

# Estudio de la evolución reciente del delta del Guadalfeo (Granada, España)

Rafael Jesús Bergillos Meca\*

Tutores: Dr. Miguel Ortega Sánchez y Dra. María José Polo Gómez\*\*

*Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA), Universidad de Granada. Edificio CEAMA, Avda. del Mediterráneo, s/n, 18006, Granada, España.*

*Grupo Dinámica Fluvial e Hidrología, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA), Universidad de Córdoba. Edificio Leonardo Da Vinci, Campus de Rabanales, 14071, Córdoba, España.*

*Máster Oficial Interuniversitario en Hidráulica Ambiental. Especialidad: Gestión Integral de Cuencas. Curso: 2013-2014.*

---

## Resumen

Los deltas están situados en la transición entre ambientes terrestres y acuáticos, por lo que responden rápidamente tanto a alteraciones naturales como a aquéllas inducidas por el hombre. Los sistemas deltaicos mediterráneos son particularmente sensibles a los cambios de la línea de costa y del nivel mar. Este Trabajo Fin de Máster estudia la evolución del delta del Guadalfeo durante los últimos quince años. Para ello, se han analizado los agentes forzadores marítimos y fluviales, se han realizado medidas batimétricas, topográficas y granulométricas que completan a las ya existentes, y se han calculado balances de volumen de sedimento, analizándose su relación con la evolución en planta y del perfil playa. Además, se ha estimado el volumen acumulado en el delta debido al transporte por fondo definiendo dos escenarios: el real, basado en los caudales desaguados por la presa de Rules; y el natural, considerando los que llegan a ella. Los resultados indican que la dinámica del delta está dominada por los aportes fluviales de sedimentos durante tormentas, siendo transportados longitudinalmente debido a las direcciones del oleaje predominantes en la zona. Además, se muestra que el delta ha sufrido pérdida de sedimentos y retroceso, tanto en planta como del perfil de playa. Esto ha generado una variación en la profundidad de cierre del perfil y un giro de la morfología submarina en planta. Se ha obtenido, asimismo, una semejanza entre las características granulométricas del sedimento que el río transporta por fondo y las del acumulado en la playa. Se concluye que la heterogeneidad en la distribución del mismo y la bidireccionalidad del oleaje son los responsables de los cambios longitudinales del perfil de playa así como que la presa de Rules altera significativamente el comportamiento del sistema aguas abajo de la misma.

*Palabras clave:* Delta, batimetría, volumen de sedimentos, granulometría, línea de costa, perfil de playa

---

## 1. Introducción

Los sistemas deltaicos se encuentran situados en la transición entre ambientes fluviales y marítimos, por lo que los procesos climáticos, sedimentarios y tectónicos interactúan de un modo complejo en ellos (Coleman and Wright, 1975; Orton and Reading, 1993; Overeem, 2005; Syvitski and Saito, 2007). Como consecuencia de su naturaleza, los deltas suelen responder de manera rápida a cambios naturales, estando dicha respuesta controlada principalmente por las variaciones en el suministro de sedimento que llega al dominio costero (Mateo and Siringan, 2007).

En los últimos siglos, las actividades humanas se han sumado a los mencionados procesos naturales. Estas acciones incluyen deforestación, cambios en la ubicación del cauce y estabilización, disminución en la entrada de agua dulce por desvíos y bombeos, así como disminución en el suministro de sedimento por la construcción de presas. Estas actividades han provocado una considerable alteración en la morfología de los ambientes deltaicos (IPCC, 2001; Hood, 2010; Anthony et al., 2014). En adición, durante las últimas décadas, el aumento del nivel del mar está provocando efectos negativos en deltas de todo el mundo (Syvitski et al., 2009). El saldo entre éste, las variaciones eustáticas, los hundimientos y los cambios en la descarga de sedimentos (Vella et al., 2005; Ericson et al., 2006) determina el avance o retroceso de la costa en el conjunto del delta y/o en determinados lugares a lo largo de ella.

---

\*rbergillos@ugr.es

\*\*miguelos@ugr.es

mjpgolo@uco.es

Los deltas mediterráneos son particularmente vulnerables al ascenso del nivel del mar (Jeftic et al., 1996; Nicholls and Hoozemans, 1996; Anthony et al., 2014), lo cual, junto con la importancia ambiental, social y económica de estos sistemas (Stanley and Warne, 1993; Sanchez-Arcilla and Jimenez, 1997; Trincardi et al., 2004) hace que sea necesario realizar estudios que cuantifiquen los procesos que tienen lugar en ellos y la importancia de los mismos en la evolución del sistema. En el caso concreto del Guadalfeo, la entrada en funcionamiento de la presa de Rules en el año 2003, regulando el 85 % de la escorrentía total de la cuenca (Nevot Pérez, 2004), está generando problemas de erosión en el delta, con el consecuente retroceso de la línea de costa (Losada et al., 2011). Esto ha motivado la realización de varias actuaciones de gestión, en forma de aportes artificiales de sedimentos, durante los últimos años.

Los trabajos anteriores sobre el delta del Guadalfeo se han centrado en temas específicos como la caracterización de la hidrología del acuífero del delta (Duque et al., 2008), la descripción de la geomorfología costera y la morfología submarina (Lobo et al., 2006; Fernández-Salas et al., 2007), y la estimación del sedimento acumulado en el delta a partir de métodos geofísicos (Duque et al., 2010). Jabaloy-Sánchez et al. (2014) estudiaron las interacciones entre las porciones emergidas y sumergidas del sistema deltaico. Si bien, su análisis está parcialmente basado en dos batimetrías cuya separación temporal (1877 – 2002) y la consecuente diferencia de precisión entre ambas, hace que resulte complejo extraer conclusiones con suficiente fiabilidad. En particular, la evolución del delta durante la última década y sus consecuencias sobre el sistema costero se encuentran pobremente documentadas.

Por ello, el objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el estudio integral (cuenca-costa) de la evolución reciente del delta del Guadalfeo. De este modo, se pretende complementar los trabajos llevados a cabo por los Grupos de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada y de Dinámica Fluvial e Hidrología de la Universidad de Córdoba, tanto en el tramo de costa en el que desemboca el río (Losada et al., 2011; Félix et al., 2012; Bergillos et al., 2014) como en su cuenca (Herrero et al., 2009; Millares et al., 2012, 2014a,b). Para ello, se ha calculado la evolución de volúmenes de sedimentos en el delta y se han analizado las consecuentes variaciones de la costa, tanto en planta como en perfil. Estos resultados han sido correlacionados con el clima marítimo de la zona, el régimen de caudales que llegaron al delta, las granulometrías tanto de la playa como de la cuenca y distintas formulaciones de transporte de sedimentos por fondo.

El trabajo se estructura de la siguiente manera: las secciones 2 y 3 describen la zona de estudio y la metodología seguida para llevarlo a cabo, respectivamente. El apartado 4 detalla los resultados obtenidos, es decir: agentes forzadores marítimos y fluviales, diferencias de volúmenes de sedimentos en el sistema, estimaciones del transporte por fondo, características del sedimento transportado y su relación con el de la costa, y evolución en planta y del perfil de playa. Estos resultados son discutidos en el punto 5, mientras que las conclusiones del trabajo y la propuesta de futuras líneas de investigación se exponen en los dos últimos apartados.

## 2. Zona de Estudio

La cuenca del río Guadalfeo se localiza en el Sur de España, posee un área de 1252 km<sup>2</sup> y drena al mar Mediterráneo (Figura 1). Incluye el pico montañoso más alto de la península Ibérica (3479 metros sobre el nivel del mar) y es alimentada por uno de los sistemas de drenaje más energéticos de la costa mediterránea española. La divisoria norte se corresponde con la línea de crestas de Sierra Nevada, mientras que la divisoria sur, de orientación Este-Oeste, se corresponde con la línea de crestas de las sierras de Lújar y la Contraviesa (Jabaloy-Sánchez et al., 2014).

Se trata de una cuenca semiárida, cuya dinámica pluvial, nival e hidrológica se encuentra condicionada por la presencia de Sierra Nevada (Millares et al., 2014a). Su escarpada topografía favorece el arrastre de sedimentos, presentando éstos gran variedad de tamaños (arena-gravas-bolos), gradación y mezcla (Nevot Pérez, 2004; Millares et al., 2014a). El curso del río desciende desde la parte noreste de la cuenca (Figura 1), alcanzando pendientes superiores al 10 % en el sur de Sierra Nevada (Jabaloy-Sánchez et al., 2014), que pasan a valores aproximados de 1,1 % aguas arriba del dique del Granadino (Millares et al., 2014a) y de 1,6 % en el tramo comprendido entre la estación del puente de Órgiva y la presa de Rules (Figura 1).

El actual delta del río Guadalfeo se encuentra situado entre la punta del Santo (antigua ubicación de la desembocadura) y el peñón de Salobreña (Figura 1). La llanura deltaica está delimitada hacia el Este por el puerto de Motril (Félix et al., 2012) y hacia el Oeste por el citado peñón (Jabaloy-Sánchez et al., 2014). Ese tramo de costa es conocido como Playa Granada. La plataforma continental es estrecha: su longitud media es menor de 5 km y la transición entre la plataforma continental y el talud continental se localiza en torno a 120 m de profundidad (Muñoz et al., 2008).

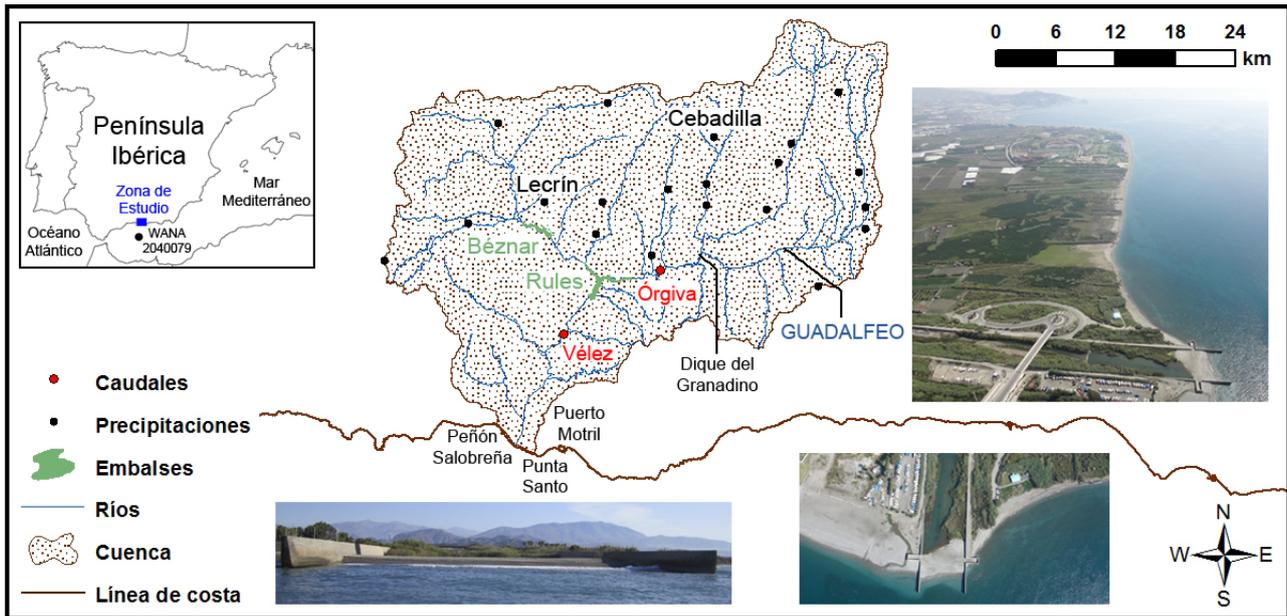


Figura 1: Panel superior izquierdo: localización de la zona de estudio y del punto WANA 2040079. Panel principal: delimitación de la cuenca, dique del Granadino, embalses de Béznar y Rules, estaciones de precipitación aguas arriba de Rules, estación de caudal de Órgiva, azud de Vélez, puerto de Motril, punta del Santo y peñón de Salobreña. Se incluyen fotografías del alzado, planta y perfil del delta.

El clima característico de la cuenca es subtropical mediterráneo: la precipitación media anual es de 586 mm (Jiménez-Sánchez et al., 2008), presentando gran variabilidad espacial y temporal. En la costa, predominan oleajes de bajo contenido energético (Bramato et al., 2012). Las tormentas atlánticas y mediterráneas generan mares de viento (oleajes tipo *sea*) sobre longitudes limitadas (300 km aproximadamente), con velocidades medias del viento a 10 m de altura de entre 18 y 22 m/s. La carrera de marea en el puerto de Motril es de 1,1 m (Ortega-Sánchez et al., 2008).

En relación con prácticas de gestión en el sistema, destacan las construcciones del puerto de Motril (1908 – 1927), la presa de Béznar sobre el río Ízvor (1977 – 1985) y la presa de Rules sobre el curso del Guadalfeo (1993 – 2003), indicados en la figura 1.

### 3. Metodología

Este Trabajo Fin de Máster está basado en: (1) El análisis de datos marítimos y fluviales; (2) la realización de medidas batimétricas, topográficas y granulométricas que complementan a medidas ya existentes; y (3) el cálculo de volúmenes de sedimentos, transporte por fondo y su influencia sobre la planta y el perfil de playa. El periodo de estudio se fija entre octubre de 1999 y septiembre de 2014.

#### 3.1. Datos

##### 3.1.1. Clima marítimo

En este trabajo se empleó una serie de 43800 estados de mar, correspondientes al periodo de estudio, procedentes del punto WANA 2040079 (Figura 1) y proporcionados por Puertos del Estado. Estos datos se usaron para estudiar la evolución de la altura de ola en profundidades indefinidas ( $H$ ), el periodo pico espectral ( $T_p$ ) y la velocidad del viento ( $V_V$ ), así como para los análisis conjuntos de  $H$  - dirección de procedencia del oleaje ( $N = 0^\circ$ ,  $E = 90^\circ$ ) y  $V_V$  - dirección de procedencia del viento ( $N = 0^\circ$ ,  $E = 90^\circ$ ). Además, se obtuvo la evolución de las mareas astronómicas y meteorológicas en el puerto de Motril desde 2007 (inicio del registro), a partir de datos también proporcionados por Puertos del Estado.

##### 3.1.2. Precipitaciones y caudales

En primer lugar, se estudió la precipitación ( $P$ ) en 20 estaciones de la parte alta de la cuenca (Figura 1). En este documento se presentan la evolución temporal en las estaciones más seca y más húmeda, es decir, con menor y mayor valor promedio de  $P$ , respectivamente (Lecrín y Cebadilla, Figura 1). Además, mediante el software *ArcGIS*, se determinó la evolución de la precipitación media espacial por el método del inverso del cuadrado de la distancia.

Por otra parte, se calcularon los caudales medios diarios que han salido de Rules (Figura 1) y del azud de Vélez (obtenidos como los anteriores menos los derivados para riego y abastecimiento) durante el periodo de estudio considerando dos escenarios: escenario real ( $Q_{real}$ ) y escenario natural ( $Q_{natural}$ ), basado en la suposición de que no existiera la presa de rules, con objeto de cuantificar la influencia de ésta en el comportamiento del sistema. Los  $Q_{real}$  anteriores a la entrada en funcionamiento de la presa (julio 2003) y el registro entero de  $Q_{natural}$  fueron obtenidos como suma de los desagües por Béznar y los registrados en Órgiva. Este registro, del que sólo se dispuso de medidas hasta mayo de 2013, fue comparado con los caudales que llegaron a la presa (disponibles en el periodo 2003 – 2011), obteniendo diferencias menores del 5 %. Los datos de caudal fueron extraídos del sistema automático de información hidrológica de las cuencas mediterráneas andaluzas (Red Hidrosur).

### 3.2. Medidas

#### 3.2.1. Batimetrías

Para este estudio se dispuso de cuatro batimetrías multihaz (Figura 2b): las dos primeras (años 1999 y 2004) están referidas al clavo MOT1 del Puerto de Motril (Figura 3b) y fueron realizadas por el Servicio Provincial de Costas de Granada, y el Grupo de Ríos y Embalses de la Universidad de Granada, respectivamente. La tercera (2008) fue realizada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, encontrándose referenciada al nivel medio del mar en Alicante (Figura 3b). Finalmente, la cuarta se realizó en el marco de este Trabajo Fin de Máster, coincidiendo con el fin del periodo de estudio y estando referida al clavo MOT2 del puerto de Motril (Figura 3b). Si bien, únicamente se pudo realizar en algunas zonas concretas de Playa Granada (VC parciales, Figura 3a), entre las que se incluye la desembocadura del río Guadalfeo (VCp1, Figura 3a).

#### 3.2.2. Topografías

Con objeto de complementar las medidas batimétricas, fueron realizados levantamientos topográficos en Playa Granada (Figura 2c) empleando un GPS Diferencial cuyas medidas presentaron errores menores a 2 cm. Previamente, se trasladaron las coordenadas del vértice geodésico 105582 *Punta del Santo* hasta la base de replanteo seleccionada, en la que se posicionó el GPS-Base. Se midieron multitud de perfiles de playa así como la línea de costa al final del periodo de estudio (Figura 2c).

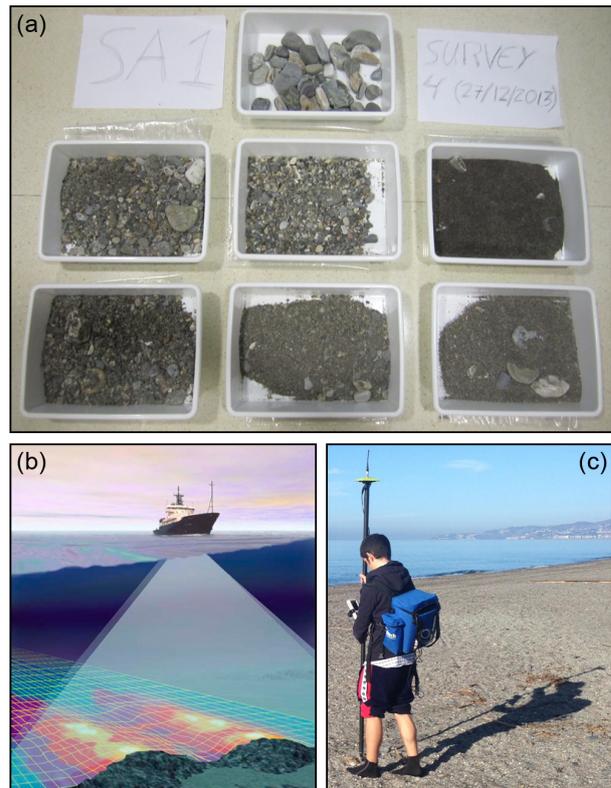


Figura 2: (a) Muestras de sedimentos antes de ser tamizadas. (b) Croquis de una batimetría multihaz. (c) Medidas topográficas del perfil (emergido) de Playa Granada.

#### 3.2.3. Granulometrías

Más de un centenar de muestras de sedimento, tanto superficiales como en profundidad, fueron tomadas en Playa Granada con objeto de caracterizar la distribución de tamaños de grano (Figura 2a). Posteriormente, se tamizaron dichas muestras siguiendo el método de Folk (1980) y empleando las nomenclaturas de Wentworth (1922). Los resultados fueron comparados con distribuciones de sedimento basadas en 22 muestras de transporte por fondo tomadas aguas arriba de la presa de Rules (Millares et al., 2014a).

### 3.3. Cálculos

#### 3.3.1. Volúmenes

Para determinar la diferencia entre los volúmenes de sedimentos de cada batimetría se definió un volumen de control delimitado al Oeste por el peñón de Salobreña, al Este por el puerto de Motril, al Sur por la envolvente superior de la máxima extensión (transversal a la línea de costa) alcanzada por las batimetrías completas (1999, 2004, 2008) y al Norte por la envolvente superior de las líneas de costa (VC total, Figura 3a).

Por otra parte, se calcularon volúmenes parciales, referidos a las zonas en las que se tenían datos batimétricos de 2014 (VC parciales, Figura 3a). Para ello, los datos originales (en formato *AutoCAD*) fueron exportados, referenciados a la misma cota (Clavo MOT2, Figura 3b) e interpolados con el software *Surfer*. Posteriormente, se calcularon los volúmenes por encima de la cota -50 m (para los VC totales) y por encima de la -30 m (para los VC parciales), mediante la regla del trapecio. Finalmente, se incorporaron al análisis todas las aportaciones artificiales de sedimentos (regeneraciones) llevadas a cabo durante el periodo de estudio.

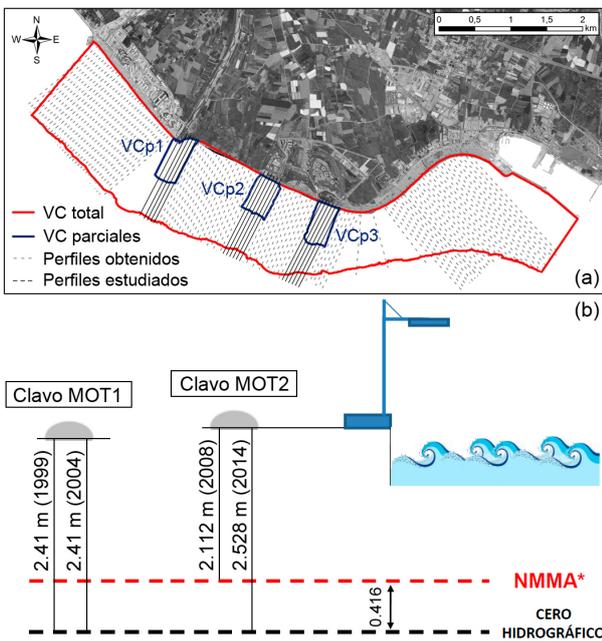


Figura 3: (a) Delimitación de los volúmenes de control (rojo y azul), y perfiles de playa obtenidos (gris) y analizados (negro). (b) Niveles de referencia de las batimetrías estudiadas.

### 3.3.2. Transporte de sedimentos por fondo

El caudal de sedimentos que llegó al delta por fondo se aproximó mediante la siguiente expresión empírica, inicialmente propuesta por Schoklitsch (1962):

$$Q_b = a S^\beta (Q - Q_c) \quad (1)$$

Donde  $Q_b$  ( $m^3/s$ ) es el transporte medio de sedimentos por fondo,  $Q$  ( $m^3/s$ ) el caudal medio del río,  $Q_c$  ( $m^3/s$ ) el caudal crítico (inicio del movimiento por fondo),  $S$  la pendiente media del río,  $a$  un coeficiente empírico función del tipo de sedimento (Rickenmann, 2001) y  $\beta$  un coeficiente empírico función de la pendiente del río y comprendido entre 1,5 y 2 (Schoklitsch, 1962).

Esta fórmula, empleada por D'Agostino and Lenzi (1999), Rathburn and Wohl (2001), Rickenmann (2001) y Hessel and Jetten (2007), entre otros, se basa en el caudal crítico, razón por la cual es comúnmente utilizada en ríos que presentan heterogeneidad en los tamaños y distribución del sedimento, como el Guadalfeo. De hecho, ha sido validada tanto aguas arriba del dique del Granadino (Millares et al., 2014a), considerando  $Q_c = 5 m^3/s$ , como en el tramo comprendido entre Órgiva y Rules (Millares et al., 2014b). En este trabajo se emplearon tanto los coeficientes inicialmente propuestos por Schoklitsch (1962), calibrados en tramos con pendientes menores del 1 %, como los obtenidos por Millares et al. (2014a). Adicionalmente, asumiendo como hipótesis que las características del sedimento arrastrado por fondo aguas arriba del Granadino se asemejan a las del sedimento que llega al delta por fondo (es decir, considerando el mismo valor de  $a$ ), se probaron tres valores de  $\beta$  distintos a los obtenidos por Millares et al. (2014a), puesto que la pendiente del cauce aguas abajo del azud de Vélez es distinta a la considerada en su estudio. El conjunto de combinaciones aplicadas se resume en la tabla 1. Para todas ellas, se calculó el caudal de sedimentos por fondo acumulado (volumen) en el delta durante el periodo de estudio, considerando los dos escenarios definidos en el apartado 3.1.2.

|         | Schoklitsch 1962 | Millares 2014 | TFM 1 | TFM 2 | TFM 3 |
|---------|------------------|---------------|-------|-------|-------|
| $a$     | 0,93             | 6,3           | 6,3   | 6,3   | 6,3   |
| $\beta$ | 1,5              | 2             | 1,6   | 1,7   | 1,8   |

Tabla 1: Valores de los coeficientes  $a$  y  $\beta$  en los cinco casos testados para estimar el transporte por fondo.

### 3.3.3. Evolución en planta

En este trabajo se analizaron un total de 17 líneas de costa: las correspondientes a los años 1947, 1956, 1973, 1977, 1981, 1993, 1995, 1998, 1999, 2001, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2013 y 2014. Las fuentes de procedencia de las mismas fueron: ortofotos del Instituto de Estadística y Cartografía de la Junta de Andalucía, ortofotos proporcionadas por el Grupo de Ecología Terrestre de la Universidad de Granada, medidas facilitadas por el Servicio Provincial de Costas de Granada y la mencionada topografía realizada al final del periodo de estudio. Se obtuvieron tanto las diferencias de áreas (mediante la regla del trapecio) entre cada par de líneas de costa sucesivas (delimitadas por el VC total, Figura 3a) como la tasa de variación en metros cuadrados por año. De modo adicional, se compararon las isóbatas de las tres batimetrías completas disponibles en las proximidades del delta del Guadalfeo.

### 3.3.4. Evolución del perfil de playa

Se obtuvieron, para el estudio del perfil de playa, un total de 120 perfiles para cada una de las tres batimetrías completas (Figura 3a) y 17 perfiles de la batimetría parcial realizada en 2014 (Figura 3a), mediante el software *Surfer*. No obstante, para el cálculo de las profundidades de cierre y los ajustes de perfiles de equilibrio se consideraron únicamente los 17 perfiles comunes a las cuatro batimetrías, haciendo un promedio de los situados en un mismo VC parcial (Figura 3a) para reducir la incertidumbre asociada a los errores de medida. Para obtener las profundidades de cierre se determinó el punto en el que los perfiles cambian su orientación (punto de inflexión), de acuerdo a lo propuesto por Nicholls et al. (1998). Por su parte, para ajustar perfiles de equilibrio se consideró la expresión inicialmente deducida por Bruun (1954) y posteriormente desarrollada por Dean (1991):  $h = Ay^{2/3}$ , donde  $h$  es la profundidad del perfil a una distancia  $y$  de la línea de costa, y  $A$  es un parámetro de escala dependiente del tamaño de sedimento.

## 4. Resultados

### 4.1. Clima marítimo

La figura 4 muestra la evolución de las variables marítimas durante el periodo de estudio. Frecuentemente, la altura de ola en indefinidas fue menor de 1 m y el periodo pico espectral estuvo comprendido entre 4 y 6 s (Figura 4a,b), indicando que el delta estuvo sometido, en general, a oleajes de bajo contenido energético. Las direcciones de procedencia del oleaje predominantes fueron SO-O y E-SE (Figura 5a). Las velocidades del viento generalmente fueron menores de 10 m/s (Figura 4c), con direcciones de procedencia E-SE y O-SO (Figura 5b).

Considerando aisladamente los tres periodos definidos por las fechas en las que se realizaron las batimetrías (1999-2004, 2004-2008, 2008-2014), se comprueba que el último de ellos fue sometido a un mayor número de tormentas ( $H > 3$  m durante al menos 12 horas), llegando a producirse eventos con alturas de ola en indefinidas mayores de 4 m hasta en 7 ocasiones. Por contra, en el periodo 2004-2008 únicamente tuvieron lugar cinco tormentas (Figura 4a). Estos estados de mar (extremales) se encontraron frecuentemente asociados a direcciones de procedencia de oleaje SO-O (Figura 5a). El periodo pico máximo registrado fue 13,6 s, no soliendo superar los 12 s (Figura 4b). Las máximas velocidades de viento también se produjeron en el periodo 2008-2014 (Figura 4c), procediendo predominantemente del Oeste (Figura 5b).

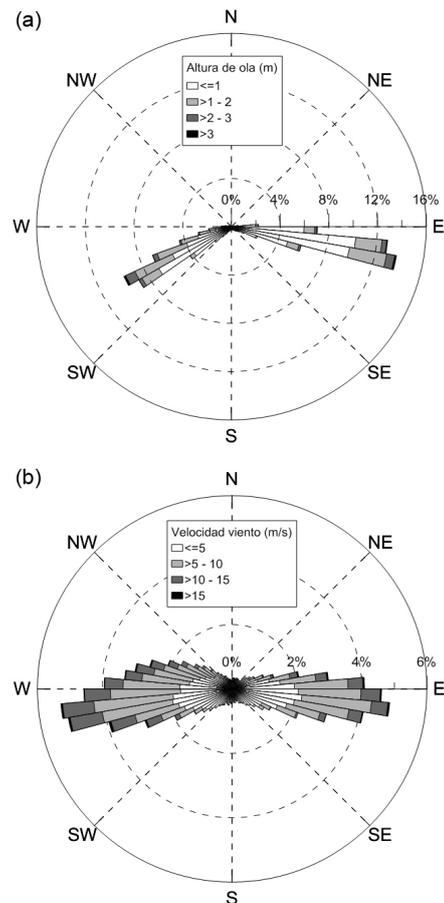


Figura 5: (a) Rosa de oleaje durante el periodo de estudio: frecuencia de valores de altura de ola asociados a la dirección de procedencia del oleaje. (b) Rosa de viento durante el periodo de estudio: frecuencia de valores de velocidad del viento asociados a su dirección de procedencia.

La carrera de marea astronómica durante el periodo de estudio fue  $\sim 0,8$  m, mientras que los valores máximos y mínimos de sobre elevación debida a la marea meteorológica registrados en el puerto de Motril fueron 0,34 y  $-0,35$  m, respectivamente (Figura 4d).

### 4.2. Precipitaciones y caudales

La figura 6 muestra la evolución de las precipitaciones y los caudales durante el periodo de estudio. Se observa una gran diferencia entre las precipitaciones de la estación más húmeda (Figura 6a) y la más seca (Figura 6c) de la parte de la cuenca aguas arriba de Rules (Figura 1), siendo éste uno de los aspectos característicos de la cuenca del Guadalfeo. Los registros de caudal (Figura 6d,e) demuestran que el régimen hidrológico del Guadalfeo está gobernado por la ocurrencia de puntuales avenidas, con caudales máximos 11 veces superiores

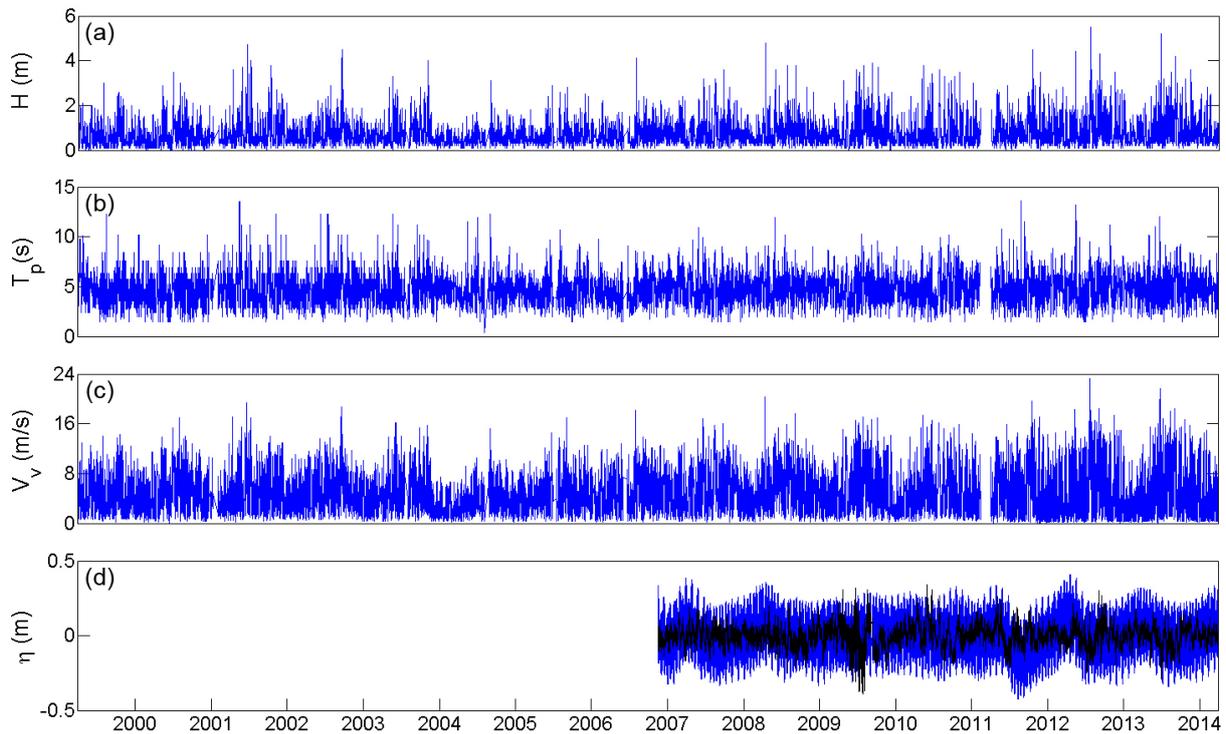


Figura 4: Evolución de las variables marítimas durante el periodo de estudio: (a) altura de ola en profundidades indefinidas, (b) periodo pico espectral, (c) velocidad del viento y (d) marea astronómica (azul) y meteorológica (negro).

su media aguas abajo de Rules y hasta 24 veces superiores a su media aguas arriba de Rules. Además, se comprueba que la precipitación media espacial (Figura 6b) a partir de 2003 (entrada en funcionamiento de la presa) estuvo más relacionada con el caudal que llegó a Rules (Figura 6e) que con el que salió de la presa (Figura 6d), evidenciando la alteración que ésta supone para el funcionamiento del sistema.

La comparativa entre los dos escenarios de caudal (Figura 6d,e) revela que en eventos extremos de tormenta (diciembre de 2009) la presa reguló el caudal del río, limitando el transporte de sedimentos aguas abajo de la misma. Asimismo, el máximo caudal desaguado por Rules (diciembre de 2010) no coincidió con el máximo caudal del escenario definido como natural, no obstante, este escenario no muestra el régimen que tendría el río sin ningún tipo de regulación, puesto que una parte de ese caudal es el desaguado (regulado) por la presa de Béznar. Finalmente, se muestra que la diferencia entre el caudal que salió de Rules y el que salió del azud de Vélez no fue significativa. Estos últimos son más representativos del caudal que llegó al delta, puesto que las observaciones *in situ* indicaron que con frecuencia ese caudal fue nulo.

### 4.3. Volúmenes

Las diferencias de volumen entre las batimetrías disponibles, tanto en el volumen de control total como en los parciales (Figura 3a), se muestra en la tabla 2. Para un análisis más certero de esos valores deben considerarse los volúmenes, procedencia y lugar de vertido de las cinco regeneraciones (Figura 7) llevadas a cabo durante el periodo de estudio (Tabla 3).

|                     | 1999 – 2004 | 2004 – 2008 | 2008 – 2014 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| Diferencia VC total | +1968,43    | -394892,32  | -           |
| Diferencia VCp1     | -13698,73   | -157150,67  | -3211,18    |
| Diferencia VCp2     | -23595,18   | -41504,04   | +13416,05   |
| Diferencia VCp3     | -22563,12   | -39001,01   | +43767,16   |

Tabla 2: Diferencias de volumen de sedimento ( $m^3$ ), basadas en medidas batimétricas, tanto en el volumen de control total como en los volúmenes de control parciales.

Se comprueba que, a nivel global (VC total, Figura 3a), entre 1999 y 2004 se produjo una ganancia aproximada de  $2000 m^3$  de sedimento. Si bien, considerando que fueron introducidos de manera artificial casi  $400000 m^3$  procedentes del vaso del embalse de Rules (Tabla 3) y a pesar de los aportes fluviales durante ese periodo (Figura 6d), tuvo lugar una pérdida neta de sedimentos en el volumen de control igual a  $387383,57$

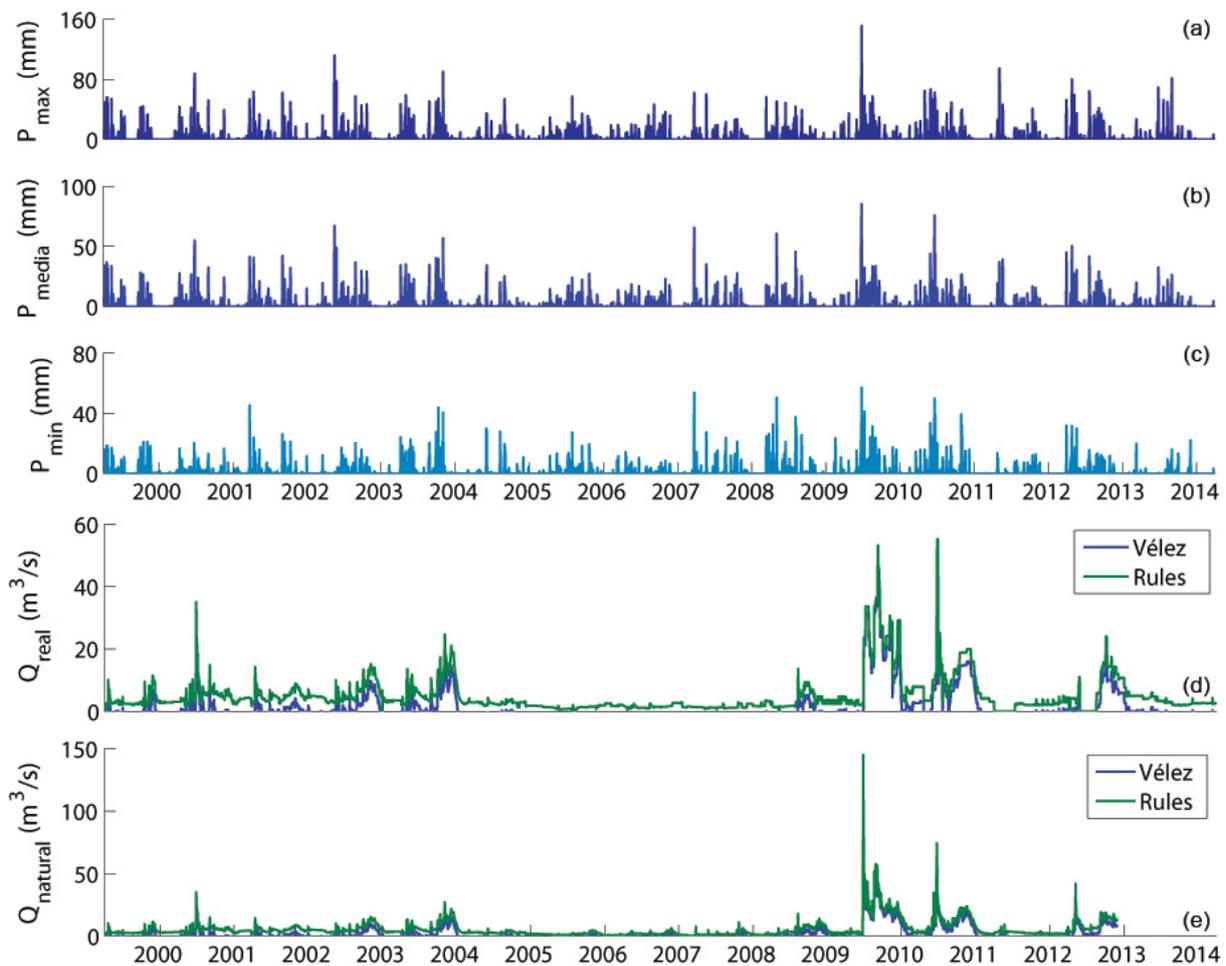


Figura 6: Evolución de precipitación y caudal durante el periodo de estudio: (a) precipitación en la estación más seca (Lecrín), (b) precipitación media espacial aguas arriba de la presa de Rules, (c) precipitación en la estación más húmeda (Cebadilla), (d) caudal escenario real y (e) caudal escenario natural.

$m^3$ . Entre 2004 y 2008 la pérdida total fue de  $394892,32 m^3$ , lo que supone una tasa de  $-98723,08 m^3/año$ , coincidiendo con un periodo de bajas precipitaciones (Figura 6a,b,c) y, consecuentemente, caudales prácticamente nulos en el delta (Figura 6d). Las regeneraciones en este intervalo temporal fueron realizadas dentro de la misma playa (Figura 7), razón por la cual, en principio, no deben suponer un aporte adicional dentro del VC total.

| Año  | Volumen  | Procedencia | Destino   |
|------|----------|-------------|-----------|
| 2002 | 389352   | Rules       | VC        |
| 2006 | 70950    | PG Este     | VCp1-VCp2 |
| 2009 | 51375,26 | PG Este     | VCp1-VCp2 |
| 2009 | 1654     | PG Este     | VCp1-VCp2 |
| 2014 | 19436    | PG Este     | VCp2-VCp3 |

Tabla 3: Actuaciones de aportaciones artificiales de sedimento durante el periodo de estudio: año, volumen (en  $m^3$ ), procedencia y lugar de vertido (destino).

En la zona de la desembocadura (VCp1, Figura 3a), se erosionaron durante el primer periodo unos  $13698,73 m^3$  de sedimento, a pesar del aporte artificial realizado (Tabla 3). En los VC parciales 2 y 3 se produjeron pérdidas de mayor magnitud, superando ambas los  $22500 m^3$  (Tabla 2). Entre los años 2004 y 2008 tuvieron lugar pérdidas de sedimento mayores a las del anterior periodo en los tres VC parciales, seguramente debidas a la sequía comentada anteriormente. No obstante, cabe destacar que la pérdida fue mayor en la zona del delta (Tabla 2). Por último, en el periodo 2008 – 2014 el balance de sedimentos en el delta fue de  $\sim 3000 m^3$ , mientras que en los VC parciales 2 y 3 se depositaron más de  $10000 m^3$  y  $40000 m^3$ , respectivamente. Esto pudo ser debido, por una parte, a que los caudales desaguados por Rules en enero de 2010, diciembre de 2010 y marzo de 2013 (Figura 6d) aportaran sedimentos al



Figura 7: Regeneración del delta en 2014: Vistas Oeste-Este (a) y Este-Oeste (b) de la playa antes de la regeneración, (c) aporte de sedimentos y (d) situación de la playa en la fase final de los trabajos, con la desembocadura al fondo.

sistema y, por otra, a que los temporales marítimos durante ese periodo (Figura 4a), frecuentemente asociados a direcciones de procedencia Oeste (Figura 5b) transportaran sedimento hacia el Este. Asimismo, los *bypass* realizados durante ese intervalo temporal desde la parte este de la playa hacia la zona oeste (Tabla 3) pudieron contribuir a la acumulación de sedimentos obtenida en los VC parciales 2 y 3.

#### 4.4. Transporte de sedimentos por fondo

La figura 8 muestra las características granulométricas del sedimento transportado por fondo aguas arriba del dique del Granadino (Figura 1). Se comprueba el carácter heterogéneo de la distribución, englobando tres fracciones distintas de arena y tres de grava más de un 10 % del total. Este hecho justifica la elección de formulaciones basadas en el caudal crítico, como la propuesta por Schoklitsch (1962), en lugar de las basadas en el cortante crítico, función del tamaño de grano: Meyer-Peter and Müller (1948), Parker (1990) y Wilcock and Crowe (2003), entre otros. Comparando la distribución de esas muestras con las tomadas en Playa Granada, se observa que en ambas coinciden las tres fracciones predominantes (Figura 8a): 0,25 – 0,5 mm (arena), 2 – 8 mm (grava fina) y 8 – 32 mm (grava gruesa). Las partes centrales de ambas curvas granulométricas (Figura 8b) muestran similitud, difiriendo en los extremos. Este hecho refuerza la hipótesis de considerar el sedimento transportado por fondo aguas abajo de Rules (del que no se tienen muestras) semejante al muestreado por Millares et al. (2014a) y adoptar el valor del parámetro  $a$  validado aguas arriba (Tabla 1).

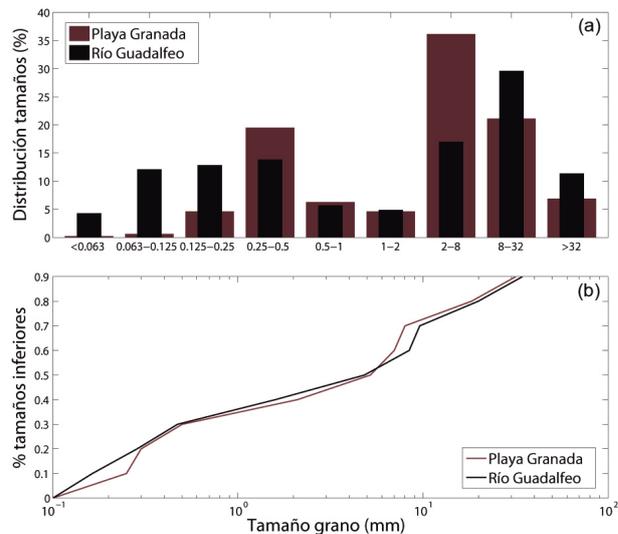


Figura 8: (a) Histogramas de tamaños de grano y (b) curvas granulométricas del conjunto de muestras de transporte por fondo (Millares et al., 2014a), en negro, y del conjunto de muestras en la parte emergida de Playa Granada, en marrón.

El cálculo del volumen acumulado que llega al delta como consecuencia del transporte por fondo, considerando los cinco casos resumidos en la tabla 1, los dos escenarios definidos en el apartado 3.3.2, el caudal crítico propuesto por Millares et al. (2014a) y la pendiente media del tramo azul de Vélez - Delta ( $S = 0,008$ ), se muestra en la figura 9. Por su parte, las estimaciones de volumen aportado por fondo entre batimetrías sucesivas se exponen en la tabla 4.

| Escenario real          | 1999 – 2004 | 2004 – 2008 | 2008 – 2014 |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Schoklitsch (1962)      | 35900       | ~ 0         | 291600      |
| Millares et al. (2014a) | 22000       | ~ 0         | 179000      |
| TFM 1                   | 150700      | ~ 0         | 1223500     |
| TFM 2                   | 93200       | ~ 0         | 756600      |
| TFM 3                   | 57600       | ~ 0         | 467400      |
| Escenario natural       | 1999 – 2004 | 2004 – 2008 | 2008 – 2014 |
| Schoklitsch (1962)      | 36100       | ~ 0         | 372200      |
| Millares et al. (2014a) | 22200       | ~ 0         | 228300      |
| TFM 1                   | 151600      | ~ 0         | 1561500     |
| TFM 2                   | 93700       | ~ 0         | 965700      |
| TFM 3                   | 58000       | ~ 0         | 597100      |

Tabla 4: Volumen acumulado entre batimetrías (en  $m^3$ ) debido al transporte por fondo según las cinco estimaciones realizadas (Ecuación Ecuación 1 y tabla 1): escenarios real y natural.

Si se tiene en cuenta que la tasa de pérdida de sedimentos en el sistema en el periodo 2004–2008, sin aportes fluviales de por medio, fue de  $-98723,08 m^3/año$  y se adopta como hipótesis una tasa anual de pérdida igual para el periodo 1999 – 2004, se tendría una pérdida en dicho periodo de  $493615,4 m^3$ . Considerando, asimismo, que fueron aportados  $389352 m^3$  de manera artifi-

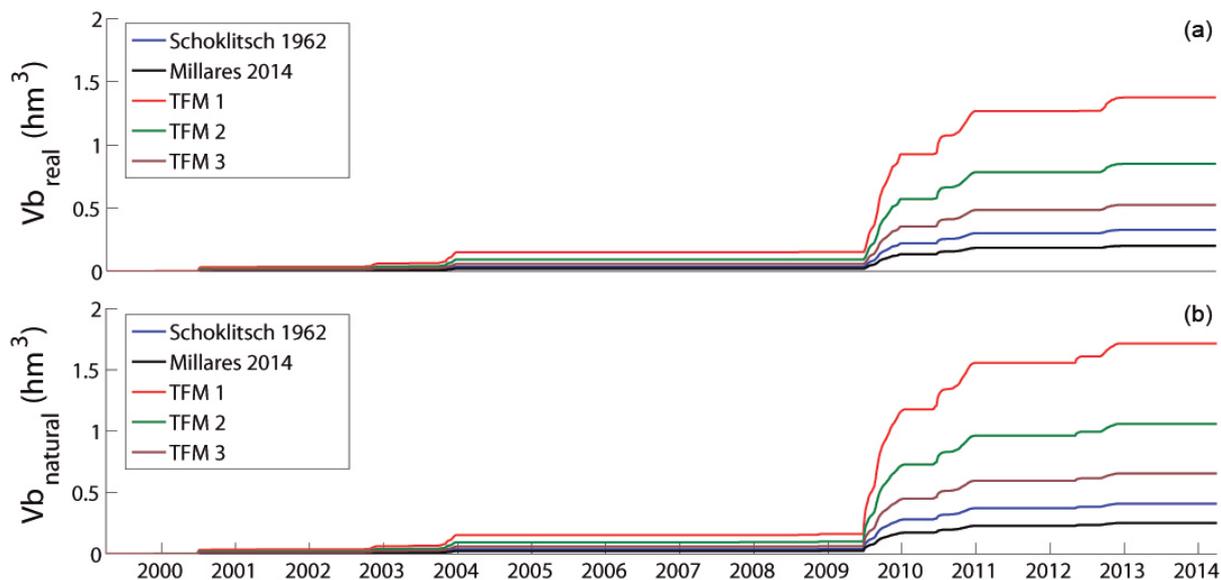


Figura 9: Evolución del volumen acumulado debido al transporte por fondo durante el periodo de estudio para los cinco casos definidos (Ecuación Ecuación 1 y tabla 1): escenarios real (a) y natural (b).

cial (Tabla 3) y que la diferencia de sedimentos en el VC total fue de +1968,43 m<sup>3</sup> (Tabla 2), se podría estimar de manera aproximada que el río pudo aportar durante ese periodo en torno a 105000 m<sup>3</sup>. Puesto que de ese aporte una parte correspondería al transporte por fondo y otra al transporte en suspensión, con una contribución aguas arriba de la presa del 52 y 48 %, respectivamente (Millares et al., 2014b), se podría afirmar, de manera aproximada, que la opción que mejor parece ajustarse es la TFM 3. En ese caso, se tendría que el aporte total al delta entre 2008 y 2014 en el escenario real sería de 467400 m<sup>3</sup>, mientras que considerando el escenario natural sería de 597100 m<sup>3</sup> (Tabla 4 y Figura 9), haciéndose de nuevo patente el efecto perturbador de la presa de Rules.

#### 4.5. Evolución en planta de Playa Granada

En la tabla 5 se exponen las diferencias de áreas entre pares de líneas de costa sucesivas así como la tasa anual de pérdida o ganancia, es decir, de retroceso o avance de la línea de costa, respectivamente. Con anterioridad al del periodo de estudio, se observa que los balances de áreas no siguieron un patrón de comportamiento claro, alternando valores positivos y negativos, probablemente relacionados con las puntuales aportaciones del río (pulsos), consecuencia del tipo de clima de la zona. Sin embargo, la evolución en la forma de las líneas de costa (Figura 10a) refleja un retroceso de la alineación oeste de la playa (desembocadura - punta del Santo), que contrasta con el avance de la alineación este (punta del

Santo - puerto de Motril). Resulta destacable, asimismo, la acumulación de sedimentos en las proximidades del delta en los años 1998 y 1999 (Figura 10a,c), en concordancia con lo obtenido en la tabla 5 (1995 – 1999) y a buen seguro debida a la ocurrencia de uno o varios episodios de tormenta (con los consecuentes pulsos de sedimento) durante ese periodo. En suma, el balance neto de áreas desde 1947 hasta 1999 fue de +240604 m<sup>2</sup>.

| Periodo     | Balace  | Tasa   | Periodo     | Balace | Tasa   |
|-------------|---------|--------|-------------|--------|--------|
| 1947 – 1956 | 181189  | 20132  | 1999 – 2001 | -14832 | -7416  |
| 1956 – 1973 | 64180   | 3,775  | 2001 – 2004 | -84351 | -28117 |
| 1973 – 1977 | 38921   | 9730   | 2004 – 2007 | -80445 | -26815 |
| 1977 – 1981 | -36778  | 9195   | 2007 – 2008 | -4062  | -4062  |
| 1981 – 1993 | -156933 | -13078 | 2008 – 2009 | 23518  | 23518  |
| 1993 – 1995 | -71104  | -35552 | 2009 – 2010 | 44175  | 44175  |
| 1995 – 1998 | 170980  | 56993  | 2010 – 2013 | -20612 | -6871  |
| 1998 – 1999 | 50149   | 50149  | 2013 – 2014 | -15686 | -15686 |

Tabla 5: Diferencia de áreas (en m<sup>2</sup>) entre las líneas de costa estudiadas y tasa anual (en m<sup>2</sup>/año) de pérdida (signo negativo) o ganancia (signo positivo).

En lo que al periodo de estudio se refiere, la playa redujo su extensión en más de 150000 m<sup>2</sup> entre los años 1999 y 2009 (Tabla 5), siendo la pérdida de área más severa entre los años 2004 y 2008 (164796 m<sup>2</sup>). Estos resultados son congruentes con los obtenidos en los apartados 4.3 (Tabla 2) y 4.4 (Tabla 4 y Figura 9). El retroceso resultó especialmente significativo en el tramo de costa colindante (al Este) con la desembocadura (Figura 10b). Por contra, en el periodo 2009 – 2010 la playa aumentó su extensión en casi 45000 m<sup>2</sup>, focalizándose

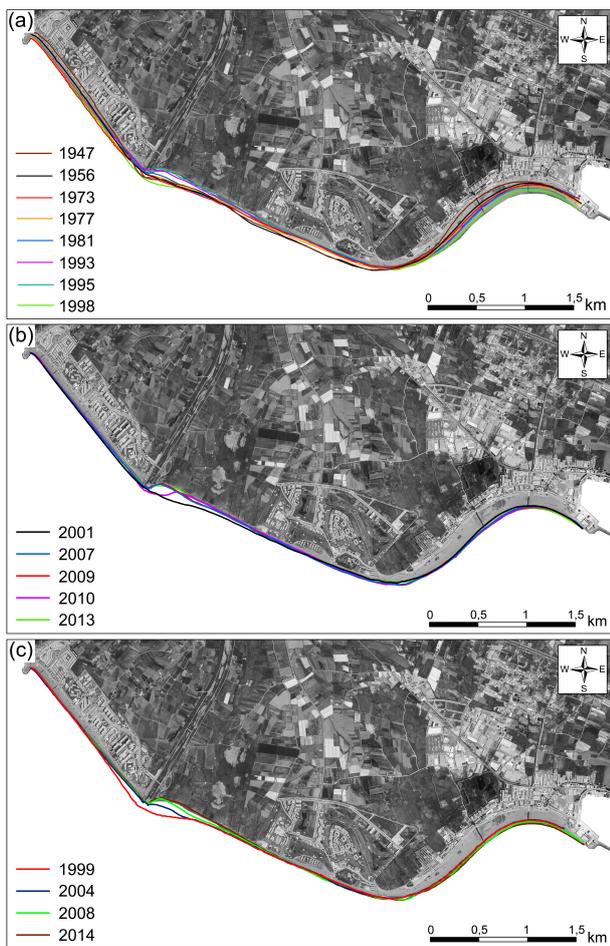


Figura 10: Esbozo de las líneas de costa estudiadas sobre la ortofoto de 2013: (a) anteriores al periodo de estudio, (b) incluidas en el periodo de estudio y (c) correspondientes a las batimetrías realizadas.

se nuevamente dicha variación en las proximidades del delta (Figura 10b). Este aumento se encuentra relacionado con las tormentas que tuvieron lugar en diciembre de 2009 y enero de 2010 (Figura 6a,b,c) y los caudales desaguados por Rules durante ese periodo (Figura 6d), así como con el consecuente transporte de sedimentos (Figura 9a). Dicho aporte, unido a la direccionalidad del oleaje (Figura 5a), generó acumulación de sedimentos a ambos lados de la desembocadura (Figura 11g,h,i). La variación resultó especialmente significativa en el lado este, probablemente debido a que los estados de mar más energéticos durante ese periodo ( $H > 3$  m, Figura 4) estuvieran asociados a oleajes de procedencia Oeste (Figura 5a). Un esquema conceptual del aporte fluvial de sedimentos y la posterior formación de una laguna al lado este de la desembocadura, junto con fotografías aéreas que lo corroboran, es mostrado en la figura 11.

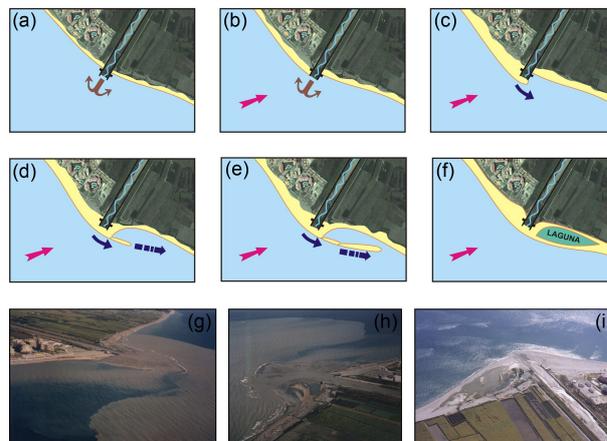


Figura 11: Modelo conceptual de la acumulación de sedimentos en torno a la desembocadura durante tormentas (a-f) y fotografías aéreas del proceso (g-i).

Finalmente, en referencia a los cuatro años de los que se dispone de medidas batimétricas (Figura 10c), a pesar de los *bypass* de sedimentos llevados a cabo (Tabla 3), se observa que la alineación este de la playa continuó avanzando, mientras que en la alineación oeste persistió la erosión. Si bien durante el periodo 1999 – 2004 el retroceso o giro de la línea de costa no se tradujo en cambios significativos en la batimetría (Figura 12a,b,d), entre los años 2004 y 2008 tuvo lugar una variación de la morfología sumergida hasta la octava isóbata al Sureste de la desembocadura (Figura 12b,c,e). El ajuste de los puntos de giro mediante una expresión de la forma  $y = A x^m$  (análoga a las propuestas por Bruun (1954), Vellinga (1984) y Dean (1991) para el perfil de playa), tomando como origen el punto de corte más profundo ( $-8$ ) y sin considerar el corte de la tercera isóbata (por alejarse de la tendencia general), resulta en un coeficiente de determinación ( $R^2$ , definido en el apéndice A) igual a 0,987 para  $A = 0,6842$  y  $m = 0,75$  (Figura 12e). Este último coeficiente se asemeja al obtenido por Vellinga (1984) para el perfil de playa ( $m = 0,78$ ).

#### 4.6. Evolución del perfil de playa

La figura 13 muestra el promedio aritmético de los perfiles de playa analizados en los tres VC parciales (Figura 3). Se comprueba que la variación de los mismos es coherente con los volúmenes obtenidos en el apartado 4.3 (Tabla 2). Así, la evolución del perfil de playa en el VCp1 (Figura 13a) denota una pérdida constante de sedimentos, mientras que los perfiles de los VC parciales 2 y 3 (Figura 13b,c) muestran erosión en el periodo 1999–2008 y sedimentación en el periodo 2008–2014, siendo ésta mayor en el VCp3 (Figura 13c).

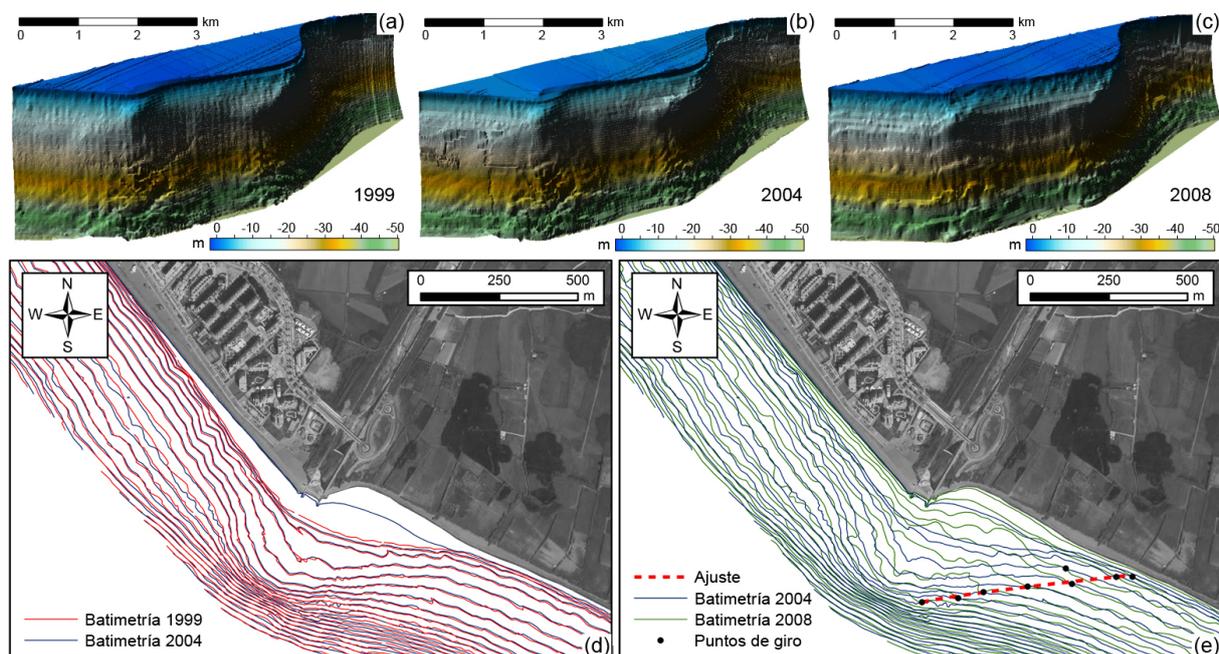


Figura 12: Representación gráfica en 3 dimensiones de las batimetrías de 1999 (a), 2004 (b) y 2008 (c). Comparativa en planta entre ellas en la zona de la desembocadura (d-e) y curva de ajuste a los puntos de giro entre 2004 y 2008 (e).

Considerando que la profundidad de cierre del perfil se fija en el punto de cambio de curvatura del mismo (límite de la zona activa del perfil), se obtienen los valores aproximados mostrados en la tabla 6. Se observa que ésta es prácticamente constante en los VC parciales 2 y 3 (Figura 13b,c), siendo coherente con lo obtenido en el apartado 4.5, pues la batimetría no giró en el periodo 1999 – 2004 (Figura 12d) e interrumpió su giro antes de llegar a los VC parciales 2 y 3 en el periodo 2004 – 2008 (Figura 12e). Sin embargo, la profundidad de cierre varía en el VCp1 entre 2004 y 2008 (Figura 13), pasando de 4,5 a 8 m (Tabla 6). Este último valor coincide con la profundidad a la que la batimetría dejó de girar (Figura 12e), no mostrando variación en el periodo 2008 – 2014.

|       | VCp1 (1999,2004) | VCp1 (2008,2014) | VCp2    | VCp3    |
|-------|------------------|------------------|---------|---------|
| $h^*$ | ~ 4,5 m          | ~ 8 m            | ~ 8,5 m | ~ 9 m   |
| $R^2$ | 0,955            | 0,9409           | 0,9662  | 0,9684  |
| $A$   | 0,1341           | 0,1208           | 0,1928  | 0,1824  |
| $D$   | 0,35 mm          | 0,28 mm          | 0,79 mm | 0,68 mm |

Tabla 6: Profundidades de cierre ( $h^*$ ), coeficientes de determinación del ajuste de Dean ( $R^2$ ), parámetros de escala ( $A$ ) y tamaños de sedimento asociados ( $D$ ).

El ajuste del perfil de equilibrio de Dean (1991) a los perfiles de la figura 13, hasta sus respectivas profundidades de cierre, proporciona coeficientes de determinación mayores o iguales a los mostrados en la tabla 6.

Los parámetros de escala ( $A$ ) difieren en los cuatro casos y, con ellos, también los tamaños de grano con los que se corresponden (Tabla 6). En el VCp1, se obtiene una disminución en el tamaño teórico del sedimento en los dos últimos perfiles (2008 y 2014) con respecto a los dos primeros (1999 y 2004), que es coherente con la variación en la pendiente de los mismos, pasando a ser más tendidos. También se comprueba que existe variación longitudinal (entre VC parciales) tanto de la profundidad de cierre como de los tamaños de grano derivados de los ajustes (Tabla 6), estando relacionada con la variación longitudinal del perfil de playa (Figura 13).

## 5. Discusión de resultados

A partir del análisis del clima marítimo, se ha obtenido que en la zona de estudio predominan oleajes de bajo contenido energético ( $H < 1$  m y  $4$  s  $< T_p < 6$  s), concordando con lo propuesto por Bramato et al. (2012) en otra playa del litoral granadino: Carchuna. Las direcciones de procedencia del oleaje más frecuentes son E-SE y SO-O, siendo las últimas más comunes durante eventos de tormenta ( $H > 3$  m). Se trata de una zona micromareal, tal y como expuso Ortega-Sánchez et al. (2008), a pesar de lo cual la sobre-elevación debida a la marea meteorológica durante tormentas es importante en la erosión de Playa Granada.

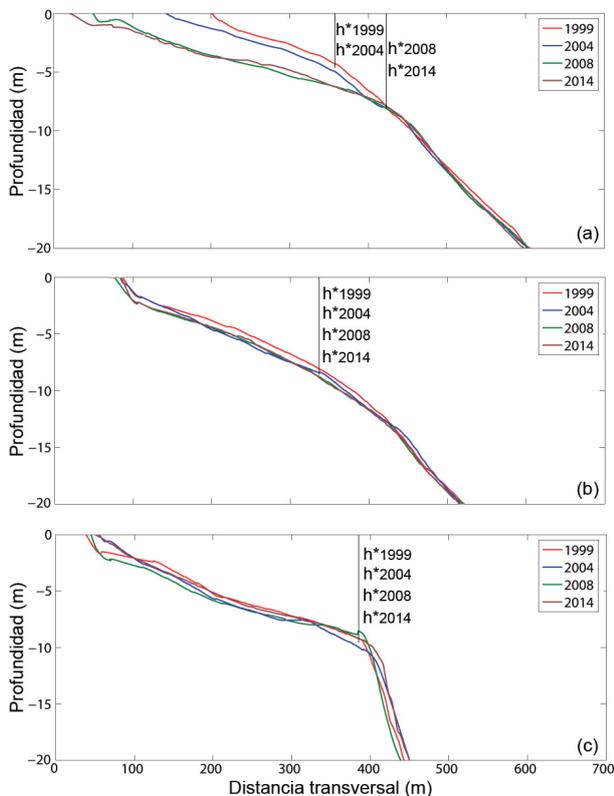


Figura 13: Perfiles de playa correspondientes a 1999 (rojo), 2004 (azul), 2008 (verde) y 2014 (marrón) en los volúmenes de control parciales 1 (a), 2 (b) y 3 (c).

El estudio del régimen de caudales ha indicado que el Guadalfeo está gobernado por la ocurrencia de puntuales avenidas, con valores de hasta 24 veces mayores a la media del registro. Sin embargo, se ha comprobado que la presa de Rules modifica el régimen natural, alterando el comportamiento del sistema aguas abajo de la misma.

Según el cálculo de volúmenes expuesto en el apartado 4.3, considerando el volumen de control delimitado por el peñón de Salobreña (Oeste) y el puerto de Motril (Este), se produjeron pérdidas de sedimento próximas a  $0,4 \text{ hm}^3$ . Esto puede ser debido a que el volumen de control está limitado, al Norte, por la envolvente superior de las líneas de costa de las batimetrías, no incluyendo la zona emergida de la alineación este de la playa, puesto que no se tienen datos topográficos de la misma. En ese tramo de playa se suelen acumular grandes cantidades de sedimento (Apartado 4.5), probablemente debido a la citada relación entre eventos de tormenta y direcciones de procedencia Oeste. Bergillos et al. (2014) probaron, a partir de un modelo de propagación, que el flujo de energía antes de la rotura en esas condiciones se encuentra dominado por la componente longitudinal

en dicha alineación (Figura 14), lo cual apoya la suposición realizada. De hecho, los sedimentos empleados en las regeneraciones artificiales llevadas a cabo en la zona comúnmente provienen de la zona emergida de ese tramo de playa (Tabla 3).

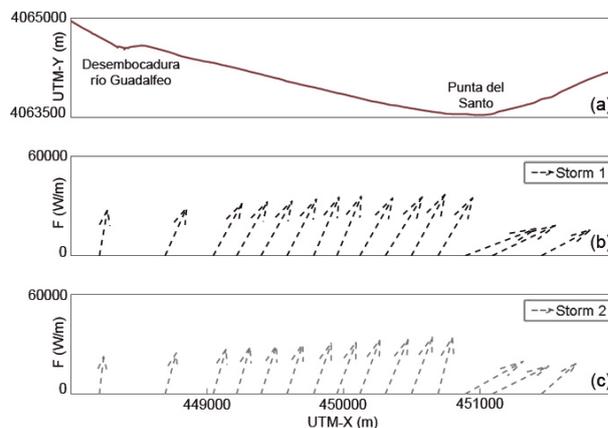


Figura 14: Distribución longitudinal del flujo de energía a 5 metros de profundidad en condiciones de tormenta (Bergillos et al., 2014).

El análisis conjunto de volúmenes de sedimento y agentes forzadores marítimos y fluviales indica que la dinámica sedimentaria del delta está dominada por los aportes sólidos del río durante avenidas (pulsos), que son transportados longitudinalmente debido al carácter bidireccional de los agentes viento y oleaje (Figura 5). Los volúmenes obtenidos revelan que la zona de la desembocadura sufrió una pérdida de sedimentos de casi  $0,18 \text{ hm}^3$ , asociada a un retroceso tanto de la línea de costa (Apartado 4.5) como del perfil de playa (Apartado 4.6). Esta pérdida de delta contrasta con la acumulación de sedimentos tanto en el dique del Granadino, estimada en  $0,14 \text{ hm}^3$  (Millares et al., 2014a), como en el embalse de Rules, donde un volumen transportado por fondo de  $1,8 \text{ hm}^3$  ha consolidado la formación de un delta (Millares et al., 2014b). Por tanto, la barrera que supone la presencia de ésta ocasiona consecuencias negativas en un doble sentido: limitando los pulsos de caudal y sedimento que llegar al mar, y acumulando volúmenes de sedimento aguas arriba. Éstas generan una incesante erosión en el tramo Rules - delta y un creciente depósito en el embalse, pudiendo llegar a su colmatación.

Se ha encontrado una relación entre las características granulométricas de muestras de transporte por fondo aguas arriba del dique del Granadino (Millares et al., 2014a) y muestras tomadas en la parte emergida de Playa Granada, mostrando disparidad en los extremos. Las diferencias en el extremo superior pueden ser debidas a que las gravas más gruesas vuelvan a depositarse antes

de llegar al delta, o bien se fragmenten durante su transporte por el fondo del río. Por su parte, las diferencias en el extremo inferior probablemente se deban a la ausencia de muestras sumergidas en el mar, donde predominan dichas fracciones (Lobo et al., 2006). Este hecho prueba el carácter dominante del río en lo que a aportes sedimentarios se refiere y, dentro de éstos, la importancia del transporte por fondo.

Debido a la heterogeneidad del sedimento encontrada (Figura 8) y tras tanteos previos, se descartó el uso de fórmulas basadas en el cortante crítico, como las de Meyer-Peter and Müller (1948), Parker (1990) y Wilcock and Crowe (2003); en pro de las basadas en el caudal crítico, como la propuesta por Schoklitsch (1962) y validada por Millares et al. (2014a) en la cuenca del Guadalfeo. Se optó por conservar el valor del parámetro  $\alpha$ , por ser función del tipo de sedimento (Rickenmann, 2001) y probar menores valores del parámetro  $\beta$ , típicos en tramos de ríos de menor pendiente (Schoklitsch, 1962), como el comprendido entre el azud de Vélez y la desembocadura. El valor  $\beta = 1,5$  se descartó por los altos volúmenes que proporcionaba y el  $\beta = 1,9$  por coincidir prácticamente con la combinación de valores de Schoklitsch (1962), con diferencias menores del 2%. Parece que el caso *TFM 3* es el que mejor se ajusta a lo medido, si bien, el número de suposiciones realizadas en la calibración no garantizan la fiabilidad de la misma. En todo caso, las diferencias de volumen de sedimento entre los dos escenarios (Tabla 4 y Figura 9) refuerzan la idea de que el régimen de aportes de sedimentos al delta se encuentra limitado a partir de la entrada en funcionamiento de la presa de Rules.

Con base en la evolución en planta de las líneas de costa, se estudió si el retroceso de las mismas influyó en la evolución de la morfología submarina. Entre 1999 y 2004 no tuvieron lugar cambios significativos en la batimetría (Figura 12d), sin embargo, en el periodo 2004 – 2008 se produjo un giro, en el lado sureste de la desembocadura, hasta la octava isóbata (Figura 12e). Los menores aportes tanto naturales (Tabla 4) como artificiales (Tabla 3) en ese tiempo parecen ser la causa del giro. Se probó que éste puede ser ajustado por una expresión del tipo  $y = A x^m$ , obteniendo un coeficiente de determinación de 0,987. El corte de las batimétricas  $-3$  m se alejó de la tendencia general, pudiendo ser debido a errores de medida, por lo que fue descartado para el ajuste.

Asimismo, se ha obtenido que el perfil de playa varió su profundidad de cierre entre 2004 y 2008, pasando de 4,5 a 8 m (Tabla 6). Este hecho puede ser debido al despreciable aporte de sedimentos durante ese periodo (Tabla 2), coincidiendo el valor final con la profundidad

a la que la batimetría dejó de girar (Figura 12e) y no variando durante el periodo 2008 – 2014. Por su parte, la profundidad de cierre en los VC parciales 2 y 3 permaneció prácticamente constante durante el periodo de estudio, concordando con la evolución en planta de la batimetría en esas zonas. El cambio de curvatura en los perfiles del VCp2 no es tan marcado como en los VC parciales 1 y 3 (Figura 13). Esto probablemente se deba a que las regeneraciones suelen focalizarse en esa zona de la playa, alterando la forma natural del perfil.

Por último, los ajustes del perfil de equilibrio de Dean (1991) aportaron distintos valores del parámetro de escala y, consecuentemente, del tamaño de grano asociado (Tabla 6), pudiendo ser debido a la heterogeneidad de la distribución de sedimentos en esta playa (Figura 8). Dicha distribución, junto con el carácter direccional del oleaje (Figura 5a), parecen ser la causa de la variación longitudinal de la forma del perfil y del consecuente cambio de las profundidades de cierre.

## 6. Conclusiones

El delta del río Guadalfeo ha sido objeto de varios trabajos durante los últimos años, sin embargo, su carácter específico en algunos casos (Lobo et al., 2006; Fernández-Salas et al., 2007; Duque et al., 2008, 2010) y la escasez de suficientes datos batimétricos en otros (Jabaloy-Sánchez et al., 2014), hace que sea necesario un estudio integral cuenca-costa de la evolución del sistema deltaico. Si bien este Trabajo Fin de Máster presenta numerosas limitaciones, como son la ausencia de muestras de sedimento marítimo en profundidad, la falta de datos de caudal en algunos ríos, la inexistencia de topografías de la parte este de Playa Granada y el carácter parcial de la batimetría de 2014; los datos tratados, los resultados obtenidos y su posterior discusión han permitido extraer las siguientes conclusiones:

1. La dinámica sedimentaria del delta del Guadalfeo está gobernada por los aportes del río durante avenidas (pulsos), ya que éstas rigen el régimen hidrológico de la cuenca.
2. Los oleajes que inciden en el tramo de costa del delta presentan un comportamiento bidireccional: E-SE y SO-O. Los últimos se encuentran generalmente asociados a mayores valores de altura de ola, contribuyendo al transporte longitudinal de los sedimentos aportados por el río.
3. La heterogeneidad de sedimentos presentes en el sistema y la bidireccionalidad del oleaje generan cambios longitudinales tanto en la forma del perfil de playa como en su profundidad de cierre.

4. Las características granulométricas del sedimento que el río transporta por fondo muestran similitud con las del sedimento existente en Playa Granada, reforzando la teoría de que ésta se formó como consecuencia de aportes fluviales y revelando la importancia del transporte por fondo en sistemas cuenca-costa de este tipo.
5. El delta ha sufrido pérdida de sedimentos y retroceso, tanto en planta como del perfil de playa, durante los últimos quince años. Esto ha generado una variación en la profundidad de cierre del perfil y un giro de la morfología sumergida en planta, cuya forma puede ser aproximada mediante una ecuación del tipo  $y = Ax^m$ .
6. La presa de Rules modifica el régimen natural de caudales y supone una barrera que limita el aporte de sedimentos al delta, alterando el comportamiento del sistema aguas abajo de la misma.

## 7. Líneas de investigación futura

Este Trabajo Fin de Máster complementa los estudios llevados a cabo por los Grupos de Dinámica de Flujos Ambientales y de Dinámica Fluvial e Hidrología en la costa y en la cuenca. Se pretende que suponga un punto de partida de un estudio más profundo de la interacción río Guadalfeo - mar Mediterráneo, razón por la cual se proponen las siguientes líneas de investigación futura:

En primer lugar, se sugiere la realización de una batimetría completa que complemente a las tres tratadas en este trabajo y permita obtener resultados concluyentes de la evolución del sistema durante el último sexenio. Se plantea, además, la realización de topografías periódicas en la alineación este de Playa Granada para poder cuantificar el volumen acumulado en esa zona.

Se propone, asimismo, realizar un seguimiento de las aportaciones artificiales de sedimentos mediante batimetrías, topografías y medidas hidrodinámicas, con objeto de determinar con mayor precisión la evolución del sedimento aportado. También estudiar posibles relaciones de los parámetros que ajustan el giro de la morfología submarina con variables fluviales, como el caudal, y/o marítimas, como la dirección de oleaje.

Finalmente, se podría calibrar el modelo *Watershed Integrated Model for Mediterranean Environments* (Polo et al., 2009) en la desembocadura a partir de las medidas presentadas en este trabajo. Esto, junto con la simulación de agentes climáticos (Solari and Losada, 2012a) e hidrológicos (Solari and Losada, 2012b), y la aplicación de un modelo de propagación de oleaje, supondría una herramienta integral de gran utilidad para la gestión del sistema estudiado.

## Apéndice A. Coeficiente de determinación

Considerando que  $h$  y  $\hat{h}$  son los datos medidos y estimados, respectivamente, en  $N$  puntos, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se define a partir de la siguiente expresión:

$$R^2 = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \frac{(h - \bar{h})(\hat{h} - \bar{\hat{h}})}{\sigma_h \sigma_{\hat{h}}} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

donde  $\sigma_h$  y  $\sigma_{\hat{h}}$  son las desviaciones estándar de los datos medidos y estimados, respectivamente, y la barra superior representa el valor medio. Este coeficiente varía entre 0 (correlación nula) y 1 (correlación fuerte). En este trabajo, el coeficiente de determinación se ha usado para evaluar tanto los ajustes del giro de la morfología sumergida en planta como los del perfil de equilibrio de Dean (1991).

## Agradecimientos

Este Trabajo Fin de Máster ha sido financiado por el Proyecto *Morfodinámica de Playas Heterogéneas en el Litoral Andaluz del Mar de Alborán* (CTM2012-32439, Secretaría de Estado de I+D+i), el grupo de investigación Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada (TEP-209, Junta de Andalucía) y una de las ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores 2013 (BES-2013-062617, Ministerio de Economía y Competitividad). Quisiera expresar mi agradecimiento a las Universidades de Granada, Córdoba y Málaga por la organización del Máster Oficial Interuniversitario en Hidráulica Ambiental, en el seno del cual se enmarca este trabajo; así como a todos los órganos que han aportado información relevante para el desarrollo del mismo: Puertos del Estado, Red Hidrosur de las cuencas mediterráneas andaluzas, Servicio Provincial de Costas de Granada, Instituto de Estadística y Cartografía de la Junta de Andalucía y Grupo de Ecología Terrestre de la Universidad de Granada. Asimismo, me gustaría dar las gracias a los Grupos de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada y de Dinámica Fluvial e Hidrología de la Universidad de Córdoba por su colaboración, haciendo mención especial a la Doctora María José Polo Gómez, cotutora del trabajo, y al Doctor Miguel Ortega Sánchez, director de mi tesis doctoral y cotutor del trabajo. Sin su orientación, dedicación y constante apoyo no hubiera sido posible la realización del mismo.

## Referencias

- Anthony, E.J., Marriner, N., Morhange, C., 2014. Human influence and the changing geomorphology of mediterranean deltas and coasts over the last 6000years: From progradation to destruction phase? *Earth-Science Reviews* .
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2014. Foreshore evolution of a mixed sand and gravel beach: The case of playa granada (southern spain), in: *Proceedings of the VIII International Conference on Coastal Sediments (Accepted)*.
- Bramato, S., Ortega-Sánchez, M., Mans, C., Losada, M.A., 2012. Natural recovery of a mixed sand and gravel beach after a sequence of a short duration storm and moderate sea states. *Journal of Coastal Research* 28, 89–101.
- Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. *Beach Erosion Board Corps of Engineers*.
- Coleman, J.M., Wright, L., 1975. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. *Houston Geological Society* .
- D'Agostino, V., Lenzi, M.A., 1999. Bedload transport in the instrumented catchment of the rio cordon: Part ii: Analysis of the bedload rate. *Catena* 36, 191–204.
- Dean, R.G., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research* 7, 53–84.
- Duque, C., Calvache, M.L., Engesgaard, P., 2010. Investigating river-aquifer relations using water temperature in an anthropized environment (motril-salobreña aquifer). *Journal of hydrology* 381, 121–133.
- Duque, C., Calvache, M.L., Pedrera, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., 2008. Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (southern spain). *Journal of Hydrology* 349, 536–547.
- Ericson, J.P., Vörösmarty, C.J., Dingman, S.L., Ward, L.G., Meybeck, M., 2006. Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change* 50, 63–82.
- Félix, A., Baquerizo, A., Santiago, J., Losada, M., 2012. Coastal zone management with stochastic multi-criteria analysis. *Journal of environmental management* 112, 252–266.
- Fernández-Salas, L., Lobo, F., Sanz, J., Díaz-del Río, V., García, M., Moreno, I., 2007. Morphometric analysis and genetic implications of pro-deltaic sea-floor undulations in the northern alboran sea margin, western mediterranean basin. *Marine Geology* 243, 31–56.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
- Herrero, J., Polo, M., Moñino, A., Losada, M., 2009. An energy balance snowmelt model in a mediterranean site. *Journal of hydrology* 371, 98–107.
- Hessel, R., Jetten, V., 2007. Suitability of transport equations in modeling soil erosion for a small loess plateau catchment. *Engineering Geology* 91, 56–71.
- Hood, W.G., 2010. Delta distributary dynamics in the skagit river delta (washington, usa): extending, testing, and applying avulsion theory in a tidal system. *Geomorphology* 123, 154–164.
- IPCC, 2001. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jabaloy-Sánchez, A., Lobo, F.J., Azor, A., Martín-Rosales, W., Pérez-Peña, J.V., Bárcenas, P., Macías, J., Fernández-Salas, L.M., Vázquez-Vilchez, M., 2014. Six thousand years of coastline evolution in the guadalfeo deltaic system (southern iberian peninsula). *Geomorphology* 206, 374–391.
- Jeftic, L., Keckes, S., Pernetta, J., et al., 1996. Climate change and the Mediterranean: environmental and societal impacts of climatic change and sea level rise in the Mediterranean region. Volume 2. Edward Arnold, Hodder Headline, PLC.
- Jiménez-Sánchez, J., Martín-Rosales, W., Fernández-Chacón, F., Rubio-Campos, J., 2008. Variabilidad temporal de las precipitaciones en la cuenca del río guadalfeo (provincia de granada). *Agua y Cultura. Instituto Geológico y Minero de España, Spain* , 159–168.
- Lobo, F., Fernández-Salas, L., Moreno, I., Sanz, J., Maldonado, A., 2006. The sea-floor morphology of a mediterranean shelf fed by small rivers, northern alboran sea margin. *Continental shelf research* 26, 2607–2628.
- Losada, M.A., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Ávila, A., 2011. Coastal evolution, sea level, and assessment of intrinsic uncertainty. *Journal of Coastal Research* , 218–228.
- Mateo, Z.R.P., Siringan, F.P., 2007. Tectonic control of high-frequency holocene delta switching and fluvial migration in linyagan gulf bayhead, northwestern philippines. *Journal of Coastal Research* , 182–194.
- Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948. Formulas for bed-load transport, in: *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, International Association of Hydraulic Research Delft*. pp. 39–64.
- Millares, A., Gulliver, Z., Polo, M., 2012. Scale effects on the estimation of erosion thresholds through a distributed and physically-based hydrological model. *Geomorphology* 153, 115–126.
- Millares, A., Polo, M., Moñino, A., Herrero, J., Losada, M., 2014a. Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. *Geomorphology* 206, 330–342.
- Millares, A., Polo, M., Moñino, A., Herrero, J., Losada, M., 2014b. Reservoir sedimentation and erosion processes in a snow-influenced basin, in southern spain, in: *Reservoir Sedimentation - Special Session on Reservoir Sedimentation of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014*, pp. 91–98.
- Muñoz, A., Ballesteros, M., Montoya, I., Rivera, J., Acosta, J., Uchupi, E., 2008. Alborán basin, southern spain-part i: geomorphology. *Marine and Petroleum Geology* 25, 59–73.
- Nevot Pérez, A., 2004. La presa de rules. *Revista de Obras Publicas* , 131–152.
- Nicholls, R., Hoozemans, F., 1996. The mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management* 31, 105–132.
- Nicholls, R.J., Birkemeier, W.A., Lee, G.h., 1998. Evaluation of depth of closure using data from duck, nc, usa. *Marine Geology* 148, 179–201.
- Ortega-Sánchez, M., Bramato, S., Quevedo, E., Mans, C., Losada, M.A., 2008. Atmospheric-hydrodynamic coupling in the nearshore. *Geophysical Research Letters* 35.
- Orton, G., Reading, H., 1993. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology* 40, 475–512.
- Overeem, I., 2005. Three-dimensional numerical modeling of deltas. *Special Publications of SEPM* .
- Parker, G., 1990. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research* 28, 417–436.
- Polo, M., Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Moñino, A., Nieto, S., Losada, M., 2009. Wimmed, a distributed physically-based watershed model (i): Description and validation. *Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental & Computational Solutions, CRC Press/Balkema* , 225–228.
- Rathburn, S.L., Wohl, E.E., 2001. One-dimensional sediment transport modeling of pool recovery along a mountain channel after a reservoir sediment release. *Regulated Rivers: Research & Management* 17, 251–273.

- Rickenmann, D., 2001. Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water resources research* 37, 3295–3305.
- Sanchez-Arcilla, A., Jimenez, J.A., 1997. Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (i): an approach. *Climatic Change* 35, 71–93.
- Schoklitsch, A., 1962. *Handbuch des wasserbaus*. vienna.
- Solari, S., Losada, M.A., 2012a. Unified distribution models for met-ocean variables: Application to series of significant wave height. *Coastal Engineering* 68, 67–77.
- Solari, S., Losada, M.A., 2012b. A unified statistical model for hydrological variables including the selection of threshold for the peak over threshold method. *Water Resources Research* 48.
- Stanley, D.J., Warne, A.G., 1993. Nile delta: recent geological evolution and human impact. *Science* 260, 628–634.
- Syvitski, J.P., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., et al., 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience* 2, 681–686.
- Syvitski, J.P., Saito, Y., 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change* 57, 261–282.
- Trincardi, F., Cattaneo, A., Correggiari, A., 2004. Mediterranean pro-delta systems. *Oceanography* 17, 34.
- Vella, C., Fleury, T.J., Raccasi, G., Provansal, M., Sabatier, F., Bourcier, M., 2005. Evolution of the rhône delta plain in the holocene. *Marine Geology* 222, 235–265.
- Vellinga, P., 1984. A tentative description of a universal erosion profile for sandy beaches and rock beaches. *Coastal engineering* 8, 177–188.
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology* , 377–392.
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C., 2003. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* 129, 120–128.