

Diseño de regeneraciones costeras mediante técnicas de simulación de variables climáticas. Aplicación al delta del Guadalfeo.

Daniel Principal Gómez*

Tutores: Dr. Miguel Ortega Sánchez y Rafael J. Bergillos Meca**

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.

Máster Oficial Interuniversitario en Hidráulica Ambiental. Especialidad: Gestión Integral de Puertos y Costas. Curso: 2016-2017.

Resumen

Numerosos sistemas deltaicos presentan retroceso de la línea de costa parcialmente debidos a la regulación del caudal en sus cuencas, es decir, parcialmente inducidos por el hombre. Las regeneraciones artificiales de sedimentos son una de las estrategias de gestión más empleadas para mitigar estos problemas de erosión en la costa. Este Trabajo Fin de Máster (TFM) aborda la simulación y el análisis de la respuesta de una serie de alternativas de regeneración costera en una playa deltaica (delta del Guadalfeo, Granada) durante un periodo de dos años. Para ello, se definieron cinco escenarios con volumen constante pero distinta configuración geométrica y localización a lo largo de la línea costa. Se cuantificó la respuesta de la línea de costa en función de la morfología en planta de la regeneración, el volumen de sedimento aportado y el tamaño de grano, comparándolas con la situación actual (escenario 0). Para ello, se aplicaron conjuntamente una metodología de simulaciones de variables climáticas, técnicas de Montecarlo, un método estadístico de downscaling híbrido, un modelo de propagación del oleaje, una formulación para estimar tasas de transporte longitudinal y el modelo de una línea. Los resultados muestran que el escenario que, al final del periodo de estudio, alberga más sedimento en el tramo más afectado por la erosión (playa Granada) con respecto a la situación actual es aquél en el que el aporte artificial del sedimento se realiza junto a la desembocadura del río Guadalfeo en su parte Este. Para dicha alternativa, se simularon ocho nuevos escenarios variando el volumen de aportación y la mayor sedimentación en playa Granada se obtuvo para un volumen de sedimento en torno a los 460.000 m³. Por último, se modelaron diez nuevos escenarios con distintos tamaños del sedimento aportado, obteniéndose las mejores respuestas para tamaños de grano mayor o igual a 0.01 m. La metodología seguida en este TFM y los resultados derivados de su aplicación a un total de 24 escenarios, permitieron proponer la alternativa de regeneración más recomendable en términos de morfología de la línea de costa, volumen de sedimento aportado y tamaño de grano.

Palabras clave: Delta, regeneración, simulación de variables climáticas, downscaling, modelo propagación de oleaje, transporte longitudinal de sedimentos

1. Introducción

Los sistemas deltaicos se encuentran situados en la transición entre entornos fluviales y marítimos, por lo que los procesos climáticos, sedimentarios y tectónicos interactúan entre sí de un modo complejo en ellos (Coleman and Wright, 1975; Orton and Reading, 1993; Overeem, 2005). Los deltas suelen responder de manera

comparativamente rápida tanto a cambios naturales como a aquéllos inducidos por el hombre. Dicha respuesta está frecuentemente controlada por las variaciones en el suministro de sedimento que llega al dominio costero debido a la regulación fluvial (Syvitski et al., 2005; Mateo and Siringan, 2007). Por ello, costas situadas en sistemas deltaicos de ríos regulados, con frecuencia, sufren problemas de erosión y retroceso de la línea de costa. (Syvitski et al., 2009). Por tanto, es esencial investigar estrategias para disminuir dichos problemas de erosión (Syvitski and Saito, 2007; Anthony, 2015) y los efectos de la subida del nivel del mar (Payo et al., 2016; Spencer

*daniprin@hotmail.com

**miguelos@ugr.es
rbergillos@ugr.es

et al., 2016).

Las aportaciones de sedimento de forma artificial en zonas costeras son, probablemente, las prácticas más frecuentemente utilizadas para reducir los problemas de erosión. La necesidad de regenerar viene dada, a parte del interés de las distintas Administraciones por atraer a los turistas, por la inestabilidad que presentan algunas playas a consecuencia de obras o acciones humanas que no permiten que la playa se establezca de forma natural. Para modelar la evolución de una regeneración, es recomendable la propagación del oleaje hasta condiciones de rotura, la estimación de las tasas de transporte longitudinal de sedimento (Ashton and Brad Murray, 2006; López-Ruiz et al., 2014) y el uso del modelo de una línea para reproducir la respuesta de la línea de costa (Payo et al., 2002; Antolínez et al., 2015). Bergillos et al. (2017) demostraron que la combinación de un modelo de propagación de oleaje debidamente calibrado, la ecuación de transporte longitudinal de sedimento propuesta por Van Rijn (2014) y el modelo de una línea representa una herramienta para reproducir la respuesta morfodinámica de zonas deltaicas con gravas tras aportes artificiales de sedimento.

Para pronosticar la evolución de la línea de costa en el tiempo y evaluar la incertidumbre asociada deben ser aplicados métodos de simulación de variables climáticas (Solari and van Gelder, 2011), técnicas de downscaling estadístico y simulaciones de Montecarlo (Baquerizo and Losada, 2008; López-Ruiz et al., 2016). Solari and Losada (2012) propusieron una metodología para simular series temporales de variables climáticas. Combinando un modelo numérico de oleaje con herramientas estadísticas, Camus et al. (2011) y Camus et al. (2014) desarrollaron una metodología de downscaling híbrido para propagar las variables climáticas en aguas profundas hacia áreas costeras, reduciendo el coste computacional. Este proceso de downscaling ha sido aplicado para estimar las tasas de transporte longitudinal en escala plurianual (Bergillos et al., 2016a).

Sin embargo, hasta donde nuestro conocimiento alcanza, no han sido aplicadas conjuntamente: (1) simulaciones de variables climáticas, (2) técnicas de Montecarlo, (3) métodos estadísticos de downscaling híbrido, (4) modelos de propagación del oleaje, (5) formulaciones para estimar tasas de transporte longitudinal y (6) el modelo de una línea nunca para pronosticar y estudiar la efectividad de diferentes alternativas de regeneración costera en zonas deltaicas.

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene el objetivo de pronosticar y analizar la respuesta de una costa deltaica (Guadalfeo, Granada) tras regeneraciones artificiales de sedimento. Para ello, se efectuó un análisis en fun-

ción de la morfología de la línea de costa regenerada en planta, el volumen de sedimento aportado y el tamaño de grano. El trabajo está estructurado de la siguiente manera. Las secciones 2 y 3 describen la zona de estudio y la metodología seguida para la realización del trabajo. La sección 4 muestra los resultados, es decir, predicción de la evolución de la línea de costa para los diferentes escenarios de regeneración, incertidumbre asociada a dichas predicciones, y respuesta de la línea de costa en función del volumen aportado de sedimento y del tamaño de grano. Finalmente, en la sección 5 del trabajo se muestran las conclusiones obtenidas tras la realización del presente TFM.

2. Zona de estudio

La zona objeto de estudio se encuentra al Sureste de la Península Ibérica, en la costa del Mar de Alborán y abarca la costa comprendida entre el peñón de Salobreña (Oeste) y el dique de abrigo del puerto de Motril (Este), constituyendo este último una barrera artificial que impide el transporte longitudinal de sedimentos en la dirección Este (Félix et al., 2012). La longitud de costa es de 6.8 km. En esta zona se distinguen tres playas distintas, de Oeste a Este: playa de Salobreña, playa Granada y playa de Poniente (Figura 1).

El tramo de costa forma parte del delta del Guadalfeo, río que aporta la mayor parte del sedimento a la playa (Polo et al., 2013). La cuenca del río Guadalfeo tiene un área de 1252 km², incluyendo el pico más alto de la Península Ibérica (Herrero et al., 2009): el Mulhacén (~3400 m). Los altos gradientes topográficos hacen que el Guadalfeo sea uno de los sistemas más energéticos, desde un punto de vista hidrológico, de la costa Mediterránea española y que los sedimentos transportados comprendan un amplio rango de tamaños (Millares et al., 2014a). Las precipitaciones presentan una distribución irregular espacialmente a lo largo de la cuenca (Moreno Aranda et al., 2010).

En el año 2004 se construyó la presa de Rules sobre el río Guadalfeo 19 km aguas arriba desde la desembocadura, regulando el 85 % de la escorrentía de la cuenca (Losada et al., 2011). Debido a esta situación, la zona de estudio, en particular playa Granada, sufre graves problemas de erosión (Bergillos et al., 2016d). Además, dicho tramo de costa tiene un uso principalmente turístico, incluyendo un hotel, un campo de golf, restaurantes y apartamentos vacacionales (Félix et al., 2012), que han sido afectados por el fuerte retroceso de la línea de costa en los últimos años (Bergillos et al., 2015b). Por ello, se han llevado a cabo hasta ahora diversas regeneraciones que no han resultado muy exitosas debido al aporte

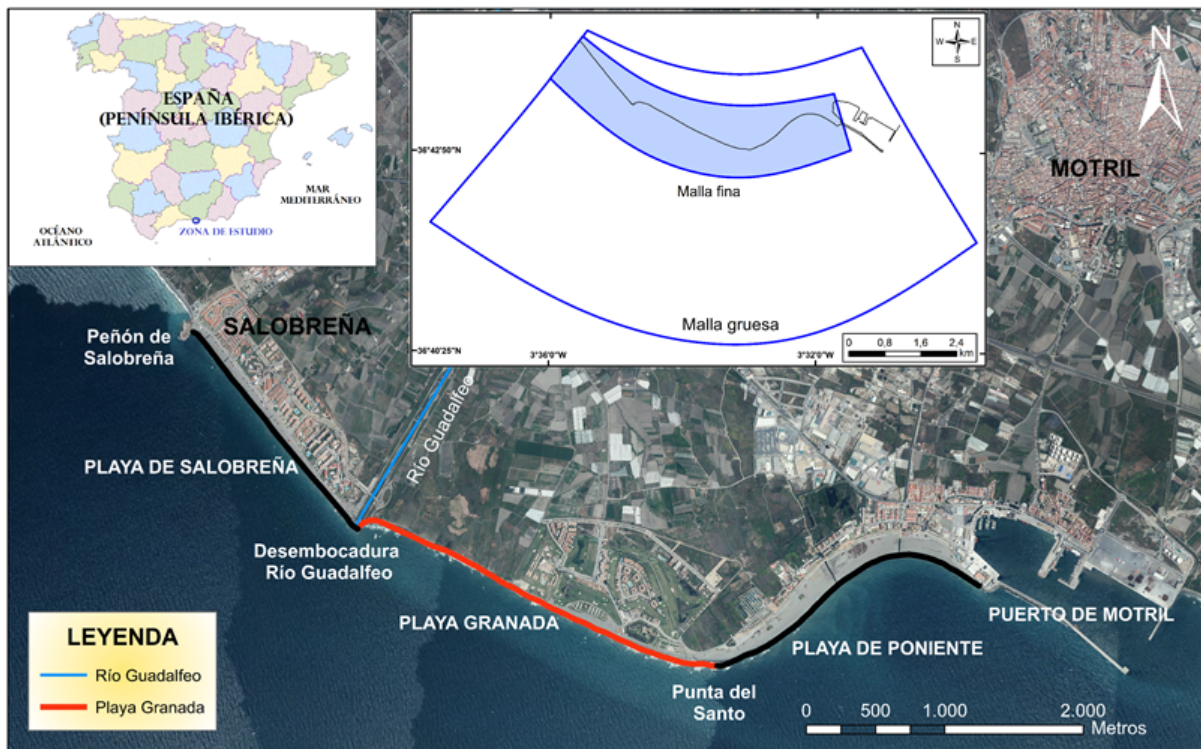


Figura 1: Panel superior izquierdo: Península Ibérica y situación de la zona de estudio. Panel superior central: mallas utilizadas en el modelo de propagación de oleaje. Panel principal: localización de playa de Salobreña, desembocadura del río Guadalfeo, playa Granada, Punta del Santo, playa de Poniente y puerto de Motril.

de un tamaño de sedimento demasiado fino (Bergillos et al., 2016a) y a la morfología en planta de dichas regeneraciones (Bergillos et al., 2017).

Las playas situadas en el delta del Guadalfeo son playas heterogéneas con tamaños de grano que varían entre arenas y gravas. De acuerdo con Bergillos et al. (2015a), en playa Granada se identifican tres fracciones predominantes en cuanto al tamaño de sedimento: una de arena (~ 0,35 mm), y dos de grava (~ 5 mm y ~ 20 mm). Sin embargo, la respuesta morfodinámica de la playa está dominada por la fracción gruesa debido a la erosión y posterior recuperación del material más fino (Bergillos et al., 2016c). Estudios numéricos anteriores también demuestran que los mejores ajustes a los perfiles medidos (Bergillos et al., 2016b) y líneas de costa (Bergillos et al., 2017) se obtienen asumiendo que la playa se compone de grava.

El clima en la zona de estudio sufre un gran contraste entre verano e invierno. Durante el invierno, esta región sufre temporales con vientos de 18 y 22 m/s, con un fetch de unos 300 km (Ortega-Sánchez et al., 2017). El oleaje es bidireccional dominando las direcciones Oeste-Suroeste y Este-Sureste. Durante los eventos de

tormenta, la altura de ola en profundidades indefinidas supera con frecuencia los 3 m, pudiendo alcanzar picos de hasta 5 m. El rango de la marea astronómica se sitúa entorno a los 0.6 m, siendo por tanto una zona micro-mareal (Bergillos et al., 2016a).

3. Metodología

La metodología seguida en este TFM se basa principalmente en: (1) simulación de series temporales de variables climáticas en profundidades indefinidas, (2) propagación hacia la costa usando técnicas de downscaling estadístico, (3) estimación de tasas de transporte longitudinal de sedimentos, y (4) aplicación del modelo de una línea (Figura 2). Dicha metodología ha sido utilizada para predecir la evolución de cinco escenarios de regeneración diferentes, diseñados con el mismo volumen de sedimento y tamaño de grano, en un periodo de dos años (vida útil típica de los proyectos de regeneración en la zona de estudio).

Para el escenario más eficiente, definido como aquel con mayor área de playa seca al final de los dos años

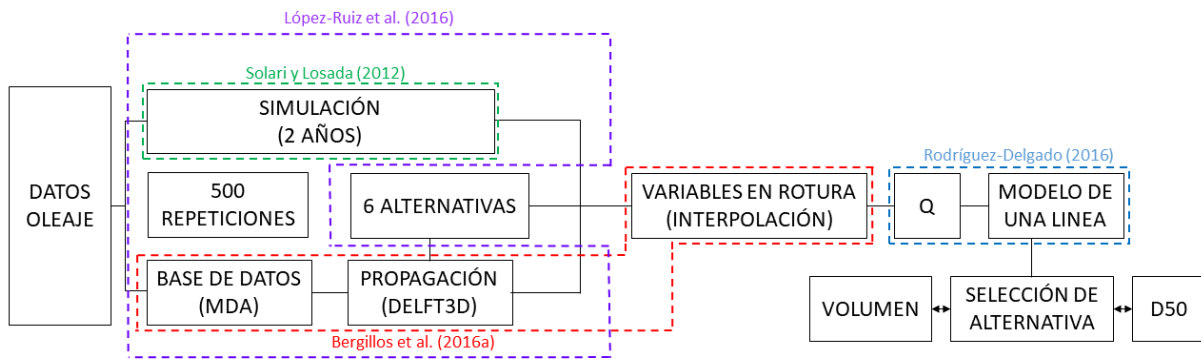


Figura 2: Esquema representativo de la metodología seguida para la realización del presente TFM.

en el tramo de playa Granada, se varió el volumen aportado y el tamaño de grano para terminar adoptando la forma, volumen y tamaño de sedimento más apropiados para el diseño de regeneraciones. Se asume la hipótesis de despreciar los cambios en la línea de costa inducidos por el transporte transversal con base en trabajos previos que han probado que los cambios morfológicos de la zona de estudio a escala plurianual están dominados por el transporte longitudinal (Bergillos et al., 2016a) y que la recuperación de la parte emergida tras eventos de tormenta en playas heterogéneas se produce en una escala temporal considerablemente menor a la de playas de arena (Bergillos et al., 2016c).

3.1. Definición de los escenarios

Se definieron cinco escenarios con diferentes formas y situación a lo largo de la costa en la zona de estudio. El criterio para su diseño ha sido el de mantener el mismo volumen aportado en todos los escenarios (aproximadamente $570,000 \text{ m}^3$). Los distintos escenarios, cuyo diseño se realizó mediante el software *ArcGis*, se muestran en la figura 3. El escenario 1 se diseñó reproduciendo la forma que presentaba la desembocadura del río Guadalfeo antes de la construcción de la presa de Rules, por lo que se podría decir que se trata de la forma más natural de aporte de sedimento a playa Granada. Los escenarios 2, 3 y 4 presentan una forma similar al escenario 1 pero están situados en diferentes posiciones a lo largo de la línea de costa: el escenario 2 sitúa el aporte de sedimento en la parte central de playa Granada, el 3 lo sitúa en la playa de Salobreña y el 4 en la parte Oeste de playa Granada, concretamente en la zona inmediatamente al Este de la desembocadura del río Guadalfeo. El último escenario (escenario 5) se corresponde con la forma en planta que se ha llevado a cabo hasta ahora en

proyectos de regeneración en playa Granada (Bergillos et al., 2017; Bergillos and Ortega-Sánchez, 2017). También se estudió el escenario 0, que representa a la línea de costa sin regenerar (situación actual).

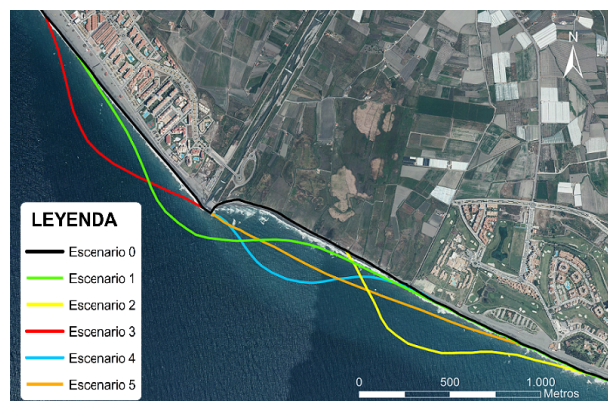


Figura 3: Representación de los distintos escenarios de regeneración diseñados en la zona de estudio, incluyendo la situación actual (escenario 0).

3.2. Simulaciones de variables climáticas

Las series temporales de variables de oleaje fueron simuladas siguiendo la metodología propuesta por Solari and Losada (2012) durante un periodo de dos años. Se usó una distribución mixta (función de distribución log-normal para la parte central y Generalizada de Pareto para las colas de la distribución) no estacionaria para describir la altura de ola significativa (H_s). Las series temporales simuladas tienen la misma distribución de probabilidad marginal que las series originales teniendo en cuenta también las variaciones estacionales y anuales de los descriptores estadísticos. Además, mantiene las autocorrelaciones, la persistencia, las tormentas, los

picos sobre umbral y la tasa de máximos anuales. Dos distribuciones log-normales y cuatro distribuciones normales truncadas se usaron para ajustar el periodo pico espectral (T_p) y la dirección de procedencia del oleaje (θ), respectivamente (López-Ruiz et al., 2017a).

Para analizar la dependencia temporal de una variable consigo misma y las demás se usó un modelo vectorial autorregresivo (VAR). Por medio de este método, se registra la dependencia temporal entre valores consecutivos, y las series finales presentan mejores parámetros estadísticos que los obtenidos con métodos de simulación tradicionales (Joe, 1997; Lütkepohl, 2005). El orden de este modelo se determina por el número de estados previos que afectan a cada uno de los nuevos. El modelo VAR asume una relación lineal entre las variables necesarias para calcular T_p y θ en un tiempo dado. Dichas simulaciones nos proporcionan una apropiada representación de los regímenes medio y extremal junto con las dependencias temporales entre variables (López-Ruiz et al., 2016).

3.3. Reducción de escala de variables climáticas

La técnica de downscaling usada en este TFM está basada en la propuesta por Camus et al. (2011) y Camus et al. (2014), sintetizando las series de clima marítimo en un grupo de menos de 280 estados de mar que representan las condiciones del oleaje de contenido energético bajo, medio y extremo (López-Ruiz et al., 2016). Dichos estados de mar se propagaron usando el modelo de propagación del oleaje que se detalla en la sección 3.4 para obtener las condiciones en rotura. Finalmente, estos resultados se usaron para reconstruir las variables en rotura del oleaje durante el periodo simulado. Esta técnica, previamente aplicada en la zona de estudio por Bergillos et al. (2016a), reduce el coste computacional ya que se pueden obtener nuevas series de variables en rotura sin realizar nuevas propagaciones del oleaje. Este proceso fue repetido para cada escenario debido a sus diferencias morfológicas y los consecuentes distintos patrones de propagación del oleaje.

3.4. Modelo de propagación del oleaje: Delft3D-Wave

Los estados de mar para cada escenario se propagaron desde profundidades indefinidas a la costa usando el módulo WAVE del modelo Delft3D (Lesser et al., 2004; Lesser, 2009), el cual está basado en el modelo SWAN (Holthuijsen et al., 1993). Este modelo reproduce con precisión los principales procesos de propagación de oleaje en áreas costeras (López-Ruiz et al., 2017b).

Se definieron dos mallas diferentes, mostradas en la figura 1. La primera es una malla curvilínea y de menor

resolución, con una distribución de 82x82 celdas que cubre toda la zona deltaica con un tamaño de celda que decrece con la profundidad desde 170x65 a 80x80 m. La segunda es una malla anidada que cubre el área de la playa con 244 celdas en dirección longitudinal y 82 celdas en dirección transversal a la línea de costa, con un tamaño de celdas de aproximadamente 20x15 m, es decir, con mayor resolución. Este modelo fue calibrado para estas mallas en particular por Bergillos et al. (2017) comparando con datos de campo y obteniendo coeficientes de determinación mayores a 0.86. El modelo se empleó para obtener las condiciones en rotura en 341 perfiles de playa (perpendiculares a la línea de costa) igualmente espaciados (1 cada 20 m) desde el peñol de Salobreña hasta el dique de abrigo del puerto de Motril. Estas variables en rotura se emplearon para calcular las tasas de transporte longitudinal de sedimento.

3.5. Formulación LST y modelo de una línea

Para calcular las tasas de transporte longitudinal se empleó la formulación de Van Rijn (2014), deducida para playas de arena y grava:

$$Q_m = 0,00018K_{vr}\rho_s g^{0,5}(\tan\beta)^{0,4}D_{50}^{-0,6}H_b^{3,1}\sin 2\theta_b$$

donde Q_m es la tasa de transporte longitudinal de sedimento (kg/s), K_{vr} es un factor que depende del tipo de oleaje y varía entre 1 y 1.5, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del sedimento, $\tan\beta$ es la pendiente en la zona de rompientes, D_{50} es el tamaño del sedimento, H_b es la altura de ola significativa en rotura y σ_b es el ángulo en rotura con respecto a la perpendicular a la línea de costa.

Por último, se aplicó el modelo de una línea durante el periodo simulado para cada escenario (Figura 2). Este modelo está basado en la siguiente ecuación (Pelnard-Considère, 1956):

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} = \frac{1}{D} \left(-\frac{\partial Q}{\partial x} \right)$$

donde y_s es la posición en la línea de costa y D es la suma de la profundidad de cierre y la altura de la berma. De acuerdo a los resultados obtenidos por Rodríguez Delgado (2016), la aplicación conjunta de la formulación de Van Rijn (1993) y el modelo de una línea proporcionó el mejor ajuste a las medidas de los cambios morfológicos de la línea de costa tras una aportación artificial de sedimentos en la zona de estudio.

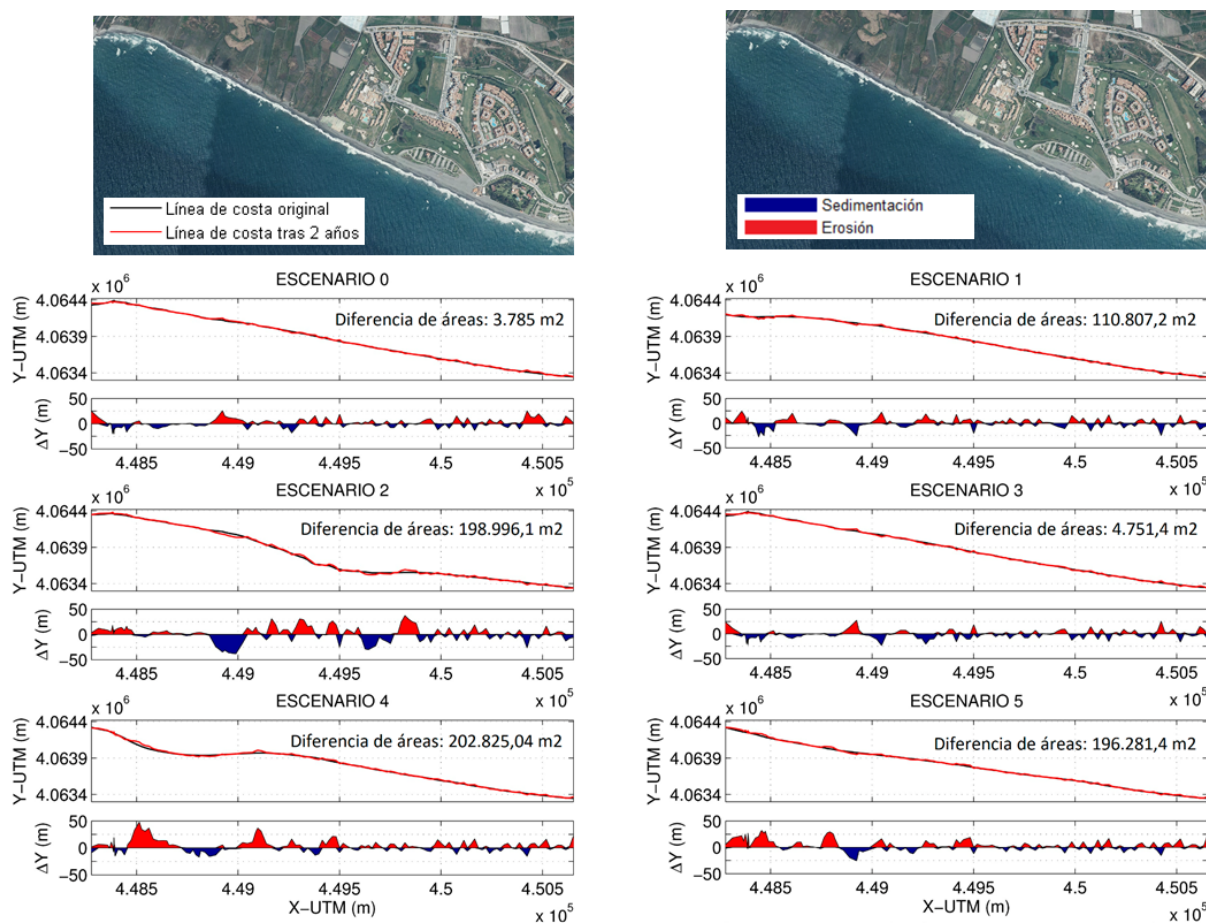


Figura 4: Línea de costa inicial y media de las líneas de costa finales en playa Granada para los 6 escenarios estudiados, señalando la variación longitudinal de la erosión/sedimentación que se produce a lo largo de ella. Se muestra el área de cada escenario, al final de los dos años de estudio, con respecto a la línea de costa original.

3.6. Evaluación de la incertidumbre: simulaciones de Montecarlo

Las técnicas de Montecarlo se emplearon para evaluar la incertidumbre de las predicciones de la morfología de la línea de costa para cada escenario, generándose 500 series de datos de clima marítimo de dos años cada una (Figura 2). La validez de esta metodología y la representatividad de esta cantidad de experimentos han sido ampliamente probadas en trabajos previos (Baquerizo and Losada (2008) o López-Ruiz et al. (2012), entre otros). Esta muestra de 500 elementos de dos años de series de oleaje que resulta de las simulaciones de Montecarlo se usaron para calcular las variables en rotura y las tasas de transporte longitudinal de sedimento. De este último cálculo, por tanto, se obtuvieron 500 series de 2 años de tasas de transporte longitudinal de sedimentos en 341 perfiles, las cuales se emplearon para aplicar el modelo de una línea (Figura 2).

Los resultados finales de esta metodología son 500 series de evolución de línea de costa durante el periodo estudiado (2 años). Por tanto, se pueden obtener parámetros estadísticos de la respuesta de la línea de costa durante la vida útil de la regeneración (por ejemplo, la media o la desviación típica). Para la elección del escenario más eficiente, se calculó la media aritmética de la respuesta de la línea de costa para cada escenario, evaluando la diferencia de área en planta con respecto a la línea de costa inicial en playa Granada (zona más afectada por los problemas de erosión). También se determinó la desviación típica de la respuesta de la línea de costa en los 500 experimentos para evaluar la incertidumbre de las predicciones.

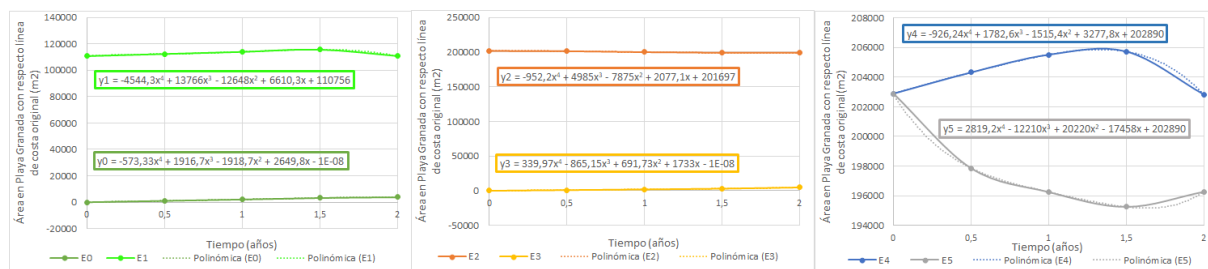


Figura 5: Variación temporal del área de sedimento en planta en playa Granada con respecto a la línea de costa original.

4. Resultados

4.1. Evolución de la línea de costa

Tras aplicar la metodología anterior a los seis escenarios definidos, se obtuvo la evolución temporal de la línea de costa en cada uno de ellos. La figura 4 muestra, en el tramo de playa Granada, la media de las 500 líneas de costa tras dos años que resultan tras aplicar dicha metodología en cada alternativa, incluyendo la situación actual (escenario 0). También se muestra la erosión/sedimentación de cada escenario a lo largo de la línea de costa y la diferencia de área al final de los dos años con respecto a la línea de costa original (criterio que se ha seguido para elegir la mejor alternativa).

El escenario 0 no presenta una variación temporal relevante dado que es el escenario con menor disponibilidad de sedimento (el más erosionado) y la línea de costa presenta una morfología más en equilibrio (Bergillos et al., 2016a).

No ocurre lo mismo con el escenario 1, en el que se observa erosión en la zona regenerada (desembocadura del río Guadalfeo); este sedimento se desplaza hacia el Este donde se encuentran puntos en los que se origina sedimentación al comparar la línea de costa original de dicha alternativa. Esto confirma que el río, antes de la construcción de la presa de Rules, era el que, de forma natural, distribuía el sedimento hacia playa Granada, reduciendo los problemas de erosión en ese tramo.

En cuanto al escenario 2, nuevamente se observa que se produce erosión en la zona regenerada (tramo central de playa Granada). Este escenario presenta una línea de costa mucho más irregular al final de los dos años dado que el aporte de sedimento se produce en una zona que se encuentra más expuesta a ambos oleajes predominantes (Este-Sureste y Oeste-Suroeste). Observando la figura que nos muestra la erosión/sedimentación neta en playa Granada, y comparando con las demás alternativas, vemos que este escenario es el que más transporte de sedimento experimenta a lo largo de la línea de costa y, por tanto, el menos estable.

El escenario 3 no presenta cambios considerables tras los dos años. Al producirse el aporte de sedimento en el tramo de Salobreña (figura 3), playa Granada no presenta variabilidad en su línea de costa tras el periodo estudiado, lo que significa que la situación donde se ha diseñado la regeneración no cumple con el objetivo de producir sedimentación o disminuir la erosión en playa Granada en los dos años simulados.

El escenario 4 sitúa el aporte artificial de sedimento en la zona más castigada por la erosión (playa junto a la desembocadura del río Guadalfeo). Se puede apreciar que, tras los dos años estudiados, la morfología de la regeneración se va deformando y desplazando hacia el Este debido al transporte longitudinal neto en esa dirección inducido por oleajes de procedencia Oeste, que son los más energéticos. Aunque se observa erosión en la zona regenerada, es la alternativa que, al final de los dos años de pronóstico, presenta más área de playa seca en playa Granada con respecto a la situación actual, siendo la mejor de ellas según el criterio adoptado.

Por último, el escenario 5 (morfología empleada en las regeneraciones hasta el momento) presenta alto nivel de erosión en la zona próxima a la desembocadura del río Guadalfeo, que es consistente con medidas realizadas tras aportes artificiales de sedimento en esa zona (Rodríguez Delgado, 2016). También se observa alta variabilidad temporal de la línea de costa en la zona central de playa Granada, donde podemos encontrar tanto zonas erosionadas como zonas donde se produce sedimentación.

El criterio seguido para elegir la mejor alternativa ha sido el de mayor área en planta en playa Granada al final de los 2 años de estudio simulados. Para ello, se ha representado en la figura 5 la evolución temporal del área de playa seca, considerando que el escenario 0 parte de un área nula y que el área inicial de cada escenario es la que se encuentra en playa Granada (desde la desembocadura del río Guadalfeo hasta la Punta del Santo). Los datos numéricos de dicha diferencia de área con el escenario 0 se muestran en la figura 4.

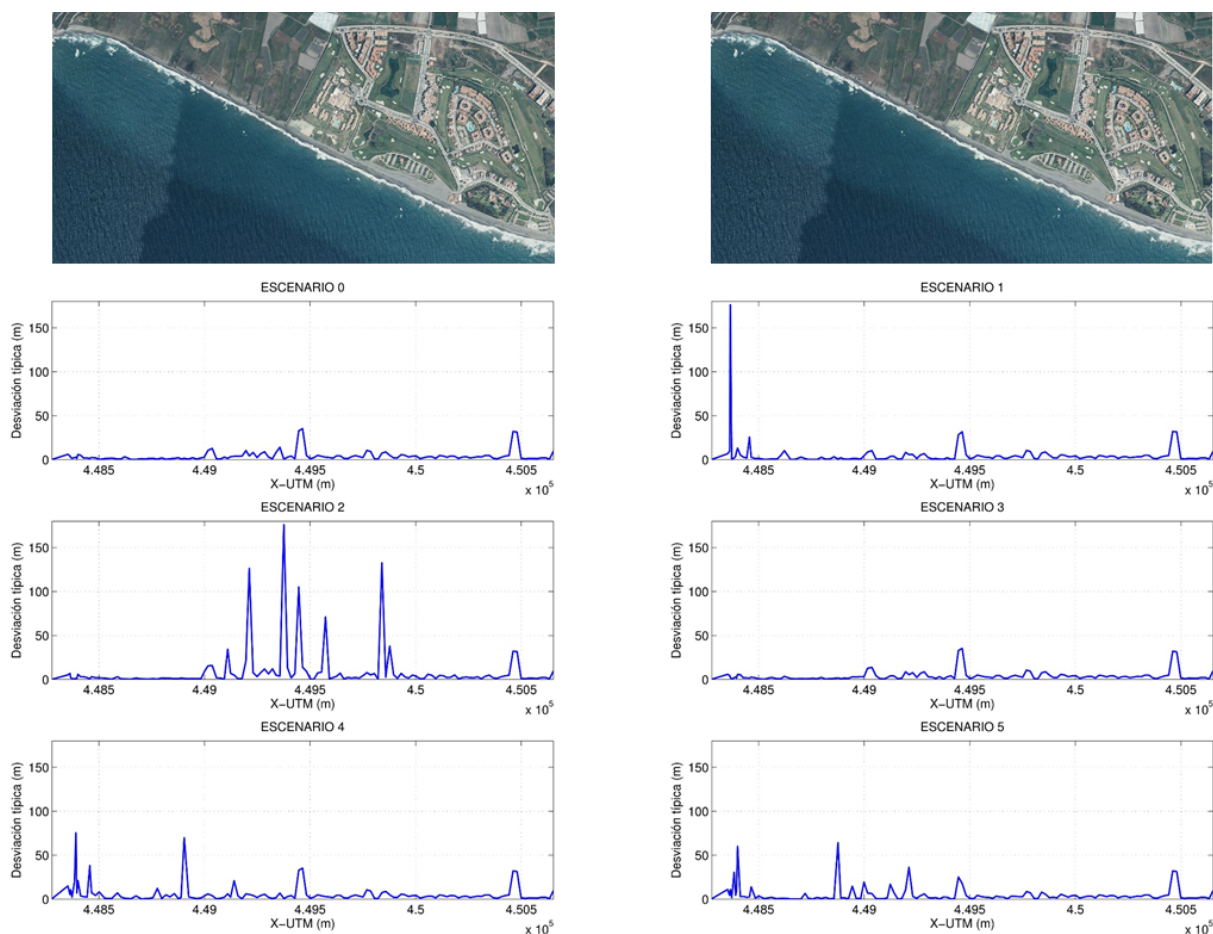


Figura 6: Desviación típica de las 500 simulaciones de línea de costa en playa Granada para los 6 escenarios estudiados.

Además, se han ajustado funciones polinómicas a la evolución temporal de área en cada alternativa de modo que, matemáticamente, se pueda pronosticar la evolución de cada una de las morfologías diseñadas dentro de los dos años de estudio, sirviendo por tanto, como herramienta para los gestores a la hora de realizar tanteos previos en el diseño de regeneraciones. Como se observa en la figura 5, la alternativa que resulta con más área en planta en playa Granada tras dos años es el escenario 4 (azul), con un total de 202.825,04 m². Como se ha comentado anteriormente, aunque dicho escenario experimenta erosión en los últimos 6 meses, es el de mayor área de playa seca al final del periodo de estudio, considerándose la mejor alternativa teniendo en cuenta el criterio establecido.

4.2. Incertidumbre de los pronósticos

Como se indicaba anteriormente, el resultado de la metodología aplicada es el promedio de 500 simulacio-

nes de la evolución de la línea de costa para cada escenario. Para estimar la variabilidad entre simulaciones y acotar la incertidumbre de las mismas, se calculó la desviación típica con respecto a la línea de costa media en cada uno de los 341 perfiles. En la figura 6 se muestra la variabilidad longitudinal de la desviación típica para cada uno de los escenarios en el tramo de playa Granada. Se observa que los escenarios que presentan menos variabilidad son los escenarios 0 y 3, con tendencias muy similares en ambos casos. En el escenario 0, estos resultados confirman la mayor estabilidad desde el punto de vista del transporte longitudinal, de la línea de costa inicial debido a que se encuentra más erosionada; mientras que en el escenario 3, esta menor variabilidad puede ser debida a que el aporte se realiza en la zona de Salobreña, no llegando a producir cambios significativos en el tramo de estudio (figuras 4 y 5). Sin embargo, los dos picos de ambas gráficas (con valores en torno a 40 m), indican que en el peor de los casos la línea de costa

podría retroceder esa magnitud, afectando directamente a los complejos turísticos situados en la parte Este de playa Granada.

Por tanto, con los escenarios 0 y 3 algunas instalaciones turísticas importantes en playa Granada podrían verse afectadas debido a la erosión de la playa y al consecuente retroceso de la línea de costa. Los escenarios 1, 4 y 5 presentan una variabilidad longitudinal considerable en las zonas cercanas a la desembocadura del Guadalfeo, es decir, la zona en la que se realiza el aporte total o parcial de sedimentos; manteniendo también los picos de los escenarios 0 y 3. Por otro lado, el escenario 2 presenta una desviación típica bastante elevada en la zona regenerada confirmando lo comentado sobre esta alternativa en el apartado anterior. Estos resultados muestran la importancia de realizar diseños probabilistas (en lugar de deterministas) y ponen en evidencia el riesgo al que está expuesto el tramo turístico de playa Granada, confirmado por los daños materiales producidos en la zona de mayor variabilidad (picos de desviación típica) durante los últimos años.

4.3. Evolución de la línea de costa en función del volumen aportado

Según lo analizado en los apartados anteriores, la mejor configuración geométrica para el diseño de regeneraciones se corresponde con el escenario 4. Fijando esa morfología, se estudió la respuesta de la línea de costa en función del volumen de sedimento aportado. Para ello se consideraron nueve escenarios con la misma morfología pero con diferente volumen aportado y área en planta (figura 7), incluyendo el escenario de partida (denotado como E4.7). Tras aplicar la metodología propuesta a los 8 nuevos escenarios, se calculó tanto la sedimentación/erosión sobre el área aportada en tanto por ciento (figura 8a) como la sedimentación/erosión neta en el tramo de playa Granada en función del volumen de sedimento aportado (figura 8b) al final del periodo simulado (2 años).

Se observa que la subalternativa que mayor sedimentación genera en playa Granada tras dos años es la E4.5. Para mayores aportes de sedimento, la efectividad disminuye dado que aumentan las tasas de transporte longitudinal de sedimento así como la divergencia de las mismas. Este aumento se debe a que la configuración de los escenarios de mayor área están más expuestos a las direcciones predominantes de procedencia del oleaje, mientras que para los que tienen menos área, están menos afectados por el oleaje procedente de poniente (O-SO), es decir, sufre menos erosión. En la figura 8 se representan los ajustes polinómicos a ambas tendencias, pudiendo también servir de ayuda a los gestores

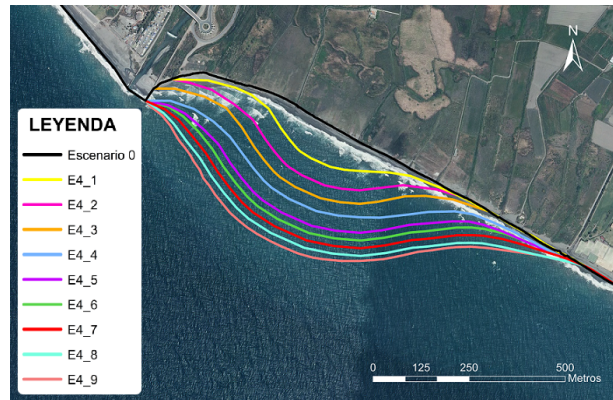


Figura 7: Representación de los 9 subescenarios diseñados, a partir del escenario 4, variando el volumen aportado y el área en planta.

a la hora de predecir la respuesta de esta geometría de regeneración en función del volumen aportado.

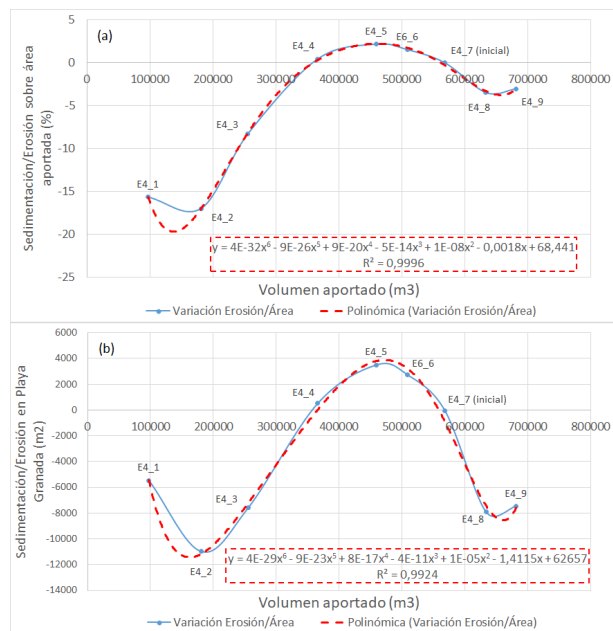


Figura 8: (a) Erosión sobre área aportada en playa Granada para cada subescenario. (b) Erosión/Sedimentación neta en playa Granada para cada subescenario en función del volumen aportado.

4.4. Evolución de la línea de costa en función del tamaño de grano

Una vez seleccionados tanto la geometría como el volumen de sedimento a aportar, se estudió la respuesta de la línea de costa en función del tamaño de grano (D_{50}). Para ello, se aplicó la metodología propuesta a 10 tamaños distintos, incluyendo el considerado inicialmente

te ($D_{50} = 0,02$ m). En la figura 9 se representa el área de playa seca erosionada/sedimentada en planta para los distintos tamaños de sedimento. Se aprecia que para un tamaño de sedimento igual o mayor a 0.01 m, la gráfica se estabiliza generando sedimentación en la zona de playa Granada. Para un tamaño menor, la eficacia de la regeneración disminuye considerablemente. Este comportamiento es consistente con la poca efectividad de las regeneraciones llevadas a cabo en la zona hasta la fecha, aportando tamaños de sedimento con D_{50} en torno a 2 mm (Bergillos et al., 2016c, 2017).

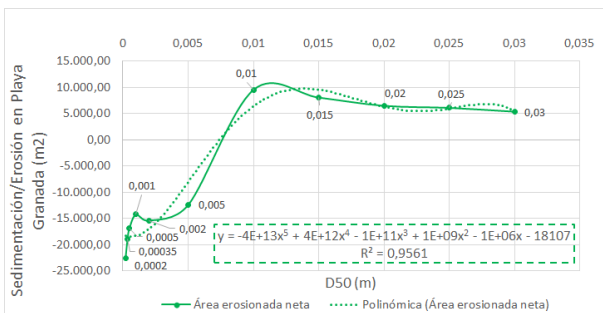


Figura 9: Área erosionada neta en playa Granada en función del tamaño de grano (D_{50})

En la figura 9 también se muestra el ajuste polinómico de la gráfica de la variación de área en función del tamaño de sedimento D_{50} , incluyendo su expresión matemática. Nuevamente, esta ecuación sencilla puede servir de ayuda a los gestores para tantear el comportamiento de playa Granada en función del tamaño de grano que se utilice en una regeneración con la geometría y volumen previamente establecidos. No obstante, para la elección de la mejor alternativa en cuanto al tamaño de sedimento es preciso comentar que, teniendo en cuenta que a partir de 0.01 m la eficiencia de la regeneración es similar, un factor determinante es la disponibilidad de material en las proximidades de la zona de estudio, como podrían ser canteras, costas cercanas o sedimentos fluviales, como los retenidos aguas arriba del dique del Granadino y la presa de Rules.

De acuerdo a trabajos previos llevados a cabo por Millares et al. (2014a) y Millares et al. (2014b) en la cuenca del Guadalfeo, tanto en la zona superficial aguas arriba del dique del Granadino ($0 < z < 2$ m) como en la zona superficial aguas arriba de la presa de Rules ($0 < z < 2,5$ m), hay disponibilidad de sedimentos con tamaños de grano mayores de 0.01 m. Por tanto, dichos depósitos sedimentarios podrían resultar recomendables a la hora de extraer el sedimento, ya que no sólo se mitigarían los problemas de erosión en la costa, sino que se reducirían los problemas de sedimentación aguas arriba del

dique y/o la presa. Por su mayor cercanía y por el mayor volumen disponible, el sedimento acumulado aguas arriba de la presa podría ser una solución más recomendable. En la figura 10 se muestra la alternativa elegida, en términos de morfología en planta, volumen aportado y tamaños de sedimento.

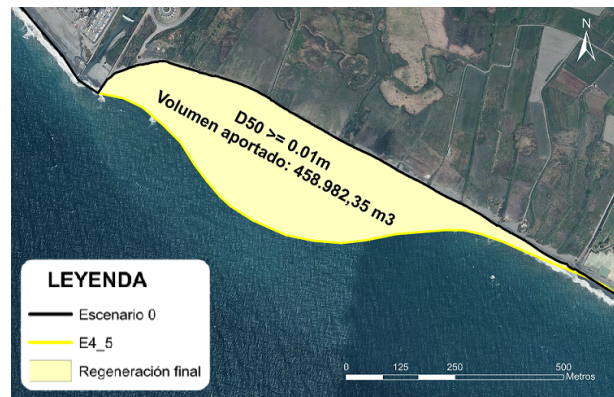


Figura 10: Alternativa seleccionada para la regeneración en términos de morfología en planta, volumen de aportación y tamaño de sedimento.

5. Conclusiones

El presente TFM aborda el estudio de cinco escenarios de regeneración con el objetivo de paliar la erosión en playa Granada durante un periodo 2 años, comparándolas con la alternativa de no regeneración (escenario 0). Para ello se usaron distintas metodologías que no han sido aplicadas conjuntamente para pronosticar y estudiar la efectividad de diferentes formas de regeneración costera en zonas deltaicas: (1) simulaciones de variables climáticas, (2) técnicas de Montecarlo, (3) métodos estadísticos de downscaling híbrido, (4) modelos de propagación del oleaje, (5) formulaciones para estimar tasas de transporte longitudinal y (6) el modelo de una línea. Se ha elegido la morfología más eficiente de entre los 6 escenarios propuestos. Posteriormente, varió el volumen y el tamaño de sedimento para la configuración geométrica del escenario elegido. Tras los resultados obtenidos en la sección anterior, se extraen las conclusiones derivadas de ellos.

De los 6 escenarios propuestos, el que presenta la geometría más eficiente es el escenario 4 (aporte de sedimento en la zona costera situada al Este de la desembocadura del río Guadalfeo, figura 3). Se ha elegido dicho escenario dado que, al final de los dos años de pronóstico, es el que presenta más área emergida en playa Granada (tramo que más sufre los efectos de la ero-

sión) y cumple de forma más óptima el objetivo del estudio. A esta regeneración le afecta mayoritariamente el oleaje de poniente (O-SO), por lo que el sedimento se va transportando hacia el Este a lo largo de la línea de costa, abasteciendo de sedimento a playa Granada durante los dos años estudiados (balance neto positivo).

El escenario 1 también responde de manera óptima tras los dos años obteniendo sedimentación si hablamos en términos netos. Este escenario es el que se daba antes de la construcción de la presa de Rules, de forma natural. El único inconveniente es que, comparándolo con el escenario 4, termina acumulando aproximadamente la mitad de sedimento al final de los dos años en playa Granada. El escenario 3 (aportación en la playa de Salobreña), no produce efectos notables en playa Granada tras el periodo pronosticado, aunque según la figura 5, durante los últimos meses, presenta un aumento de material sedimentado en la zona de estudio. El escenario 2, al estar expuesto a la bidireccionalidad del oleaje, presenta alta variabilidad longitudinal y grandes tasas de erosión. El escenario 5, geometría que se ha usado para realizar regeneraciones hasta ahora en esta zona costera, también presenta grandes tasas de erosión y no resulta eficiente. Finalmente, el escenario 0 no presenta unas tasas elevadas de erosión dado que la disponibilidad de sedimento es menor y la línea de costa presenta mayor equilibrio.

Tras la elección de la morfología del escenario 4 se diseñaron 8 nuevas alternativas de regeneración variando el área de dicho escenario. Para dicha morfología, si aportamos un volumen de entre 350.000 y 550.000 m³ aproximadamente, la regeneración es eficiente dado que no se produce erosión en términos netos. El subescenario que presenta mayor sedimentación es el denominado E4.5. Para volúmenes inferiores a 350.000 m³, la playa presenta mayor erosión en términos netos cuanto menor volumen se aporte.

Con la morfología y volumen de aportación seleccionados, se definieron 10 nuevas alternativas variando el tamaño de grano (D_{50}). Tamaños de sedimento mayores de 0.01 m presentan sedimentación en términos netos tras los dos años, mientras que para tamaños iguales o menores a 0.05 se produce erosión. Esto es consistente con la poca eficacia de las regeneraciones que se han llevado a cabo hasta ahora en la zona de estudio, en las que se empleó un D_{50} en torno a 0.002 m. Tamaños de grano mayores a 0.01 se pueden extraer de los depósitos sedimentarios aguas arriba de la presa de Rules, de modo que se reduzcan también los problemas de sedimentación en la cola del embalse.

La metodología conjunta empleada ha permitido seleccionar la alternativa óptima, en cuanto a configura-

ción geométrica en planta, volumen de sedimento aportado y tamaño de grano, para realizar una regeneración y resolver los problemas de erosión que sufre playa Granada, considerando un periodo de dos años. Esta metodología es fácilmente extensible a otras áreas costeras y su aplicación puede ser de utilidad en proyectos de regeneración en zonas costas que presenten problemas de erosión.

6. Líneas de investigación futura

Los resultados y conclusiones obtenidos en el presente TFM abren nuevas líneas de investigación que podrían ser desarrolladas en el futuro. En primer lugar, dicha metodología podría ser aplicada en un mayor horizonte temporal y desarrollar pronósticos más a largo plazo, incluyendo la subida del nivel del mar como consecuencia del calentamiento global.

En segundo lugar, se podría establecer un umbral de cambio en la morfología de la línea de costa a partir del cual se volviera a propagar el oleaje y calcular las variables en rotura, las tasas de transporte de sedimento y aplicar el modelo de una línea. Así mismo, sería recomendable incluir las variables de viento (dirección y velocidad) en la propagación y el downscaling estadístico. De este modo, la precisión de los resultados obtenidos podría ser mayor.

Por último, se podría contemplar establecer una ponderación longitudinal para la elección de la alternativa en función de los distintos usos o actividades que se desarrollen en la proximidad de la línea de costa (agrarios, residenciales, turísticos, etc).

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a todos los que han contribuido a realizar este Trabajo Fin de Máster empezando por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales del Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, haciendo mención especial a mis tutores: el Doctor Miguel Ortega Sánchez y Rafael J. Bergillos Meca. Sin su orientación, dedicación y apoyo prestado, este trabajo no se podría haber llevado a cabo. Agradecer también los consejos de Pedro Folgueras y Juan del Rosal que han contribuido a mejorar el contenido de este trabajo. Por último, quisiera agradecer a las Universidades de Granada, Córdoba y Málaga la organización del Máster Oficial Interuniversitario en Hidráulica Ambiental en el que se enmarca este trabajo.

Referencias

- Anthony, E.J., 2015. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review. *Marine Geology* 361, 53–78.
- Antolínez, J.A.A., Méndez, F.J., Camus, P., Vitousek, S., González, E.M., Ruggiero, P., Barnard, P., 2015. A Multi-scale Climate Emulator for Long-term Morphodynamics (MUSCLE-morpho). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121, 775–791.
- Ashton, A.D., Brad Murray, A., 2006. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 2. Wave climate analysis and comparisons to nature. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 111.
- Baquerizo, A., Losada, M.A., 2008. Human interaction with large scale coastal morphological evolution. An assessment of the uncertainty. *Coastal Engineering* 55, 569–580.
- Bergillos, R.J., López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., Masselink, G., Losada, M.A., 2016a. Implications of delta retreat on wave propagation and longshore sediment transport - Guadalfeo case study (southern Spain). *Marine Geology* 382, 1–16.
- Bergillos, R.J., Masselink, G., McCall, R.T., Ortega-Sánchez, M., 2016b. Modelling overwash vulnerability along mixed sand-gravel coasts with XBeach-G: Case study of Playa Granada, southern Spain, in: *Coastal Engineering Proceedings*, p. 13.
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., 2017. Assessing and mitigating the landscape effects of river damming on the Guadalfeo River delta, southern Spain. *Landscape and Urban Planning* 165, 117–129.
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2015a. Foreshore evolution of a mixed sand and gravel beach: The case of Playa Granada (Southern Spain), in: *Proceedings of the 8th Coastal Sediments*, World Scientific.
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., Masselink, G., Losada, M.A., 2016c. Morpho-sedimentary dynamics of a micro-tidal mixed sand and gravel beach, Playa Granada, southern Spain. *Marine Geology* 379, 28–38.
- Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., López-Ruiz, A., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2015b. Recent human-induced coastal changes in the Guadalfeo river deltaic system (southern Spain), in: *Proceedings of the 36th IAHR-International Association for Hydro-Environment Engineering and Research World Congress*: <http://89.31.100.18/~iahrpapers/87178.pdf>.
- Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2016d. Impact of river regulation on a Mediterranean delta: Assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research* 52, 5132–5148.
- Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Ortega-Sánchez, M., 2017. Advances in management tools for modeling artificial nourishments in mixed beaches. *Journal of Marine Systems* 172, 1–13.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., 2011. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering* 58, 851–862.
- Camus, P., Menéndez, M., Méndez, F.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Cánovas, V., Pérez, J., Rueda, A., Losada, I.J., Medina, R., 2014. A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119, 7389–7405.
- Coleman, J.M., Wright, L., 1975. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. *Houston Geological Society*.
- Félix, A., Baquerizo, A., Santiago, J.M., Losada, M.A., 2012. Coastal zone management with stochastic multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management* 112, 252–266.
- Herrero, J., Polo, M.J., Moñino, A., Losada, M.A., 2009. An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *Journal of Hydrology* 371, 98–107.
- Holthuijsen, L., Booij, N., Ris, R., 1993. A spectral wave model for the coastal zone, in: *Ocean Wave Measurement and Analysis*, ASCE. pp. 630–641.
- Joe, H., 1997. *Multivariate models and dependence concepts*. Chapman & Hall/CRC.
- Lesser, G.R., 2009. An approach to medium-term coastal morphological modeling. Ph.D. thesis. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering* 51, 883–915.
- López-Ruiz, A., Bergillos, R.J., Lira-Loarca, A., Ortega-Sánchez, M., 2017a. Forecasting and uncertainty assessment of the life cycle performance, operational capacity and design specifications of wave energy converter arrays. *Applied Energy*, under review.
- López-Ruiz, A., Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., 2016. The importance of wave climate forecasting on the decision-making process for nearshore wave energy exploitation. *Applied Energy* 182, 191–203.
- López-Ruiz, A., Bergillos, R.J., Raffo-Caballero, J.M., Ortega-Sánchez, M., 2017b. Towards an optimum design of wave energy converter arrays through an integrated approach of the life cycle performance and operational capacity. *Applied Energy*, under review.
- López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., Losada, M.A., 2012. Short and medium-term evolution of shoreline undulations on curvilinear coasts. *Geomorphology* 159, 189–200.
- López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., Losada, M.A., 2014. A note on alongshore sediment transport on weakly curvilinear coasts and its implications. *Coastal Engineering* 88, 143–153.
- 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.
- Lütkepohl, H., 2005. *New introduction to multiple time series analysis*. Springer.
- Mateo, Z.R.P., Siringan, F.P., 2007. Tectonic control of high-frequency Holocene delta switching and fluvial migration in Lingayen Gulf bayhead, northwestern Philippines. *Journal of Coastal Research*, 182–194.
- Millares, A., Polo, M.J., Moñino, A., Herrero, J., Losada, M.A., 2014a. Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. *Geomorphology* 206, 330–342.
- Millares, A., Polo, M.J., Moñino, A., Herrero, J., Losada, M.A., 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.
- Moreno Aranda, I.M., Millares Valenzuela, A., Herrero Lantarón, J., Polo Gómez, M.J., Losada Rodríguez, M.Á., 2010. Futuro de los recursos hídricos en la cuenca del río Guadalfeo bajo supuesto de cambio climático. *Revista Interdisciplinaria de las Ciencias Ambientales*.
- Ortega-Sánchez, M., Bergillos, R.J., López-Ruiz, A., Losada, M.A., 2017. *Morphodynamics of Mediterranean Mixed Sand and Gravel Coasts*. Springer.
- Orton, G.J., Reading, H.G., 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*.
- Payo, A., Baquerizo, A., Losada, M.A., 2002. One-line model with time dependent boundary conditions, in: *Coastal Engineering Proceedings*, World Scientific. pp. 3046–3052.
- Payo, A., Mukhopadhyay, A., Hazra, S., Ghosh, T., Ghosh, S., Brown,

- S., Nicholls, R.J., Brichenno, L., Wolf, J., Kay, S., Lázár, A.N., Haque, A., 2016. Projected changes in area of the sundarban mangrove forest in bangladesh due to slr by 2100. *Climatic Change* 139, 279–291.
- Pelnaud-Considère, R., 1956. Essai de theorie de levolution des forms de rivages en plage de sable et de galets. 4th Journees de lHydraulique, les Energies de la Mer, Question III , 289–298.
- Polo, M., Aguilar, C., Diaz-Gutiérrez, A., Dugo, M., 2013. Cuantificando la interceptación en cuencas heterogéneas: la cuenca del rio Guadalfeo (Granada). Interceptación de la lluvia por la vegetación en Espana, Instituto Euromediterráneo del Agua , 297–318.
- Rodriguez Delgado, C., 2016. Regeneraciones artificiales en playas heterogéneas: análisis de datos y modelado numérico. Trabajo Fin de Máster. Universidades de Granada, Córdoba y Málaga.
- Solari, S., van Gelder, P.H.A.J.M., 2011. On the use of Vector Autoregressive (VAR) and Regime Switching VAR models for the simulation of sea and wind state parameters. *Marine Technology and Engineering*, 217–230.
- Solari, S., Losada, M.A., 2012. A unified statistical model for hydrological variables including the selection of threshold for the peak over threshold method. *Water Resources Research* 48, W10541.
- Spencer, T., Schuerch, M., Nicholls, R.J., Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Reef, R., McFadden, L., Brown, S., 2016. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: the DIVA Wetland Change Model. *Global and Planetary Change* 139, 15–30.
- Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., Nicholls, R.J., 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience* 2, 681–686.
- Syvitski, J.P.M., Saito, Y., 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change* 57, 261–282.
- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P., 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376–380.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. volume 1006. Aqua publications Amsterdam.
- Van Rijn, L.C., 2014. A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. *Coastal Engineering* 90, 23–39.