calibración y validación del modelo Sobek*

Vicente, E. & M.R. Miracle (1992): *The coastal lagoon Albufera de Valencia: an ecosystem under stress (La laguna costera de la Albufera de Valencia: un ecosistema bajo presión)*. Limnetica, Asociación Española de Limnología, Vol.8, pp.87-100.



## **APÉNDICE A. VALORES GENERALES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO**

La Tabla A.1 muestra algunos valores generales para los parámetros utilizados en los modelos.

**TABLA A.1: VALORES GENERALES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO.**

<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Comentarios</b>
Tamaño típico de la malla gruesa en el modelo A	m	100-125	
Intervalo temporal del modelo A	s	300	
Tamaño típico de la malla fina en el modelo B	m	25	
Intervalo temporal del modelo B	s	60	
Nivel inicial del agua, modelo A	m	0.2	media de las mediciones
Nivel inicial del agua, modelo B	m	0.11	valor de las mediciones
Valor de rugosidad	s/m <sup>1/3</sup>	0.02	
Número de capas	-	10	10% para cada capa
Viscosidad horizontal de turbulencia	m <sup>2</sup> /s	1	valor por defecto
Difusividad horizontal de turbulencia	m <sup>2</sup> /s	10	valor por defecto



## **APÉNDICE B. DATOS**

### **B.1 TOPOGRAFÍA DEL FONDO**

La batimetría del lago y del Poyo se basa en un grid del lago de 5 m x 5 m. La Figura B.1 muestra cómo se aplica la batimetría en el Modelo B. La batimetría del Modelo A es exactamente igual con excepción de la parte del Poyo, que no se incluye en este modelo. La profundidad media en el lago es de 0.88 m, pero las diferencias de profundidad son claramente visibles. También son visibles las islas, que se incluyen en la batimetría del modelo. La Figura B.1 también muestra que una pequeña parte del Barranco del Poyo incluida en el modelo.

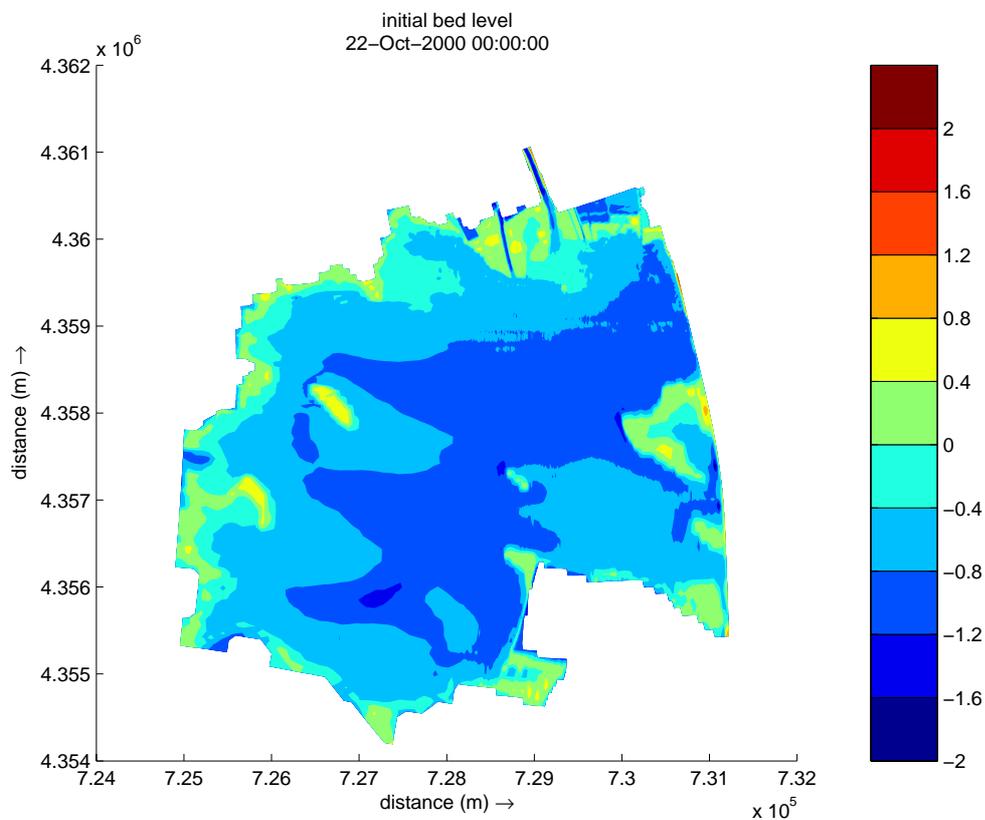


Figura B.1: Batimetría de la Albufera. Mapa de elevaciones referida al nivel medio del mar (mareógrafa del Puerto de Valencia).

### **B.2 ENTRADAS Y NIVELES DE AGUA**

La mayoría de los cálculos se han realizado con un nivel medio de agua en el lago, sin entradas. El nivel medio del lago es de 0,20 m.s.n.m.m., basándonos en una caracterización de niveles efectuada con los registros en la Golas que mantiene la Junta de Desagües de L'Albufera de Valencia.

Para estudiar el movimiento del agua en el lago como resultado de las diversas aportes, se ha realizado un cálculo con entradas medias durante el período 1971-2001 de las diferentes ubicaciones, carac-

terizadas en función de la distribución espacio temporal de los datos proporcionados por la Oficina de Planificación Hidrológica de la CHJ. La Tabla B.1 muestra las ubicaciones y las descargas.

**TABLA B.1: DIVERSAS AFLUENCIAS PARA LA ALBUFERA (VALORES MEDIOS).**

Ubicación de la afluencia	Descarga [m <sup>3</sup> /s]
Acequia Dreta	0,895
Acequia Overa	2,743
Acequia dels Campets	0,220
Acequia l'Alqueresia	0,313
Acequia de la Foia	0,150
Acequia Nova de Silla	0,278
Beniparell Mariano	0,718
Acequia de Albal	0,131
Port de Catarroja	0,158
Barranco del Poyo	0,027
Acequia del Fus o de Rav	0,702
Acequia Carrera del Sale	0,625

Por otro lado, se ha simulado el evento Octubre 2000 de forma simplificada, introduciendo un caudal de entrada en la ubicación del Barranco del Poyo, basado en los resultados de una simulación de SO-BEK para el citado evento, combinado con mediciones de descargas durante el evento en el caudal desagüado por la gola de Pujol. La Figura B.2 muestra las descargas en la desembocadura del Poyo y en Pujol. Aguas arriba de la desembocadura del Poyo los caudales circulantes simulados son superiores, pero justo antes de la desembocadura del Poyo el barranco (en su situación anterior a las obras de encauzamiento 2003-2004) desborda superando las motas de su tramo final y una parte relevante del caudal fluye hacia los arrozales. Es necesario cuantificar en un estudio de alternativas posterior la influencia de este fenómeno y como se podría potenciar el efecto de trampa de sedimentos de los tan-cats (campos de arroz que se encuentran en la periferia del lago y cuya elevación es inferior al lago).

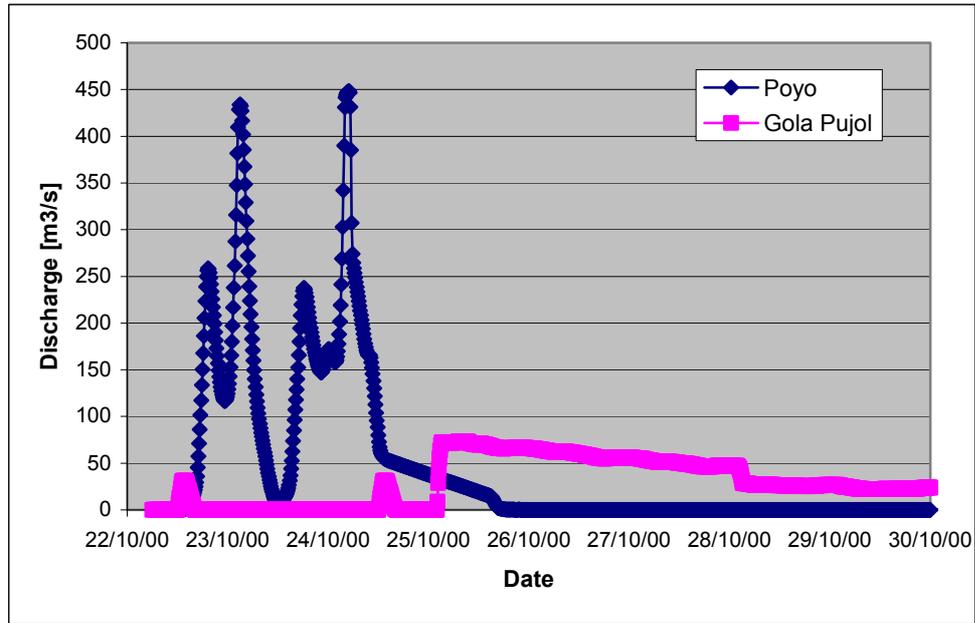


Figura B.2: Descarga en el Barranco del Poyo y en Pujol, del 22 de octubre al 26 de octubre de 2000.

### B.3. VIENTO

El viento desempeña un importante papel en la Albufera. La dirección y la velocidad del viento determinan los movimientos del agua en el lago. Las mediciones en tres estaciones diferentes de medición del viento (Estaciones 4, 14 y 17 del IVIA) muestran un patrón diario en la dirección y las velocidades del viento. Durante la noche, la velocidad del viento llega a 0 m/s y viene aproximadamente del noroeste, mientras que durante el día las velocidades aumentan a 2 m/s o 3 m/s y el viento gira hacia el este. Por las noches, durante un periodo de varias horas, no hay viento. La Figura B.3 muestra un detalle de una serie de mediciones del viento en una estación cercana a la Albufera.

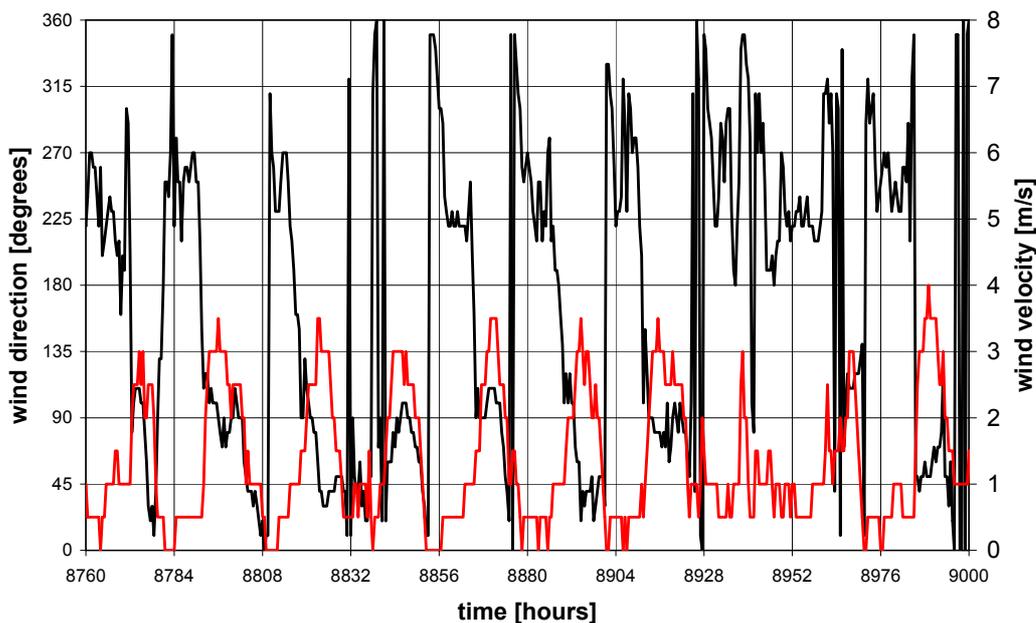


Figura B.3: Dirección y velocidad del viento del 26 de mayo de 2002 (a las 20:00) al 5 de junio de 2002 (a las 20:00).

Por lo demás, estas mediciones sobre un periodo de tiempo de tres años muestran que durante los eventos de fuerte viento (velocidades > 4 m/s) éste viene preferentemente del oeste.

Partiendo de estos datos, se han utilizado dos escenarios representativos para realizar los cálculos con Delft3D, que sirven para estudiar el comportamiento del sistema de la Albufera:

1. Un escenario para una situación diaria, con un viento que viene del oeste con una velocidad de 4 m/s;
2. Un escenario para un evento de tormenta con el viento también viniendo del oeste y una velocidad de 7 m/s.

Para el evento Octubre 2000, se midieron y utilizaron en el cálculo las condiciones reales del viento.

Para información adicional, nos remitimos a la Tabla B.2, que muestra la escala de Beaufort.

**TABLA B.2: ESCALA DEL VIENTO BEAUFORT.**

<b>Fuerza Beaufort</b>	<b>Promedio de la velocidad del viento a 10 m durante 10 minutos (km/h)</b>	<b>Denominación</b>	<b>Efectos en tierra</b>	<b>Efectos en el mar</b>
0	0 – 1	Calma	Las hojas de los árboles no se mueven. El humo se eleva verticalmente	Mar llana como un espejo
1	2 – 6	Ventolina	Las hojas de los árboles no se mueven. El humo se eleva en pequeñas ondulaciones	Mar rizada. Pequeña ondulación
2	7 – 11	Flojito (brisa muy débil)	Las hojas de los árboles susurran. Las banderas ondean ligeramente	Pequeñas olas cortas. Mar rizada
3	12 – 19	Flojo (brisa débil)	Las hojas de los árboles están en constante movimiento. Las banderas están extendidas al viento	Las olas empiezan a romper. Mar rizada
4	20 – 29	Bonancible (brisa moderada)	Las ramas pequeñas de los árboles se mueven. Las banderas ondean	Olas bajas, algo largas. Marejadilla
5	30 – 39	Fresquito (brisa fresca)	Se balancean los árboles pequeños. Las banderas ondean dando aletazos	Olas largas. Algunos rociotes. Marejada
6	40 – 50	Fresco (brisa fuerte)	Las ramas grandes de los árboles se balancean. Las banderas ondean fuertemente	Grandes olas que rompen. Crestas blancas. Peligro para embarcaciones menores. Mar gruesa
7	51 – 61	Frescachón (viento fuerte)	Los árboles grandes se mueven fuertemente	Espuma longitudinal por el viento. Mar muy gruesa
8	62 – 74	Temporal (viento duro)	Las ramas pequeñas de los árboles se rompen	Olas altas que rompen. Espuma en bandas. Mar arbolada
9	75 – 87	Temporal fuerte (viento muy duro)	Las ramas grandes de los árboles se rompen. Las tejas vuelan de los tejados	Olas muy gruesas. El mar ruge. Mala visibilidad por rociotes y espuma
10	88 – 101	Temporal duro	Los árboles son arrancados. Se producen daños en los edificios	Olas muy gruesas. Superficie del mar blanca. El mar ruge intensamente. Espuma en el aire
11	102 – 117	Temporal muy dura (borrasca)	Se producen daños generalizados en árboles y edificios.	Olas muy grandes. Mar blanca. Navegación imposible
12	> 117	Temporal huracanado (huracán)	Grandes y extensos daños en edificios. Muchos árboles arrancados	Aire lleno de espuma y de rociotes. Visibilidad casi nula

## B.4. SEDIMENTOS

No se dispone de datos cuantitativos detallados sobre el transporte y la composición del sedimento disponibles, pero las varias descripciones cualitativas dan, no obstante, un cuadro razonable de las condiciones locales del sedimento.

A modo de introducción de la situación a principios de siglo, Haas (1919; según Benet Granell, 1983) describía las siguientes condiciones:

- Zona cercana a la costa este del lago:
  - En superficie, una capa muy fina, casi líquida, de materia vegetal en descomposición;
  - Bajo dicha capa existe otra, también muy delgada, de fango gris orgánico;Bajo ella existe un sustrato de arena.
- En los canales de acceso a los puertos y en la zona próxima a la desembocadura:
  - Una capa de limo arcilloso con inclusiones de materia orgánica vegetal procedente de cultivos.
- En las costas oeste y sur:
  - Fango orgánico. En grandes profundidades es arcilloso, y limoso en zonas menos profundos.

Benet Granell (1983): El promedio de los sedimentos recientes (menos de 50 años) se cifra en 0,4 m de espesor, registrándose el máximo en la costa oeste en que se ha medido más de 1,30 m de espesor de sedimentos arcillosos y orgánicos muy recientes, aún en descomposición. Eso corresponde a una tasa de sedimentación de 1 o 2 mm/año. Un corte típico actual de los sedimentos del fondo se desarrolla de la siguiente forma:

- Una capa, de unos cinco centímetros de espesor, de un limo suavísimo, muy arcilloso, casi líquido.
- Una capa, debajo de la anterior, de un espesor comprendido entre los diez y los treinta centímetros, de un limo más denso y estabilizado.
- Una capa, debajo de la anterior, de quince a cincuenta centímetros de espesor, de arcillas con buena proporción de materia orgánica.
- Finalmente, por debajo de todo lo anterior, un sustrato arenoso o limo-arenoso con gran abundancia de conchas marinas.

Benet Granell (1983): Contemplando el lago bajo una óptica de totalidad, los sedimentos orgánicos atribuibles al proceso eutrófico del lago son, en cuanto a volumen de aterramiento, y hasta el presente, de mínima importancia. Los sedimentos orgánicos o minerales originados por vertidos industriales son también escasos y se hallan localizados en unos puntos concretos de la costa oeste del lago. Su importancia – en cuanto a volumen de aterramiento – es, asimismo, despreciable. La práctica totalidad de los sedimentos es de tipo arcilloso, con baja o nula proporción de arenas. Estos limos se reciben en suspensión en el agua, y será vano todo intento tradicional de retenerlos en los cauces mediante presas o albaradas para evitar su llegada al lago. Únicamente la desviación de acequias y el dragado sistemático pueden aportar una solución al respecto.

Martín Monerri (1998) ha estudiado extensamente en su tesis la calidad del agua en la Albufera. La Tabla B.3 muestra las elecciones que se han hecho para las características de los sedimentos en el modelo Delft3D, basadas en las conclusiones de Martín (1998) y en los comentarios realizados en este apéndice.

**TABLA B.3: CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS USADOS EN DELFT3D.**

Tamaño del limo  ( $\mu\text{m}$ )	Velocidad límite de caída		Tensión crítica de corte para sedimentación	Descripción
	(mm/s)	(m/día)	( $\text{N/m}^2$ )	
1 – 5	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,005	limo muy fino
25 – 50	$4,6 \cdot 10^{-2}$	4,0	0,01	limo fino
50 – 80	0,28	24,0	0,05	material del fondo más grueso

Las tres fracciones están inicialmente presentes en el fondo del lago, en una capa de 0,30 m cada una.

## B.5. OLAS

En un sistema como el lago de la Albufera, las olas desempeñan un papel muy importante. Debido a la tensión tangencial al fondo adicional que causan las olas sobre el fondo del lago, una cantidad extra de sedimento queda en suspensión y es transportada a través del sistema. Para poder modelizar las olas correctamente, deben fijarse varios parámetros característicos.

Es necesario definir un espacio de frecuencia para el grid espectral en SWAN. Los límites de este espacio dependerán de  $T_p$ . Las Tablas B.4 y B.5 ofrecen valores para  $H_s$  y  $T_p$ , dependientes de la profundidad del agua, la velocidad del viento y el fetch. Se resalta en color azul un escenario típico para la Albufera.

El espacio de frecuencia se define como:

$$\min 0,5 \cdot \frac{1}{T_p} \dots \max 3 \cdot \frac{1}{T_p}$$

Con  $T_p = 1,738$  s, se obtiene frecuencias de 0,28 a 1,726 Hz. En los cálculos con olas se utilizan valores entre 0,25 y 1,75 Hz.

Para la rompiente inducida por las olas, es importante el parámetro  $\gamma$ . Se define como:

$$\gamma = 0,5 + \tanh(33 \cdot S_0) \text{ donde } S_0 = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{H_s}{T_p^2}$$

con  $H_s = 0,152$  m y  $T_p = 1,738$  s para una situación característica de la Albufera,  $S_0 = 0,03$  y  $\gamma$  nos devuelve un valor de 0,81.

Estos parámetros pueden definirse en los ficheros de entradas para SWAN, con los cuales se realizan todos los cálculos de olas con Delft3D.

**TABLA B.4: ALTURA SIGNIFICATIVA DE LAS OLAS DEPENDIENTE DE LA PROFUNDIDAD DEL AGUA.**

Altura significativa de las olas							
dirección	fetch (km)	profundidad (m)		velocidad del viento (m/s) y factor desestabilizador			
				u	2,0	4,0	6,0
			u_A	1,877	4,402	7,248	10,325
N	5	1		0,063	0,145	0,213	0,266
N	5	1.5		0,065	0,156	0,245	0,327
N	5	2		0,065	0,159	0,257	0,354
O	6	1		0,067	0,152	0,218	0,269
O	6	1.5		0,069	0,168	0,260	0,341
O	6	2		0,070	0,173	0,277	0,377
SO	7	1		0,070	0,158	0,222	0,270
SO	7	1.5		0,073	0,178	0,271	0,350
SO	7	2		0,074	0,185	0,294	0,395

**Tabla B.5: Periodo de ola máxima dependiente de la profundidad del agua.**

Periodo de ola máxima							
dirección	fetch (km)	profundidad (m)		velocidad del viento (m/s) y factor desestabilizador			
				u	2,0	4,0	6,0
			u_A	1,877	4,402	7,248	10,325
N	5	1		1,187	1,666	1,974	2,217
N	5	1.5		1,222	1,706	2,023	2,275
N	5	2		1,239	1,722	2,041	2,297
O	6	1		1,219	1,738	2,061	2,313
O	6	1.5		1,265	1,794	2,130	2,396
O	6	2		1,287	1,817	2,157	2,428
SO	7	1		1,240	1,793	2,129	2,387
SO	7	1.5		1,295	1,867	2,220	2,497
SO	7	2		1,322	1,898	2,257	2,541