

Diseño de espigones y diques exentos mediante análisis multicriterio. Aplicación al tramo de costa entre la Punta del Caballo y la Punta de Calaburras (Málaga)

Jose Luis Martínez Santos*

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

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

Los principales problemas de las zonas costeras en la actualidad son los procesos erosivos y la subida del nivel del mar. Los procesos erosivos, representados por el retroceso de la línea de costa, suelen estar debidos a la falta de suministro de sedimento procedente de sistemas fluviales y a la interrupción de la dinámica litoral por distintas estructuras artificiales, las cuales impiden la regeneración natural de las playas. Por ello es fundamental el desarrollo de soluciones técnicas para conseguir la regeneración definitiva las playas. El objetivo de este Trabajo Fin de Máster ha sido el desarrollo de un estudio para escoger la mejor solución técnica capaz de solventar esta problemática. Con el fin de obtener una solución óptima para solventar estos problemas, se ha realizado un análisis multicriterio de distintas alternativas propuestas como solución definitiva de esta problemática. El análisis se realizó mediante una serie de gestores, analizando las distintas alternativas propuestas por cada uno de estos gestores, basándose en tres criterios: efectividad de las obras, coste económico e impacto ambiental. Tras realizar el análisis se ha determinado que la alternativa óptima para el diseño de estas obras es la alternativa 2, constituida por seis espigones con forma de "T" dispuestos en los puntos más conflictivos de la línea de costa objeto de estudio. De este modo, podemos concluir que la disposición de estas estructuras de contención a lo largo de línea de costa no solo detendrá el proceso erosivo, sino que también generará beneficios en la zona, debido principalmente a la falta de necesidad de regeneraciones y al atractivo generado por las playas de esta zona.

Palabras clave: Playa, regeneración, estudio de casos tipo, modelo propagación de oleaje, análisis multicriterio, transporte de sedimentos

1. Introducción

Las playas representan la delimitación entre mar y tierra, siendo la interacción entre procesos climáticos, sedimentarios y tectónicos fundamentales en ellas (Coleman and Wright, 1975; Orton and Reading, 1993; Overeem, 2005). Las playas responden rápidamente ante las distintas presiones sobre las que se ven expuestas tanto frente a procesos naturales como a presiones humanas. Estas presiones provocan variaciones en la línea de costa dando lugar a problemas de erosión.

Las variaciones suelen ser debidas a los movimientos de los sedimentos que forman las playas, produci-

dos por la incisión en la costa del oleaje además de las variación en el suministro de sedimento procedente de los sistemas fluviales. Estas variaciones de aportación de sedimentos suelen ser debidas principalmente a los distintos tipos de obras hidráulicas dispuestas sobre los cauces de los ríos permitiendo la regulación de los mismos (Syvitski et al., 2005; Mateo and Siringan, 2007). Debido a ello, las playas situadas en torno a las desembocaduras de los ríos suelen sufrir problemas de erosión y retroceso de la línea de costa (Syvitski et al., 2009). Además de estas afecciones a lo largo de la costa existen distintas estructuras tanto naturales como artificiales que impiden el transporte natural del sedimento.

Las pérdidas de sedimento de las playas, que dan lugar a problemas de erosión y retroceso de la línea de costa, también se producen por fenómenos naturales da-

*joseluis.mrsn@gmail.com

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

do que éstas son un medio dinámico, el cual se muestra en constante movimiento y evolución. El oleaje ejerce una acción continuada incidiendo sobre las playas y transportando el sedimento. Para que una playa sea estable en lo referente al volumen de arena, es necesario que dichos movimientos presenten una cantidad similar de material tanto entrante como saliente. En muchos casos, debido a la descompensación de materiales entrantes y salientes, se dan fenómenos de erosión en las playas, que derivan en un retroceso de la línea de costa de las mismas.

Las prácticas más frecuentes para la regeneración de las playas erosionadas, suelen ser las aportaciones artificiales de sedimento. Estas correcciones en la posición de la línea de costa suelen estar debidas a la necesidad de conseguir la estabilidad de las playas, perdida a consecuencia de estructuras o acciones humanas que imposibilitan la estabilización de las mismas de forma natural. Además de ello, las playas son un incentivo para promover el turismo en las costas. Por esta razón, distintas Administraciones invierten grandes cantidades de dinero en estas regeneraciones. Para conseguir la estabilidad de la playa tras una regeneración se llevan a cabo la construcción de obras de contención como espigones o diques exentos capaces de impedir el movimiento longitudinal del sedimento a lo largo de una franja de costa.

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene el objetivo de realizar un análisis de posibles obras de contención definitiva, con el fin de impedir el movimiento longitudinal del sedimento tras la regeneración del tramo de costa objeto de estudio. Para ello, se efectuó un análisis multicriterio de distintas alternativas estructurales en función de la funcionalidad, el coste económico y el impacto medioambiental. 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 obtenidos tras el análisis de las alternativas estructurales propuestas en función de los criterios antes mencionados. Finalmente, en la sección 5 del trabajo se muestran las conclusiones extraídas.

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 el tramo de costa comprendido entre la Punta de Calaburras (Oeste) y la Punta del Caballo (Este), en este tramo de costa se encuentra el Puerto de Fuengirola, constituyendo una barrera artificial que impide el transporte longitudinal de sedimentos en la dirección Suroeste. La longitud del tramo de costa objeto de estudio es

de 9,55 km. Este tramo de costa abarca tres términos municipales: Mijas, Fuengirola, Benalmadena. En ella se distinguen diez playas, de Oeste a Este: playa de la Campana, playa Mare Nostrum, playa del Castillo, playa de Santa Amalia, playa de Fuengirola, playa de los Boliches, playa de las Gaviotas, playa de los Olimpos, playa de Torreblanca, y playa de Carvajal (Figura 1).

El tramo objeto de estudio forma parte del sector de costa comprendido entre la Punta de Calaburras y la Punta Negra. En dicho sector la costa comprende en su totalidad a la provincia de Málaga. La longitud aproximada del sector es de 31,30 km y su forma en planta es la de dos arcos cóncavos muy ligeramente apuntados con un tramo de acuerdo ligeramente convexo. Todo él está orientado en dirección SO-NE y por tanto queda abierto al mar hacia el SE (Retamero, 2000).

El tramo de costa objeto de estudio se halla en la formación deltaica que agrupa a las playas antes mencionadas, asociada al Río de Fuengirola, cuya desembocadura se encuentra entre la playa del Castillo y la playa de Santa Amalia.

Este tramo de costa, formado principalmente por el delta del río Fuengirola, río que aporta la mayor parte de sedimento a la playa. El río Fuengirola nace por la unión del río Ojén con el río Alaminos o de Las Pasadas, formando una red fluvial con una cuenca de 118 km² y 20 km de longitud, enmarcada dentro de la cuenca del río Guadalhorce.

El tramo de costa estudiado pertenece principalmente al término municipal de Fuengirola y cuenta con las siguientes playas: (1) playa del Castillo, que cuenta con una extensión de 800 metros y una anchura media de 50 metros, recorriendo el litoral, llegamos hasta (2) la playa de Santa Amalia, contigua a (3) playa de Fuengirola, correspondiendo con la zona del centro del municipio, con 1.650 metros y una anchura media de 30 metros, seguida de (4) playa de los Boliches, (5) playa de las Gaviotas y (6) playa de Torreblanca que suman 3.000 metros de longitud y una anchura entre 40 y 50 metros, seguida, por último, por (7) playa de los Olimpos y (8) playa de Carvajal que se extienden a lo largo de 1.200 metros de longitud y tiene una anchura media de 20 metros.

En junio del año 1934 comenzó la construcción del Puerto de Fuengirola situado al término de la playa de Santa Amalia, culminando la construcción del mismo en la década de los 60. La construcción del puerto provocó un cambio en el régimen hidráulico de este tramo de costa. Debido a esta situación, la zona de estudio, en particular las playas situadas en el Suroeste del puerto, sufren graves problemas de erosión como puede observarse en la figura 1. Además, dicho tramo de costa tiene



Figura 1: Panel inferior izquierdo: Península Ibérica y situación de la zona de estudio. Panel central: localización de las playas existentes a lo largo de la zona de estudio. Rojo: localización de las zonas con mayor erosión en la zona de estudio.

un uso principalmente turístico, incluyendo varios hoteles, restaurantes y numerosos apartamentos vacacionales, que han sido afectados o podrían verse afectados por el retroceso de la línea de costa en los próximos años. Por ello, se han llevado a cabo hasta ahora diversas regeneraciones que no han resultado muy exitosas debido al aporte de un tamaño de sedimento inadecuado y a la morfología en planta de dichas regeneraciones.

2.1. Clima marítimo

El clima marítimo en la zona de estudio se ha caracterizado según los datos punto WANA 2029078 (proporcionados por Puertos del Estado), por tratarse del punto más cercano a la zona de estudio. Tras el análisis de estos datos se ha caracterizado tanto el oleaje como el viento existente en la zona de estudio.

Para caracterizar el oleaje existente en la zona se realizó un histograma de probabilidad de ocurrencia con los datos de altura de ola significativa, en él se pudo observar que aproximadamente más del 80 % de las olas eran menores de 1 metro. En cuanto al periodo, los dominantes en la zona de estudio son los comprendidos entre 2 y 8 segundos.

Por último, analizando la dirección del oleaje se determinó que las direcciones predominantes eran ESE (32,56 %), E (24,96 %) y SO (18,99 %). Con el fin de representar los parámetros antes mencionados se procedió a la confección de la rosa de oleaje (Figura 2)

Del mismo modo se procedió con el fin de caracterizar el viento existente en la zona de estudio. Del histograma de velocidad de viento se determinó que las velocidades más frecuentes se encontraban en el intervalo entre 2-4 m/s, siendo las direcciones principales E (11,65 %), O (9,76 %), ESE (9,47 %). Al igual que para el oleaje se representó una rosa de los vientos (Figura 3)

Durante los eventos de tormenta, la altura de ola en profundidades indefinidas supera con frecuencia los 1,48 m, pudiendo alcanzar picos de hasta 5 m. El rango

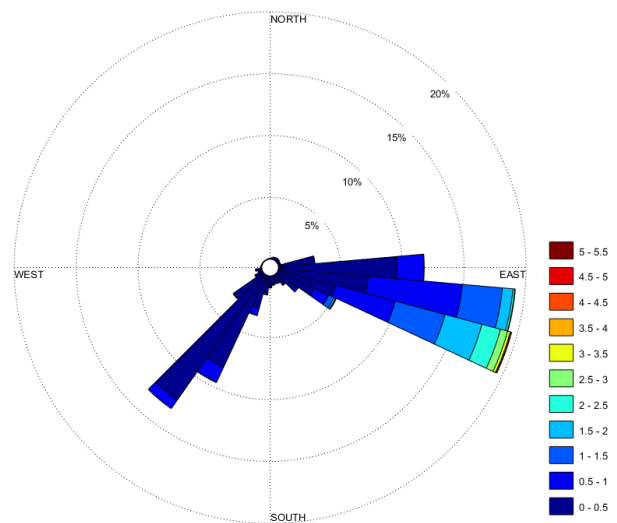


Figura 2: Rosa de oleaje. Punto WANA 2029078.

de la marea astronómica se sitúa en torno a los 0.6 m, siendo por tanto una zona micromareal.

2.2. Dinámica litoral

El transporte de sedimentos se define como el efecto producido por el oleaje al propagarse e incidir en la costa, produciendo el movimiento del material que forma la franja litoral. Este movimiento de sedimentos es el responsable de la transformación de la línea de costa.

Debido al ángulo de incidencia del oleaje sobre la línea de costa, surge una corriente paralela a la misma, que genera el transporte longitudinal y otra transversal generadora del transporte transversal.

Para determinar las tasas de transporte de sedimentos existentes en la zona de estudio se ha empleado el método del flujo de energía. Este método considera que el volumen de sedimento transportado a lo largo de la costa es proporcional al flujo de energía del oleaje.

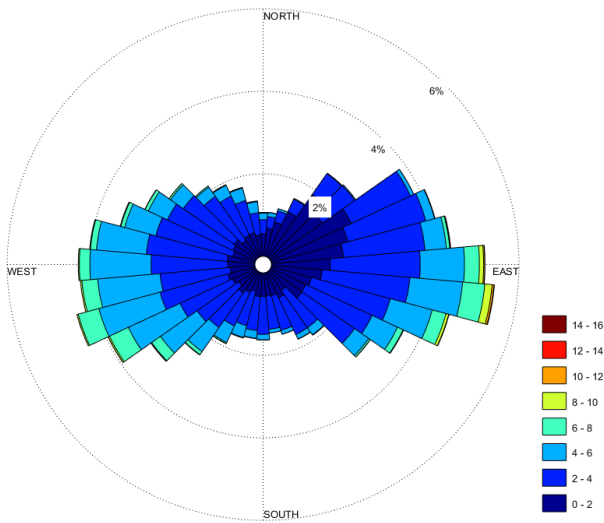


Figura 3: Rosa de los vientos. Punto WANA 2029078.

Dado que los datos disponibles de altura de ola corresponden a profundidades indefinidas debemos realizar una serie de transformaciones de la fórmula del CERC, aplicando la Ley de Snell y la constancia del flujo de energía (de la Peña Olivas, 2007).

Las playas situadas en el entorno del delta del río Fuengirola son playas de arenas de cuarzo gruesas y microgravas con diámetros medios comprendidos entre 0,2 y 1,0 mm. Realizando las transformaciones antes mencionadas e introduciendo los parámetros para este tipo de sedimento, la fórmula de CERC obtenida es la siguiente:

$$Q_l = 16,34 \cdot 10^5 H_0^{\frac{5}{2}} (\cos \alpha_0)^{1/4} \sin 2\alpha_0$$

Donde Q_l es el transporte longitudinal en ($m^3/año$). De este modo se obtuvo un transporte sólido bruto de $57.016,31 (m^3/año)$, distribuyéndose el mismo en las direcciones Sursuroeste (85,41 %) y Nornoreste (14,59 %). En la Figura 4 se muestra un esquema de los mismos.

Para determinar hasta que distancia de la línea de costa se produce el movimiento de sedimentos debido tanto al transporte longitudinal como al transporte transversal es necesario conocer la profundidad de cierre (Hallermeier, 1978, 1981), la cual se determina en función de la altura de ola significativa excedida 12 horas al año. En el caso que nos ocupa esta altura de ola es de 3,66 metros, por lo que la profundidad de cierre se encuentra en 6,41 m.

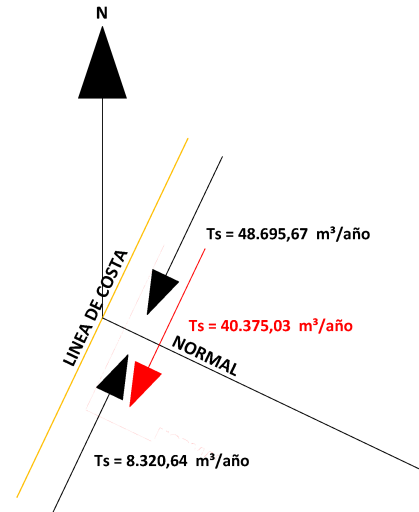


Figura 4: Transporte de sedimentos. En rojo se muestra el transporte de sedimentos neto.

3. Metodología

La metodología seguida en este TFM se basa principalmente en: (1) caracterización del clima marítimo de la zona de estudio, (2) definición de casos de propagación, (3) propagación hacia la costa de casos tipo, (4) definición de alternativas para la contención definitiva de sedimentos, (5) establecimiento de criterios de análisis y (6) análisis multicriterio de las alternativas establecidas (Figura 5).

Las distintas alternativas propuestas han sido evaluadas mediante un análisis multicriterio AHP (Analytic Hierarchy Process).

Los criterios establecidos para realizar este análisis han sido:

- Criterio 1: Efectividad de las obras
- Criterio 2: Coste de ejecución
- Criterio 3: Impacto ambiental

Cada una de las alternativas propuestas, han sido evaluadas en función de cinco gestores, donde en cada uno de ellos se asignará un peso distinto a cada criterio.

Realizando el análisis multicriterio de este modo, la valoración no es subjetiva dado que no se establece un único peso para cada criterio, sino que para cada criterio se han asignado distintos pesos. De este modo la alternativa óptima será aquella que resulte la más adecuada en el mayor número de criterios.

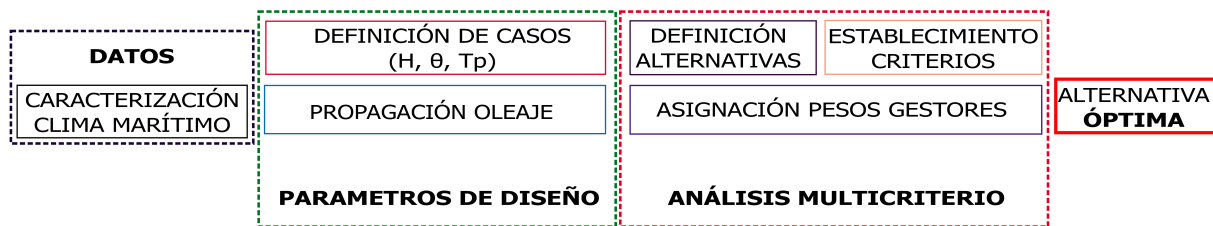


Figura 5: Esquema representativo de la metodología seguida para la realización del presente TFM.

3.1. Definición de las alternativas

Con el fin de dar solución a los problemas de erosión que presenta el tramo de costa objeto de estudio, se han establecido y analizado distintas configuraciones de obras de contención.

Para ello se han definido cinco alternativas con diferentes configuraciones de espigones y diques exentos, definiendo las mismas con diferente orientación y ubicación a lo largo de la costa en la zona de estudio. Con el fin de poder comparar las distintas alternativas de forma equitativa se han diseñado las mismas manteniendo un mismo área equivalente de obra en todas ellas (aproximadamente 21,172,00 m²). Las distintas alternativas, cuyo diseño se realizó mediante el software *AutoCAD*, se describen a continuación.

Alternativa 1

La primera de las alternativas propuestas se diseñó disponiendo espigones distanciados entre 300 y 500 metros a lo largo de todo el tramo de costa. Esta alternativa está compuesta por 14 espigones con cinco metros de anchura. La longitud de los mismos es variable según la distancia necesaria en cada punto para alcanzar la profundidad de cierre, la cual ha sido definida anteriormente. La disposición de las obras de esta alternativa se muestra en la figura 6. En la tabla 1 se muestran las dimensiones en planta de cada uno de los espigones que forman esta alternativa.

Alternativa 2

La alternativa 2 se ha diseñado disponiendo seis espigones en forma de "T", situados en las zonas donde se han localizado los puntos de mayor erosión. La forma de "T" permite combinar el efecto producido por los diques exentos colocados en paralelo a la línea de costa los cuales reflejan el oleaje, y el efecto barrera u obra de contención que ejercen los espigones sobre el transporte longitudinal de sedimentos. Las obras de esta alternativa se muestran en la figura 7 y los aspectos geométricos se resumen en la tabla 2.

Nº	Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)
1	170	5	850
2	270	5	1350
3	300	5	1500
4	270	5	1350
5	300	5	1500
6	350	5	1750
7	350	5	1750
8	350	5	1750
9	300	5	1500
10	280	5	1400
11	280	5	1400
12	300	5	1500
13	330	5	1650
14	350	5	1750
Total Alternativa 1			21.000 (m ²)

Tabla 1: Dimensionamiento de estructuras en la alternativa 1.

Nº	Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)
1	170	6	1020
	150	6	900
2	300	6	1800
	300	6	1800
3	300	6	1800
	300	6	1800
4	350	6	2100
	300	6	1800
5	300	6	1800
	150	6	900
	125	6	750
6	300	6	1800
	300	6	1800
Total Alternativa 2			20.070 (m ²)

Tabla 2: Dimensionamiento de estructuras en la alternativa 2.

Alternativa 3

En el diseño de la alternativa 3 se han dispuesto siete diques exentos con el fin de minimizar el efecto del oleaje y tres espigones cuya función es la de impedir el



Figura 6: Obras de contención diseñadas para la alternativa 1.



Figura 7: Obras de contención diseñadas para la alternativa 2.

transporte longitudinal de sedimentos. Los diques exentos han sido dispuestos a la profundidad de 10 m en paralelo a la línea de costa, separados entre 400 y 500 metros unos de otros. La ubicación de los mismo a la profundidad de 10 m permite asegurar que se alcanza la profundidad de cierre aunque la playa avance debido a la formación de tómbolos o hemitómbolos tras ellos (Figura 8).

Alternativa 4

La alternativa 4 se diseñó disponiendo espigones y diques exentos alternativamente de manera que se combine el efecto de uno y otro a lo largo del tramo de costa, formando tramos de playas encajadas entre espigones y protegidas del oleaje mediante los diques. Al igual que en el caso de la alternativa 3, los diques exentos han sido colocados en la línea batimétrica de 10 m, pero en este caso alguno de ellos han sido dispuestos en perpendicular a la dirección del flujo medio de energía, siendo la dirección del mismo 146 ° (Figura 9).

Alternativa 5

La disposición de las obras de esta alternativa es muy similar a la de la alternativa 4, pero en este caso se han eliminado dos obras y se ha ampliado el espacio entre

Nº	Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)
1	170	5	850
	75	6	450
2	300	8	2400
3	300	8	2400
3	300	8	2400
4	350	5	1750
5	300	8	2400
6	300	8	2400
7	300	5	1500
	50	6	300
	75	6	450
8	300	8	2400
9	300	8	2400
Total Alternativa 3			22.1000 (m ²)

Tabla 3: Dimensionamiento de estructuras en la alternativa 3.

diques exentos y espigones. En la zona norte del tramo de costa se ha dispuesto un espigón con forma de "T", al igual que en las alternativas 2 y 3 (Figura 10).

Como se ha comentado anteriormente todas las alternativas dispuestas cumplen el criterio de mantener un área de obra aproximadamente constante, con el fin de que el análisis de las obras sea lo más equitativo posi-

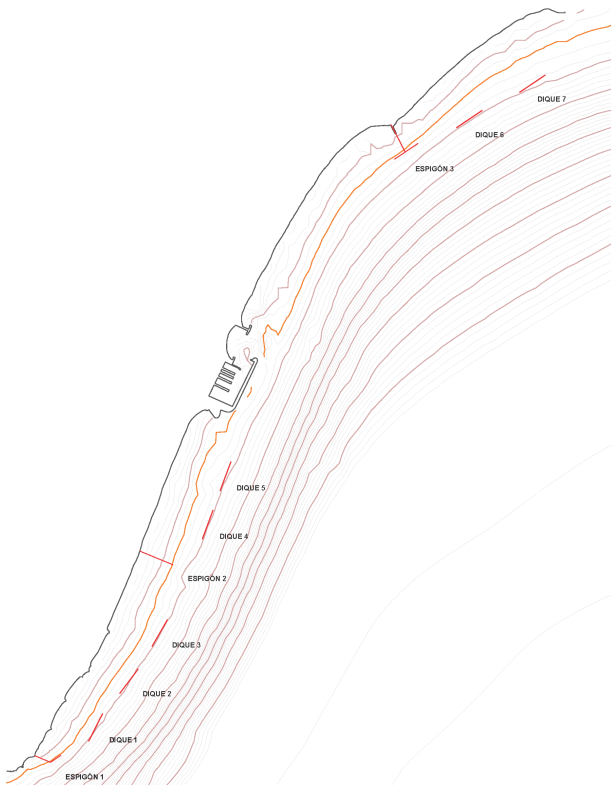


Figura 8: Obras de contención diseñadas para la alternativa 3.

Nº	Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)
1	170	6	1020
	50	6	300
2	300	8	2400
3	300	6	1800
4	300	8	2400
5	300	6	1800
6	300	8	2400
7	350	6	2100
8	300	8	2400
9	300	6	1800
10	300	8	2400
11	300	8	2400
Total Alternativa 4			23.220 (m ²)

Tabla 4: Dimensionamiento de estructuras en la alternativa 4.

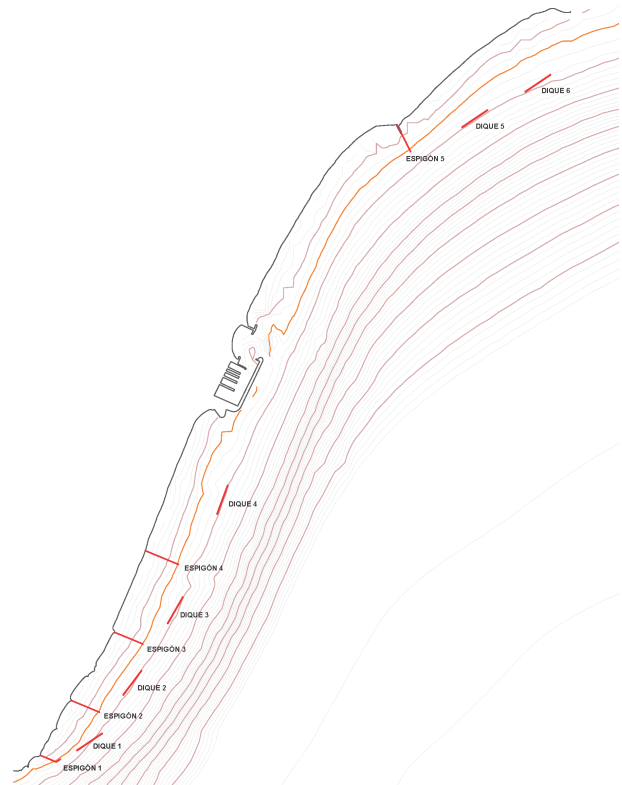


Figura 9: Obras de contención diseñadas para la alternativa 4.

Nº	Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)
1	170	6	1020
	150	6	900
2	350	6	2100
3	300	6	1800
4	300	6	1800
5	350	6	2100
6	350	6	2100
7	300	6	1800
	125	6	750
	150	6	900
8	350	6	2100
9	350	6	2100
Total Alternativa 5			19.470 (m ²)

Tabla 5: Dimensionamiento de estructuras en la alternativa 5.

ble. Además tanto los espigones como los diques exentos propuestos se han dispuesto de manera que ambos alcancen la profundidad de cierre, habiendo sido definida la misma en 7m.

3.2. Modelo de propagación del oleaje: Delft3D-Wave

Para la evaluación de la efectividad de las estructuras diseñadas ha sido necesario realizar la propagación

de los cuatro casos definidos como representativos del oleaje existente en la zona de estudio. Por ello, para cada alternativa se propagaron estos estados de mar desde profundidades indefinidas hasta 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

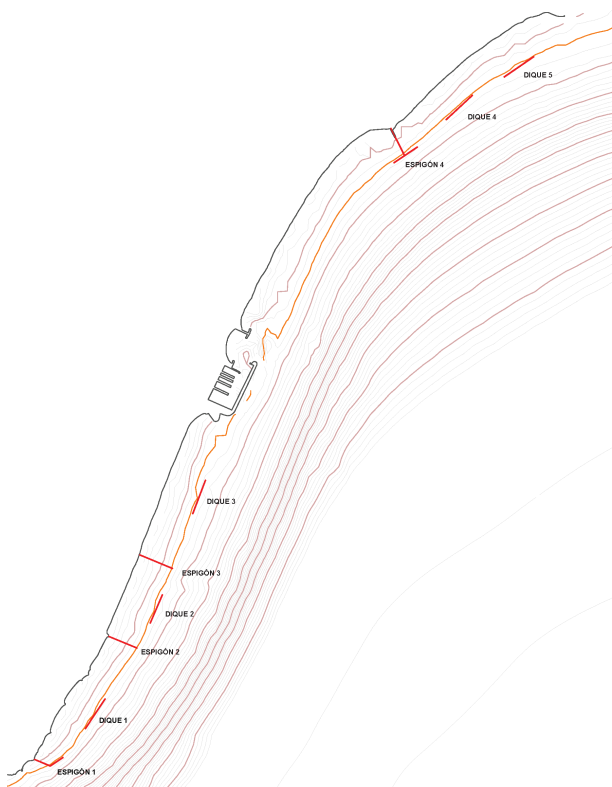


Figura 10: Obras de contención diseñadas para la alternativa 5.

oleaje en áreas costeras (López-Ruiz et al., 2017).

Se definieron tres mallas diferentes. La primera es una malla curvilínea y de menor resolución, con una distribución de 82x82 celdas que cubre toda la zona de estudio. La segunda es una malla anidada que cubre el área más cerna a las playas con 244 celdas en dirección longitudinal y 82 celdas en dirección transversal a la línea de costa, con mayor resolución. Por último se estableció una tercera malla anidada, esta malla cubre el área existente entre la línea de costa y la profundidad de cierre a lo largo de toda la línea de costa. Se adoptaron los parámetros del modelo calibrados en el litoral granadino por Bergillos et al. (2017).

3.3. Criterios para el análisis de alternativas

Tras la definición de las alternativas y la aplicación del modelo de propagación de oleaje, se procedió al análisis de las mismas. Los criterios seguidos han sido:

- Criterio 1: Efectividad de las obras
- Criterio 2: Coste de ejecución
- Criterio 3: Impacto ambiental

Para la evaluación de la efectividad de las obras se ha analizado la disminución de la altura de ola que provoca la ejecución de las obras de contención descritas en cada una de las alternativas. Para ello se ha procedido a la propagación del oleaje sobre las mismas, propagando cuatro estados de mar, definidos como los casos más representativos (Tabla 6).

	H_s (m)	θ ($^\circ$)	T_p (seg)
CASO 1	5,11	112,5	6
CASO 2	5,11	112,5	8
CASO 3	5,11	225	6
CASO 4	5,11	225	8

Tabla 6: Casos de propagación.

El coste de ejecución ha sido evaluado en función de la longitud y del tipo de obra de contención, para los espigones se ha establecido un coste de 4.500 €/m mientras que para los diques exentos el coste es de 6.000 €/m (Centro de Estudios de Puertos y Costas, 2017)

En cuanto al impacto ambiental es de vital importancia en este tipo de proyectos de acuerdo con la Ley 7/2007, del 9 de Julio de Gestión Integrada de Calidad Ambiental, la cual recoge en su anexo primero en el punto 7.7. la obligatoriedad de ser sometidas al proceso de autorización ambiental las obras costeras destinadas a combatir la erosión, así como las obras marítimas que puedan alterar la costa.

El análisis del impacto ambiental ha sido evaluado en función tanto del impacto visual como del impacto que las obras podrían provocar sobre el medio biótico, pensando en el efecto barrera que producirían las obras de ser ejecutadas.

Una vez establecidos los criterios con los que realizar el análisis, se establecieron cinco gestores con diferentes pesos para cada criterio, de modo que cada alternativa será analizada cinco veces.

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
GESTOR 1	33 %	33 %	33 %
GESTOR 2	25 %	50 %	25 %
GESTOR 3	25 %	25 %	50 %
GESTOR 4	50 %	25 %	25 %
GESTOR 5	27 %	19 %	54 %

Tabla 7: Porcentajes de cada criterio según cada gestor.

Una vez definidos las distintas alternativas y los pesos de cada uno de los criterios en los distintos gestores, se procedió al análisis de las mismas.

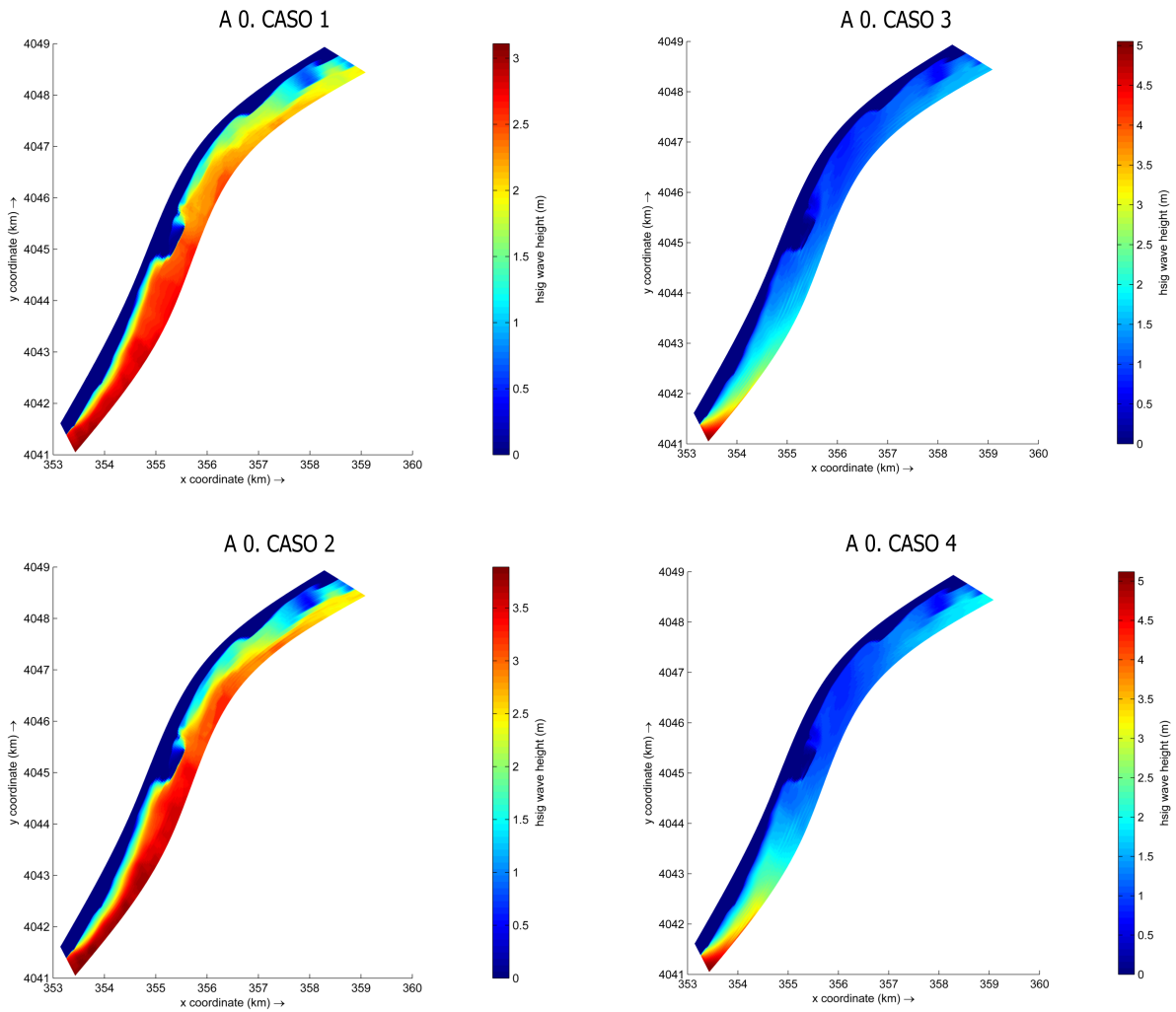


Figura 11: Propagación del oleaje en el estado actual.

4. Resultados

4.1. Efectividad de las obras

Tras realizar la propagación antes definida se analizó la efectividad de las distintas estructuras planteadas en función de los cuatro casos de propagación establecidos.

Para establecer un punto de partida con el que poder comparar los resultados de la propagación de cada alternativa, se realizó esta misma propagación para el escenario inicial, siendo éste el estado actual del tramo de costa.

Los resultados de esta comparación se exponen en la tabla 8. Se observa que la alternativa que mayor efectividad de las obras proporciona es la alternativa 5 (Figura 10) con una disminución de la altura de ola propagada

	C 1	C 2	C 3	C 4	PROMEDIO
A 1	100,04 %	99,80 %	99,36 %	99,84 %	99,76 %
A 2	93,80 %	93,39 %	93,11 %	94,46 %	93,69 %
A 3	91,89 %	92,42 %	90,38 %	93,17 %	91,96 %
A 4	95,33 %	96,17 %	91,46 %	94,27 %	94,31 %
A 5	91,24 %	90,69 %	91,68 %	92,69 %	91,57 %

Tabla 8: Porcentaje de reducción de altura de ola según casos.

cercana al 10 %, seguida de la alternativa 3 (Figura 8) con un porcentaje de disminución cercano al 8 %, seguida a su vez de la alternativa 2 (Figura 7) con una disminución del 6 %.

Además de esto se han representado un mapas de color en el que se puede observar el efecto de las estructuras (Figuras 12, 13, 14, 15 y 16) .

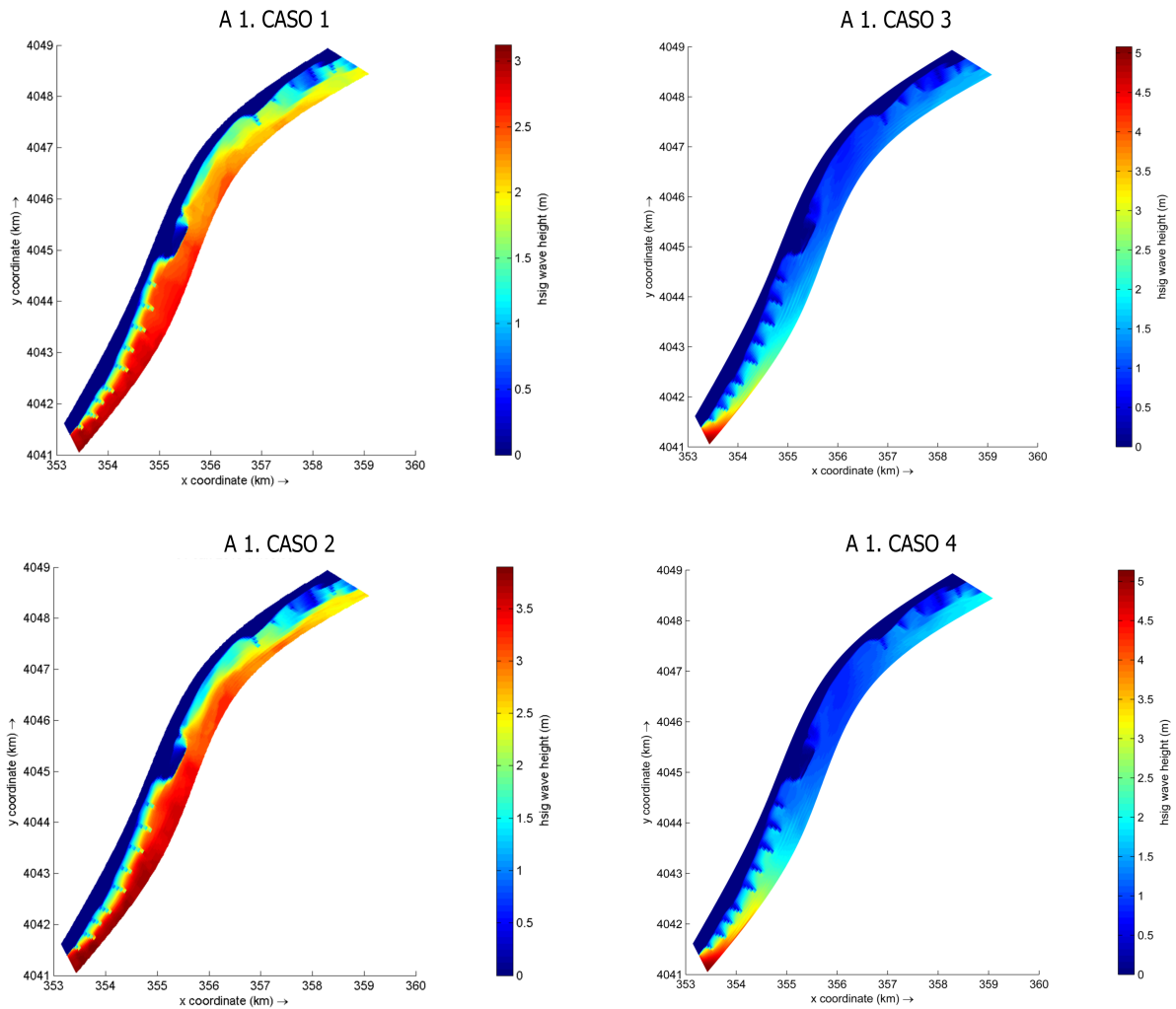


Figura 12: Propagación del oleaje en la alternativa 1.

4.2. Coste de ejecución

Respecto al factor económico, con el fin de analizar el coste de ejecución de las distintas alternativas, se ha calculado el valor de cada una de las obras de las alternativas establecidas.

En la siguiente tabla se muestran los costes económicos de la ejecución de cada alternativa, diferenciando en cada alternativa entre espigón y dique exento.

De la tabla 9 obtenemos que la alternativa más ventajosa desde el punto de vista del coste de ejecución es la alternativa 2 (Figura 7), con un presupuesto un 13 % más económico que el resto de las alternativas propuestas, seguida de la alternativa 5 (Figura 10).

	Nº ESPIGONES	Nº DIQUES	COSTE
A 1	14		18.900.000,00 €
A 2	6		15.052.500,00 €
A 3	3	7	17.190.000,00 €
A 4	5	6	17.415.000,00 €
A 5	4	5	17.152.500,00 €

Tabla 9: Coste económico de las alternativas.

4.3. Impacto ambiental

La mejor alternativa en el caso del criterio impacto ambiental es la alternativa 2, tratándose de la segunda alternativa con menos superficie de obras, además de ser la que menos número de obras presenta con seis espigones y cero diques exentos.

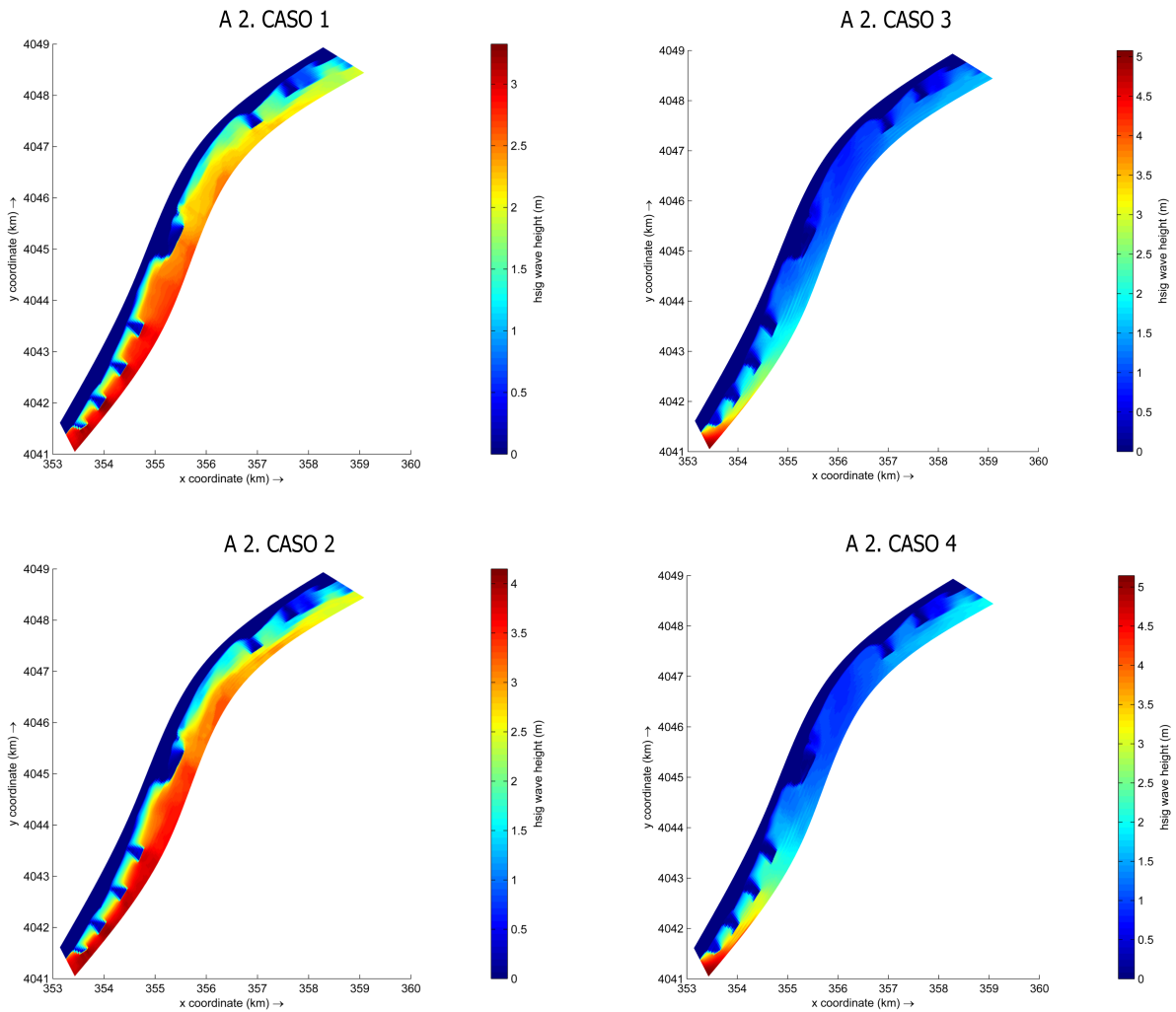


Figura 13: Propagación del oleaje en la alternativa 2.

4.4. Resultados análisis

Para concluir el análisis multicriterio, es necesario ponderar la importancia relativa de cada una de las alternativas con los pesos de los mismos según cada gestor. Los pesos en los diferentes gestores varían, con el fin de llevar a cabo un análisis más objetivo. El análisis de las distintas alternativas propuestas, según los pesos asignados a los tres criterios a analizar, se resumen en las tablas 10, 11, 12, 13 y 14.

Como se puede observar según el gestor 1, el cual asigna el mismo valor a cada criterio la alternativa más adecuada es la alternativa 2, con un 37 % (Tabla 10).

	C1	C2	C3	GESTOR 1	
PESO	33,33 %	33,33 %	33,33 %		
A 1	4,12 %	7,63 %	26,81 %	12,85 %	4
A 2	15,79 %	48,41 %	46,84 %	37,01 %	1
A 3	26,37 %	15,03 %	4,41 %	15,27 %	3
A 4	7,43 %	6,75 %	7,59 %	7,26 %	5
A 5	46,29 %	22,19 %	14,36 %	27,61 %	2

Tabla 10: Análisis según el gestor 1.

Procediendo del mismo modo, el análisis mediante el gestor 2 indica que la alternativa más adecuada es la alternativa 2 con un 40 %, siendo en este caso el criterio con mayor peso el coste económico (Tabla 11).

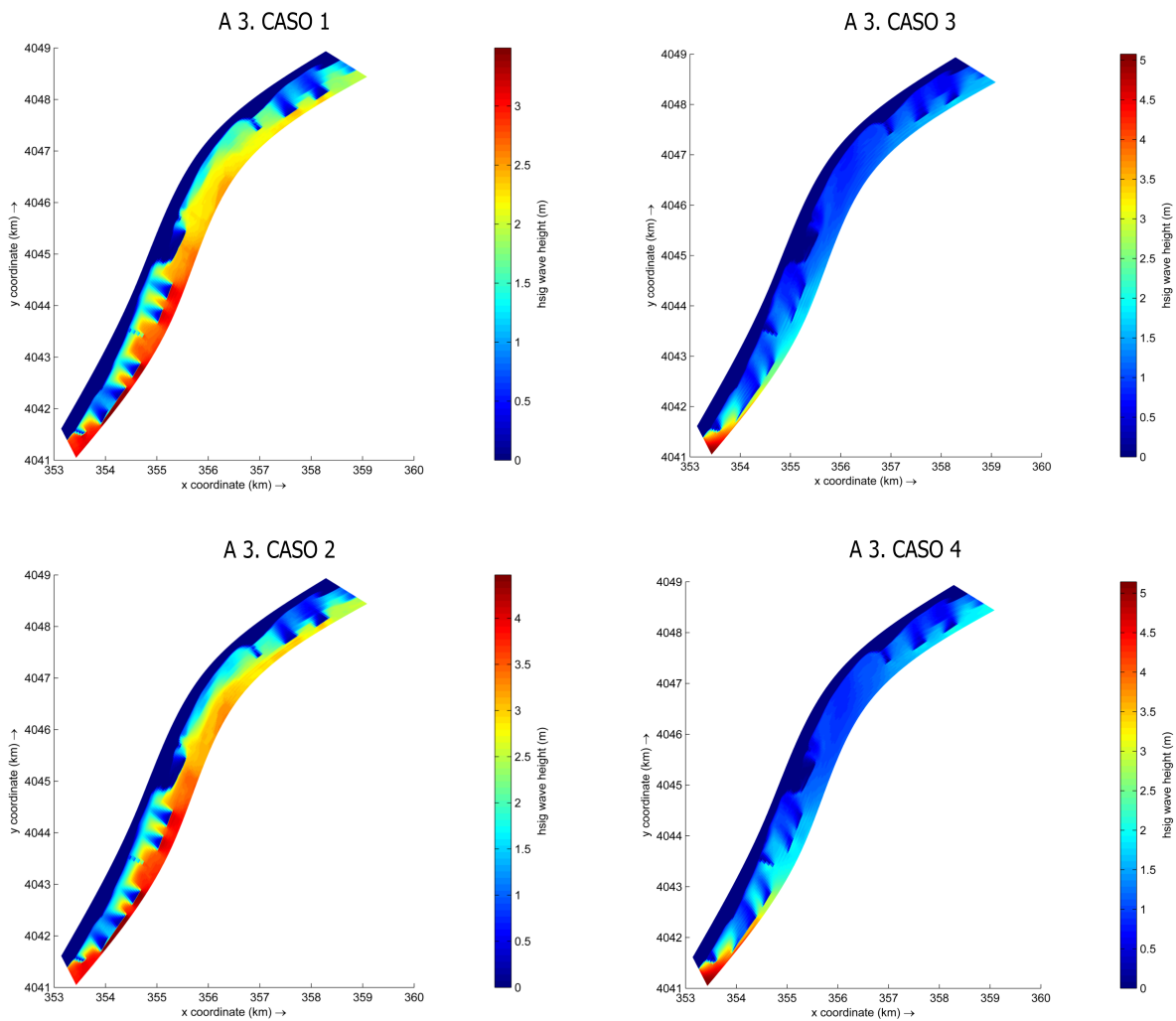


Figura 14: Propagación del oleaje en la alternativa 3.

	C1	C2	C3	GESTOR 2	
PESO	25,00 %	50,00 %	25,00 %		
A 1	4,12 %	7,63 %	26,81 %	11,55 %	4
A 2	15,79 %	48,41 %	46,84 %	39,86 %	1
A 3	26,37 %	15,03 %	4,41 %	15,21 %	3
A 4	7,43 %	6,75 %	7,59 %	7,13 %	5
A 5	46,29 %	22,19 %	14,36 %	26,25 %	2

Tabla 11: Análisis según el gestor 2.

	C1	C2	C3	GESTOR 3	
PESO	50,00 %	25,00 %	25,00 %		
A 1	4,12 %	7,63 %	26,81 %	10,67 %	4
A 2	15,79 %	48,41 %	46,84 %	31,71 %	1
A 3	26,37 %	15,03 %	4,41 %	18,04 %	3
A 4	7,43 %	6,75 %	7,59 %	7,30 %	5
A 5	46,29 %	22,19 %	14,36 %	32,28 %	2

Tabla 12: Análisis según el gestor 3.

Realizando el mismo proceso con el gestor 3 los valores obtenidos son los mostrados en la tabla 12. Al igual que en los dos primeros casos la alternativa más adecuada según el análisis mediante el gestor 3 es la alternativa 2 con un 32 %.

Del mismo modo, del análisis mediante el gestor 4 se obtiene que la alternativa más adecuada es la alternativa 3 con un 39 %, seguida por la alternativa 1. En este gestor se le ha dado mayor peso al impacto ambiental (Tabla 13).

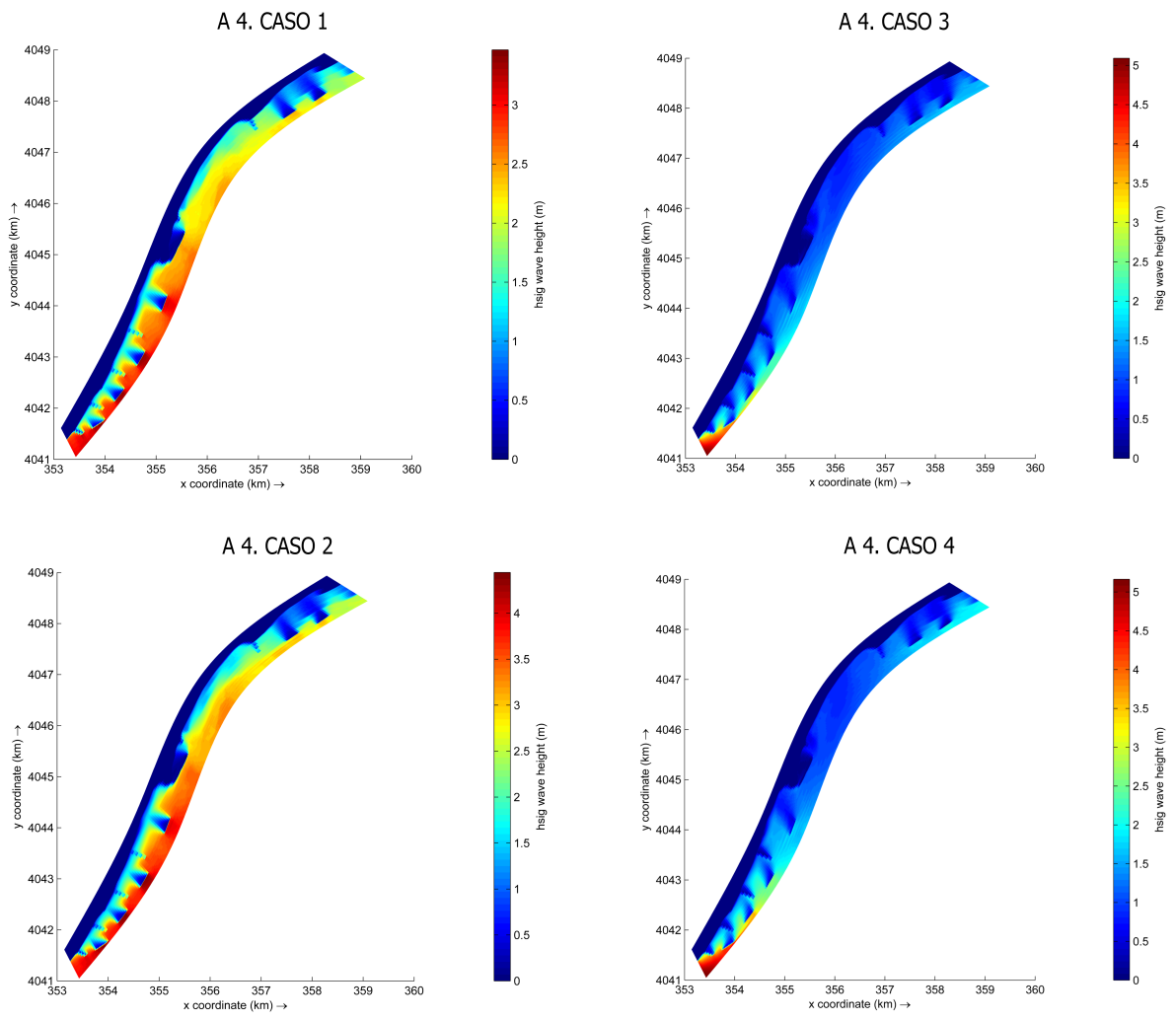


Figura 15: Propagación del oleaje en la alternativa 4.

	C1	C2	C3	GESTOR 4	
PESO	25,00 %	25,00 %	50,00 %		
A 1	50,00 %	25,00 %	25,00 %	31,25	2
A 2	4,12 %	7,63 %	26,81 %	16,34	3
A 3	15,79 %	48,41 %	46,84 %	39,47	1
A 4	26,37 %	15,03 %	4,41 %	12,56	4
A 5	7,43 %	6,75 %	7,59 %	7,34	5

Tabla 13: Análisis según el gestor 4.

	C1	C2	C3	GESTOR 5	
PESO	54,00 %	19,00 %	27,00 %		
A 1	4,12 %	7,63 %	26,81 %	10,91	4
A 2	15,79 %	48,41 %	46,84 %	30,37	2
A 3	26,37 %	15,03 %	4,41 %	18,28	3
A 4	7,43 %	6,75 %	7,59 %	7,34	5
A 5	46,29 %	22,19 %	14,36 %	33,09	1

Tabla 14: Análisis según el gestor 5.

Por último, mediante el análisis según el gestor 5 la alternativa más adecuada resulta ser la alternativa 5 con un 33 % (Figura 10), seguida de la alternativa 2 (Figura 7). Los pesos asignados en este gestor fueron establecidos de forma subjetiva (Tabla 14), realizando una ma-

triz de prioridades basada en la escala saaty, propia de los modelos de análisis multicriterio AHP.

Por último, si se establece la misma importancia para cada uno de los gestores, podemos concluir que la alternativa más adecuada será la alternativa 2.

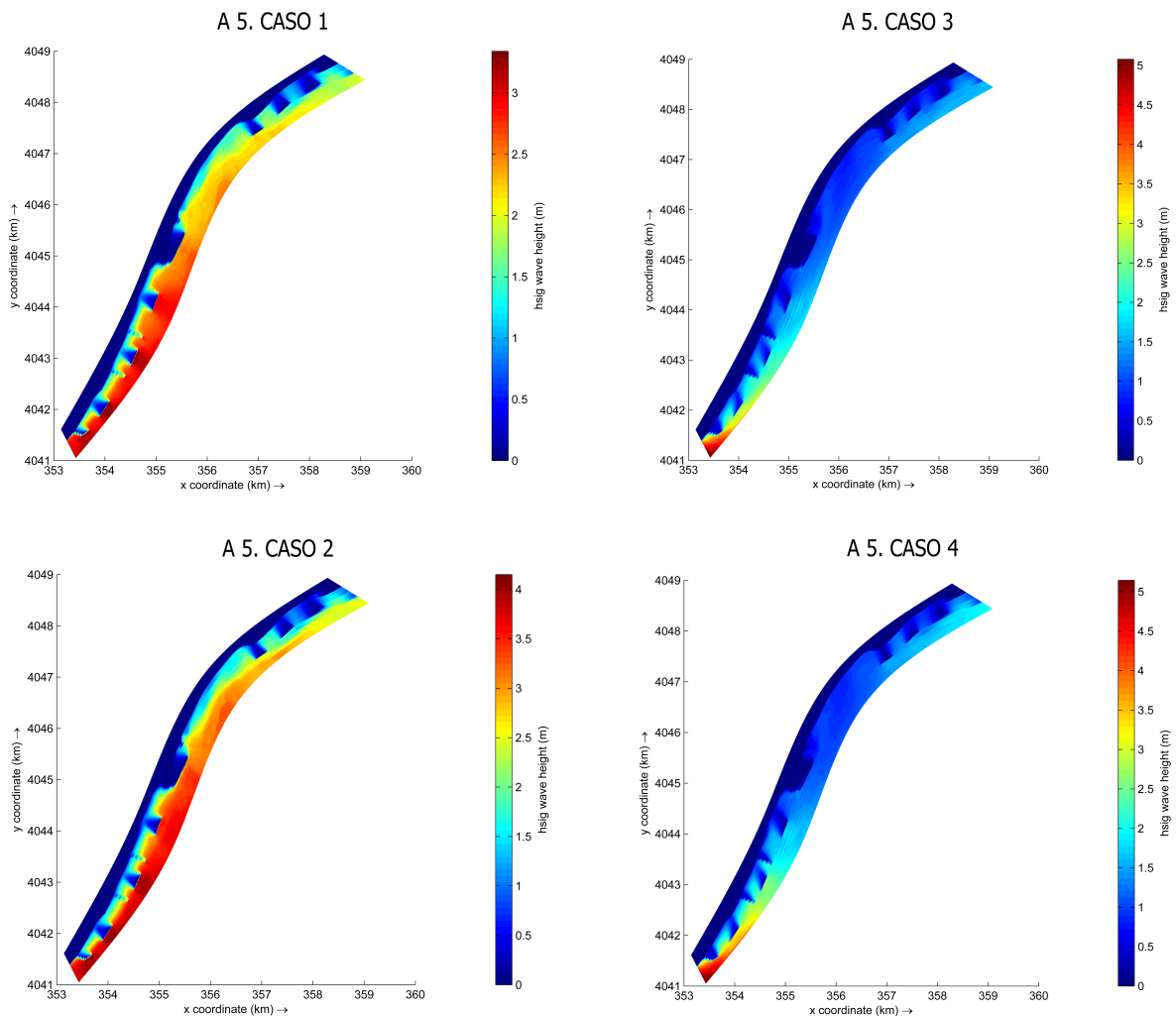


Figura 16: Propagación del oleaje en la alternativa 5.

5. Conclusiones

El tramo de costa objeto de estudio sufre problemas de erosión y retroceso de la línea de costa debido fundamentalmente a dos motivos. El primer motivo se debe a la falta de suministro de sedimento llegado a las playas de la zona de estudio, debido a las distintas obras de regulación construidas a lo largo el cauce del río Fuengirola las cuales impiden la alimentación del sistema deltaico formado en la desembocadura de por este río. El segundo motivo se debe a la construcción del puerto de Fuengirola, actuando éste como barrera para el transporte longitudinal del sedimento, generando depósitos de sedimentos al Noreste del mismo, los cuales han causado diversos problemas de aterramiento de la bocana del puerto, y produciendo a su vez problemas de erosión o

retroceso de la línea de costa al Suroeste del mismo.

Estos motivos provocan la alteración de la dinámica de las playas existentes en la zona de estudio, impidiendo su regeneración natural. Con el fin de poder solventar estos problemas de erosión, tras caracterizar la zona de estudio, se analizaron cinco posibles alternativas estructurales para la contención del sedimento.

Con los datos obtenidos del análisis multicriterio expuesto en el apartado anterior podemos concluir que la alternativa optima desde el punto de vista de los criterios efectividad de las obras, coste económico e impacto ambiental, ha resultado ser la alternativa 2 (Figura 7), constituida por seis espigones en forma de “T” dispuestos en los puntos más dañados del tramo de costa estudiado.

Esta alternativa ha resultado ser la primera en los gestores 1,2 y 3, segunda en el gestor 5 y tercera en el gestor 4. Si realizásemos un promedio de los pesos obtenidos para cada alternativa según cada uno de los gestores, la alternativa 2 sería la óptima con 31 % del total, seguida de la alternativa 5 con un 25 %.

6. Líneas de investigación futura

Uno de los criterios establecidos para el análisis multicriterio llevado a cabo en este TFM ha sido la efectividad, medida en términos de reducción de la energía de oleaje, por lo que en el futuro una posible línea de investigación podría ser la aplicación de alguna formulación para la obtención de las tasas de transporte en la zona.

A partir de estas tasas, se podría aplicar el modelo de una línea con el fin de determinar los cambios producidos en la línea de costa tras la construcción de cada alternativa. De este modo podría evaluarse el efecto de las estructuras planteadas en cada alternativa sobre la línea de costa actual, determinando nuevas zonas de playa seca generadas o posibles zonas de regresión de la línea de costa debidas al efecto de la construcción de estas obras.

Otro de los criterios que ha sido determinante para el análisis realizado ha sido el impacto medioambiental producido por las obras sobre el medio biótico, el cual se ha evaluado en función del impacto visual y el efecto barrera de las estructuras propuestas sobre el medio biótico, por lo que sería interesante cuantificar y analizar en detalle el desarrollo del medio biótico tras la construcción de las estructuras, determinando si incrementa o aminora las poblaciones existentes en la actualidad.

Referencias

- 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.
- Coleman, J.M., Wright, L., 1975. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. *Houston Geological Society*.
- Centro de Estudios de Puertos y Costas, C., 2017. Estrategia litoral. Ministerio de Medio Ambiente.
- Hallermeier, R.J., 1978. Uses for a calculated limit depth to beach erosion, in: *Coastal Engineering* 1978, pp. 1493–1512.
- Hallermeier, R.J., 1981. Seaward limit of significant sand transport by waves: an annual zonation for seasonal profiles. Technical Report. COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER FORT BELVOIR VA.
- 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.
- 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., Raffo-Caballero, J.M., Ortega-Sánchez, M., 2017. 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.
- 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.
- 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.
- de la Peña Olivas, J.M., 2007. Guía técnica de estudios litorales: manual de costas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Retamero, J.M.M., 2000. Análisis y soluciones a los problemas de aterramiento en el puerto de Fuengirola. Universidad de Granada.
- 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., 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.