Universidad de Cantabria

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente



TESIS DOCTORAL

Modelo de Evolución Morfodinámica de Zonas Costeras en Escalas de Medio a Largo Plazo

Presentada por: Lara Ruiz González

Dirigida por: Dr. Ernesto Mauricio González Rodríguez Dr. Raúl Medina Santamaría

Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria"

Febrero, 2016

"Mucha gente pequeña, en lugares pequeños, haciendo cosas pequeñas, puede cambiar el mundo"

Eduardo Galeano

Agradecimientos

Gracias al Ministerio de Educación por la concesión de la beca del Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU) para financiar el desarrollo de esta tesis, así como por la financiación para la estancia en Reino Unido.

Gracias a Mauricio por haber confiado en mi y brindarme esta oportunidad, al igual que por corregir y dirigir esta tesis. A él le debo un doble agradecimiento por dirigir, además, el Grupo de Ingeniería y Gestión de la Costa del IH Cantabria, del que tengo la suerte de formar parte.

Igualmente, gracias a Raúl por la dirección y corrección de esta tesis, así como por luchar diariamente por el Instituto, con una dedicación infinita, y por transmitirnos su pasión por la ingeniería de costas.

Gracias a cada una de las persona del Grupo de Ingeniería y Gestión de la Costa; Roland, Iñigo, Erica, Omar... Y un agradecimiento especial a Vero, por todos los detalles que ha tenido a lo largo de estos años, que son innumerables.

A Jara por su orientación, su implicación, toda la ayuda brindada y por enseñarme a mirar con otros ojos. ¡Mil gracias!

A Sole, por el interés en la tesis aun estando a miles de kilómetros, por su predisposición continua para echarme una mano y por la ayuda ofrecida.

Gracias a HR Wallingford por abrirme las puertas de su casa para que hiciera allí la estancia, especialmente a Alan y a Marion. Fue una gran experiencia.

No puedo dejar de nombrar a Belén, por su enorme ayuda en el arranque de la tesis y su orientación. El inicio hubiese sido infinitamente más difícil sin ella a mi lado.

Manu, Nabil, Imen, Chisco, Elvira, Andrés, Zeng, Pilar, Tamara,... por todos los momentos vividos estos años, dentro y fuera del Instituto, y por los que estoy segura que están por venir.

Y como no, gracias a mis niñas, Miri, Bea, Alba y Fátima, por la carcajada constante, toda esa energía positiva diaria y una amistad que vale su peso en oro. Jamás pensé que una tesis doctoral me fuera a hacer un regalo tan grande.

Gracias a toda la gente que forma parte de mi día a día y que me ha ayudado en este periodo de mi vida, de una u otra manera, y que es imposible nombrar aquí.

A Carol, por su amistad desde que tengo memoria y por tenerla siempre cerca, incluso cuando los kilómetros nos separaban.

Gracias a Loli, por brindarme siempre energía positiva y cuidarnos como si fuera nuestra propia madre.

A mis padres y a mi hermana, por creer siempre en mí y su apoyo incondicional absolutamente en todo, desde los grandes proyectos hasta las pequeñas locuras, da igual lo que sea, siempre estáis ahí. Soy realmente afortunada.

Y por último, y no menos importante, a mis dos chicos, Raúl y Valentino, por iluminar mi vida. Gracias por todo el amor del mundo, por la paciencia y comprensión, especialmente estos últimos meses tan duros, y por esta felicidad plena. Realmente no podría ser más feliz.

Índice

Agradecimientos	V
Índice	VII
Lista de figuras	XI

1.	Intr	oducción 1
	1.1.	Motivación del estudio
	1.2.	Estado del arte
		1.2.1. Modelos de evolución en el largo plazo o modelos de una línea 5
		1.2.2. Modelos de evolución que intentan ser aplicables en el medio-largo
		plazo
		1.2.2.1. Modelos de una línea con término de transporte trans- versal de sedimento
		1.2.2.2. Modelos híbridos
		1.2.2.3. Modelos de N líneas
		1.2.3. Modelos recientes de evolución de la línea de costa 10
		1.2.3.1. Modelo GenCade
		1.2.3.2. Modelo híbrido MIKE21 FM y modelo de una línea $\ .\ .\ .\ 14$
		1.2.3.3. Modelo híbrido Delf3D y UNIBEST
		1.2.4. Conclusiones del estado del arte
	1.3.	Objetivos de la tesis
	1.4.	Organización del documento
2.	Des	nrollo del modelo de evolución de medio-largo plazo; punto de
	part	ida 23
	2.1.	Introducción
	2.2.	Soluciones analíticas de los modelos de una línea
	2.3.	Modelo numérico de partida de evolución de la línea de costa a largo plazo
		(UnaLinea)
		2.3.1. Descripción del modelo UnaLinea
		2.3.2. Hipótesis y limitaciones fundamentales del modelo Una Line a $\ .$. 36
	2.4.	Conclusiones
3.	Mej	oras en el modelo de propagación del oleaje 41
	3.1.	Introducción

	3.2.	Model	o de propagación de oleaje monocromático	45
		3.2.1.	Descripción conceptual del modelo	45
		3.2.2.	Hipótesis y limitaciones fundamentales del modelo	49
		3.2.3.	Conclusiones	51
	3.3.	Valida	ción del modelo Oluca Monocromático	53
	3.4.	Compa	aración de los modelos de propagación de oleaje simplificados uti-	
		lizados	s en los modelos tradicionales de una línea y el modelo Oluca Mo-	
		nocron	nático	56
		3.4.1.	Introducción	56
		3.4.2.	Primeros trabajos de difracción y refracción-difracción	57
		3.4.3.	Difracción con el método aproximado de Goda et al. (1978) y Kraus (1984)	58
		3.4.4.	Oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción con el modelo GENESIS	59
		3.4.5.	Oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción con el modelo ONELINE	61
		3.4.6.	Casos de oleaje en rotura con el modelo Oluca-MC	64
		3.4.7.	Resultados de oleaje en rotura con el modelo Oluca-MC y compa-	
			ración con los modelos GENESIS y ONELINE	65
		3.4.8.	Conclusiones	72
	3.5.	Impler	nentación del modelo Oluca Monocromático	73
		3.5.1.	Definición de las mallas	73
		3.5.2.	Definición de perfiles y tratamiento de la batimetría	77
	3.6.	Criteri	io de rotura	81
4.	Mej	oras e	n el cálculo del balance de masas	85
	4.1.	Introd	ucción	85
	4.2.	Incorp	oración del término de gradiente longitudinal de altura de ola en	
		rotura	en la formulación del transporte de sedimento del CERC	86
	4.3.	Profur	ndidad de cierre variable en tiempo y espacio	88
	4.4.	Estabi	lidad del modelo	93
5.	Vari	iabilida	ad del perfil transversal de playa	99
	5.1.	Introd		99
	5.2.	Model	o de evolucion de la linea de costa por transporte transversal de	100
		5 9 1	Desarrollo teórico del modelo	100
		J.2.1.	 5.2.1.1. Correlación entre la energía del oleaje en equilibrio y la posición de la línea de costa 	101
			5.2.1.2. Modelo de evolución de la línea de costa en el medio plazo	>107
		5.2.2.	Hipótesis fundamentales del modelo	110
		5.2.3.	Validación del modelo	111
	5.3.	Impler	nentación del modelo de evolución del perfil de playa	114
6.	Vali	dación	a del modelo final de evolución de medio-largo plazo en la	ı
	play	ra de N	Nova Icaria	119
	61	Introd	ucción	119
	0.1.	mnou		110

	6.3.	Forzamientos del modelo: oleaje	125
	6.4.	Parámetros de configuración del modelo IH-MOEC	126
	6.5.	Resultados obtenidos con IH-MOEC y comparación con otros modelos de	
		una línea	129
	6.6.	Conclusiones	137
7	Con	nclusiones y futuras líneas de investigación	139
••	Con	interiores y futuras filicas de filices igación	100
	7.1.	Conclusiones	139
	7.2.	Futuras líneas de investigación	143

A. Validación del modelo Oluca Monocromático	149
A.1. Introducción	. 149
A.2. Fenómenos de propagación con solución analítica conocida	. 149
A.3. Fenómenos de propagación (refracción-difracción) en un ensayo físico	. 160

Bibliografía

167

Lista de figuras

1.1.	Playa de El Pozuelo en Granada, España, en junio de 2009 (izquierda) y enero de 2010 (derecha). (Fuente: Dirección General de Costas)	2
1.2.	Clasificación de los modelos de evolución de playas por escalas espaciales y temporales. (Fuente: Hanson et al., 2003)	4
1.3.	Representación esquemática de una playa con un modelo de N líneas. (Fuente: Hanson and Larson, 2000)	10
1.4.	Representación esquemática de la interacción de los elementos morfológi- cos de una ensenada mareal. (Fuente: Frey et al., 2012)	13
1.5.	Representación esquemática de un muro paralelo a la costa	19
2.1.	Representación esquemática de una playa en los modelos de una línea. (Fuente: Hanson and Kraus, 1989)	28
2.2.	Representación esquemática de un tramo de línea de costa en forma de diferencias finitas. (Fuente: Horikawa, 1988)	30
2.3.	Definición de los ángulos del oleaje en rotura. (Fuente: Hanson and Kraus, 1989)	35
3.1.	Condiciones de contorno laterales abiertas.(Fuente: GIOC, 2001)	46
3.2.	Esquema general del acoplamiento de los modelos Oluca-MC y UnaLinea.	53
3.3.	Esquema de la difracción generada por un dique exento en fondo uniforme. (Fuente: Dean and Dalrymple, 1991)	58
3.4.	Delimitación de zonas en el área sometida a la influencia de un dique exento. (Fuente: Requejo, 2005)	60
3.5.	Representación esquemática del cálculo del oleaje en una zona sometida a la influencia de un dique exento en el modelo GENESIS. (Fuente: Hanson and Kraug. 1080)	61
3.6.	Frentes de oleaje en áreas sometidas a la influencia de un dique exen- to, determinados con los métodos convencionales (izquierda), frente a lo	01
	propues to por Dabees (2000) (derecha). (Fuente: Dabees, 2000) $\ . \ . \ . \ .$	62
3.7.	Representación esquemática del método propuesto para el cálculo de la refracción-difracción en áreas sometidas a la influencia de diques exentos.	
9 0	(Fuente: Requejo, 2005)	64
3. 8.	Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los mo- delos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 1	ßß
3.9.	Ángulo del oleaje en rotura establecido con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONE-	00
	LINE para la Configuración 1 y el Caso 1. (Positivo sentido antihorario).	66

3.10.	Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los mo- delos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 2.	67
3.11.	Ángulo del oleaje en rotura establecido con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONE-	07
3.12.	LINE para la Configuración I y el Caso 2. (Positivo sentido antihorario) Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los mo- delos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE	67
3.13.	para la Configuración 1 y el Caso 3. Angulo del oleaje en rotura establecido con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONE-	68
3.14.	LINE para la Configuración 1 y el Caso 3. (Positivo sentido antihorario) Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los mo- delos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE	68
3.15.	Ángulo del oleaje en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONE-	69
3.16.	LINE para la Configuración 2 y el Caso 1. (Positivo sentido antihorario) Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los mo- delos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE	69
3.17.	para la Configuración 2 y el Caso 2	70
3.18.	LINE para la Configuración 2 y el Caso 2. (Positivo sentido antihorario) Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los mo- delos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE	70
3.19.	para la Configuración 2 y el Caso 3	71
	LINE para la Configuración 2 y el Caso 3. (Positivo sentido antihorario)	71
3.20.	Malla de referencia del modelo de oleaje Oluca-MC. (Fuente: GIOC, 2001)	74
3.21.	Malla de cálculo del modelo IH-MOEC	75 77
3.23.3.24.	Evolución durante cinco meses de la batimetría	78
3.25.	propagación erróneo	80
	del oleaje	84
4.1.	Isolíneas y línea de rotura con un dique exento e incidencia del oleaje normal a la costa	91
4.2.	Profundidad de cierre variable con un dique exento e incidencia del oleaje normal a la costa	92
4.3.	Evolución de la línea de costa con un espigón corto y valor de $ndt=1$.	97
4.4.	Evolución de la línea de costa con un espigón corto y valor de ndt=2. \therefore	97
5.1.	Esquema del perfil de equilibrio del modelo transversal. (Fuente: Jara et al., 2015)	103

5.2.	Esquema de la envolvente de perfiles de equilibrio. (Fuente: Jara et al.,	
	$2015)\ldots$. 105
5.3.	Esquema de la curva de energía de equilibrio. (Fuente: Jara et al., 2015)	. 107
5.4.	Modelo dinámico de evolución de la línea de costa a corto plazo para	100
	oleaje estacionario. (Fuente: Jara et al., 2015) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$. 109
5.5.	Situación de la playa de Nova Icaria. (Fuente: Martinez, 2013)	. 112
5.6.	Resultados del modelo de evolucion para el periodo 2005 y 2006 en Nova	
	Icaria, junto con las posiciones medidas y la altura de ola en rotura.	119
57	(Fuente: Jara et al., 2013)	. 110
0.1. F 0	Modelo de permi de equilibrio del caso de estudio	. 110
ə.ð.	curva de energia de equilibrio del modelo de transporte transversal de sedimento.	. 117
5.9.	Evolución de la línea de costa con y sin transporte transversal de sedi- mento (panel superior), junto a la energía del oleaje (panel inferior)	. 118
6.1.	Localización de la playa de Nova Icaria y la Estación Litoral de Barcelona	
	(ARGUS). (Fuente: adaptada de Google Earth)	. 121
6.2.	Video cámara del sistema ARGUS (panel superior) y fotografías tomadas	
	por sus 5 video-cámaras. (Fuente: Martínez, 2013)	. 122
6.3.	Imagen rectificada de la playa de Nova Icaria y línea de costa digitalizada	
	(en azul)	. 123
6.4.	Esquema del proceso de rectificación de una fotografía. (Fuente: Turki,	
	2011)	. 124
6.5.	Validación del oleaje de la base de datos DOW con la boya de Barcelona de la red Costera del OPPE (año 2005)	. 126
6.6.	Malla de cálculo de Oluca-MC y ejes de referencia del modelo IH-MOEC	
	(en rojo)	. 127
6.7.	Evolución de la línea de costa promedio a lo largo de un mes (panel	
	superior) bajo forzamientos variables (panel inferior)	. 130
6.8.	Propagación del oleaje promedio de los años 2001-2007 en Nova Icaria	. 131
6.9.	Línea de costa de equilibrio en Nova Icaria bajo forzamientos constantes.	. 132
6.10	. Evolución de la línea de costa hacia el equilibrio con el modelo tradicional	
	de una línea.	. 134
6.11	. Error cuadrático medio, $RMSE$, obtenido entre la línea de costa de equi-	
	librio medida y modelada con IH-MOEC empleando distintos valores de	
	$K_1 \ldots \ldots$. 135
6.12	. Línea de costa de equilibrio en Nova Icaria bajo forzamientos constantes,	100
	$con K_1 calibrado. \dots \dots$. 136
A.1.	Esquema de una batimetría recta y paralela. (Fuente: GIOC, 2001)	. 150
A.2.	Fenómeno de asomeramiento sobre una pendiente. (Fuente: GIOC, 2001)	. 151
A.3.	Fenómeno de refracción por fondo. Coeficiente de propagación total y	
	dirección de propagación en función de kh . Ángulos de incidencia de 15° y 30°. (Fuente: GIOC, 2001)	. 152
A.4.	Fenómeno de refracción por fondo. Coeficiente de propagación total v	
	dirección de propagación en función de kh . Ángulos de incidencia de 45° ,	
	50° y 60°. (Fuente: GIOC, 2001) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$. 153
A.5.	Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica.	
	Angulo de incidencia -30°. (Fuente: GIOC, 2001) $\ldots \ldots \ldots \ldots$. 155

A.6. Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica.
Ángulo de incidencia -15°. (Fuente: GIOC, 2001)
A.7. Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica.
Ángulo de incidencia 0°. (Fuente: GIOC, 2001) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 157$
A.8. Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica.
Ángulo de incidencia 15°. (Fuente: GIOC, 2001) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 158$
A.9. Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica.
Ángulo de incidencia 30° . (Fuente: GIOC, 2001)
A.10.Resultados para el test de rotura. Perfil de altura de ola en función de la
distancia a la costa. (Fuente: GIOC, 2001) $\ldots \ldots 161$
A.11.Batimetría del ensayo de Berkhoff (1982) y perspectiva tridimensional.
(Fuente: GIOC, 2001) $\ldots \ldots 163$
A.12.Comparación de resultados experimentales y numéricos para las secciones
1 y 2. (Fuente: GIOC, 2001)
A.13.Comparación de resultados experimentales y numéricos para las secciones
3, 4 y 5. (Fuente: GIOC, 2001) $\dots \dots \dots$
A.14.Comparación de resultados experimentales y numéricos para las secciones
6, 7 y 8. (Fuente: GIOC, 2001)

A mis cinco pilares; mis padres, Raquel, Raúl y Valentino

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del estudio

Las zonas costeras han sido siempre muy demandadas por el hombre desde la Antigüedad, tanto para su explotación como para su ocupación, yendo en constante aumento hasta nuestro días. Este hecho se ha visto especialmente incrementado en las últimas décadas debido a la explotación turística, la cual genera grandes beneficios económicos al año.

Las playas son, dentro de las áreas costeras, las que se han visto más afectadas por dicha afluencia humana, que junto con actuaciones inadecuadas llevadas a cabo en las mismas, ha originado que éstas pierdan una o varias de sus tres funciones fundamentales (GIOC, 2003).

La primera de sus funciones es la disipación y reflexión de la energía del oleaje que incide sobre ellas, protegiendo de esta manera la costa y, más concretamente, las infraestructuras existentes en el trasdós de las playas. Hay que destacar que las playas realizan esta función modificando su morfología.

Asimismo, las playas son el hábitat de numerosas especies de flora y fauna, altamente amenazadas por la presión a la que se ven sometidas en la actualidad.

Por último, su tercera función fundamental es la de uso residencial y lúdico, puesto que son el escenario de numerosas actividades de ocio, tanto acuáticas como terrestres, así como de actividades de gran importancia económica (pesca, navegación, turismo, etc.) Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), dos tercios de la población mundial vive en ciudades costeras, pronosticando, además, que este número continuará aumentando rápidamente en los próximos años. Todo esto ha dado lugar a la demanda de un mejor entendimiento del comportamiento de las playas y una mejora de las herramientas de análisis de los procesos costeros para el estudio de las mismas, con el objetivo de poder diseñar medidas de mitigación y protección adecuadas a cada problema concreto, entre ellos los problemas de erosión e inundación (véase figura 1.1).



Figura 1.1: Playa de El Pozuelo en Granada, España, en junio de 2009 (izquierda) y enero de 2010 (derecha). (Fuente: Dirección General de Costas)

Antes del gran avance de los ordenadores, especialmente en cuanto a potencia y velocidad, los cambios en las playas se predecían en base a la experiencia en casos de estudio similares dentro del campo de la ingeniería costera, y en estimaciones más cualitativas que cuantitativas. Sin embargo, gracias a la continua investigación para mejorar la comprensión de los procesos físicos costeros y el rápido avance tecnológico, se inició el desarrollo de modelos numéricos para simular los procesos y los cambios topobatimétricos experimentados por las playas bajo la acción de las principales dinámicas que actúan sobre ellas (oleaje, corrientes y viento). Estos modelos numéricos van desde modelos sencillos unidimensionales a sofisticados modelos tridimensionales.

El uso del modelado numérico para la predicción de la evolución morfodinámica de playas, ha demostrado ser una herramienta potente a la hora de seleccionar el diseño de las medidas de protección más apropiado ante una problemática determinada. Según Gravens et al. (1991), los modelos proporcionan el marco para desarrollar los problemas de protección de la costa y sus posibles soluciones, organizar la recogida y análisis de datos relevantes y evaluar de manera eficiente diferentes alternativas de diseño, optimizando el diseño seleccionado.

De esta manera, los modelos numéricos han ido complementando, e incluso sustituyendo, al modelado físico progresivamente, debido a los problemas asociados a estos últimos, tales como los efectos del modelado (entre los que se encuentran los efectos de escala), su alto coste económico, el elevado tiempo que lleva la preparación de los ensayos y la necesidad de instalaciones adecuadas para llevar a cabo los mismos. Dada la complejidad de los procesos costeros, los cuales no pueden ser representados enteramente por fórmulas deterministas, y a la alta incertidumbre en los datos de oleaje y transporte de sedimentos (Kamphuis, 1999), se requiere de numerosas ejecuciones del modelo numérico para su análisis de sensibilidad y para la calibración y validación del mismo, lo que complica la aplicación práctica de los modelos más sofisticados (Dabees, 2000).

Como se ha indicado, los proyectos de playas, y por tanto los modelos numéricos, se basan fundamentalmente en el análisis de la interacción entre el sedimento de las playas y las numerosas dinámicas que actúan sobre éstas, tanto marinas (oleaje, corrientes, aportaciones fluviales, variaciones del nivel medio, ondas infragravitatorias,...) como atmosféricas (viento, presión,...). De esta manera, las dinámicas modifican la forma de las playas al mover el sedimento. Cada una de las diferentes dinámicas tiene su propia escala espacial y temporal de actuación, generando una respuesta en la playa en dichas escalas de variabilidad. Se debe tener en cuenta, además, que todos los procesos hidrodinámicos y sedimentarios que ocurren en una playa son tridimensionales.

Debido a esta variabilidad de escalas y tridimensionalidad de los procesos involucrados, no existen en la actualidad modelos de predicción de la evolución de las playas que puedan aplicarse en todo el rango de escalas y puedan utilizarse para estudiar cualquier problema que se presente. Por lo que los modelos desarrollados para el estudio de la hidrodinámica, los procesos de transporte y los cambios de forma de la playa, son válidos en escalas acotadas en un rango espacio-temporal determinado.

En función de la escala temporal de aplicación del modelo, están los modelos de corto plazo (horas-días), medio plazo (días-años) y largo plazo (años-décadas). Mientras que en función de la escala espacial se distinguen los modelos de pequeña escala (decenas de metros), media escala (centenas de metros) y gran escala (kilómetros).

En cuanto a la tridimensionalidad, normalmente se establecen dos direcciones principales que corresponden al perfil y a la planta de la playa.

Esto indica que no existe una única manera de clasificar a los modelos de predicción de evolución de playas, sino que en realidad existen numerosas clasificaciones en función del criterio que se elija; por su naturaleza, exactitud, escalas de aplicación, dirección principal de los procesos involucrados, etc.

Con carácter ilustrativo, en la figura 1.2 se muestra una de las clasificaciones existentes de los modelos de evolución de playas por escalas espaciales y temporales. En concreto la clasificación de Hanson et al. (2003), la cual toma como referencia la propuesta por Hanson and Kraus (1989).



Figura 1.2: Clasificación de los modelos de evolución de playas por escalas espaciales y temporales. (Fuente: Hanson et al., 2003)

Hay un creciente conocimiento de que los cambios en los sistemas costeros son forzados por procesos a gran escala y realizados en escalas temporales relativamente largas (décadas). Estos cambios, originados tanto por causas naturales (erosión causada por el aumento del nivel del mar) como por causas antropogénicas (regeneración de una playa), subrayan la importancia de adecuar las herramientas cuantitativas al análisis y predicción de los cambios en estas escalas (Hanson et al., 2003).

Si bien se dispone de herramientas específicas para el estudio de la evolución de playas en el corto-medio plazo y en el largo plazo, hay un vacío en lo que se refiere a modelos de evolución morfodinámica en el medio-largo plazo. La mayor parte de los modelos existentes que intentan ser aplicables en escalas de medio a largo plazo se basan en modelos unidimensionales de una línea (one-line models), donde el término "una línea" se refiere a la línea de costa. Estos modelos de una línea han demostrado tener una gran aplicabilidad en la predicción de los cambios de la costa a largo plazo, sin embargo, la mayoría de los modelos existentes presentan diversas limitaciones que condicionan su amplia utilización.

Una de las herramientas necesarias en la Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC) para evitar o solucionar problemas de erosión e inundación, es precisamente una herramienta fiable para predecir la evolución de la línea de costa en el medio-largo plazo, estando la presente tesis enmarcada dentro de este campo.

1.2. Estado del arte

Tanto en el ámbito de la ciencia como de la ingeniería, se ha analizado la evolución de la línea de costa a largo plazo empleando diferentes técnicas (Dean and Dalrymple, 2002):

- Mediante medidas y análisis de las líneas de costa históricas.
- Por medio del uso de los modelos de una línea, basados en la ecuación de conservación de sedimento.
- A través de la aplicación de modelos morfodinámicos costeros.
- Gracias al empleo de modelos físicos.

El método de análisis de datos estadístico es el más preciso a la hora de caracterizar el cambio de la línea de costa, pero no permiten evaluar cambios en el sistema debido a actividades ingenieriles o cambio climático. Los modelos morfodinámicos costeros requieren un gran coste computacional, no siendo adecuados en escalas espaciales y temporales grandes. Por su parte, los modelos físicos son adecuados a escalas locales, pero excesivamente caros para escalas muy grandes. Por lo que los modelos de una línea siguen siendo los idóneos a la hora de evaluar los cambios de la línea de costa, originados tanto por causas naturales como antropogénicas.

1.2.1. Modelos de evolución en el largo plazo o modelos de una línea

Según la dirección del transporte de sedimento causado por el oleaje, éste se clasifica en dos tipos; transporte longitudinal, el que se realiza a lo largo de la línea de costa, y transporte transversal, el que tiene lugar perpendicular a la misma.

En las predicciones a largo plazo, la mayor parte del cambio de la línea de costa viene originado por el transporte longitudinal. Por ello, en los modelos de una línea, o modelos de evolución de la planta de las playas en el largo plazo, la evolución de la playa se representa por el cambio de la línea de costa debido a variaciones del transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la costa y en el tiempo.

La base de los modelos de una línea es asumir que el perfil de playa no cambia de forma y sólo se traslada paralelamente a sí mismo hasta la profundidad de cierre. Esto hace que no puedan ser utilizados en escalas temporales más pequeñas, en las que es necesario tener en cuenta la variabilidad experimentada por el perfil de playa. Por tanto, un modelo de línea de costa es un modelo de predicción numérica basado en la ecuación de continuidad del sedimento y en una ecuación para el transporte longitudinal del mismo.

Este tipo de modelos parten de la ecuación de conservación de la masa de sedimento dentro del flujo turbulento (Abbott and Price, 1994). Partiendo de ella y tras una serie de cálculos, se llega a la ecuación básica de los modelos de una línea:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \pm q \tag{1.1}$$

siendo A el área transversal del perfil de playa, Q el transporte longitudinal de sedimento (volumen total por unidad de tiempo) y q un posible aporte (+) o pérdida (-) de sedimento (volumen total por unidad de longitud y por unidad de tiempo).

El modelo de una línea se debe emplear para la predicción espacial a media y gran escala. Este modelo es especialmente adecuado para determinar el efecto de espigones, aportaciones puntuales de sedimento, etc. Sin embargo, no es capaz de describir la formación del perfil de playa ni determinar, por tanto, los cambios estacionales del mismo, así como la erosión originada por muros de protección o cualquier otro cambio que involucre transporte transversal de sedimento. De igual manera, no determina las formas de media escala como megacusps o cusps, al no quedar definidas por las ecuaciones del transporte longitudinal empleadas.

El primer modelo analítico de evolución de línea de costa lo desarrolló Pelnard-Considère (1956). Posteriormente, y en base al mismo, se han desarrollado diferentes modelos numéricos de una línea, entre los que destacan el modelo GENESIS (Hanson and Kraus, 1989) y el modelo ONELINE (Dabees and Kamphuis, 1997, 1998; Kamphuis, 1993).

La mayoría de los modelos de una línea emplean las siguientes hipótesis básicas (Hanson and Kraus, 1989):

• Se considera que el perfil de playa adopta una forma invariable en el tiempo y en el espacio, por lo que, como ya se ha indicado, estos modelos no se pueden emplear en escalas de medio plazo al no considerar la variabilidad experimentada por el perfil. Como consecuencia, no se pueden reproducir las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, entre otros fenómenos. Estos modelos son, por tanto, aplicables en zonas de estudio donde el perfil de playa se ajusta a su forma de equilibrio (puede haber variaciones estacionales, pero los cambios transversales)

deben compensarse a largo plazo). Asimismo, es fundamental considerar la variabilidad espacial del perfil en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los predominantes, para poder representarlos adecuadamente.

- Los límites entre los que se traslada el perfil de playa también son invariables en el tiempo y en el espacio. Según Hanson and Kraus (1989), el límite en la costa viene marcado por la elevación de la berma y en el mar por la profundidad de cierre. Las consecuencias de esta hipótesis son las mismas que las del punto anterior.
- La arena es transportada a lo largo de la costa por la acción de la rotura del oleaje y las corrientes longitudinales.
- Se ignora la estructura detallada de la circulación costera.
- Hay una tendencia a largo plazo en la evolución de la línea de costa.
- Existe cantidad suficiente de arena, asumiendo que el suministro de arena es infinito.

El capítulo 2 está dedicado a una descripción más detallada de estos modelos de evolución de línea de costa a largo plazo.

1.2.2. Modelos de evolución que intentan ser aplicables en el mediolargo plazo

La mayor parte de los modelos de evolución que intentan ser aplicables en el medio-largo plazo se basan en la incorporación de la variabilidad del perfil de playa a modelos de una línea (descritos brevemente en el apartado anterior). Estos modelos se han clasificado a su vez en tres grupos distintos: modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento, modelos híbridos y modelos de N líneas (Requejo, 2005; Requejo et al., 2008).

1.2.2.1. Modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento

Como se ha señalado, para desarrollar una herramienta válida en el medio plazo se debe incorporar a los modelos de una línea la variabilidad del perfil de playa. Con esta finalidad, Dabees and Kamphuis (1997, 1998) modificaron en el modelo ONELINE la ecuación básica de los modelos de una línea (véase ecuación 2.11), sumando al término que representa el aporte o pérdida de sedimento constante por unidad de longitud (q) un término de transporte transversal de sedimento. El transporte fue dividido en transporte por fondo y transporte por suspensión y se calculó con la formulación de Bailard (1981).

Por su parte, Hanson et al. (1997) y Hanson and Larson (1998) modificaron la misma ecuación (ecuación 2.11) de manera que el término q representa directamente el transporte transversal de sedimento, para incorporar, de este modo, las variaciones estacionales de la línea de costa. Dicho transporte se calculó con una expresión parecida a la propuesta por Horikawa (1988).

En ninguno de los dos intentos se tuvieron en cuenta los cambios en la forma del perfil de playa debido a la redistribución del sedimento dentro del mismo, concluyendo que este tipo de modelos, al incluir el término de transporte transversal de sedimento como una condición de contorno, tratan de resolver el problema únicamente de una manera artificial.

1.2.2.2. Modelos híbridos

La base de este tipo de modelos es acoplar un modelo de una línea con un modelo de evolución del perfil de playa.

Uno de los primeros modelos híbridos fue el propuesto por Hashimoto and Uda (1980), en el que se aplicaron las autofunciones empíricas para predecir la evolución del perfil de playa, estableciendo la continuidad del material del fondo con el modelo de una línea.

Diez años después, Larson et al. (1990) presentaron el modelo híbrido 3DBEACH, el cual acopla el modelo de una línea GENESIS con el modelo de evolución de perfil SBEACH (Larson and Kraus, 1989). En este modelo híbrido el transporte transversal y el transporte longitudinal son tratados de manera independiente, lo que reduce el coste computacional considerablemente.

Shimizu et al. (1996) desarrollaron el modelo híbrido 3D-SHORE en el que se acopla un modelo de una línea, para determinar la evolución de la línea de costa, a un modelo de evolución de playa tridimensional, que determina la batimetría y la evolución de la morfología de la playa.

En el Instituto Hidráulico Danés (DHI) se ha desarrollado un modelo híbrido dentro del paquete LITPACK (DHI, 2001), el cual combina diversos modelos numéricos deterministas para el cálculo de la posición de la línea de costa. Un conjunto de módulos determina la hidrodinámica y el transporte de sedimento mediante un esquema en 2DH, mientras que el módulo LITLINE, basado en la teoría de una línea, evalúa la posición de la línea de costa a partir del transporte calculado por los otros módulos del paquete y resolviendo la ecuación de conservación de sedimento. El módulo de oleaje es un modelo de asomeramiento y refracción que propaga el oleaje hasta la rotura, pudiendo incluir además la interacción oleaje-corriente. Al estar acoplado a un módulo de desarrollo del perfil de playa, puede estimar la respuesta del perfil ante las tormentas.

Del estudio de los modelos híbridos se deduce que el acoplamiento de dos modelos es una buena herramienta para disponer de un modelo de evolución en el medio-largo plazo. No obstante, los modelos existentes presentan diversos problemas que limitan su utilización. El empleo de modelos 2DH que tratan de modelar procesos físicos de pequeña escala, como los que usan los modelos 3D-SHORE y el incluido en el paquete LITPACK, no son muy idóneos a la hora de calcular la evolución de la línea de costa a largo plazo, puesto que pueden llegar a desestabilizarse y generar soluciones físicamente imposibles. Asimismo, la interacción entre la planta y el perfil en modelos como el 3DBEACH es demasiado débil, no representando la interacción real que existe en las playas. Sin embargo, a pesar de las limitaciones del modelo 3DBEACH, su uso es más adecuado, puesto que emplea un modelo de evolución de perfil tendente al equilibrio.

1.2.2.3. Modelos de N líneas

En este tipo de modelos se hace un seguimiento de la línea de costa y de N contornos, conectados entre sí a través de un intercambio de transporte transversal de sedimento, el cual les lleva hacia una configuración de equilibrio. En la figura 1.3 se ve la representación esquemática de una playa con un modelo de N líneas, tomada de Hanson and Larson (2000).



Figura 1.3: Representación esquemática de una playa con un modelo de N líneas. (Fuente: Hanson and Larson, 2000)

En la mayoría de este tipo de modelos, el transporte transversal de sedimento se calcula con base en la diferencia entre el perfil existente y el perfil de equilibrio. Estos modelos parten de la teoría de una línea y tratan de aproximarse a una descripción tridimensional de la evolución de la playa. Describen cambios en la topografía del fondo causados por la combinación del transporte transversal y longitudinal neto, bajo hipótesis simplificadoras que limitan la forma del perfil.

Bakker (1968) desarrolló el primer modelo de este tipo, que fue un modelo de dos líneas. Posteriormente, Perlin and Dean (1979, 1983) desarrollaron un modelo de N líneas para determinar el cambio de los contornos de la playa. Otros ejemplos de modelos de N líneas son el modelo NLINE, realizado por Dabees and Kamphuis (1999, 2000), y el modelo INLINE, propuesto por Hanson and Larson (2000).

Del análisis de los modelos de N líneas se concluye que su coste computacional es mucho mayor que el de los modelos de una línea. Además, no se han empleado con frecuencia en aplicaciones ingenieriles, puesto que el intercambio de transporte transversal de sedimento no se ha incluido mediante expresiones fiables cuantitativamente. En principio, es un modelo más detallado que el modelo de una línea, pero requiere mucha más calibración que este último, no proporcionando mucha información adicional a la ya requerida para calibrar el modelo. No obstante, este tipo de modelos podría llegar a aplicarse, inicialmente, en escalas temporales de meses a décadas y escalas espaciales de unos pocos cientos de metros a cientos de kilómetros.

1.2.3. Modelos recientes de evolución de la línea de costa

1.2.3.1. Modelo GenCade

Las escalas espaciales y temporales de los proyectos costeros exigen modelado regional para abordar todas las interacciones y consecuencias de las actividades ingenieriles, así como la amplia escala de influencia de los procesos naturales (Larson et al., 2002).

Bajo esta premisa, se desarrolló el modelo GenCade (Frey et al., 2012), el cual es un modelo de una línea desarrollado para acoplar dos modelos de línea de costa previos; el modelo Cascade, de escala regional, para cálculos a nivel de planificación (Connell and Kraus, 2006; Larson and Kraus, 2003; Larson et al., 2006a,b, 2003), y el modelo GENESIS para cálculos a nivel de diseño (Gravens et al., 1991; Hanson and Kraus, 1989), mejorando de esta manera las capacidades de ambos. Esto ha sido posible al introducir una malla de resolución variable.

Pese a que se habían hecho diferentes estudios con modelos de una línea para analizar la evolución de la línea de costa en modelos físicos y en condiciones de prototipo, únicamente Hanson and Kraus (1986a); Kraus et al. (1984); Kraus and Larson (1988) intentaron

emplear este tipo de modelos como una herramienta ingenieril para predecir la evolución de la línea de costa en una playa real. Matsuoka and Ochi (1979) llevaron a cabo una de las primeras aplicaciones en Oarai, una playa de Japón. Con base en los datos de este caso real, Hanson and Kraus (1986a,b); Kraus et al. (1984); Kraus and Harikai (1983) desarrollaron un modelo sofisticado de evolución de línea de costa para simular, específicamente, las condiciones en Oarai. Dicho modelo fue posteriormente reformulado de una manera generalizada dando lugar al modelo numérico GENESIS (Hanson and Kraus, 1989), logrando de este modo que fuera aplicable a una playa abierta arbitraria. Hasta la actualidad, éste ha sido el modelo de una línea más utilizado gracias a su generalidad.

Es importante señalar que el modelo GENESIS representa de una manera simplificada el oleaje en las zonas donde los procesos de refracción-difracción, conjuntamente, son importantes (diques exentos, salientes, cabos,...), dando lugar en estos casos, a una predicción de la línea de costa no del todo acertada. Sin olvidar, además, las limitaciones inherentes a todo modelo de una línea, como por ejemplo no considerar la variabilidad experimentada por el perfil de playa, con las restricciones que esto conlleva.

Por su parte, el modelo Cascade es un modelo numérico desarrollado para simular la evolución costera y el transporte de sedimento regional a largo plazo. El nombre Cascade hace referencia al concepto de abarcar diferentes escalas temporales y espaciales, que van respectivamente desde el largo plazo al corto plazo y desde escalas grandes a escalas pequeñas, en las cuales tienen lugar los procesos físicos que causan el cambio de la morfología costera a largo plazo y que deben, por tanto, ser simulados. El acoplamiento entre la evolución de la costa a diferentes escalas se lleva a cabo por medio de un proceso de cascada, a través del cual la evolución en una cierta escala aporta las condiciones para la evolución en la escala adyacente menor.

La primera versión del modelo Cascade calcula el transporte longitudinal de sedimento (describe matemáticamente los procesos longitudinales) y representa tan solo esquemáticamente los procesos transversales (las condiciones y las tasas deben ser introducidas por el usuario como datos de entrada), tales como modificaciones de la morfología de la playa debido a tormentas y localización de las regeneraciones de playa periódicas. Mientras que la segunda versión de este modelo (en desarrollo) permitirá el cálculo matemático de varios procesos transversales, tales como el rebase y el transporte de sedimento por viento, los cuales influyen en el cambio costero a largo plazo.

Por consiguiente, el modelo GenCade se puede emplear en estudios tanto de escala regional como de escala local, y en escalas temporales que van desde los años a las centenas de años. De este modo mantiene la tendencia regional, suavizada en el resto de modelos de una línea existentes, y converge a condiciones de equilibrio, representando los efectos acumulativos a través de la interacción de los proyectos locales en una escala regional.

Los gradientes de transporte a lo largo de la costa en una escala regional pueden producir formas complicadas en la línea de costa. Los forzamientos para crear y mantener la forma de la línea de costa a dicha escala espacial son los gradientes en las condiciones de oleaje y corrientes de gran escala, así como diferentes elementos regionales que podrían tener una variabilidad grande a lo largo de la costa, como la topografía en profundidades indefinidas o cambios en el oleaje incidente causados, por ejemplo, por el resguardo de un saliente.

Uno de sus puntos fuertes es que, a diferencia de otros modelos de una línea, el modelo GenCade puede simular, gracias al acoplamiento del modelo Cascade, el bypass en ensenadas mareales y la evolución de los bajos, los cuales hacen de almacenamiento de arena, ver figura 1.4. Además de simular la erosión y avance de la línea de costa de las playas adyacentes y el bypass entre ambos elementos. Concretamente, el modelo Cascade incorpora el modelo Inlet Reservoir Model (Kraus, 2000) para describir el depósito de sedimento y su transferencia en las ensenadas mareales.



Figura 1.4: Representación esquemática de la interacción de los elementos morfológicos de una ensenada mareal. (Fuente: Frey et al., 2012)

Esto tiene una gran relevancia puesto que se ha demostrado que el alcance de la influencia morfológica de las ensenadas mareales puede exceder las dimensiones de los proyectos locales (Kraus, 2006), pudiendo alterar las trayectorias del transporte longitudinal de sedimento en decenas o centenas de kilómetros. Asimismo, la formación de los bajos mareales coge el sedimento que de otra manera podría estar disponible para las playas adyacentes. Esta demanda de sedimento influye también a la hora de llevar a cabo regeneraciones de playa. Anteriormente, se podía incluir en el GENESIS el transporte de sedimento regional obtenido del modelo Cascade como una condición de contorno. Gracias al desarrollo del modelo GenCade, ahora este proceso se transfiere de manera automática y continua.

Aunque la versión actual del modelo GenCade no puede simular el cambio de la línea de costa producido por transporte transversal de sedimento, como por ejemplo el asociado a tormentas y variaciones estacionales, se podrá simular en versiones futuras, puesto que se está incluyendo el cálculo matemático de varios procesos transversales, tal y como se ha señalado.

Otras de las limitaciones del modelo GenCade son que solamente se puede considerar un único tamaño de grano para todo el dominio de estudio y que no se puede calcular la migración ni la nueva abertura de una ensenada mareal.

1.2.3.2. Modelo híbrido MIKE21 FM y modelo de una línea

Años después, el Instituto Hidráulico Danés (DHI) sigue con la línea de investigación de los modelos híbridos, combinando un modelo de una línea para el cálculo de la evolución de la línea de costa, con un modelo de área 2DH para el cálculo de oleaje, corrientes y transporte de sedimento, con el que se describe la evolución morfológica de un área determinada. Esto hace que el modelo resultante sea capaz de tener en cuenta la variación de la batimetría en profundidades indefinidas y el efecto de las estructuras costeras en el oleaje y las corrientes y, por consiguiente, en el transporte de sedimento y en la respuesta de la línea de costa.

La batimetría se compone de dos regiones; una fuera de la zona de rompientes basada en mediciones y datos batimétricos, y una región en la zona de rompientes representada por una geometría idealizada con una forma de perfil de playa constante.

El modelo de área empleado es el MIKE21 FM. En cada paso de tiempo morfológico, el oleaje espectral es propagado desde un contorno dado en profundidades indefinidas hasta la rotura, la cual origina las corrientes que, junto con el oleaje, generan el transporte de sedimento. Concretamente, el transporte de sedimento es función de la corriente media integrada en vertical y de la altura de ola, periodo y profundidad del oleaje, siendo su dirección la dirección de la corriente media.

El campo de transporte de sedimento bidimensional es entonces integrado sobre el perfil de playa en una gran cantidad de localizaciones a lo largo de la costa. El resultado es la distribución del transporte longitudinal a lo largo de la línea de costa, empleado para la generación de la batimetría idealizada de la segunda región, necesaria para el siguiente paso de tiempo. La malla del modelo de área es una malla triangular, flexible, de resolución variable. De manera que se puede obtener una resolución más detallada en las zonas de interés, logrando un número de celdas razonable.

Drønen et al. (2011) aplicaron este modelo en un caso de estudio de un dique exento en profundidades indefinidas. Los resultados muestran un buen ajuste, tanto cualitativo como cuantitativo, con la morfología medida cuatro años después de la construcción del dique original. Asimismo, los resultados obtenidos con el diseño de un dique exento alternativo, demuestran el potencial que tiene el modelo como herramienta para realizar estudios donde haya que evaluar los cambios experimentados por la línea de costa a largo plazo, por causas naturales o antropogénicas.

1.2.3.3. Modelo híbrido Delf3D y UNIBEST

La línea de investigación seguida en Deltares es similar a las anteriores, siendo el desarrollo de un sistema en el que se integren diferentes técnicas y modelos existentes, su objetivo para los próximos años. De esta forma se podrán realizar los estudios de ingeniería costera con un enfoque global, considerando de una manera continua las escalas apropiadas.

Para cumplir este objetivo se comenzó desarrollando un modelo híbrido inicial, en el que se han acoplado el modelo de área de escala local Delft3D y el modelo de línea de costa UNIBEST. En el futuro se podrán incluir, además, modelos como el XBeach, para tener en cuenta las tormentas en el desarrollo morfológico a largo plazo.

El modelo XBeach es un modelo que cubre periodos de tormenta en áreas del orden del kilómetro. Delft3D se aplica para periodos desde ciclos mareales a décadas y áreas hasta varias decenas de kilómetros. Mientras que UNIBEST se enfoca en escalas temporales que abarcan desde estaciones a siglos y escalas espaciales que cubren todo un sistema costero.

Luijendijk et al. (2011) aplicaron este modelo híbrido en el estudio piloto del puerto de Ijmuiden, cuyos resultados muestran que el acoplamiento entre un modelo de línea de costa y un modelo de área (bypass, corrientes) mejora el cálculo del transporte de sedimento longitudinal y la predicción de la evolución de la línea de costa.

Como se ha indicado, éste es un modelo híbrido básico que sirve como punto de partida, por lo que aún quedan mejoras y procesos que implementar. De los resultados obtenidos en el puerto de Ijmuiden, se deduce que varios parámetros, como el bypass o el transporte longitudinal, requieren un estudio más en profundidad para comprobar si son realistas. Para calcular las condiciones de oleaje cerca de la costa se emplea el modelo de propagación de oleaje SWAN (Simulating WAves Nearshore), desarrollado por la Universidad de Delf. El modelo SWAN es un modelo de propagación de oleaje que promedia la fase, esto es, resuelve las ecuaciones de balance de energía espectral o acción de onda. Estos modelos requieren menor resolución espacial que los modelos que resuelven la fase, siendo posible su aplicación en áreas mayores.

De los procesos que experimenta el oleaje en su propagación, el modelo SWAN incluye generación local de oleaje por viento, refracción, reflexión, asomeramiento, disipación de energía por fondo, disipación por white-capping, interacciones no lineales entre componentes y rotura. Sin embargo, no reproduce la difracción en un sentido estricto, sino que lo hace mediante la incorporación del término de tasa de giro direccional (Holthuijsen et al., 2003). A este respecto, diversos estudios del Instituto de Hidráulica Ambiental, "IH Cantabria", han demostrado que la difracción en geometrías complejas no proporciona resultados adecuados, por lo que este modelo sólo se debería emplear en zonas donde se produzcan variaciones importantes en altura de ola, dentro de una escala horizontal de varias longitudes de onda. Asimismo, este modelo no produce corrientes generadas por el oleaje en la zona de rotura.

1.2.4. Conclusiones del estado del arte

Del análisis del estado del arte se deduce que la línea de investigación más idónea a la hora de desarrollar un modelo numérico aplicable en el medio-largo plazo, para evaluar cambios de la línea de costa debido a actividades ingenieriles, es el desarrollo de un modelo híbrido en el que se combinen varios modelos. De hecho, ésta es la línea que se está siguiendo en la actualidad en otras universidades y centros de investigación.

Los modelos de N líneas no son del todo apropiados porque, a pesar de ser modelos más detallados que los modelos de una línea, requieren mucha más calibración que estos últimos, no proporcionando mucha información adicional a la ya requerida para su calibración. Además, no se han empleado con frecuencia en aplicaciones ingenieriles, puesto que el intercambio de transporte transversal de sedimento no se ha incluido mediante expresiones fiables cuantitativamente. Por su parte, los modelos de una línea con término de transporte transversal de sedimento, tratan de incorporar a los modelos de línea de costa la variabilidad experimentada por el perfil de playa únicamente de una manera artificial, puesto que incluyen el término de transporte transversal de sedimento como una condición de contorno.

Hasta no hace mucho tiempo, las herramientas predictivas se desarrollaban para cubrir escalas espaciales y temporales muy específicas, con un rango de aplicación limitado. Sin embargo, la tendencia actual ya no se centra en mejorar los modelos individualmente, sino en desarrollar un sistema en el que se integren distintos modelos para, de esta manera, considerar los procesos de pequeña escala en escalas espacio-temporales grandes.

Ha quedado demostrado en diferentes casos de estudio, como en el estudio piloto del puerto de Ijmuiden realizado por Luijendijk et al. (2011), que las respuestas ante las intervenciones costeras pueden ocurrir en múltiples escalas espaciales y temporales, siendo necesario tener en cuenta la interacción entre los procesos de las distintas escalas para obtener unos resultados adecuados. Un único modelo numérico no es capaz de resolver todas las escalas relevantes, por lo que se hace indispensable desarrollar modelos híbridos en los que se combinen dos o más modelos. De hecho, los resultados obtenidos al aplicar el modelo híbrido Delf3D y UNIBEST en ese estudio, muestran que el acoplamiento entre un modelo de línea de costa y un modelo de área mejora el cálculo del transporte de sedimento longitudinal y la predicción de la evolución de la línea de costa.

Los modelos de área 2DH determinan la circulación costera, el transporte de sedimento y los correspondientes cambios de la batimetría. Este tipo de modelos no resuelve ni el flujo ni el transporte en cada punto de la columna de agua, sino que utiliza las ecuaciones promediadas en la coordenada vertical z y formulaciones de transporte de sedimento con variables agregadas (velocidad orbital en el fondo o corriente promediada en un periodo). El esquema seguido por los modelos 2DH consiste, por tanto, en determinar las corrientes costeras promediadas en profundidad, calculando seguidamente el transporte de sedimento y los cambios batimétricos.

Los modelos de área pueden emplearse en escalas espaciales grandes, mayores de cien metros, pero no son apropiados en escalas temporales de largo plazo, mayores a un año. Esta restricción es debida al alto coste computacional que supone su empleo en grandes escalas temporales. Asimismo, la representación del perfil transversal se puede distorsionar cuando son ejecutados durante un periodo largo de tiempo sin introducir algún tipo de recalibración o normalización del perfil de playa. Como contrapartida, los modelos 2DH, en comparación con los modelos de una línea, dan una descripción más realista de los efectos espaciales horizontales en el flujo y en el transporte de sedimento, proporcionando, por ejemplo, una descripción detallada del desarrollo de barras, corrientes de retorno o de la evolución de la morfología alrededor de estructuras.

Por su parte, comparado con los modelos de área, los modelos de una línea representan los procesos físicos de una manera más simplificada. Además, no pueden ser utilizados en escalas temporales menores al largo plazo por no tener en cuenta la variabilidad experimentada por el perfil de playa. Igualmente, es fundamental considerar la variabilidad espacial del perfil en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los predominantes, para poder representarlos adecuadamente. Es importante señalar que en ninguno de los dos tipos de modelos la descripción del transporte transversal es lo suficientemente precisa como para hacer simulaciones realistas de la evolución del perfil de playa.

Por todo esto, se adopta la idea de combinar ambos tipos de modelos para el análisis de la evolución de la línea de costa. De esta manera, se tienen las ventajas del modelo de área a la hora de calcular el transporte longitudinal de sedimento, sin que se produzca la distorsión del perfil de playa a largo plazo y con un coste computacional significativamente menor que si se empleara únicamente un modelo morfológico 2DH.

No obstante, los modelos híbridos existentes presentan diversos problemas que limitan su uso. El empleo de modelos 2DH que tratan de modelar procesos físicos de pequeña escala, como los que usan los modelos 3D-SHORE y el incluido en el paquete LITPACK, no son muy idóneos a la hora de calcular la evolución de la línea de costa a largo plazo, puesto que pueden llegar a desestabilizarse y generar soluciones físicamente imposibles. Asimismo, la interacción entre la planta y el perfil en modelos como el 3DBEACH es demasiado débil, no representando la interacción real que existe en las playas. Sin embargo, a pesar de las limitaciones del modelo 3DBEACH, su uso es más adecuado, puesto que emplea un modelo de evolución del perfil tendente al equilibrio.

Por otro lado, el modelo GenCade representa de una manera simplificada el oleaje en las zonas donde los procesos de refracción-difracción son importantes conjuntamente (diques exentos, salientes, cabos,...), dando lugar en estos casos a una predicción de la línea de costa no del todo acertada. Además, la versión actual de este modelo no puede simular el cambio de la línea de costa producido por transporte transversal de sedimento, aunque se podrá realizar en versiones futuras, ya que se está incluyendo el cálculo matemático de varios procesos transversales.

Por otra parte, el modelo híbrido Delf3D y UNIBEST es un modelo básico que sirve como punto de partida, por lo que aún quedan mejoras y procesos que implementar. Se ha visto que algunos parámetros requieren un estudio más exhaustivo, para comprobar si los resultados obtenidos en los casos de estudio son realistas. Además, para calcular las condiciones de oleaje cerca de la costa emplea el modelo de propagación de oleaje SWAN, el cual no proporciona buenos resultados en geometrías complejas donde la difracción es el fenómeno predominante, puesto que no es capaz de reproducirla en un sentido estricto.

En general, los modelos estudiados no incluyen la difracción o, si lo hacen, es de una manera simplificada, centrándose principalmente en simular los procesos de refracción y asomeramiento. No obstante, es muy habitual que la difracción esté presente en los casos de aplicación de este tipo de modelos, puesto que en ellos es común la presencia de diques exentos, espigones, salientes, cabos, muros paralelos a la costa... En la figura 1.5 se puede ver un caso típico en el que es necesario considerar el efecto de la difracción.



Figura 1.5: Representación esquemática de un muro paralelo a la costa.

1.3. Objetivos de la tesis

En base al análisis del estado del arte, se define como objetivo general de la tesis el desarrollo de un modelo numérico explícito de evolución morfodinámica de zonas costeras que sea aplicable en escalas de medio a largo plazo. Este propósito se llevará a cabo por medio del acoplamiento de las herramientas y modelos necesarios, puesto que se ha concluido en dicho análisis que ésta es la metodología más apropiada.

Para lograr este objetivo general, se partirá de un modelo sencillo de evolución de la línea de costa en el largo plazo (modelo de una línea) y se resolverán tres aspectos fundamentales:

- Mejorar el modelo de propagación del oleaje, implementando un modelo de oleaje que resuelva las carencias de los modelos híbridos existentes, tales como la refracción-difracción.
- Mejorar el cálculo del balance de masas, implementando las herramientas necesarias para mejorar los resultados del modelo híbrido y conseguir la estabilidad del mismo.
- Incorporar la variabilidad del perfil de playa, acoplando un modelo de evolución de la línea de costa debido al transporte transversal de sedimento a lo largo del perfil de playa, tendente al equilibrio y aplicable en el medio plazo.

1.4. Organización del documento

La estructura de la tesis es la que sigue:

Capítulo 1. Introducción, en el que se describe la motivación del estudio, se realiza el análisis del estado del arte, se determinan las conclusiones del mismo y se definen los objetivos a lograr con la presente tesis.

Capítulo 2. Desarrollo del modelo de evolución de medio-largo plazo: punto de partida, donde se realiza una descripción detallada de los modelos de evolución de la línea de costa en el largo plazo, y más concretamente del modelo UnaLinea desarrollado por HR Wallingford (UK), puesto que éste es el modelo que se va a emplear como modelo sencillo de partida.

Capítulo 3. Mejoras en el modelo de propagación del oleaje, en el que se acoplan el modelo de propagación de oleaje monocromático Oluca-MC y el modelo de una línea del capítulo anterior. Este modelo de propagación de oleaje fue desarrollado inicialmente en la Universidad de Delaware (USA) y mejorado, posteriormente, por miembros de la citada Universidad y del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (GIOC). El acoplar los modelos UnaLínea y Oluca-MC genera una serie de necesidades que se resuelven también en este capítulo.

Capítulo 4. Mejoras en el cálculo del balance de masas, en el cual se implementan una serie de herramientas para mejorar los resultados del modelo híbrido y conseguir que sea estable. Estas mejoras consisten en la incorporación del término de gradiente longitudinal de altura de ola en rotura en la formulación del transporte de sedimento, la implementación de una profundidad de cierre que sea variable tanto en el tiempo como en el espacio y, por último, la integración de un nuevo parámetro para subdividir el intervalo de tiempo y cumplir, de este modo, el criterio de estabilidad definido en los modelos numéricos explícitos.

Capítulo 5. Variabilidad del perfil transversal de playa, en el que se incorpora la variabilidad del perfil mediante el acoplamiento de un modelo de evolución de la línea de costa debido al transporte transversal de sedimento a lo largo del perfil de playa, tendente al equilibrio y aplicable en el medio plazo. Las bases técnicas de este modelo han sido desarrolladas en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria). De esta manera, se obtiene un modelo final de evolución morfodinámica de zonas costeras aplicable en escalas de medio a largo plazo.

Capítulo 6. Validación del modelo final de evolución de medio-largo plazo en la playa de Nova Icaria, en el que se muestran los resultados de la comparación entre la línea de costa obtenida con el modelo desarrollado en los capítulos anteriores y la línea de costa medida en la playa de Nova Icaria (Barcelona). Asimismo, se comparan los resultados arrojados por el modelo de la tesis con los del modelo de partida UnaLinea.

Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación, donde se exponen las principales conclusiones alcanzadas en la tesis, proponiendo además futuras líneas de investigación.
Capítulo 2

Desarrollo del modelo de evolución de medio-largo plazo: punto de partida

2.1. Introducción

En este capítulo se van a estudiar los modelos de evolución de la línea de costa en el largo plazo, también llamados modelos de una línea, los cuales fueron brevemente introducidos en el capítulo anterior. En concreto, se va a presentar el modelo explícito denominado UnaLinea, desarrollado por HR Wallingford (UK); puesto que es el que se va a emplear como modelo sencillo de partida para desarrollar el modelo de evolución morfodinámica de zonas costeras aplicable en escalas de medio a largo plazo, denominado IH-MOEC, objeto de la tesis.

Asimismo, se hará una breve descripción de las soluciones analíticas de los modelos de una línea, puesto que son el antecedente de los distintos modelos numéricos que se han ido desarrollando con el paso de los años.

2.2. Soluciones analíticas de los modelos de una línea

El primer modelo analítico de evolución de línea de costa lo desarrolló Pelnard-Considère (1956), aplicando su teoría de una línea a un caso simplificado de cambio de línea de costa cerca de un espigón impermeable infinitamente largo. Numerosos estudios siguieron la teoría de una línea de Pelnard-Considère, cuyo resultado fue el desarrollo de un gran

número de soluciones analíticas para casos idealizados de evolución de línea de costa y transporte de sedimento, bajo condiciones de oleaje constante en tiempo y espacio.

La base de las diferentes soluciones analíticas es la ecuación de difusión. Con el objetivo de obtener soluciones analíticas de la ecuación de conservación de la masa de sedimento, que es la ecuación que emplean los modelos de una línea actuales (como se expondrá en el siguiente apartado), hay que hacer un serie de simplificaciones que no se corresponden con la realidad y que no tienen los modelos numéricos.

Esta ecuación de conservación de sedimento es la que se muestra a continuación (la cual se explicará con detalle en el próximo apartado):

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \pm q\right) = 0 \tag{2.1}$$

Debido a la serie de simplificaciones necesarias para la obtención de las soluciones analíticas, los modelos analíticos no pueden ser empleados como herramienta ingenieril para predecir la evolución de la línea de costa, pero si son útiles para determinar tendencias de una manera rápida y sencilla, así como para realizar estudios de sensibilidad de determinados parámetros como, por ejemplo, determinar la influencia del cambio de las condiciones del oleaje incidente, de las condiciones de contorno o de las condiciones iniciales de la línea de costa.

Para resolver la ecuación 2.1 de conservación de la masa de sedimento, hay que proponer una expresión para calcular el transporte longitudinal del mismo:

$$Q = Q_0 \sin(2\theta_{bs}) \tag{2.2}$$

siendo Q_0 la amplitud del transporte longitudinal de sedimento o la parte del transporte no asociada al ángulo de incidencia del oleaje en rotura y θ_{bs} el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa.

Con respecto al parámetro Q_0 , existen distintas expresiones para calcular su valor, aunque se suele utilizar la fórmula del CERC (Komar and Inman, 1970; SPM, 1984), que se describirá en el apartado siguiente. Se puede decir que mediante esta expresión, Q_0 depende únicamente de la altura de ola significante en rotura H_{bs} .

El ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa, se obtiene de la diferencia entre el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto al eje x (θ_b) y el ángulo de la línea de costa con respecto al mismo eje (θ_s):

$$\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s \tag{2.3}$$

$$\theta_{bs} = \theta_b - \arctan\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \tag{2.4}$$

Para derivar la ecuación de difusión y obtener diferentes soluciones analíticas hay que asumir las siguientes hipótesis:

• El ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa (θ_{bs}) se asume pequeño, pudiéndose emplear la relación:

$$\sin(2\theta_{bs}) \approx 2\theta_{bs} \tag{2.5}$$

 El ángulo de la línea de costa con respecto al eje de referencia x se asume pequeño, pudiéndose emplear la siguiente relación:

$$\arctan\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \approx \frac{\partial y}{\partial x}$$
 (2.6)

Introduciendo la relación 2.4 y empleando las dos hipótesis anteriores, la ecuación 2.2 se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q = Q_0 \sin\left(2\theta_b - 2\arctan\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\right) \approx 2Q_0\left(\theta_b - \arctan\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\right) \approx 2Q_0\left(\theta_b - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)\right)$$
(2.7)

Por último, se combina la ecuación del transporte de sedimento linealizada (2.7) con la ecuación de conservación de sedimento (2.1), asumiendo que en esta última el término de aportes o pérdidas es nulo (q=0).

En función de una serie de hipótesis adicionales se pueden obtener las dos ecuaciones siguientes:

- Si Q_0 y θ_b son constantes en la coordenada longitudinal x se obtiene la ecuación:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{2.8}$$

con:

$$\varepsilon = \frac{2Q_0}{D} \tag{2.9}$$

Nótese que el hecho de asumir Q_0 invariable en la coordenada longitudinal x implica asumir que la altura de ola significante en rotura H_{bs} es también invariable con esta coordenada, ya que, como se ha indicado, se puede afirmar que Q_0 depende únicamente de H_{bs} .

Como la distancia vertical en la cual se asume que el perfil de playa se traslada (D) es constante (independiente del tiempo t y de la coordenada longitudinal x) y se asume que Q_0 es constante en el tiempo t, la ecuación 2.8 es una ecuación diferencial parcial lineal, idéntica a la ecuación que describe la conducción del calor en un sólido en una dimensión o a la ecuación de difusión, motivo por el cual se conoce con este nombre.

Una vez que se definen las condiciones iniciales y de contorno para cada caso concreto, se pueden obtener diferentes soluciones analíticas de la ecuación de difusión. Carslaw and Jaeger (1959) proporcionaron gran cantidad de soluciones para la ecuación de conducción del calor y Crank (1975) propuso soluciones para la ecuación de difusión.

El coeficiente ε se denomina coeficiente o constante de difusión y se expresa en unidades de área por unidad de tiempo. Es un indicador de la escala de tiempo del cambio de la línea de costa ante una acción determinada. Por ejemplo, un valor elevado de la amplitud del caudal del transporte de sedimento conlleva una rápida respuesta de la línea de costa ante una perturbación, mientras que un valor elevado de la profundidad de cierre origina una sección ancha de la playa donde se lleva a cabo el movimiento del sedimento y, por tanto, la respuesta de la línea de costa a las perturbaciones es más lenta.

• Si Q_0 y θ_b son variables en la coordenada longitudinal x se obtiene una ecuación diferencial de gobierno para determinar la posición de la línea de costa más general:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial(\theta_b \varepsilon)}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x}$$
(2.10)

Mediante esta ecuación se puede considerar, de una manera simplificada, la difracción en zonas de espigones (altura de ola variable con la coordenada longitudinal x). Sin embargo, la fórmula de Q_0 tiene que ser lo suficientemente sencilla como para permitir la derivación de una solución analítica.

Las soluciones analíticas proporcionan, de una manera rápida y sencilla, una primera estimación de la respuesta de la línea de costa ante diferentes actividades ingenieriles. Sin embargo, cuando el caso de estudio incluye condiciones de contorno complejas o se requiere de un análisis más exhaustivo, es necesaria la aplicación de modelos numéricos, puesto que éstos simulan la evolución de la línea de costa para un amplio rango de playas, estructuras costeras, condiciones de contorno y características del oleaje, que pueden ser variables tanto en el tiempo como en el espacio.

2.3. Modelo numérico de partida de evolución de la línea de costa a largo plazo (UnaLinea)

2.3.1. Descripción del modelo UnaLinea

Todos los modelos de línea de costa a largo plazo parten de la ecuación de conservación de la masa de sedimento dentro del flujo turbulento (Abbott and Price, 1994). Partiendo de ella y tras una serie de cálculos, se llega a la ecuación básica de los modelos de una línea:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \pm q \tag{2.11}$$

siendo A el área transversal del perfil de playa, Q el transporte longitudinal de sedimento (volumen total por unidad de tiempo) y q un posible aporte (+) o pérdida (-) de sedimento (volumen total por unidad de longitud y por unidad de tiempo).

Se considera un sistema de coordenadas cartesianas, en el cual el eje x está orientado paralelo a la tendencia general de la costa y el eje y, perpendicular al anterior, positivo hacia el mar; véase figura 2.1, tomada de Hanson and Kraus (1989). De este modo, el parámetro y representa la posición de la línea de costa y el x la distancia a lo largo de la misma.

La base de los modelos de una línea es asumir que el perfil de playa no cambia de forma ni en el tiempo ni en el espacio, sino que se traslada, a lo largo de una sección de costa, paralelamente a sí mismo hasta la profundidad de cierre, también invariable en el tiempo y en el espacio, cuando una cantidad neta de sedimento entra o sale de la sección durante un intervalo de tiempo Δt . El cambio en la posición de la línea de costa es Δy , la longitud del segmento de la linea de costa es Δx y el perfil se traslada dentro de una distancia vertical definida por la altura de la berma (D_B) y la profundidad de cierre (D_C) , ambas medidas respecto a una misma referencia vertical (por ejemplo el nivel medio del mar).



Figura 2.1: Representación esquemática de una playa en los modelos de una línea. (Fuente: Hanson and Kraus, 1989)

A partir de esta hipótesis fundamental, se define la variación del área transversal de la playa (A) en función de la variación de la posición de la línea de costa (y):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D \frac{\partial y}{\partial t} \tag{2.12}$$

siendo D la distancia vertical en la cual se asume que el perfil de playa se traslada, esto es, la suma de la altura de la berma (D_B) y la profundidad de cierre (D_C) .

Introduciendo la ecuación 2.12 en la ecuación 2.11, se obtiene la ecuación que emplean los modelos de una línea actuales:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \pm q\right) = 0$$
(2.13)

Para resolver esta última ecuación hay que definir la posición inicial de la línea de costa en todo el dominio, las condiciones de contorno en cada extremo de la playa, el transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la costa, los aportes o pérdidas puntuales de sedimento y la distancia vertical en la que se traslada el perfil de playa.

Nótese que se prescinde de la información del transporte transversal de sedimento y que el único cambio de la línea de costa que se reproduce mediante la ecuación 2.13, es el asociado a las variaciones del transporte longitudinal a lo largo de la costa, con las pérdidas o aportes puntuales de sedimento oportunos. Por esta razón, los modelos de una línea proporcionan únicamente soluciones válidas en el largo plazo (años a décadas). Este tipo de modelos, por tanto, calcula la evolución de la línea de costa en función de los gradientes del transporte longitudinal de sedimento, modificando la posición de la costa cada paso de tiempo. Si hay un aumento del transporte longitudinal se produce la erosión de la playa, mientras que si el transporte longitudinal disminuye se origina el avance de la misma.

En los modelos numéricos de cambio de línea de costa, la ecuación de gobierno (ecuación 2.13) se presenta en forma de diferencias finitas:

$$\frac{y_i' - y_i}{\Delta t} = \lambda \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_i + (1 - \lambda) \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_i'$$
(2.14)

$$\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_{i} = -\frac{1}{D} \left(\frac{Q_{i+1} - Q_{i}}{\Delta x} - q_{i}\right)$$
(2.15)

$$\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_{i}^{'} = -\frac{1}{D} \left(\frac{Q_{i+1}^{'} - Q_{i}^{'}}{\Delta x} - q_{i}^{'}\right)$$
(2.16)

donde Δt es el intervalo de tiempo y λ ($0 \le \lambda \le 1$) es un parámetro relacionado con el esquema de solución numérica elegido.

Se emplea una malla escalonada en la que la posición de la línea de costa (y) y las pérdidas o aportes puntuales de sedimento (q) están definidos en el centro de las celdas, mientras que el transporte longitudinal de sedimento (Q) se define en los contornos de las mismas, de anchura Δx .

El subíndice i representa el número de celda y el superíndice ' indica que esas variables pertenecen al siguiente intervalo de tiempo. Una variable sin el superíndice expresa que dicha variable pertenece al paso de tiempo presente.

En la figura 2.2, tomada de Horikawa (1988), se representa un tramo de la posición de la línea de costa y los índices del transporte longitudinal de sedimento según un esquema de diferencias finitas.

En los modelos numéricos de cambio de línea de costa, las ecuaciones en diferencias finitas, tanto explícitas como implícitas, pueden ser empleadas en función del valor de λ seleccionado. En los esquemas explícitos, se puede calcular directamente la línea de costa usando la información del intervalo de tiempo anterior (la solución se corresponde con un valor de $\lambda = 1$). Por el contrario, los esquemas implícitos son más complicados de programar, pero no se van a describir porque el modelo UnaLinea, empleado como punto de partida de la tesis, es un modelo explícito.



Figura 2.2: Representación esquemática de un tramo de línea de costa en forma de diferencias finitas. (Fuente: Horikawa, 1988)

Para el cálculo del transporte longitudinal de sedimento se pueden emplear distintas expresiones. Concretamente, el modelo UnaLinea emplea la fórmula del CERC (Komar and Inman, 1970; SPM, 1984) y la fórmula de Damgaard and Soulsby (Damgaard and Soulsby, 1996).

La fórmula del CERC representa el transporte longitudinal de sedimento originado por la incidencia oblicua del oleaje en rotura, y es la siguiente:

$$Q = K_1 \frac{\rho \sqrt{g}}{16\sqrt{\frac{H_{bs}}{h_b}}(\rho_s - \rho)(1 - p)} H_{brms}^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b)$$
(2.17)

siendo K_1 un coeficiente empírico tratado como un parámetro de calibración, H_{bs} la altura de ola significante en rotura, H_{brms} la altura de ola cuadrática media en rotura, h_b la profundidad en rotura, ρ_s la densidad del sedimento (definida como 2650 kg/m^3 para arenas), ρ la densidad del agua (con un valor por defecto en el modelo de 1025 kg/m^3 para agua salada), p la porosidad del sedimento (un valor típico de este parámetro es 0.4), g la aceleración debida a la gravedad y α_b el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa.

Komar and Inman (1970) definieron inicialmente el coeficiente empírico $K_1 = 0.77$, a partir de sus experimentos con arena y empleando en sus cálculos la altura de ola cuadrática media. Se han llevado a cabo diferentes estudios a lo largo de los años para tratar de relacionar este coeficiente adimensional K_1 con parámetros de playa, tales como el tamaño de sedimento o la pendiente. La correlación con el tamaño de sedimento es la más aceptada.

El modelo UnaLinea emplea la variación logarítmica entre el coeficiente K_1 y el tamaño de grano medio del sedimento d_{50} (definido en metros), desarrollada por Swart (1976):

$$K_1 = \log(0.00146/d_{50}) \tag{2.18}$$

Aunque el parámetro K_1 ha sido estimado empíricamente, es tratado como un parámetro de calibración del modelo, debido a las hipótesis y simplificaciones que se emplean en la formulación de los modelos de una línea. Dicho parámetro controla la escala temporal del cambio de la línea de costa simulado, así como la magnitud del índice del transporte longitudinal de sedimento.

La fórmula de Damgaard and Soulsby (1996), por su parte, es sólo para evaluar el transporte longitudinal por fondo en playas de gravas, aunque podría ser empleada también en playas de arena si se aplica únicamente para el cálculo de la componente del transporte por fondo. Dicha fórmula es la que se muestra a continuación:

$$Q = max\{Q_1, Q_2\}$$
(2.19)

donde Q_1 es el transporte longitudinal por las corrientes y Q_2 es el transporte de sedimento por el oleaje.

$$Q_{1} = \begin{cases} 0 & \text{para } \widehat{\theta_{cr}} < 1\\ \frac{0.19(g \tan \beta)^{\frac{1}{2}} (\sin 2\alpha_{b})^{\frac{3}{2}} H_{b}^{\frac{5}{2}} (1 - \widehat{\theta_{cr}})}{12(s-1)} & \text{para } \widehat{\theta_{cr}} \ge 1 \end{cases}$$
(2.20)

$$Q_{2} = \begin{cases} \frac{0.24f(\alpha_{b})g^{\frac{3}{8}}d_{50}^{\frac{1}{4}}H_{b}^{\frac{1}{8}}}{12(s-1)T^{\frac{1}{4}}} & \text{para } \theta_{wr} \ge \theta_{wsf} \\ \frac{0.046f(\alpha_{b})g^{\frac{2}{5}}H_{b}^{\frac{1}{3}}}{12(s-1)^{\frac{6}{5}}(\pi T)^{\frac{1}{5}}} & \text{para } \theta_{wr} < \theta_{wsf} \end{cases}$$
(2.21)

sujeto a $Q_2 = 0$ para $\theta_{max} \le \theta_{cr}$

siendo:

$$\widehat{\theta_{cr}} = \frac{16.7\theta_{cr}(s-1)d_{50}}{H_b(\sin 2\alpha_b)\tan\beta}$$
(2.22)

$$f(\alpha_b) = (0.95 - 0.19\cos 2\alpha_b)(\sin 2\alpha_b)$$
(2.23)

$$\theta_{wr} = \frac{0.15H_b^{\frac{3}{4}}}{g^{\frac{1}{4}}(s-1)(Td_{50})^{\frac{1}{2}}}$$
(2.24)

$$\theta_{wsf} = \frac{0.004H_b^{\frac{9}{5}}}{g^{\frac{1}{5}}(s-1)^{\frac{7}{5}}d_{50}T^{\frac{2}{5}}}$$
(2.25)

$$\theta_w = max\{\theta_{wr}, \theta_{wsf}\}$$
(2.26)

$$\theta_m = \frac{0.1 H_b(\sin 2\alpha_b) \tan \beta}{(s-1)d_{50}}$$
(2.27)

$$\theta_{max} = \left[(\theta_m + \theta_w \sin \alpha_b)^2 + (\theta_w \cos \alpha_b)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(2.28)

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - exp(-0.02D_*)]$$
(2.29)

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}} d_{50} \tag{2.30}$$

donde H_b es la altura de ola cuadrática media en rotura, T el periodo del oleaje, d_{50} el tamaño de grano medio del sedimento, tan β la pendiente de playa, g la aceleración debida a la gravedad, α_b el ángulo del frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa, ν la viscosidad cinemática del agua y s la relación de la densidad del sedimento con respecto a la densidad del agua.

Según Soulsby (1997), la fórmula de Damgaard and Soulsby (1996) debería tener una amplia aplicabilidad, puesto que tiene una fuerte base física e incluye una dependencia con el tamaño de grano, la pendiente de la playa y el periodo del oleaje. Mientras que la fórmula del CERC no incluye esta dependencia de por sí, sino que lo hace a través del parámetro de calibración. A cambio, esta última incluye el transporte en suspensión y tiene la ventaja añadida de que es más sencilla.

Como se puede ver en ambas formulaciones, este caudal de transporte longitudinal de sedimento se calcula a partir de las características del oleaje en rotura. La propagación del oleaje hasta la rotura es un proceso iterativo basado en la teoría lineal de ondas y en el que se considera batimetría recta y paralela a la línea de costa y los procesos de asomeramiento y refracción. Son tres las incógnitas a calcular; la altura de ola, la dirección y la profundidad en rotura.

Para obtener la altura de ola en rotura, transformada mediante los fenómenos de asomeramiento y refracción, se emplea la siguiente ecuación:

$$H_b = H_0 K_R K_S \tag{2.31}$$

donde H_b es la altura de ola en rotura en un punto arbitrario a lo largo de la costa, H_0 la altura de ola en profundidades indefinidas, K_R el coeficiente de refracción y K_S el coeficiente de asomeramiento.

Para el caso de batimetría recta y paralela, el coeficiente de refracción K_R se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$K_R = \left[\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.32}$$

donde θ_0 es el ángulo de salida del rayo desde el punto del inicio de la propagación y θ_1 el ángulo de llegada de las olas al punto de rotura.

Mientras que el coeficiente de asomeramiento K_S es función del periodo de oleaje, la profundidad en el punto desde el cual se propaga y la profundidad en rotura:

$$K_S = \left[\frac{C_{g0}}{C_{g1}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.33}$$

donde C_{g0} y C_{g1} son la celeridad de grupo en el punto inicial y en el punto de rotura respectivamente.

La celeridad de grupo C_g se define como:

$$C_g = Cn \tag{2.34}$$

con:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{CT}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{CT}\right)} \right)$$
(2.35)

donde C es la celeridad de la onda (C = L/T) y L la longitud de onda en la profundidad h. Esta longitud de onda se calcula a través de la relación de dispersión:

$$L = L_0 tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \tag{2.36}$$

La relación de dispersión se resuelve en UnaLinea mediante la aproximación de Hunt (1979) de noveno orden.

Por su parte, el ángulo del oleaje en rotura se calcula a partir de la ley de Snell, que relaciona las variaciones en la dirección de propagación con las variaciones en la longitud de onda:

$$\frac{\sin\theta_b}{L_b} = \frac{\sin\theta_0}{L_0} \tag{2.37}$$

donde θ_b y L_b son el ángulo y la longitud de onda en el punto de rotura y θ_0 y L_0 el ángulo y la longitud de onda en el punto en profundidades indefinidas a partir del cual se propaga.

Los modelos de refracción del oleaje proporcionan el ángulo en rotura θ_b en un sistema de coordenadas fijo. Como se puede ver en la figura 2.3, tomada de Hanson and Kraus (1989), el ángulo del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa, necesario para calcular el transporte longitudinal de sedimento, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\theta_{bs} = \theta_b - \theta_s \tag{2.38}$$

siendo θ_b el ángulo del oleaje en rotura con respecto al eje x y θ_s el ángulo de la línea de costa con respecto al mismo eje.

El ángulo θ_s se puede calcular como:

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \tag{2.39}$$

Este ángulo del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa θ_{bs} de la figura 2.3, se corresponde con el parámetro α_b de las formulaciones del transporte longitudinal de sedimento, tanto en la fórmula del CERC como en la fórmula de Damgaard and Soulsby.



Figura 2.3: Definición de los ángulos del oleaje en rotura. (Fuente: Hanson and Kraus, 1989)

El criterio de rotura empleado en UnaLinea es el dado por McCowan (1891), quien estudiando las ondas solitarias determinó que el oleaje rompe cuando su altura alcanza un valor igual a una fracción de la profundidad:

$$H_b = \gamma h_b \tag{2.40}$$

con un coeficiente de rotura $\gamma \approx 0.78$ y siendo H_b y h_b la altura de ola y la profundidad en rotura respectivamente.

Para obtener las tres incógnitas (altura de ola, dirección y profundidad en rotura) hay que resolver, mediante un proceso iterativo, las tres ecuaciones descritas: la ecuación que relaciona la altura de ola en rotura con la altura de ola incidente en profundidades indefinidas (ecuación 2.31), la ley de Snell como una ecuación de refracción (ecuación 2.37) y el criterio de rotura (ecuación 2.40).

Para ello, se divide la altura de ola en profundidades indefinidas entre el coeficiente de rotura ($\gamma = 0.78$), para obtener una primera aproximación de la profundidad en rotura asociada. A continuación, se propaga el oleaje desde indefinidas hasta dicha profundidad, teniendo en cuenta los procesos de asomeramiento y refracción. A partir de esta nueva altura de ola se calcula la siguiente estimación de la profundidad en rotura, volviendo a dividir entre el coeficiente de rotura 0.78. Con esta segunda estimación de la profundidad en rotura se vuelve a propagar el oleaje hasta la misma, teniendo en cuenta de nuevo los fenómenos de asomeramiento y refracción. Este proceso es repetido hasta que la diferencia entre las alturas de ola en rotura, obtenidas con el criterio de rotura dado Dentro de las capacidades del modelo UnaLinea, está la de poder simular la interacción fluvial, ya sea la entrada de sedimento a causa de ríos o la pérdida del mismo más allá de la profundidad de cierre, con descargas constantes o variables en el tiempo.

Asimismo, simula el cambio de la línea de costa a causa de regeneraciones de playa o estructuras costeras. Estas estructuras pueden ser espigones cortos (simulando el bypass en el extremo de la estructura mar adentro) y espigones infinitamente largos (que bloquean completamente el paso del sedimento y, por tanto, restringen el movimiento de la línea de costa en su localización). El bypass en las estructuras dependerá de la distancia entre el punto de rotura del oleaje y el extremo del espigón.

Además, en el modelo UnaLinea se pueden definir varios puntos de oleaje, a lo largo de la costa, a partir de los cuales llevar a cabo la propagación, con la restricción de que todos deben estar a la misma profundidad.

2.3.2. Hipótesis y limitaciones fundamentales del modelo UnaLinea

La mayoría de los modelos de evolución de la línea de costa en el largo plazo, como es el caso del modelo de partida UnaLinea, emplean las siguientes hipótesis básicas (Hanson and Kraus, 1989):

- Se considera que el perfil de playa adopta una forma invariable en el tiempo y en el espacio, por lo que, como ya se ha indicado, estos modelos no se pueden emplear en escalas de medio plazo al no considerar la variabilidad experimentada por el perfil. Como consecuencia, no se pueden reproducir las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, entre otros fenómenos. Estos modelos son, por tanto, aplicables en zonas de estudio donde el perfil de playa se ajusta a su forma de equilibrio (puede haber variaciones estacionales, pero los cambios transversales deben compensarse a largo plazo). Asimismo, es fundamental considerar la variabilidad espacial del perfil en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los predominantes, para poder representarlos adecuadamente.
- Los límites entre los que se traslada el perfil de playa también son invariables en el tiempo y en el espacio. Según Hanson and Kraus (1989), el límite en la costa viene marcado por la elevación de la berma (D_B) y en el mar por la profundidad de cierre (D_C) . Las consecuencias de esta hipótesis son las mismas que las del punto anterior.

- La arena es transportada a lo largo de la costa por la acción de la rotura del oleaje y las corrientes longitudinales.
- Se ignora la estructura detallada de la circulación costera.
- Hay una tendencia clara a largo plazo en la evolución de la línea de costa, ya que si no fuera así no se podría separar la "señal" uniforme del cambio de la línea de costa, del "ruido" producido por las tormentas, variaciones estacionales del oleaje, fluctuaciones mareales y otros movimientos cíclicos. Esta hipótesis implica que la acción del oleaje, que da origen al transporte longitudinal de sedimento, y las condiciones de contorno son los principales factores que controlan el cambio de la línea de línea de costa a largo plazo.
- Existe cantidad suficiente de arena, asumiendo que el suministro de arena es infinito.

Se asume, por tanto, que los efectos del transporte transversal de sedimento, tales como la erosión producida por tormentas o el movimiento cíclico de la posición de la línea de costa asociado a las variaciones estacionales del oleaje, se cancelan en un periodo de simulación suficientemente largo, o bien se tienen en cuenta a través de cálculos externos.

Otra limitación importante del modelo UnaLinea es que únicamente se tienen en cuenta los fenómenos de asomeramiento y refracción a la hora de propagar el oleaje hasta la rotura. Sin embargo, en la mayor parte de los casos de aplicación de este tipo de modelos hay diques exentos, espigones, salientes, muros paralelos a la costa, etc.; elementos que hacen que el hecho de considerar el fenómeno de la difracción sea fundamental.

Asimismo, para llevar a cabo la propagación del oleaje se emplea la ley de Snell, considerando batimetría recta y paralela, lo que hace que no se pueda tener en cuenta la batimetría real de la zona de estudio, que marca la propagación del oleaje incidente.

Por último, debido a que los modelos de una línea emplean una fórmula de transporte de partículas dependiente del ángulo del oleaje, las perturbaciones en la posición de la línea de costa tienden a ser suavizadas, a no ser que sean controladas o mantenidas por una condición de contorno u otra limitación.

2.4. Conclusiones

Los modelos de evolución de la línea de costa tradicionales, como es el caso del modelo de partida UnaLinea, prescinden de la información del transporte transversal de sedimento y el único cambio de la línea de costa calculado es el asociado a las variaciones del transporte longitudinal. Por esta razón, este tipo de modelos son válidos únicamente en el largo plazo (años a décadas), no pudiendo, por ejemplo, simular las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, entre otros procesos. Asimismo, una línea de costa con oleaje normal a la misma no se mueve con los modelos tradicionales de largo plazo, sin embargo, sí existe un movimiento por perfil observado en la naturaleza. Para eliminar esta limitación, en el modelo objeto de la tesis se va a acoplar un modelo de evolución de la línea de costa debido al transporte transversal de sedimento a lo largo del perfil de playa, tendente al equilibrio y aplicable en el medio plazo.

Otra limitación importante del modelo UnaLinea es que únicamente se tienen en cuenta los fenómenos de asomeramiento y refracción en la propagación del oleaje hasta la rotura. Sin embargo, es muy común que en los casos de estudio de este tipo de modelos existan espigones, salientes, muros paralelos a la costa, etc. que hacen que el hecho de considerar el fenómeno de la difracción sea fundamental a la hora de obtener las características del oleaje en rotura correctamente. En el modelo IH-MOEC se va a acoplar un modelo de propagación de oleaje monocromático (denominado Oluca-MC) que simula este fenómeno.

Asimismo, en los modelos de una línea se considera batimetría recta y paralela, por lo que no se puede tener en cuenta la batimetría real de la zona de estudio, en la que puede haber bajos, barras y otros elementos morfológicos que influyen enormemente en la propagación del oleaje incidente. Al acoplar el modelo de oleaje Oluca-MC se emplea la batimetría real del caso de estudio, por lo que también se solventará esta limitación.

Igualmente, los modelos de evolución de la línea de costa a largo plazo tradicionales consideran profundidad de cierre constante. Sin embargo, un valor elevado de la profundidad de cierre conlleva una sección ancha de la playa en la cual se lleva a cabo el movimiento del sedimento, siendo la respuesta de la línea de costa ante las perturbaciones más lenta. Mientras que es sabido que en las zonas abrigadas, por ejemplo por una estructura o un saliente, el perfil de playa es mucho más estrecho que en las playas abiertas, por lo que la respuesta de la línea de costa ante los cambios es mucho más rápida. Por este motivo, se va a implementar en el modelo de la tesis una profundidad de cierre que sea variable tanto en el tiempo como en el espacio.

Además, se añadirá en la formulación del CERC el transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura, con el objetivo de incorporar los efectos de la difracción en las proximidades de las estructuras, ya que este fenómeno produce un cambio considerable en la altura de ola en rotura sobre una longitud de playa importante.

Todas estas implementaciones mejorarán el cálculo de la altura de ola y dirección del oleaje en rotura, así como del transporte de sedimento, lo que supone una mejora sustancial en la predicción de la evolución de la línea de costa.

Capítulo 3

Mejoras en el modelo de propagación del oleaje

3.1. Introducción

Los modelos de una línea calculan el caudal del transporte longitudinal de sedimento mediante el conocimiento de las características del oleaje en rotura. Es necesario, por tanto, un modelo de oleaje que permita determinar la distribución longitudinal de la altura de ola y el ángulo en rotura, a partir de la información de la altura de ola, período y dirección del oleaje incidente, definido en una determinada profundidad de referencia fuera del área de rompientes.

A partir de las carencias de los modelos de una línea enumeradas en el capítulo anterior, se decide implementar un modelo de oleaje que tenga en cuenta la batimetría real de la zona de estudio, puesto que ésta determina la propagación del oleaje, así como el fenómeno de la difracción tan común en los casos de aplicación de este tipo de modelos (debido a la existencia de estructuras, salientes, islas y bajos cercanos a la costa), sumado a los procesos de asomeramiento, refracción, disipación de energía y rotura. Asimismo, se implementará un modelo que esté ampliamente validado, para garantizar el éxito del modelo final, y que sea computacionalmente muy rápido, ya que deberá aplicarse en estudios de escalas de largo plazo.

Existen diferentes modelos numéricos de propagación de ondas, en función de las ecuaciones discretizadas y de los fenómenos que se trate de representar. En general, se pueden establecer dos grandes grupos: modelos basados en la simulación de flujos de superficie libre y modelos basados en la teoría de propagación de ondas. Los modelos basados en la simulación de flujos de superficie libre resuelven las ecuaciones

de Navier-Stokes o las ecuaciones de Boussinesq, tratando el fenómeno de la propagación de una forma mucho más amplia y con menos restricciones. Están directamente basados en los principios más elementales de la dinámica de fluidos (conservación de masa y momentum), lo que les permite tratar una cantidad mayor de problemas. El inconveniente de estos modelos, en comparación con los modelos basados en la teoría de propagación de ondas, es su mayor complejidad y coste computacional.

Respecto a las ecuaciones de Boussinesq, cabe destacar su buen comportamiento para el caso de ondas largas. Se obtienen a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, promediadas en vertical y asumiendo una variación lineal de la velocidad vertical desde el fondo hasta la superficie libre. Entre los inconvenientes que presentan estos modelos están su alto coste computacional (como ya se ha indicado) y su rango de validez; sólo para relaciones $h/L \leq 0.20$. No obstante, se han conseguido modificaciones de dichas ecuaciones que permiten ampliar dicho rango hasta $h/L \leq 0.50$. Por el contrario, poseen la ventaja de utilizar la variable tiempo, de modo que se pueden emplear para el estudio del oleaje irregular, que representa mejor la realidad. Además, son modelos muy válidos para el estudio de la agitación interior en puertos y resonancia en dársenas, dado que, además de la refracción y difracción, permiten evaluar la reflexión de las ondas inducidas por las paredes del contorno, así como la radiación de energía hacia el exterior del dominio del fluido (conocida como outgoing waves).

Por su parte, entre los modelos basados en la teoría de propagación de ondas se encuentran los de la teoría del rayo y los de la ecuación de la pendiente suave (mild slope), que requieren en general la asunción de una serie de hipótesis, algunas de las cuales pueden ser claramente retrictivas o irreales, como por ejemplo la de las relaciones H/L o H/hpequeñas o la de ondas que se propagan sin cambio de forma. La contrapartida a estas limitaciones es la posibilidad de llegar a formulaciones muy compactas y aplicables con un bajo coste computacional.

La refracción del oleaje determinada mediante las técnicas del trazado de los rayos, utilizando el principio de Fermat y la ecuación de la conservación de la energía a lo largo de cada rayo, no incluye la difracción de las ondas y, por tanto, resulta inadecuada cuando los efectos de la difracción son importantes. Frecuentemente, debido a la complejidad de la batimetría, los diagramas de rayos presentan múltiples intersecciones. Puesto que la refracción asume la conservación del flujo de energía entre rayos, la intersección de los mismos implicaría energía infinita en ese punto, lo que es físicamente imposible. Inicialmente, a la hora de desarrollar la teoría del rayo, se asumió que la intersección de los rayos estaba asociada a un proceso de rotura, considerando estos puntos lugares en los que la altura de ola era excesivamente grande como para ser estable. Sin embargo, no siempre las intersecciones se deben a la rotura, sino que pueden ser debidas a la presencia de un fenómeno de difracción en esos puntos, el cual se caracteriza por la cesión lateral de energía a través de los rayos y conlleva una disminución de la altura de ola que la teoría del rayo no es capaz de reproducir.

La difracción del oleaje alrededor de estructuras simples, tales como rompeolas, se ha resuelto analíticamente para fondo de profundidad constante (Sommerfeld, 1896). En el caso de estructuras cilíndricas, MacCamy and Fuchs (1954) presentaron la solución para fondo plano horizontal. Estas soluciones no dan sólo la altura de la onda en el área abrigada por la estructura, sino que con ellas se obtiene también el oleaje reflejado por ella. Versiones generalizadas de estos problemas de difracción, utilizando técnicas numéricas como el método de la función de Green, han dado lugar a potentes procedimientos de cálculo de fuerzas del oleaje sobre estructuras en aquellos casos en los que la fuerza de arrastre es mucho menor que la de inercia.

Una práctica generalizada para incorporar los efectos de la difracción ha sido suspender los de la refracción en aquellas zonas donde la difracción es dominante, utilizando la solución analítica de Sommerfeld para fondo plano horizontal. Fuera del área de difracción predominante, se desprecian los efectos de la misma y sólo se considera la refracción. Esta metodología es claramente inexacta, pero permite la inclusión de la difracción de manera aproximada.

Sin embargo, los modelos combinados de refracción-difracción incluyen ambos efectos explícitamente, permitiendo el modelado del oleaje en aquellas regiones donde la batimetría es irregular y donde los efectos de la difracción son importantes. Las situaciones en las que los rayos se cruzan debido a concentraciones locales provocando cáusticos, se tratan adecuadamente por medio de estos modelos sin que se predigan amplitudes infinitas. Estos modelos de refracción-difracción combinada son apropiados, por tanto, para el cálculo de las alturas de ola y su dirección en aquellas áreas donde están presentes ambos fenómenos.

Con base a este análisis, se deduce que la mejor opción a la hora de acoplar un modelo de oleaje con un modelo de una línea es emplear un modelo combinado de refraccióndifracción, puesto que es muy habitual que ambos fenómenos estén presentes en los casos de aplicación de los modelos de evolución de la línea de costa a largo plazo y este tipo de modelos los simula conjuntamente de manera adecuada. Además, puesto que se van a emplear en simulaciones de largo plazo, son requisitos imprescindibles que tengan un bajo coste computacional y que se empleen formulaciones muy compactas para evitar, en lo posible, que puedan llegar a desestabilizarse y generar soluciones físicamente imposibles, aspectos que cumplen estos modelos. Por su parte, con base en los modelos de refracción-difracción se pueden desarrollar modelos de oleaje monocromático y modelos de oleaje espectral. Un modelo de oleaje monocromático es aquel que propaga un tren de ondas de una única frecuencia y amplitud, mientras que un modelo de oleaje espectral propaga un espectro de energía asociado a un oleaje irregular aleatorio.

Generalmente, se utilizan los modelos monocromáticos para caracterizar el patrón de oleaje en una zona de estudio, ya que su bajo coste computacional permite propagar un alto número de trenes de ondas monocromáticas, las cuales se obtienen a partir de los regímenes medios direccionales del oleaje en el área. Estos modelos representan bastante bien el patrón de oleaje. Dentro de este grupo se ubica el modelo numérico Oluca-MC, el cual es un modelo de propagación de oleaje monocromático débilmente no lineal.

Los modelos espectrales permiten conocer en una zona de estudio la altura de ola estadísticamente representativa de un estado de mar (oleaje irregular aleatorio). Estos modelos son bastante precisos en el cálculo de las alturas de ola, requiriendo un alto coste computacional, razón por la cual generalmente se aplican en la propagación de casos extraordinarios o en aquellos casos en los que es necesario obtener los regímenes de oleaje en una zona costera con una gran precisión, como es el caso del diseño de estructuras. Dentro de este grupo se encuentra el modelo Oluca-SP, que es un modelo espectral no dispersivo que resuelve la fase.

Tanto el modelo Oluca-MC como el Oluca-SP están incluidos dentro del Modelo Integral de Propagación de Oleaje, Corrientes y Morfodinámica de Playas (MOPLA), que a su vez forma parte del programa Sistema de Modelado Costero (SMC), del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (GIOC). Dichos modelos se han desarrollado respectivamente con base en los modelos REF/DIF 1 (Kirby and Dalrymple, 1994) y REF/DIF S (Kirby and Özkan, 1994) de la Universidad de Delaware (USA) y mejorados, posteriormente, por miembros de la citada Universidad y del GIOC. De esta manera, se han incluido mejoras en el método numérico de resolución y condiciones de contorno para que puedan ser aplicados en la realización de proyectos de ingeniería costera, con batimetrías y oleajes reales, puesto que inicialmente los programas REF/DIF fueron codificados para ser aplicados en casos teóricos.

En la práctica, se debe llegar a un acuerdo entre el nivel de complejidad exigido al modelo de oleaje y el nivel de precisión con el que se realizan los cálculos del transporte de sedimento en los modelos de una línea, por lo que la implementación de un modelo de oleaje monocromático es idónea. Este tipo de modelos es lo suficientemente rápido como para poder realizar ejecuciones a largo plazo y los resultados del oleaje en rotura obtenidos son adecuados para calcular el transporte longitudinal de sedimento. Además, aunque se pueden tener en consideración estructuras costeras en los modelos de una línea, el objetivo de los mismos es analizar la influencia que tienen las estructuras en el cambio de posición de la línea de costa, no su diseño, por lo que dicha limitación no es importante en el acoplamiento del modelo de oleaje monocromático con el modelo de una línea.

3.2. Modelo de propagación de oleaje monocromático

3.2.1. Descripción conceptual del modelo

El modelo de propagación de oleaje monocromático Oluca-MC ha sido desarrollado con base en la formulación no lineal de la aproximación parabólica de la refracción-difracción, con interacción oleaje-corriente, propuesta por Kirby (1986a).

Este modelo se clasifica dentro de los modelos no dispersivos en amplitud, que resuelven la fase y son aplicables sobre batimetrías complejas. La batimetría puede incluir la formación de bajos en las desembocaduras de entradas costeras o estuarios, donde la refracción, difracción, asomeramiento, rotura por fondo e interacción ola-corriente son de forma simultánea importantes.

El modelo Oluca-MC requiere como condición inicial en el contorno exterior (mar adentro) un oleaje definido por una onda monocromática (altura de ola, período y dirección), la cual es propagada, mediante el modelo parabólico, en una malla rectangular sobre la batimetría real para un nivel de marea definido. El modelo halla las variables en cada fila de la malla en función de las variables de la fila anterior, avanzando fila a fila sobre la malla de cálculo desde el contorno inicial exterior hasta la costa.

Asimismo, las condiciones de contorno laterales son importantes. A pesar de que existen varias maneras de tratar los contornos, ninguna de las condiciones de contorno existentes hasta la fecha logran la transmisión total del oleaje radiado. El modelo Oluca-MC tiene la posibilidad de tratar dos tipos de condiciones de contorno laterales; contornos cerrados reflejantes y contornos abiertos que permiten la transmisión del oleaje.

Dado que, en general, los contornos laterales son límites artificiales de la zona a modelar y son puntos de agua, la condición más realista para estos casos es aquella que permite tanto la entrada como la salida del oleaje del interior del dominio sin producir reflexiones inexistentes en la realidad (véase figura 3.1). Esta condición de transmisión puede obtenerse suponiendo las hipótesis de Kirby (1986b): ondas planas, no hay cambios de la profundidad en los contornos en dirección y y la ley de Snell es válida en los contornos.



Figura 3.1: Condiciones de contorno laterales abiertas. (Fuente: GIOC, 2001)

A pesar de imponer ocasionalmente condiciones de contorno abiertas, los resultados indican que siempre existe una cierta reflexión irreal hacia el interior del dominio. De hecho, en el Oluca-MC se utiliza generalmente una condición lateral de contorno totalmente reflejante en cada extremo, lo que requiere que la especificación de la malla del modelo se realice con cuidado, puesto que la reflexión en los laterales de la onda incidente se puede propagar rápidamente hacia el área de interés, dando resultados erróneos. En general, la anchura de la malla debería ser tal que las reflexiones en los laterales no alcancen la zona de interés.

Este modelo parabólico de refracción-difracción débilmente no lineal se basa en un desarrollo en serie de Stokes de las ecuaciones que definen el problema de la propagación de ondas. Se obtiene a partir de las formulaciones de pendiente suave (batimetría con profundidad suavemente variable) e incluye una aproximación hasta el tercer orden de la velocidad de fase de la onda o celeridad. La amplitud de la onda se aproxima hasta el segundo orden (Liu and Tsay, 1984). Hay que señalar que el modelo no incluye todos los términos de tercer orden de un desarrollo de Stokes. Asimismo, el modelo permite determinar el efecto de unas corrientes dadas, sobre la propagación del oleaje.

La aplicación de este modelo teórico a situaciones prácticas incluye el uso de una aproximación parabólica, lo que restringe el uso del modelo a los casos donde la dirección de propagación del oleaje está dentro de $\pm 55^{\circ}$ alrededor de una dirección de propagación dominante. Mediante esta aproximación parabólica se obtiene la amplitud de la onda resolviendo la ecuación por medio de una técnica de diferencias finitas, resultando un sistema de matrices tridiagonales que son, desde un punto de vista computacional, muy rápidas de invertir.

Hay que señalar que la ecuación de la pendiente suave en su forma original corresponde a una ecuación diferencial elíptica, cuya resolución requiere el conocimiento de las condiciones de contorno en todos los contornos: mar adentro, contacto con tierra (línea de costa) y contornos laterales. Existen varios modelos numéricos que resuelven esta ecuación diferencial en su forma elíptica mediante elementos finitos; sin embargo, la difícil implementación de las condiciones de contorno ha hecho que sean utilizados principalmente para el estudio de agitación portuaria, donde las condiciones de contorno en diques y muelles son relativamente sencillas de modelar.

Por su parte, la ecuación de la pendiente suave en su forma parabólica es la más extendida en el estudio combinado de la refracción y la difracción en grandes dominios, como es el caso del Oluca-MC, siendo además el modelo empleado apto para la resolución de problemas de propagación que cubran múltiples longitudes de onda. La principal ventaja es que la resolución numérica puede realizarse desde profundidades indefinidas hacia la costa sin especificar las condiciones de contorno en esta última, lo que era sumamente difícil al no saber dónde se iba a producir la rotura. Como contrapartida, este tipo de modelos tiene como requisito que las ondas tengan una dirección principal de propagación, puesto que la difracción se produce exclusivamente en la dirección perpendicular a la misma.

En muchos casos, la simulación realista de la propagación de oleaje requiere la inclusión de efectos de disipación de energía, que introducen una ligera no linealidad. La presencia localizada de disipación de energía en el fondo o en algún punto de la columna de agua provoca la difracción del oleaje, así como su atenuación. El modelo Oluca-MC permite tres opciones de disipación por fondo; capa límite laminar en superficie y fondo (Phillips, 1966), capa límite turbulenta en el fondo (Dean and Dalrymple, 1984) y fondos porosos de arena (Liu and Dalrymple, 1984). En campo, las condiciones de oleaje son tales que la capa límite en el fondo es siempre turbulenta.

Sin duda, la rotura del oleaje es uno de los fenómenos más significativos de la hidrodinámica costera, puesto que afecta a diferentes procesos costeros naturales, tales como las corrientes litorales y el transporte de sedimento. La rotura de la onda, que se produce principalmente en la zona de rompientes al disminuir el calado, también puede producirse en aguas más profundas por peraltamiento de la ola, y es un fenómenos altamente no lineal y disipativo.

El análisis de la rotura de la onda es fundamental para un modelo de propagación de oleaje y debe servir para determinar la pérdida de energía sufrida, así como la altura de ola y profundidad a la que se produce dicha rotura.

En general, los modelos de propagación de ondas en rotura pueden clasificarse en tres categorías (Massel, 1989): modelos que limitan la altura de la onda; modelos de propagación de bores y modelos que determinan la variación espacial de la energía de las ondas o de la "wave action".

El modelo Oluca-MC emplea un modelo del último tipo, desarrollado por Dally et al. (1985), que trata de hallar una relación con el coeficiente de disipación de energía. Este modelo no sólo pretende describir la rotura, sino también el proceso de recomposición de las ondas, hecho observable en la naturaleza. Dally et al. (1985) consideraron en el perfil una onda que, propagándose desde aguas profundas por una pendiente, inicia la rotura en el punto donde el perfil empieza a ser horizontal. La rotura continúa hasta que la ola alcanza una altura de ola estable, lo cual fue comprobado con datos de laboratorio por Horikawa and Kuo (1966).

Empleando el modelo de disipación por rotura del oleaje y el criterio de inicio de rotura dado por McCowan (1891), el Oluca-MC es capaz de determinar el oleaje tanto fuera como dentro del área de rotura.

Por su parte, las islas, paredes verticales, diques, etc. que cortan la superficie libre y las costas que puedan tener zonas de rotura, se tratan mediante la técnica de la "película delgada" o "thin film" de Dalrymple et al. (1984b). Esta técnica, acoplada al modelo de rotura, permite el cálculo sencillo de las alturas de ola alrededor de las islas u obstáculos, reemplazando la zona que aflora por encima del nivel del agua por un bajo de fondo plano y de profundidad muy reducida (del orden de 1 mm). De esta manera, se incluye la zona de tierra en el interior del dominio sin modificar este último; es decir, se inundan artificialmente las zonas de tierra del dominio con una película de agua de profundidad 1 mm. El modelo de rotura reduce las alturas de ola sobre el bajo a menos de un milímetro, de manera que la energía que pasa por encima del bajo resulta despreciable. De esta manera, el Oluca-MC no distingue, desde el punto de vista computacional, las islas de las áreas de mayor profundidad, ya que todo el dominio de cálculo estará formado por agua y todos los nodos de la malla estarán activos, obteniéndose sin embargo, como resultado, la influencia de las islas sobre el oleaje. Algunos ejemplos de rotura del oleaje obtenidos con el modelo se pueden observar en Dalrymple et al. (1984a) y Kirby and Dalrymple (1986b).

Cuando se emplean aproximaciones parabólicas de orden superior para la simulación de la propagación de ondas alrededor de islas u obstáculos, el hecho de que haya ondas en rotura en una parte de los nodos de una fila (dirección y) y de ondas sin romper en el resto, provoca cambios bruscos en la amplitud de las ondas entre dos puntos consecutivos de la malla, lo que puede llegar a generar ruido numérico. Inicialmente, este ruido numérico aparece en forma de grandes valores de la amplitud en nodos aislados y se propaga, entonces, como ondas de alta frecuencia en dirección transversal hacia el interior del dominio de cálculo, pudiendo llegar a falsear los resultados. Para resolver dicho ruido numérico es necesario diseñar un filtro que reduzca estas perturbaciones. Kirby (1986a) y el GIOC, tras estudiar detenidamente este problema, adoptaron un filtro de forma que la energía en la fila filtrada se mantiene constante.

Para obtener una descripción más detallada del modelo Oluca-MC, así como la formulación del mismo, consultar GIOC (2001).

3.2.2. Hipótesis y limitaciones fundamentales del modelo

Las hipótesis del modelo parabólico de propagación son las que se enumeran a continuación:

- Fluido: no viscoso, incompresible y densidad constante.
- Flujo: irrotacional y estacionario.
- Dinámicas: presión constante en la superficie libre y no se considera ni la acción del viento ni la de Coriolis.
- **Contornos:** fondo de pendiente suave (se asume que las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales son pequeñas en comparación con la longitud de onda). Para el modelo lineal, Booij (1983) realizó una comparación entre un modelo numérico exacto y el de la ecuación de pendiente suave para ondas propagándose sobre una playa, concluyendo que hasta pendientes del fondo de 1:3, el modelo de la pendiente suave es exacto y que para pendientes mayores predice adecuadamente las tendencias.
- Propagación: no linealidad débil (dependencia débil de la ecuación de dispersión con la amplitud de ola; modelo no lineal Stokes-Hedges). Y aproximación parabólica (las componentes se propagan principalmente en una dirección x, despreciando términos del tipo
 ²(1)/_{∂x²}).

Las ventajas de la aproximación parabólica son las que siguen:

- Es una ecuación de gobierno correcta para la propagación de componentes lineales sobre fondos de pendientes suaves en presencia de corrientes.
- Es una ecuación de tipo parabólico y, como tal, no necesita condiciones en todo el contorno, sino que basta con una condición inicial en el contorno desde el que se va a propagar el oleaje y condiciones en los contornos laterales.

 Es una herramienta muy útil para reducir el esfuerzo y el tiempo de computación, pues pueden utilizarse esquemas implícitos de seis puntos como el de Crank-Nicholson y obtener soluciones rápidas y estables.

Mientras que sus desventajas son las siguientes:

- El ángulo de propagación del oleaje está limitado a $\pm 55^{\circ}$ con respecto al eje principal (x).
- Cuanta menor variación haya respecto a la dirección principal x, más aproximada será la solución.

Por tanto, como resultado de la primera desventaja de la aproximación parabólica, se deduce que el modelo Oluca-MC requiere que las ondas tengan una dirección principal de propagación, dado que la difracción se produce exclusivamente en la dirección perpendicular a la misma, siendo el ángulo de propagación permitido de $\pm 55^{\circ}$ con respecto a dicha dirección principal.

Además, la principal limitación del modelo Oluca-MC es su sensibilidad respecto a la batimetría considerada, principalmente en el contacto con tierra a nivel de la línea de costa y en los contornos de la malla de cálculo. Por este motivo es importante verificar, en primer lugar, la batimetría de partida para evitar discontinuidades en ella y asegurar que se va a cumplir el requisito de pendiente suave.

3.2.3. Conclusiones

Puesto que las ecuaciones del transporte longitudinal de sedimento, necesarias para definir la evolución de la línea de costa, dependen de las características del oleaje en rotura, es necesario determinar la altura de ola y la dirección del oleaje en rotura mediante un modelo de oleaje. De esta manera, se podrán calcular las variaciones longitudinales del transporte de sedimento y, por consiguiente, la evolución de la línea de costa.

El Oluca-MC es un modelo de propagación de oleaje monocromático no dispersivo, que resuelve la fase a partir de la ecuación de la pendiente suave en su aproximación parabólica mediante un modelo en diferencias finitas. La ecuación que emplea este modelo para simular la propagación de las ondas considera los fenómenos de asomeramiento, refracción por fondo, difracción, presencia de corrientes, disipación de energía, rotura y dispersión por amplitud.

La aplicación de los modelos que resuelven la fase se limita a áreas relativamente pequeñas, pero con la ventaja de que tienen una resolución más fina que los modelos que promedian la fase. Un ejemplo de estos últimos es el modelo SWAN, implementado en el modelo híbrido Delf3D y UNIBEST de Deltares, que al requerir menor resolución espacial se puede aplicar en áreas mucho mayores para estudios de ámbito global. El hecho de que las mallas del Oluca-MC deban ser más pequeñas no supone un problema a la hora de acoplarlo al modelo de partida UnaLinea, puesto que la aplicación del modelo híbrido de la tesis, IH-MOEC, es para estudios de ámbito local. Además, tal y como se comentó en el capítulo anterior, el modelo SWAN no proporciona buenos resultados en geometrías complejas donde la difracción es el fenómeno predominante, puesto que no es capaz de reproducirla en un sentido estricto, sino que lo hace mediante la incorporación del término de tasa de giro direccional (Holthuijsen et al., 2003). Sin embargo, es muy habitual que la difracción esté presente en los casos de aplicación de los modelos de evolución de línea de costa, puesto que es común la presencia de diques exentos, espigones, salientes, muros paralelos a la costa, etc., por lo que es importante que el modelo de oleaje empleado sea capaz de resolver la difracción adecuadamente; punto fuerte del modelo Oluca-MC.

Por otro lado, gracias al acoplamiento del modelo Oluca-MC se podrá tener en cuenta en la propagación del oleaje la morfología detallada de la zona de estudio, como barras, islas, bajos, rip channels o la evolución de la morfología alrededor de las estructuras y salientes, que determinan dicha propagación y, por tanto, influyen en la evolución de la línea de costa.

Con un modelo de refracción de rayos, por ejemplo, sería imposible computar la altura de ola detrás de un bajo, debido a que el oleaje se concentra al refractarse por ambos lados del mismo, apareciendo una zona de cáusticos y de cruce de rayos. Mientras que utilizando un modelo de refracción-difracción como el Oluca-MC, si es posible modelar dicha zona de concentración energética, ya que la difracción reduce el efecto de acumulación de energía que se produciría considerando únicamente el fenómeno de la refracción.

Por último, será necesario tener en cuenta la interacción entre el modelo de oleaje y el de línea de costa, puesto que a medida que cambia la línea de costa, se altera la batimetría y, con ella, la propagación del oleaje.

La presencia de estructuras, por ejemplo, produce cambios en la orientación de la línea de costa y en la batimetría próxima a la misma. Estos cambios espaciales y temporales en la batimetría costera originarán cambios, a su vez, en el oleaje en rotura; por tanto, la altura de ola y la dirección en rotura variarán de acuerdo a la curvatura local de la línea de costa. Por este motivo, la incorporación de la interacción del oleaje con las estructuras y cambios en la batimetría es fundamental para proporcionar una descripción realista del cambio de la línea de costa. La nueva línea de costa calculada mediante la variación longitudinal del transporte de sedimento, se deberá emplear para regenerar la batimetría necesaria para el modelo de oleaje, y ambas serán empleadas como datos de entrada para el siguiente paso de tiempo, en el cual se volverán a determinar las características del oleaje en rotura para la evolución de la línea de costa. Este procedimiento se repetirá sucesivamente hasta terminar el periodo de simulación. En la figura 3.2 se puede ver un esquema general del acoplamiento de los dos modelos y su interacción, así como la secuencia de cálculo.



Figura 3.2: Esquema general del acoplamiento de los modelos Oluca-MC y UnaLinea.

Todos estos aspectos mejoran, considerablemente, el cálculo de la altura de ola y dirección del oleaje en rotura con respecto a los modelos de una línea tradicionales, lo que provoca mejoras a su vez en el cálculo del transporte longitudinal de sedimento y, por tanto, en la predicción de la evolución de la línea de costa.

3.3. Validación del modelo Oluca Monocromático

El modelo Oluca-MC es un modelo que está ampliamente validado, tanto con soluciones analíticas como con ensayos de modelos físicos en laboratorio. En el apéndice A se pueden consultar dichas validaciones y en este apartado se recoge un resumen de las mismas.

Para validar el fenómeno de asomeramiento se propagó un tren de ondas sobre una playa y se comparó ese resultado numérico con la solución analítica que se obtiene a partir de la hipótesis de conservación del flujo de energía. El error cuadrático medio relativo para la altura de ola fue de orden 10^{-4} .

Dada la linealidad de las ecuaciones los resultados no dependen de la altura de ola inicial, dependiendo muy ligeramente del peralte de las ola. Concretamente, se observó que los errores relativos aumentan ligeramente al aumentar el periodo de la onda, especialmente para el caso de ondas largas en aguas poco profundas, aunque su influencia no es cuantitativamente significativa. Respecto a la pendiente, los resultados no dependen prácticamente del valor de la misma.

Para la validación del fenómeno de refracción por fondo se propagó un tren de ondas sobre un fondo plano inclinado con distintos ángulos de incidencia, comprobándose como, a medida que aumenta el ángulo de incidencia, los errores cuadráticos medios relativos crecen tanto para la altura de ola como para el ángulo de propagación. Admitiendo errores relativos del 3 % el ángulo de incidencia debe ser menor que 50°, ya que para 60° se obtuvieron errores del 8 %.

Por su parte, la solución teórica de la difracción tras un obstáculo no se suele presentar de forma analítica debido a su complejidad, pues requiere el uso de integrales de Fresnel, las cuales deben resolverse numéricamente. Se suele mostrar dicha solución mediante tablas y gráficos en los que se representan las isolíneas de difracción en un determinado dominio, esto es, las líneas que unen los puntos en los que el coeficiente de difracción K_0 es el mismo. Estos gráficos se conocen con el nombre de ábacos de Wiegel (1962), puesto que fue él quien los presentó por primera vez.

Se realizaron gráficos que muestran las isolíneas de difracción producidas tras un obstáculo semi-infinito, recto, rígido e impermeable en un dominio con profundidad constante, evitando así la interferencia de los fenómenos ya calibrados de asomeramiento y refracción, en los que la profundidad era fundamental.

Se analizaron una serie de casos para distintos ángulos de incidencia, pudiéndose comprobar como los resultados numéricos son mejores para relaciones h/L próximas a las correspondientes a aguas intermedias y poco profundas. Asimismo, al igual que ocurre en los ábacos de Wiegel (1962), en las proximidades del extremo del dique se observa que la solución es altamente variable, ya que en este punto los gradientes de altura de ola y dirección de propagación son muy grandes.

Respecta al ángulo de incidencia sobre el dique, hay que destacar la bondad del modelo para los casos estudiados. En todos ellos, especialmente con ángulo de incidencia de 30°, la zona de sombra que se crea a sotamar del dique es la que presenta los mayores errores. Así todo, se puede concluir que el fenómeno de la difracción está bien modelado por el modelo Oluca-MC.

El modelo de rotura del oleaje incorporado en el Oluca-MC, el cual incluye tanto el inicio de la rotura como la disipación de energía producida en el interior de la zona de

rompientes, fue calibrado y verificado por Dally et al. (1985), empleando datos de laboratorio obtenidos por Horikawa and Kuo (1966). Puesto que el modelo de propagación es válido para oleaje regular, se tomó como base para la comparación de los resultados numéricos, un conjunto de datos de laboratorio presentados por Stive (1985) y obtenidos

El programa de medidas llevado a cabo consistió en ensayos en canal de oleaje; un primer ensayo en un canal de escala grande y otro en un canal de pequeña escala.

con oleaje regular. De esta manera se pudo contrastar el modelo de rotura.

Se compararon las medidas experimentales con los resultados del modelo, observándose que los resultados del modelo se ajustan bastante bien a los datos experimentales, especialmente en el ensayo a pequeña escala. En el ensayo a gran escala el modelo no llega a reproducir fielmente el punto de inicio de la rotura, sin embargo hay que resaltar una cierta dispersión de las medidas experimentales. Por su parte, se obtiene una variación de la altura de ola bastante aproximada a la de los ensayos, con una disipación inicial intensa tras el punto de rotura, y una disipación posterior ligeramente más suave.

Por último, dentro de las limitaciones del modelo de rotura, hay que destacar que éste no incluye las variaciones del nivel medio provocadas por el oleaje, como el "set-up" y el "set-down". Particularmente, las variaciones debidas al "set-up" son importantes en la zona de rompientes, ya que pueden llegar a alcanzar valores relativos del 10-20 % respecto a la altura de ola.

Asimismo, se validó el modelo Oluca-MC con resultados experimentales obtenidos a partir de un modelo reducido. Las medidas experimentales fueron obtenidas de un ensayo realizado por Berkhoff (1982); Berkhoff et al. (1982). Dicho modelo reducido constaba de una batimetría con un bajo elíptico, con una serie de secciones donde se tomaron las medidas. En el contorno final del ensayo existía una playa para que la energía propagada se disipara casi totalmente por el proceso de rotura del oleaje. Una descripción analítica detallada de la batimetría se puede encontrar en Kirby and Dalrymple (1986a).

Se eligió este caso de validación porque el dominio presentado daba lugar a cáusticos y, por tanto, se producía un cruce de ortogonales si se empleaban métodos de refracción por rayos. De esta manera, los resultados numéricos del modelo Oluca-MC mostraron la utilidad del mismo en casos donde es necesario considerar el efecto combinado de refracción-difracción.

Este caso de estudio fue también útil para comprobar las diferencias entre el modelo lineal y los modelos no lineales de Stokes y de Dalrymple compuesto, ya que se utilizaron tres modelos posibles diferentes en función de la elección del término no lineal: modelo lineal, modelo de Stokes y modelo compuesto de Kirby and Dalrymple.

Los resultados de los tres modelos para las distintas secciones mostraron la utilidad de incluir el término no lineal. Con un modelo de refracción de rayos sería imposible calcular la altura de ola detrás del bajo, ya que el oleaje se concentra al refractarse por ambos lados del mismo, apareciendo una zona de cáusticos y de cruce de rayos. Sin embargo, empleando un modelo de refracción-difracción como el Oluca-MC, es posible modelar dicha zona de concentración energética, puesto que la difracción reduce el efecto de acumulación de energía que se produciría considerando únicamente el fenómeno de refracción.

No obstante, el modelo de refracción-difracción lineal tiende a calcular por exceso los picos de altura de ola en las zonas de concentración de energía, donde el peralte de la onda se hace grande y los efectos no lineales son importantes. Por este motivo, se puede concluir que los resultados numéricos para los modelos no lineales son mejores que para el modelo lineal, excepto en el inicio de la formación de los cáusticos, lo cual puede ser debido a la limitación del modelo para permitir una rápida concentración de las olas.

3.4. Comparación de los modelos de propagación de oleaje simplificados utilizados en los modelos tradicionales de una línea y el modelo Oluca Monocromático

3.4.1. Introducción

Los modelos de evolución de la línea de costa a largo plazo necesitan las características del oleaje en rotura para determinar el transporte longitudinal de sedimento. En este tipo de modelos el oleaje suele ser calculado de una manera simplificada. Sin embargo, en las zonas de refracción-difracción (diques exentos, diques de abrigo en puertos, cabos, salientes, etc.), una determinación "demasiado simplificada" del oleaje no es adecuada, como se mostrará a continuación.

Así pues, el objetivo de este apartado es comparar los modelos de propagación del oleaje simplificados utilizados tradicionalmente en los modelos de una línea, con el modelo de propagación Oluca-MC utilizado en la presente tesis, asumiendo que los resultados del modelo Oluca-MC son los que se ajustan a la realidad, con el fin de analizar la bondad de los modelos.

Se puede asumir que los resultados del modelo Oluca-MC son los que se ajustan a la realidad en base a la validación del mismo, llevada a cabo tanto en campo como en laboratorio y presentada brevemente en el apartado anterior, donde se demostró que el modelo representa bien las variaciones de altura de ola y dirección del oleaje en zonas costeras, especialmente en rotura. Por este motivo, se puede asumir que el Oluca-MC es un modelo preciso, pudiendo ser implementado en el IH-MOEC.

La mayoría de los modelos de evolución de la línea de costa a largo plazo calculan el coeficiente de difracción en áreas sometidas a procesos de refracción-difracción mediante el método de Goda et al. (1978), así como la aproximación de este método realizada por Kraus (1984).

El modelo GENESIS (Hanson and Kraus, 1989) y el modelo ONELINE (Dabees and Kamphuis, 1998) son dos modelos de una línea muy habituales. El modelo de propagación utilizado por ambos para la determinación de las características del oleaje en rotura en estas zonas de refracción-difracción va a ser comparado, con base en Requejo (2005), frente al modelo de propagación Oluca-MC implementado en el modelo de la tesis.

3.4.2. Primeros trabajos de difracción y refracción-difracción

Los primeros trabajos de difracción fueron realizados por Sommerfeld (1896), quien estudió el caso de fondo con profundidad uniforme, aplicó la teoría potencial (teoría lineal) y obtuvo la ecuación de Helmholtz a partir de la ecuación de Laplace, asumiendo un movimiento armónico simple. En la figura 3.3 se muestra un esquema simple de la propagación del oleaje hasta alcanzar un dique exento y difractarse, empleando profundidad constante. El área se encuentra dividida en una zona iluminada y una zona de sombra, que son delimitadas por el oleaje incidente en el morro. Los frentes en la zona de sombra pueden aproximarse mediante semicírculos con centro en el morro del dique.



Figura 3.3: Esquema de la difracción generada por un dique exento en fondo uniforme. (Fuente: Dean and Dalrymple, 1991)

El estudio del fenómeno conjunto de la refracción-difracción se basa en Berkhoff (1972), quien puso fin a las teorías previas simplificadoras, las cuales asumían que la difracción era el fenómeno predominante en la proximidad del obstáculo y la refracción lo era a una distancia "suficientemente alejada" de él.

Berkhoff (1972) obtuvo una ecuación capaz de tener en cuenta la refracción y la difracción conjuntamente, teniendo en cuenta teoría lineal de ondas y considerando la hipótesis de que el fondo variaba muy suavemente en una longitud de onda, denominada ecuación de la pendiente suave o "mild slope equation".

3.4.3. Difracción con el método aproximado de Goda et al. (1978) y Kraus (1984)

El estudio de la difracción a través de la solución de Sommerfeld (1896) y la aproximación de Penney and Price (1952), a pesar de aportar resultados razonables para el caso de oleaje regular, esto es, oleaje de banda estrecha tipo "swell", pierde su validez cuando el oleaje es irregular y la dispersión direccional del mismo aumenta, es decir, oleajes de banda ancha tipo "sea". Se comprobó que en la difracción, la dispersión direccional o angular del oleaje tiene una influencia mucho mayor que la dispersión frecuencial del mismo (Goda, 1985; Goda et al., 1978).

Goda et al. (1978) plantearon un método para determinar la difracción en el caso de oleaje irregular (Goda, 1985). Para definir el espectro frecuencial incidente, adoptaron la forma propuesta por Bretschneider (1959, 1968) y modificada por Mitsuyasu (1968). El método aproximado de Goda (1985) considera que la estructura es un obstáculo que obstruye una parte del espectro direccional del oleaje incidente.

Kraus (1984) planteó una aproximación para determinar el coeficiente de difracción de oleaje irregular, la cual consiste en emplear directamente la simplificación de Goda et al. (1978) pero ajustando sus gráficas a una serie de expresiones, con la finalidad de obtener una mayor rapidez de cálculo en su implementación dentro de los modelos de evolución a largo plazo.

3.4.4. Oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción con el modelo GENESIS

En este apartado se describe el proceso seguido por el modelo GENESIS (Hanson and Kraus, 1989) para la determinación del oleaje en rotura en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los preponderantes como, por ejemplo, en áreas sometidas a la influencia de diques exentos. Este tipo de áreas se puede dividir en tres zonas, véase figura 3.4. Existe una zona exterior, donde la presencia del dique no afecta ni los frentes del oleaje ni a la altura de ola. Una zona iluminada, donde la altura de ola se ve influenciada por la existencia de la estructura pero los frentes permanecen inalterados. Y, por último, una zona de sombra, donde tanto los frentes del oleaje como la altura de ola se ven modificados por la presencia del dique.



Figura 3.4: Delimitación de zonas en el área sometida a la influencia de un dique exento. (Fuente: Requejo, 2005)

En el modelo GENESIS, se delimita la zona exterior y la zona iluminada mediante un punto en el que el coeficiente de difracción tiene un valor próximo a la unidad. Si se emplea la aproximación de Kraus (1984) para el cálculo del coeficiente de difracción, el límite entre estas dos zonas se produce para un valor del ángulo con respecto al ángulo del oleaje incidente de unos 33° a 35°. La separación entre la zona iluminada y la zona de sombra viene marcada por el rayo del oleaje incidente en el morro.

El método que utiliza GENESIS para calcular las características del oleaje en rotura en la región iluminada, se basa en asumir que el ángulo del oleaje no se ve afectado por la difracción, considerando únicamente el efecto de la difracción en la altura de ola mediante el coeficiente de difracción. Por tanto, en esta zona las olas se asomeran y refractan a partir de la profundidad y el ángulo del oleaje en el morro de la estructura.

Sin embargo, como el ángulo de salida del oleaje desde el morro no se conoce previamente dentro de la zona de sombra, se suele emplear la técnica del rayo para calcularlo, requiriendo grandes tiempos de ejecución. Por este motivo se tiene en cuenta el ángulo del oleaje dentro de la zona de sombra de una manera simplificada, asumiendo que los
rayos se refractan desde el morro (punto P_1 en la figura 3.5) hasta el punto de cálculo (punto P_2), partiendo con el ángulo que forma la línea recta entre ambos puntos (θ_g), a pesar de que el ángulo del oleaje con el que se debe salir desde el morro para alcanzar el punto P_2 es el ángulo θ_1 .



Figura 3.5: Representación esquemática del cálculo del oleaje en una zona sometida a la influencia de un dique exento en el modelo GENESIS. (Fuente: Hanson and Kraus, 1989)

El coeficiente de difracción se determina en la región de sombra de la misma manera que en la región iluminada, siguiendo la aproximación de Kraus (1984) al método simplificado de Goda (1985); Goda et al. (1978). En ambas regiones, se calcula el coeficiente de refracción con base en la ley de Snell (para batimetría recta y paralela) y el coeficiente de asomeramiento en base al principio de conservación de energía.

Una vez que se ha asumido un criterio de rotura, las características del oleaje en rotura se calculan de forma iterativa.

3.4.5. Oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción con el modelo ONELINE

Dabees and Kamphuis (1998) desarrollaron el modelo de evolución de largo plazo denominado ONELINE, en el que se empleó, para determinar las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción, un método totalmente diferente al del modelo GENESIS descrito. La teoría de difracción lineal, desarrollada para profundidad constante, predice formas circulares de los frentes del oleaje difractado. Sin embargo, el asomeramiento y la refracción asociada a una profundidad variable, alteran los frentes en las zonas sometidas a la influencia de estructuras (véase figura 3.6). Igualmente, distintos estudios de campo mostraron que la dispersión del oleaje asociada a la amplitud de la onda en zonas someras modificaba las formas circulares de los frentes, tendiendo hacia formas de arcos de radio decreciente (Weishar and Byrne, 1978).



Figura 3.6: Frentes de oleaje en áreas sometidas a la influencia de un dique exento,

determinados con los métodos convencionales (izquierda), frente a lo propuesto por Dabees (2000) (derecha). (Fuente: Dabees, 2000)

La mayoría de los modelos de evolución de largo plazo emplean, para simular el oleaje difractado en las zonas de influencia de los diques exentos, teoría de difracción lineal . En este tipo de modelos, se considera que los morros de los diques exentos son fuentes a partir de las cuales se radia el oleaje hacia la costa. Sin embargo, fuera de la zona de sombra el oleaje mantiene su forma de propagación inicial. Según Dabees (2000) esto es cierto en el caso de ondas luminosas, pero para ondas de gravedad el comportamiento es diferente a causa de la influencia de la inercia. A diferencia de las ondas luminosas, que pueden cambiar su curso repentinamente, la inercia de la masa de las partículas de agua de las ondas de gravedad impide que este cambio sea repentino. Esto hace que en la difracción, la influencia de la inercia unida al efecto del asomeramiento y la refracción, relaje cualquier cambio brusco alrededor del morro del dique, tendiendo hacia una forma elíptica más suave de los frentes del oleaje. Esto hace que exista una zona de transición (zona G de la parte derecha de la figura 3.6), en la cual los rayos del oleaje cambian, gradualmente, el curso en la proximidad del dique. Se asume que la anchura de la zona transicional es proporcional a la longitud de onda. Dabees (2000), basándose

en varias ejecuciones de calibración de su modelo, recomendó para determinar la zona de transición emplear un valor de dos a tres veces la longitud de onda.

Igualmente, se determinó, a partir del análisis de diferentes medidas de laboratorio y de campo (Hsu and Silvester, 1990; McCormick, 1993), que la planta de equilibrio de la línea de costa seguía una forma casi circular o elíptica, estando el centro localizado a una distancia separado del morro del dique. De esta manera el oleaje cerca de la costa seguirá una forma casi circular similar.

En base a todo esto, Dabees (2000) propuso un método para determinar las características del oleaje en rotura en estas zonas de refracción-difracción, el cual se describe a continuación.

Se asume que existe una serie de fuentes a partir de las cuales se radian las olas difractadas hacia la costa. Estas fuentes se extienden a lo largo de la distancia G, que es la zona transicional observada en la figura 3.6, desde el morro del dique exento y a lo largo del frente incidente en él. A medida que el oleaje se acerca a la costa y a causa del efecto de la refracción, las trayectorias del oleaje se curvan. Las olas viajan desde el punto I hacia el punto P asumiendo que sus ángulos siguen la ley de Snell (esquema de la figura 3.7). En este contexto se hace una hipótesis fundamental, la cual consiste en asumir que la refracción tiene lugar a lo largo de un arco circular, esto es, los puntos I y P pertenecen a un arco circular, tal y como se indica en dicha figura. De este modo, los frentes de oleaje casi circulares, a medida que se propagan hacia la costa, cambian hacia formas elípticas más suaves.

El ángulo en cualquier localización dada dentro de la zona de influencia del dique exento P (figura 3.7), se calcula asumiendo que el rayo del oleaje sigue un arco circular del punto I al punto P. El ángulo de salida del punto I (α_I) y el ángulo de llegada al punto P (α_P), se obtienen a partir de las ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente. Seguidamente se aplica la ley de Snell.

$$\alpha_I = \theta_{IP} + \xi \tag{3.1}$$

$$\alpha_P = \theta_{IP} - \xi \tag{3.2}$$

Respecto a las alturas de ola, Dabees (2000) emplea los diagramas del coeficiente de difracción para oleaje irregular de Goda (1985), pero en lugar de emplear la aproximación de Kraus (1984), realiza un análisis de regresión de estos gráficos para determinar, de este modo, el coeficiente de difracción (Kamphuis, 2000).



Figura 3.7: Representación esquemática del método propuesto para el cálculo de la refracción-difracción en áreas sometidas a la influencia de diques exentos. (Fuente: Requejo, 2005)

Al igual que en el modelo GENESIS, una vez definidas las características del oleaje con este método y con un criterio de rotura determinado, se calculan las características del oleaje en rotura de una forma iterativa.

3.4.6. Casos de oleaje en rotura con el modelo Oluca-MC

Puesto que en la tesis se ha implementado el modelo de propagación de oleaje Oluca-MC, se analizan una serie de casos con el objetivo de evaluar las características del oleaje en rotura obtenidas con dicho modelo en zonas de refracción-difracción y de comparar sus resultados con los estimados mediante los modelos simplificados de propagación del oleaje de los modelos GENESIS y ONELINE.

La configuración analizada ha sido la de un dique exento semi-infinito emergido e impermeable, con batimetría recta y paralela y siguiendo un perfil de equilibrio de Dean. Sin embargo, con la idea de estudiar la influencia de la batimetría, se han utilizado diferentes parámetros de forma del perfil de equilibrio (Ad).

En cuanto al oleaje incidente se ha considerado incidencia normal para todos los casos analizados. De hecho, en la mayoría de las situaciones reales, el oleaje alcanza el morro de las estructuras costeras con esta incidencia. Además, se han ejecutado casos con diferentes alturas de ola en el morro de la estructura y periodos del oleaje incidente. Así pues, se han analizado dos configuraciones:

- Configuración 1: dique exento semi-infinito separado 354 metros de la línea de costa, con profundidad en el morro del dique de 5 metros y parámetro de forma del perfil de equilibrio de Dean de $0.1 m^{\frac{1}{3}}$.
- Configuración 2: dique exento semi-infinito separado 354 metros de la línea de costa, con profundidad en el morro del dique de 10 metros y parámetro de forma del perfil de equilibrio de Dean de $0.2 m^{\frac{1}{3}}$.

Para cada una de las configuraciones, se han propagado tres casos de oleaje, con diferentes características del oleaje incidente en el morro:

- Caso 1: Altura de ola en el morro (Hmorro) de 1 metro y periodo del oleaje (T) de 8 segundos.
- Caso 2: Altura de ola en el morro (*Hmorro*) de 1 metro y periodo del oleaje (*T*) de 12 segundos.
- Caso 3: Altura de ola en el morro (*Hmorro*) de 3 metros y periodo del oleaje (*T*) de 12 segundos.

3.4.7. Resultados de oleaje en rotura con el modelo Oluca-MC y comparación con los modelos GENESIS y ONELINE

A continuación, se muestran los resultados del oleaje en rotura para los casos indicados en el apartado anterior. En las siguientes gráficas se presenta la variación longitudinal de la altura de ola en rotura H_b adimensionalizada con la correspondiente altura de ola en rotura en la zona no afectada por la estructura H_{bref} , así como la variación longitudinal del ángulo del oleaje en rotura θ_b .

En las figuras 3.8 y 3.9 se pueden visualizar los resultados para la Configuración 1 y Caso 1. En las figuras 3.10 y 3.11 los mismos resultados para la Configuración 1 y Caso 2. En las figuras 3.12 y 3.13 para la Configuración 1 y Caso 3. En las figuras 3.14 y 3.15 para la Configuración 2 y Caso 1. En las figuras 3.16 y 3.17 para la Configuración 2 y Caso 2. Y, por último, en las figuras 3.18 y 3.19 para la Configuración 2 y Caso 3.



Figura 3.8: Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 1.



Figura 3.9: Ángulo del oleaje en rotura establecido con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 1. (Positivo sentido antihorario).



 $\label{eq:Figura 3.10: Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 2.$



Figura 3.11: Ángulo del oleaje en rotura establecido con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 2. (Positivo sentido antihorario).



Figura 3.12: Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 3.



Figura 3.13: Ángulo del oleaje en rotura establecido con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 1 y el Caso 3. (Positivo sentido antihorario).



 $\label{eq:Figura 3.14: Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 2 y el Caso 1.$



Figura 3.15: Ángulo del oleaje en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 2 y el Caso 1. (Positivo sentido antihorario).



Figura 3.16: Altura de ola en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 2 y el Caso 2.



Figura 3.17: Ángulo del oleaje en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 2 y el Caso 2. (Positivo sentido antihorario).



 $\label{eq:Figura 3.18} \begin{array}{l} Figura \ 3.18: \ Altura \ de \ ola \ en \ rotura \ establecida \ con \ el \ modelo \ Oluca-MC \ y \ con \ los \ modelos \ simplificados \ de \ propagación \ de \ los \ modelos \ GENESIS \ y \ ONELINE \ para \ la \ Configuración \ 2 \ y \ el \ Caso \ 3. \end{array}$



Figura 3.19: Ángulo del oleaje en rotura establecida con el modelo Oluca-MC y con los modelos simplificados de propagación de los modelos GENESIS y ONELINE para la Configuración 2 y el Caso 3. (Positivo sentido antihorario).

3.4.8. Conclusiones

Con base en el estudio realizado y en los resultados obtenidos, se puede concluir que los métodos simplificados empleados por la mayoría de los modelos de evolución de playas de largo plazo, para la estimación de las características del oleaje en rotura, no son adecuados.

La zona de refracción-difracción se está evaluando con los métodos simplificados de una manera incorrecta. En el modelo GENESIS el área de influencia es fija y queda definida por un ángulo de 33-35 grados con respecto al rayo de incidencia del oleaje en el morro del dique exento. Mientras que en el modelo ONELINE el área de influencia ya no es fija y depende del periodo.

De igual modo, el ángulo del oleaje en rotura se está estimando de una manera inadecuada con los métodos simplificados. En el modelo GENESIS el ángulo se ve afectado en una zona más reducida de la esperada, puesto que en este modelo sólo se modifica el ángulo del oleaje en la zona de sombra. Por el contrario, aunque en el modelo ONELINE no se diferencia entre zona de sombra y zona iluminada, los valores obtenidos del ángulo del oleaje en rotura son excesivamente grandes.

Además, la altura de ola en rotura se está obteniendo de una manera incorrecta con dichos métodos simplificados. Las diferencias observadas en altura de ola, al igual que en el ángulo del oleaje, tienen dos componentes claramente identificadas; por una parte está el hecho de la incorrecta determinación de la zona de refracción-difracción y, por otra, están las diferencias en magnitud de la altura de ola. Tampoco se debe olvidar que las características del oleaje en rotura (altura de ola y ángulo del oleaje) están íntimamente unidas, por lo que una incorrecta determinación del ángulo del oleaje conlleva valores erróneos de la altura de ola.

Por último, es importante destacar que una incorrecta determinación de las características del oleaje en rotura tiene gran importancia en la evolución de la línea de costa, ya que a partir de las características del oleaje en rotura se calcula el transporte de sedimento y, a partir del mismo, el movimiento de la línea de costa. Es tal la importancia del método para determinar las características del oleaje, que ciertas características de la línea de costa, como la forma en planta de equilibrio, no van a poder ser representadas si se utiliza un método erróneo de propagación, independientemente de que se calibre el modelo de evolución de largo plazo empleado. Esto no sólo influye en la forma de la línea de costa, sino también en la velocidad con la que ocurren los procesos, al ser el oleaje más o menos energético. Merece la pena destacar que la presente tesis incorpora el modelo Oluca-MC como método de propagación del oleaje para la evaluación de las características del oleaje en rotura y este apartado sirve, precisamente, para poner de manifiesto la mejora que supone esta implementación.

3.5. Implementación del modelo Oluca Monocromático

3.5.1. Definición de las mallas

La terminología usada para una malla de referencia del modelo Oluca-MC se muestra en la figura 3.20. Dicha malla está formada por una red rectangular de puntos, de dimensiones MRxNR en los ejes x e y respectivamente. El eje x tiene aproximadamente la dirección de la propagación del oleaje, desde mar adentro hacia la línea de costa, mientras que el eje y es perpendicular a él. En cada uno de los puntos o nodos se definen los datos de entrada, la profundidad h y las componentes U y V de la velocidad de la corriente, así como los valores de la amplitud compleja A.

Se asume que el sistema de coordenadas x-y tiene por origen el punto (IR, JR) = (1, 1). Los nodos están separados una distancia DXR y DYR uniforme en las direcciones x e y respectivamente. Para una mejor descripción del dominio, se hace la distinción entre fila IR, que es la fila de puntos JR = 1, NR, y bloque IR, que es el espacio físico entre las filas IR e IR + 1. El conjunto de puntos IR = 1, MR con JR fijo es la columna.



Figura 3.20: Malla de referencia del modelo de oleaje Oluca-MC. (Fuente: GIOC, 2001)

Una característica del modelo es que se pueden subdividir los espaciados en ambas direcciones y obtener así una malla más finamente discretizada y densa. Se suele hacer en casos donde el espaciado es muy grande o cuando existen características batimétricas especiales que aconsejan una resolución más precisa de la malla.

La subdivisión ND en la dirección y, es definida por el usuario y aplicada uniformemente a lo largo de cada fila. Mientras que la subdivisión MD(IR) en la dirección de propagación x, la determina el propio programa y es variable en cada bloque. En este segundo caso, el código calcula un factor de número de onda medio en cada fila inicial de un bloque, y elige MD(IR) de forma que haya al menos 10 puntos por longitud de onda en ese bloque IR. En la figura 3.21 se muestra un ejemplo de subdivisión de la malla.

Una vez que se ha subdividido la malla, el código numérico utiliza esta nueva red como su dominio de cálculo. El código calcula los valores de la profundidad y de la corriente en los nuevos nodos, ajustando una superficie reglada distorsionada usando interpolación lineal en ambas direcciones.

A la hora de aplicar el Oluca-MC en un caso de estudio real, se analizan las direcciones del oleaje a propagar y se diseñan distintas mallas, de manera que la orientación de cada una de ellas garantice que se pueda propagar un rango de direcciones determinado cumpliendo la limitación de los $\pm 55^{\circ}$, cubriendo entre todas ellas el rango total de direcciones del oleaje en profundidades indefinidas a propagar. Por tanto, es necesario definir un abanico de mallas en varias direcciones, para garantizar que siempre exista una malla cuyo rumbo sea próximo a la dirección principal de propagación del oleaje.

Por su parte, a la hora de aplicar el modelo IH-MOEC se elige un punto de oleaje en profundidades intermedias y, a partir de éste, se propaga el oleaje hasta la rotura con el Oluca-MC. Como el punto inicial de propagación ya no está en profundidades indefinidas, una única malla será suficiente para llevar a cabo la propagación de todas las direcciones del oleaje representativas, puesto que en esta profundidad el oleaje ya se ha refractado lo suficiente como para que todas ellas puedan ser propagadas por la misma malla cumpliendo la limitación mencionada.

Para determinar el rumbo de la malla de cálculo del modelo IH-MOEC, hay que tener en cuenta las direcciones del oleaje incidente y la geometría de la batimetría de la zona de estudio. Las direcciones de propagación del oleaje deben ser iguales o menores de $\pm 55^{\circ}$ respecto al eje x de la malla, ya que fuera de este rango los errores comienzan a ser importantes en algunas zonas donde se propaga el oleaje. En lo que respecta a la batimetría, el modelo Oluca-MC, y por consiguiente el IH-MOEC, requiere que el rumbo de la malla sea lo más normal posible a las curvas batimétricas.



Figura 3.21: Subdivisión de la malla de referencia. (Fuente: GIOC, 2001)

En cuanto al contorno exterior de la malla, éste se debe situar donde se encuentre el punto de oleaje a partir del cual se va a realizar la propagación. Además, es recomendable situar la malla de manera que, en la medida de lo posible, exista la mínima variación de profundidad a lo largo de dicho contorno.

Por otro lado, los contornos laterales de la malla se deben separar lo máximo posible de la zona de estudio, debido a que el modelo Oluca-MC se puede volver inestable con las componentes que viajan hacia los contornos laterales si la batimetría es no decreciente en ellos.

De esta manera, el IH-MOEC tiene una malla de propagación del oleaje para el modelo Oluca-MC (que debe cumplir las consideraciones mencionadas) y un sistema coordenado con nodos equi-espaciados para la evolución de la línea de costa. El sistema de coordenadas empleado por ambos modelos es diferente, por lo que ha sido necesario implementar en el código dos subrutinas de cambio de coordenadas para acoplar el modelo Oluca-MC con el modelo UnaLinea, ya que, como se explicará a continuación, ambos modelos están intercambiándose información cada paso de tiempo.

En el modelo UnaLinea se considera un sistema de coordenadas cartesianas, en el cual el eje x está orientado paralelo a la tendencia general de la línea de costa y el eje y es perpendicular al anterior y positivo hacia el mar. Mientras que en el modelo Oluca-MC el eje x tiene la dirección dominante de la propagación del oleaje, desde mar adentro hacia la línea de costa, siendo el eje y el perpendicular a éste. En la figura 3.22 se puede ver la malla de cálculo del IH-MOEC en un caso de ejemplo, donde los ejes X_{UL} e Y_{UL} son los ejes del sistema coordenado del modelo UnaLinea y los ejes X_{OL} e Y_{OL} los de la malla del modelo Oluca-MC. En ella se ha indicado la limitación de los $\pm 55^{\circ}$ con respecto a la dirección principal de propagación del oleaje (eje X_{OL}), donde se deben encontrar todas las direcciones a propagar.



Figura 3.22: Malla de cálculo del modelo IH-MOEC.

Asimismo, el modelo Oluca-MC emplea como referencia del oleaje de entrada el eje x de la malla de Oluca (eje X_{OL} de la figura 3.22), mientras que UnaLinea emplea el oleaje referido al norte, por lo que en las subrutinas mencionadas, ha sido necesario también hacer la conversión de la dirección del oleaje para su correcta lectura en función del modelo a emplear.

3.5.2. Definición de perfiles y tratamiento de la batimetría

Como se ha señalado anteriormente, los modelos de una línea tradicionales calculan el cambio de la línea de costa con base en la ecuación de continuidad del sedimento, a partir de la posición inicial de la costa, las condiciones de contorno en cada extremo de la playa, el transporte longitudinal, los aportes o pérdidas puntuales de sedimento y la distancia vertical en la que se traslada el perfil de playa.

Sin embargo, el modelo IH-MOEC necesita, para la propagación del oleaje, la batimetría real de la zona de estudio definida en la malla del Oluca-MC descrita en el apartado anterior. Para el primer paso de tiempo esta batimetría se debe dar como dato de entrada del modelo, pero para los intervalos de tiempo posteriores la batimetría se obtiene a partir de la línea de costa calculada en el paso de tiempo anterior.

La presencia de estructuras, por ejemplo, produce cambios en la orientación de la línea de costa y en la batimetría próxima a la misma. Estos cambios espaciales y temporales en la batimetría costera originarán cambios, a su vez, en el oleaje en rotura. Por este motivo, la incorporación de la interacción del oleaje con la batimetría es fundamental para proporcionar una descripción realista del cambio de la línea de costa y gracias a la implementación del modelo Oluca-MC se obtiene esta interacción.

Si se observa como evoluciona la batimetría de un caso de ejemplo durante un periodo de cinco meses (figura 3.23) se puede comprobar como ésta va cambiando hasta la profundidad de cierre (definida en 5 metros), curvándose progresivamente las líneas batimétricas hasta dicha profundidad, debido a la curvatura que va adquiriendo la línea de costa a causa del efecto del espigón. Esta curvatura comienza a ser visible de una manera local en las cercanías de la estructura (primer mes), y se va extendiendo hacia los laterales a medida que transcurre el tiempo.

La regeneración de la batimetría se lleva a cabo desplazando el perfil real de playa desde la altura de la berma hasta la profundidad de cierre, asumiendo que a partir de esta profundidad la batimetría exterior no cambia. De esta manera, el perfil puede incluir barras y otros rasgos batimétricos, pero se asume que siempre mantienen la misma forma.

Para realizar esta regeneración, se discretiza el perfil en tramos y se traslada, cada uno de ellos, la magnitud del cambio en la posición de la costa dy obtenido en el modelo de una línea. Como el Oluca-MC asume un espaciado de malla dy constante, el movimiento dy se traduce en un cambio en profundidad dz de cada una de las celdas de la malla de oleaje, de acuerdo a la pendiente del tramo del perfil y al dy obtenido (dz = dy * pendiente).



Figura 3.23: Evolución durante cinco meses de la batimetría

En el caso de que existan estructuras, éstas se superponen una vez que se ha regenerado la batimetría, puesto que son puntos fijos y, tanto la posición de la línea de costa como la batimetría sobre la que está la estructura, no cambia.

Aunque el modelo Oluca-MC es computacionalmente muy rápido, se han implementado dos criterios en el modelo IH-MOEC para no tener que regenerar la batimetría y propogar el oleaje cada paso de tiempo y, de esta manera, reducir tiempo computacional, especialmente para escalas de largo plazo (años) con intervalos de tiempo pequeños (del orden de una hora).

Estos criterios deben ser función de las condiciones hidrodinámicas y de las condiciones morfológicas. Por tanto, el primer criterio comprueba cómo de diferente es el oleaje en dos intervalos de tiempo consecutivos, calculando la diferencia entre las alturas de ola y las direcciones. Mientras que el segundo criterio consiste en comparar la magnitud de la velocidad de cambio de la posición de la línea de costa.

Dependiendo del tipo de análisis que se quiera llevar a cabo con el IH-MOEC, se debe aplicar estos criterios de manera diferente: Si se quiere simular la evolución de la línea de costa durante un periodo de tiempo acotado para definir su posición final, el modelo comprueba cómo de diferente es el oleaje en dos pasos de tiempo consecutivos, así como la velocidad de cambio de la posición de la línea de costa.

Si la diferencia entre las alturas de ola y direcciones no superan un determinado valor umbral y la velocidad de cambio de la línea de costa tampoco supera el suyo, IH-MOEC toma para ese segundo intervalo de tiempo, el valor del transporte longitudinal de sedimento del paso de tiempo anterior. De esta manera, se ahorra el tiempo de regeneración de la batimetría y propagación del oleaje en el segundo intervalo de tiempo.

 Si se quiere simular la evolución de la línea de costa hasta su posición de equilibrio, cuando el modelo IH-MOEC empiece a considerar como transporte longitudinal de sedimento el del intervalo de tiempo anterior, debido a que las posiciones de la línea de costa son prácticamente iguales, indica que la línea de costa ha convergido. En este caso IH-MOEC marca el fin de la simulación.

Por tanto, en el primer tipo de estudio, los criterios de ejecución del modelo de oleaje definidos implican no regenerar la batimetría ni propagar el oleaje, mientras que en el segundo, el criterio de la velocidad de cambio de la posición de la línea de costa implica el fin de la simulación. Esto es de suma importancia, ya que si en el segundo tipo de análisis se sigue simulando una vez que la costa ha convergido, en la posición de equilibrio de la línea de costa se continuará sumando el último caudal de transporte calculado, dando lugar a una línea de costa errónea.

En la figura 3.24 se ilustra lo que ocurre cuando no se definen estos criterios de un manera correcta. En ella se simula una línea de costa recta inicial sobre la que incide un oleaje constante normal a la misma y que, debido a la existencia de un bajo, evoluciona formando un saliente. Como se puede observar, en torno a las 130-200 horas de ejecución, la línea de costa ha alcanzado su posición de equilibrio, pero como se sigue simulando el modelo sin propagar el oleaje a partir de ese intervalo de tiempo, se va sumando siempre el último valor del caudal del transporte de sedimento calculado, sobrestimando el avance de la línea de costa y dando lugar a un saliente completamente irreal.



Figura 3.24: Evolución de la línea de costa con un criterio de ejecución del modelo de propagación erróneo.

Por tanto, la secuencia del modelo IH-MOEC es la que se muestra a continuación, la cual se repetirá sucesivamente hasta terminar el periodo de simulación:

- 1. En la batimetría de entrada (en el primer intervalo de tiempo) o la batimetría regenerada (en el resto de pasos de tiempo del periodo de simulación), la cual debe cumplir el requisito de la pendiente suave, se superponen los puntos fijos de las estructuras y se propaga el oleaje hasta el punto de rotura.
- 2. Con las características del oleaje en rotura se calcula el transporte longitudinal de sedimento.
- 3. Se calcula el cambio en la posición de la línea de costa debido a la variación longitudinal del transporte de sedimento, para cada una de las celdas de la malla.
- 4. En función de los criterios de ejecución del Oluca-MC que se acaban de describir, existen dos opciones:
 - a) Si la velocidad de cambio de la línea de costa no supera un determinado valor y se considera, además, que el oleaje propagado en el paso 1 es similar al oleaje en el siguiente paso de tiempo, se va directamente al paso 3 empleando el valor del transporte longitudinal de sedimento calculado en el paso de tiempo anterior.
 - b) Si la velocidad de cambio de la línea de costa supera en alguna de las celdas el umbral definido, o se considera que el oleaje en el siguiente paso de tiempo

es distinto del oleaje del paso de tiempo anterior, se regenera la batimetría a lo largo del perfil a partir del cambio de la línea de costa calculado en el paso 3, desde la elevación de la berma y hasta la profundidad de cierre, y se vuelve al paso 1. Esta regeneración de la batimetría se debe hacer, lógicamente, sin tener en cuenta las estructuras, ya que son puntos fijos.

3.6. Criterio de rotura

Las aproximaciones parabólicas, como es el caso del Oluca-MC, pueden considerarse ecuaciones complejas de difusión no lineales, en las que el eje x representa el tiempo. Para su resolución se emplea el método de Crank-Nicholson, implícito de segundo orden que calcula los valores de la fila IR + 1 en función de los de la fila IR, avanzando fila a fila sobre la malla de cálculo (figura 3.20). En IR = 1 se deben especificar la altura de ola y dirección del oleaje incidente, esto es, los valores de A(IR = 1, JR). Además, como ya se ha mencionado, se deben imponer unas condiciones en los contornos laterales JR = 1 y JR = NR.

Mediante dicha aproximación parabólica se obtiene la amplitud de la onda (A(i, j), j = 1, N) resolviendo la ecuación por medio de una técnica de diferencias finitas, resultando un sistema de matrices tridiagonales que contienen algunos términos no lineales.

Dichos términos no lineales de la ecuación de propagación convierten el esquema numérico en un sistema cúbico para los valores incógnita A(i + 1, j), en caso de ponderar por igual los valores de las filas $i \in i + 1$ en el método de Crank-Nicholson. Estos términos afectan al valor de los coeficientes del sistema de ecuaciones a resolver, que dejan de ser función exclusiva de la topografía y de las características de la onda, pasando a depender también de |A(i + 1, j)| desconocida. Para resolver este problema se emplea un sistema iterativo hasta obtener la convergencia. Para las aplicaciones implementadas en el Oluca-MC basta con dos iteraciones, puesto que se ha tomado:

$$\Delta x = \frac{L}{10} \tag{3.3}$$

El algoritmo de rotura empleado en el modelo Oluca-MC, obliga a realizar una iteración adicional a la de la no linealidad, cuando se pasa de ola rota a ola no rota o viceversa.

Inicialmente, se calcula la fila i + 1 con los valores de disipación nulos, se calcula el vector solución A(i + 1, j) y se comprueba si el oleaje ha roto en algún nodo de dicha fila. Si uno o varios nodos han roto, se calcula el coeficiente de disipación correspondiente y se recalcula la fila i + 1, calculando A(i + 1, j) por segunda vez. A continuación, se

realiza una segunda iteración debida únicamente a los términos no lineales y se calcula A(i + 1, j) por tercera vez, obteniéndose el vector solución de la amplitud compleja y, con él, la altura de ola y dirección en rotura.

Si por el contrario, no se produjera rotura en ningún nodo de la fila, se recalcula la fila i+1 utilizando el valor de A(i+1, j) calculado de la primera iteración, reemplazándolo en los términos no lineales.

Si se modificara directamente la amplitud en el nodo en el cual la altura de ola hubiera excedido a la de rotura, de acuerdo con algún criterio de rotura, se introducirían efectos de difracción no realistas sobre los nodos adyacentes. Por este motivo, es necesario recalcular la fila i + 1 cuando la ola ha roto.

Del mismo modo, se parte de la fila i con valores de disipación no nulos, se calcula la fila i + 1 y se comprueba si el oleaje se ha estabilizado en algún nodo de dicha fila. Si así es, se anula el coeficiente de disipación correspondiente y se calcula de nuevo la fila i + 1. A continuación, se realiza la segunda iteración para resolver la no linealidad.

El criterio de rotura empleado en Oluca-MC es el dado por McCowan (1891), que se define como:

$$H_b \ge \gamma h_b \tag{3.4}$$

siendo γ el coeficiente de rotura definido como 0.78, H_b la altura de ola en rotura y h_b la profundidad en rotura.

El Oluca-MC calcula la disipación de energía en cada celda, esto es, calcula la rotura nodo a nodo a lo largo de cada una de las filas de la malla, sin tener en cuenta lo que ocurre en los nodos próximos. Sin embargo, en la naturaleza el oleaje no es monocromático sino espectral y la rotura se produce en una zona, no en un punto como considera el Oluca-MC.

En la mayoría de los casos el Oluca-MC define bien la rotura. Sin embargo, cuando la batimetría es muy irregular, y especialmente si es rocosa, puede obtenerse una línea de rotura en la que hay grandes saltos entre la posición de la rotura de una celda y la celda contigua.

Esto tiene una gran implicación en la aplicación del modelo IH-MOEC en casos reales con batimetrías irregulares y configuraciones complejas, puesto que cambios bruscos en la línea de rotura implicarán cambios bruscos e inestabilidades en la línea de costa modelada. Sin embargo, estos cambios abruptos en la línea de rotura y en la línea de costa no son realistas puesto que, como ya se ha comentado, en la naturaleza el Para resolver este problema se ha implementado en el IH-MOEC un procedimiento para calcular la rotura, adicional al del modelo de oleaje, el cual consiste en realizar una serie de ejecuciones iniciales con oleaje medio y extremal. De esta manera, se generan mapas con el valor del coeficiente de rotura en cada punto de la malla de cálculo y en base a estos, el usuario debe seleccionar el valor de γ adecuado para cada caso de estudio en concreto, el cual defina una línea de rotura representativa y que sea más suave.

Por ello, a la hora de ejecutar el IH-MOEC se debe hacer un análisis previo para comprobar si se está determinando la línea de rotura correctamente y, si no es así, seleccionar un coeficiente de rotura que sea válido.

De este modo, cuando tienen lugar estas inestabilidades en la línea de costa a causa de los cambios bruscos de la línea de rotura, existe la posibilidad de aplicar un segundo coeficiente de rotura para suavizarlas, el cual puede tratarse como un parámetro de calibración del IH-MOEC.

Para ilustrar esta implementación se muestra en la figura 3.25 los valores del coeficiente de rotura en un caso real con una batimetría compleja. La línea negra representa la línea de rotura calculada con la metodología implementada internamente en el Oluca-MC, mientras que la línea blanca representa la línea de rotura calculada con el nuevo algoritmo implementado en el IH-MOEC.

Como puede observarse en dicha figura, la línea de rotura del Oluca-MC presenta cambios bruscos que desaparecen con la mejora hecha en el modelo.



Figura 3.25: Línea de rotura con Oluca-MC (línea negra) y con IH-MOEC (línea blanca) y valores del coeficiente de rotura (H/h) en la malla de propagación del oleaje.

Capítulo 4

Mejoras en el cálculo del balance de masas

4.1. Introducción

En el presente capítulo, se implementan una serie de mejoras en el modelo IH-MOEC, resultado de acoplar el modelo de partida UnaLinea y el modelo de oleaje monocromático Oluca-MC, el cual se desarrolló en el capítulo anterior.

Concretamente, estas mejoras consisten en la incorporación del término de gradiente longitudinal de altura de ola en rotura en la formulación del transporte de sedimento del CERC (SPM, 1984), la posibilidad de emplear una profundidad de cierre que sea variable en el tiempo y en el espacio y la implementación de un nuevo parámetro para subdividir el intervalo de tiempo y cumplir, de esta manera, el criterio de estabilidad definido en los modelos numéricos explícitos, como es el caso del modelo de la tesis.

La incorporación en la formulación del CERC del transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura, es fundamental a la hora de aplicar el modelo en casos de estudio donde existan estructuras. Esto es debido a que en la proximidad de las mismas, la difracción produce un cambio considerable en la altura de ola en rotura sobre una longitud de playa importante, por lo que los resultados del modelo mejoran notablemente cuando se incorporan los efectos de la difracción.

La profundidad de cierre, en realidad, no es constante en el tiempo, tal y como tienen en cuenta los modelos de una línea tradicionales, sino que varía tanto temporal como espacialmente y es importante considerar ambas variabilidades. El perfil de playa no tiene la misma anchura en las zonas expuestas que en las zonas abrigadas, siendo más estrecho en estas últimas, lo que significa que la zona donde se produce el movimiento del sedimento es más estrecha y, por consiguiente, la respuesta de la línea de costa ante las perturbaciones más rápida.

Por último, el modelo IH-MOEC emplea un esquema de solución numérica explícito, el cual presenta, en ocasiones, dificultades a la hora de conservar la estabilidad de la solución numérica, obligando a que los intervalos de tiempo de cálculo tengan que ser mucho menores que, por ejemplo, en el caso de un esquema implícito. Si no se cumple el criterio de estabilidad, la línea de costa calculada muestra oscilaciones irreales, volviéndose inestable, por lo que es importante resolver este problema para obtener resultados válidos, especialmente en su aplicación en casos de estudio reales.

En el capítulo 6 se valorará la incidencia de las mejoras llevadas a cabo a lo largo del presente capítulo, en los resultados obtenidos con el modelo IH-MOEC en su validación en la playa de Nova Icaria (Barcelona).

4.2. Incorporación del término de gradiente longitudinal de altura de ola en rotura en la formulación del transporte de sedimento del CERC

La versión modificada de la fórmula del CERC, desarrollada por Ozasa and Brampton (1980), considera el transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura, adicionalmente al transporte de sedimento por incidencia oblicua del oleaje en rotura estimado en la fórmula inicial (ecuación 2.17), convirtiéndose, de esta manera, en la siguiente ecuación:

$$Q = H_{bs}^2 C_{gb} \left(a_1 \sin(2\theta_{bs}) - a_2 \cos\theta_{bs} \frac{\partial H_{bs}}{\partial x} \right)$$
(4.1)

con:

$$a_1 = \frac{K_1}{16\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)(1 - p)(1.416)^{\frac{5}{2}}}$$
(4.2)

$$a_2 = \frac{K_2}{8\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)(1 - p)\tan\delta(1.416)^{\frac{7}{2}}}$$
(4.3)

siendo K_1 y K_2 coeficientes empíricos tratados como parámetros de calibración, H_{bs} la altura de ola significante en rotura, C_{gb} la celeridad de grupo en rotura, θ_{bs} el ángulo del

frente del oleaje en rotura con respecto a la línea de costa, tan δ la pendiente del perfil en el tramo de éste donde se produce el principal transporte longitudinal de sedimento, ρ_s la densidad del sedimento (definida como 2650 kg/m^3 para arenas), ρ la densidad del agua (con un valor por defecto en el modelo de 1025 kg/m^3 para agua salada) y p la porosidad del sedimento (un valor típico de este parámetro es 0.4). Los valores 1.416 se emplean para convertir la altura de ola significante en altura de ola cuadrática media.

En casos de playas abiertas, la contribución del transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura es mucho menor que el transporte longitudinal por incidencia oblicua del oleaje en rotura. Sin embargo, en la proximidad de las estructuras, donde la difracción produce un cambio considerable en la altura de ola en rotura sobre una longitud de playa importante, la implementación del término de gradiente longitudinal de altura de ola en rotura en la formulación del CERC mejora considerablemente los resultados del modelo, puesto que, de esta manera, se incorporan los efectos de la difracción (Kraus, 1983; Kraus and Harikai, 1983; Mimura et al., 1983).

Aunque los valores de K_1 y K_2 han sido estimados empíricamente, estos coeficientes son tratados como parámetros de calibración del modelo, debido a la gran cantidad de hipótesis y aproximaciones que se han considerado en la formulación de los modelos de una línea, así como en los modelos de oleaje, y a la poca exactitud de las actuales formulaciones predictivas del transporte longitudinal de sedimento.

El parámetro K_1 controla la escala temporal del cambio de línea de costa simulado, así como la magnitud del transporte longitudinal de sedimento. El valor de K_2 es típicamente del orden de 0.5 a 1.0 veces el valor de K_1 , no siendo recomendable variar el valor de K_2 más allá de $1.0K_1$, puesto que se obtendría un cambio de la línea de costa en la proximidad de la estructura exagerado y se originaría un problema de inestabilidad numérica. De este modo, el parámetro K_1 se calibra normalmente primero, para obtener la escala apropiada de tiempos, calibrándose posteriormente el parámetro K_2 , de manera que se ajusten las líneas de costa calculadas con las medidas en las áreas de difracción predominante.

Asimismo, además de incorporar el término del gradiente longitudinal de altura de ola en rotura (K_2) en la formulación del CERC, se ha sustituido la fórmula para calcular el parámetro (K_1) que tenía inicialmente implementada el modelo de partida UnaLinea desarrollada por Swart (1976) (ecuación 2.18), por la formulación desarrollada por del Valle et al. (1993):

$$K_1 = 1.4e^{-2.5D_{50}} \tag{4.4}$$

donde D_{50} es el tamaño de grano del sedimento en milímetros.

Esta formulación desarrollada por del Valle et al. (1993) para el cálculo del parámetro K_1 , ha sido validada con datos de campo y empleada con éxito en multitud de proyectos de ingeniería costera en el IH Cantabria.

4.3. Profundidad de cierre variable en tiempo y espacio

Los modelos de una línea tradicionales consideran profundidad de cierre constante a lo largo de toda la playa. Sin embargo, un valor elevado de la profundidad de cierre conlleva una sección ancha de la playa en la cual se lleva a cabo el movimiento del sedimento, siendo la respuesta de la línea de costa ante las perturbaciones más lenta. Del mismo modo, es sabido que en las zonas abrigadas por una estructura o un saliente, por ejemplo, el perfil de playa es mucho más estrecho que en las zonas expuestas, por lo que la respuesta de la línea de costa ante los cambios es mucho más rápida. Por este motivo, es importante considerar la variabilidad de la profundidad de cierre, tanto espacial como temporal.

La profundidad de cierre, que se corresponde con el límite hacia aguas profundas de los cambios estacionales en el perfil, fue definida por Hallermeier (1981) mediante la siguiente expresión:

$$h_* = 2.28H_e - 68.5\frac{H_e^2}{gT_e^2} \tag{4.5}$$

donde H_e y T_e son, respectivamente, la altura de ola local del oleaje efectivo y su periodo asociado, y g la aceleración debida a la gravedad. Este oleaje efectivo, propuesto por Hallermeier (1981), es el oleaje excedido únicamente 12 horas al año o el 0.14% del tiempo.

Unos años después, Birkemeier (1985) definió, a partir de nuevos datos de campo, la profundidad de cierre como la profundidad mínima a la cual dejan de producirse variaciones medibles del fondo antes y después de un temporal, proponiendo la siguiente formulación, en la cual se fijó la variación máxima en 3 centímetros:

$$h_* = 1.75H_e - 57.9\frac{H_e^2}{gT_e^2} \tag{4.6}$$

donde H_e es la altura de ola media máxima de 12 horas, obtenida a partir de registros realizados cada 6 horas en una boya situada a 18 metros de profundidad durante la ocurrencia del temporal que da lugar a la erosión del perfil y T_e su periodo asociado.

Esta formulación de Birkemeier (1985), se suele simplificar de la siguiente manera:

$$h_* = 1.57H_e \tag{4.7}$$

Es importante destacar que, aunque a primera vista las formulaciones de Hallermeier (1981) y Birkemeier (1985) parecen muy similares, hay en realidad grandes diferencias conceptuales entre las dos, puesto que la primera tiene un carácter anual, mientras que la segunda está basada en mediciones realizadas durante temporales concretos.

Stive et al. (1992) extendieron el valor anual de h_* de Hallermeier (1981) a una expresión dependiente del tiempo, en la cual la profundidad de cierre tiene un carácter interanual:

$$h_{*,t} = 2.28H_{e,t} - 68.5\frac{H_{e,t}^2}{gT_{e,t}^2}$$
(4.8)

siendo h_{*t} la profundidad de cierre asociada a t años, $H_{e,t}$ la altura de ola significante excedida sólo 12 horas en los t años y $T_{e,t}$ su periodo asociado.

Capobianco et al. (1997) reflejó la importancia del criterio considerado para la definición del límite del perfil activo de playa con la formulación siguiente:

$$h_* = K H_e^{0.67} \tag{4.9}$$

donde K tiene los valores de 3.4, 2.8 y 2.1 para una variación máxima en el perfil de 5, 10 y 20 centímetros respectivamente, correspondiéndose H_e a la H_{s12} media anual.

Por su parte, Nicholls et al. (1998) hicieron una revisión de la formulación de Hallermeier (1981) y su extensión interanual (Stive et al., 1992), con una base de datos mayor que la empleada por Birkemeier (1985), llegando a la conclusión de que la formulación de Hallermeier (1981) proporciona un límite robusto para la profundidad de cierre medida desde el nivel medio de bajamar, considerando un criterio de variaciones máximas en el perfil de 6 centímetros.

Posteriormente, Turki et al. (2013) expresaron la formulación propuesta por Capobianco et al. (1997), en función de la altura de ola significante horaria definida para cada estado de mar, empleando una constante C_c de valor 2.8, la cual varía de una playa a otra, estando habitualmente comprendida entre 2.4 y 3.4:

$$h_* = C_c H_s^{0.67} \tag{4.10}$$

Siguiendo esta línea, en la presente tesis se reinterpreta la formulación de Capobianco et al. (1997) empleando como parámetro de entrada la altura de ola en rotura, en lugar de la altura de ola significante como hicieron Turki et al. (2013), y considerando el parámetro C_c como un parámetro de calibración del modelo IH-MOEC. De tal manera que:

$$h_* = C_c H_b^{0.67} \tag{4.11}$$

De este modo, como en el IH-MOEC, gracias a la implementación del modelo de oleaje Oluca-MC se tiene en cuenta la variabilidad longitudinal de la altura de ola en rotura, se podrá considerar tanto la variabilidad espacial como la variabilidad temporal en la definición de la profundidad de cierre del modelo.

En la figura 4.1 se muestran las isolíneas y la línea de rotura en un caso de ejemplo con un dique exento e incidencia del oleaje normal a la costa y en la figura 4.2 la línea de profundidad de cierre variable obtenida mediante la fórmula de Capobianco et al. (1997) empleando como parámetro de entrada la altura de ola en rotura.

Por tanto, la aplicación de una profundidad de cierre variable tendrá una influencia tanto en el tiempo de respuesta como en la forma de la línea de costa resultante.



Figura 4.1: Isolíneas y línea de rotura con un dique exento e incidencia del oleaje normal a la costa.



Figura 4.2: Profundidad de cierre variable con un dique exento e incidencia del oleaje normal a la costa.

4.4. Estabilidad del modelo

En los modelos numéricos de cambio de línea de costa, se discretiza la línea de costa en celdas de una anchura determinada (espaciado) y el tiempo de la simulación en pequeños elementos (denominados intervalos o pasos de tiempo). Si el espaciado y el intervalo de tiempo son pequeños, las soluciones de la ecuación de gobierno (ecuación 2.13) se pueden calcular mediante una solución numérica de diferencias finitas.

Según la figura 2.1 y la ecuación 2.13, el cambio en la posición de la línea de costa se puede escribir matemáticamente de la siguiente manera:

$$\Delta y = -\frac{\Delta t}{(D_B + D_C)} \frac{\Delta Q}{\Delta x} \tag{4.12}$$

donde Δy representa el cambio en la posición de la línea de costa, Δx es la longitud del segmento de la línea de costa, ΔQ es la diferencia en el transporte longitudinal de sedimento en las paredes de las celdas, D_B la altura de la berma, D_C la profundidad de cierre y Δt el intervalo de tiempo. En esta ocasión se ha omitido el posible aporte o pérdida de sedimento q para una mayor simplicidad.

Esta ecuación indica que el cambio en la posición de la línea de costa Δy es directamente proporcional a Δt e inversamente proporcional a Δx (en realidad, Δy es inversamente proporcional a $(\Delta x)^2$ como se mostrará a continuación).

La precisión numérica indica el grado en el que el esquema numérico proporciona una solución precisa de la ecuación de gobierno 2.13. Mientras que la precisión física se refiere al grado en el que esta ecuación, junto con los datos de entrada asociados, representan los procesos reales que se llevan a cabo. La precisión física depende de la calidad de los datos de entrada y del grado en el que las hipótesis básicas del modelo de cambio de línea de costa se aproximan a las condiciones de la zona de estudio. Una buena precisión numérica no implica necesariamente una buena precisión física. Para una ejecución del modelo rápida, el intervalo de tiempo debería ser lo más grande posible. Por el contrario, la precisión numérica y física serán mejor si el intervalo de tiempo es pequeño, ya que se representarán mejor los cambios en las condiciones de oleaje y en la posición de la línea de costa. Asimismo, el uso de un espaciado pequeño proporcionará más detalle, mejorando la precisión numérica en el cálculo del cambio de la línea de costa, pero el tiempo de ejecución aumentará a medida que aumente el número de celdas (Hanson and Kraus, 1989).

El espaciado y el intervalo de tiempo admisibles en una solución numérica en diferencias finitas de una ecuación diferencial parcial como la ecuación 2.13, dependen del esquema

de solución numérica elegido. Bajo una serie de condiciones ideales, la ecuación 2.13 puede reducirse a una forma más sencilla para analizar, de esta manera, la dependencia de la solución con respecto al intervalo espacial y temporal. Por medio de las hipótesis 2.5 y 2.6, así como asumiendo que θ_b no cambia con respecto a x (véase figura 2.3) y tras un desarrollo algebraico, la ecuación 2.13 (o ecuación 4.12 reescrita como una ecuación diferencial parcial) se puede expresar como (Kraus and Harikai, 1983):

$$\frac{\partial y}{\partial t} = (\epsilon_1 + \epsilon_2) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{4.13}$$

donde:

$$\epsilon_1 = \frac{2K_1}{(D_B + D_C)} H_{bs}^2 C_{gb} \tag{4.14}$$

$$\epsilon_2 = \frac{K_2}{(D_B + D_C)} \left[H_{bs}^2 C_{gb} cos\theta_{bs} \frac{\partial H_{bs}}{\partial x} \right]$$
(4.15)

La ecuación 4.13 es de la forma de la ecuación unidimensional de la difusión, por lo que sus propiedades de estabilidad son bien conocidas. La estabilidad numérica del esquema de cálculo está gobernada por:

$$R_S = \frac{\Delta t(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{(\Delta x)^2} \tag{4.16}$$

donde R_S es el número de Courant o parámetro de estabilidad y ϵ_1 y ϵ_2 coeficientes de difusión, los cuales gobiernan la velocidad de cambio de la línea de costa. La forma en diferencias finitas de la ecuación 4.13 muestra que, efectivamente, $\Delta y \sim \Delta t/(\Delta x)^2$.

La ecuación 4.13 se puede resolver mediante un esquema explícito o implícito. Como ya se ha comentado anteriormente, el modelo IH-MOEC emplea un esquema explícito, en el cual la posición de la línea de costa, para cada una de las celdas en cualquier intervalo de tiempo, depende únicamente de los valores del transporte de sedimento y posiciones de la línea de costa calculados en el intervalo de tiempo anterior.

Las principales ventajas de los esquemas explícitos frente a los implícitos son su fácil programación y expresiones de las condiciones de contorno más sencillas. Su principal desventaja es, precisamente, la dificultad para conservar la estabilidad de la solución, lo que obliga a que los intervalos de tiempo de cálculo tengan que ser mucho menores que para el caso de esquemas implícitos. Si se emplea un esquema explícito para resolver la ecuación de difusión, el intervalo o paso de tiempo debe cumplir la siguiente condición (Crank, 1975):

$$R_S \le 0.5 \tag{4.17}$$

Si al utilizar un esquema explícito R_S excede en algún punto el valor de 0.5, la línea de costa calculada mostrará oscilaciones irreales, volviéndose inestable. Dichas oscilaciones crecerán en el tiempo mientras R_S permanezca por encima de dicho valor. Por su parte, los parámetros ϵ_1 y ϵ_2 pueden cambiar enormemente a lo largo de la costa, puesto que dependen de las condiciones del oleaje local.

El intervalo de tiempo óptimo para la renovación de los datos de oleaje depende de la variabilidad temporal del ángulo de incidencia y de la altura de ola. Para obtener resultados fiables, es aconsejable que los datos del oleaje incidente tengan intervalos de tiempo de un día o menos.

Si se asume que el espaciado es fijo, un valor de altura de ola grande requerirá un valor de Δt pequeño. Mientras que si consideramos dos casos de estudio iguales, con el mismo oleaje incidente, el intervalo de tiempo variará en función del espaciado; de manera que con espaciados más pequeños, se requerirá de intervalos de tiempo menores.

A veces, debido a la morfología de la zona de estudio, existe la necesidad de determinar incrementos de malla pequeños para considerar, por ejemplo, elementos morfológicos de pequeña escala o analizar la evolución de la línea de costa con mayor detalle, lo que implica, a su vez, usar intervalos de tiempo menores. Esta situación puede originar problemas de inestabilidad, especialmente empleando esquemas numéricos explícitos, como es el caso del IH-MOEC.

Por ello, tras el cálculo del cambio de la línea de costa en cada paso de tiempo, el modelo lleva a cabo un análisis de estabilidad. Si el criterio de estabilidad no se cumple, habrá que reducir el paso de tiempo y repetir la simulación. Si, por el contrario, se cumple el criterio de estabilidad, se debería repetir la simulación empleando un paso de tiempo mayor, ya que si este último también cumple el criterio de estabilidad y los resultados que se obtienen son los mismos que en el caso anterior, se consigue reducir el coste computacional. Esto es, para evitar tanto la inestabilidad del modelo como un coste computacional excesivamente alto, hay que determinar el paso morfológico de tiempo con el máximo número de Courant menor de 0.5. De esta manera se llega a un acuerdo entre precisión y coste computacional.

Por todo lo expuesto, se ha visto la necesidad de implementar en el IH-MOEC la posibilidad de modificar el intervalo de tiempo con la finalidad de lograr resultados del modelo estables. Este cambio se debe de poder hacer de una manera sencilla y automática, sin la modificación del resto de parámetros de entrada, ya que para la aplicación del modelo en un caso real pueden ser necesarias numerosas ejecuciones hasta llegar a resultados estables, no siendo práctico tener que configurar todo el caso de estudio cada vez que se quiera hacer una prueba de estabilidad.

El hecho de modificar en el modelo IH-MOEC el espaciado entre los nodos donde está definida la línea de costa implica, por ejemplo, que se tengan que modificar las posiciones de la línea de costa inicial y las posiciones de las estructuras, ríos y regeneraciones de playa si existieran, por lo que lo óptimo es, efectivamente, automatizar el cambio del intervalo de tiempo.

Debido a esto, se ha implementado en IH-MOEC un parámetro nuevo (denominado ndt), que divide el paso de tiempo con el objetivo de cumplir el criterio de estabilidad, de tal manera que:

$$R_S = \frac{\Delta t(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{n dt (\Delta x)^2} \le 0.5 \tag{4.18}$$

De este modo, cuando ndt es mayor de 1, se ejecuta el modelo ndt veces con el oleaje de cada uno de los intervalos de tiempo, hasta finalizar el periodo de simulación.

Con la finalidad de mostrar la funcionalidad de esta implementación, se ha definido una playa inicialmente recta, sobre la que se construye un espigón corto (que no alcanza la profundidad de cierre) y se le aplica, a una profundidad de 30 metros y durante un mes, un oleaje con dirección media del cuarto cuadrante y altura media de 1.5 metros. Si se emplea un espaciado de 20 metros y un paso de tiempo de 1 hora, se obtiene el resultado de la figura 4.3.

Como se puede observar en dicha figura, entre la tercera y la cuarta semana la línea de costa muestra oscilaciones irreales y se desestabiliza, obteniéndose valores de R_S de 1.15, que son muy superiores a la limitación de 0.5. Mientras que si se baja el valor de dt con ndt igual a 2 (véase figura 4.4), R_S disminuye hasta 0.5, obteniéndose, por tanto, una línea de costa estable.


Figura 4.3: Evolución de la línea de costa con un espigón corto y valor de ndt=1.



Figura 4.4: Evolución de la línea de costa con un espigón corto y valor de ndt=2.

Capítulo 5

Variabilidad del perfil transversal de playa

5.1. Introducción

Como se comentó anteriormente, las características del modelo de oleaje implementado (Oluca-MC) mejora considerablemente el cálculo de la altura de ola y dirección del oleaje en rotura con respecto a los modelos de una línea tradicionales, lo que provoca mejoras a su vez en el cálculo del transporte longitudinal de sedimento y, por tanto, en la predicción de la evolución de la línea de costa. Pero quedaba un aspecto pendiente; el movimiento debido al transporte transversal.

Los modelos de evolución de la línea de costa tradicionales, como es el caso del modelo de partida de la tesis, prescinden de la información del transporte transversal de sedimento y el único cambio de la línea de costa calculado es el asociado a las variaciones del transporte longitudinal. Por esta razón, este tipo de modelos son válidos únicamente en el largo plazo (años a décadas), no pudiendo simular, por ejemplo, las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, entre otros procesos. Asimismo, una línea de costa con oleaje normal a la misma no se mueve con los modelos tradicionales de largo plazo, sin embargo sí existe un movimiento por perfil observado en la naturaleza. Un aspecto importante a tener en cuenta en el largo plazo es incluir los efectos de los temporales en el perfil transversal, que muchas veces no se recuperan en las variaciones estacionales de la línea de costa resultando ser un proceso acumulativo y que los modelos tradicionales no son capaces de considerar.

Es en este capítulo donde, con el fin de eliminar estas limitaciones, se incorpora en el modelo IH-MOEC la variabilidad del perfil de playa mediante la implementación de un

modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal de sedimento a lo largo del perfil, tendente al equilibrio y aplicable en el medio plazo. Las bases técnicas de este modelo han sido desarrolladas en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, IH Cantabria (Jara et al., 2015).

Existen en la literatura numerosos modelos de evolución de la línea de costa debidos al transporte transversal de sedimento, basados en el equilibrio y con origen en la ecuación cinética proporcional al desequilibrio existente, bien en términos energéticos (Davidson et al., 2013; Yates et al., 2009) o en términos de posiciones de la línea de costa (Kriebel and Dean, 1993; Miller and Dean, 2004). Todos ellos presentan una gran cantidad de parámetros libres de ajuste, que tienen que determinarse empíricamente y que no tienen correlación con las características físicas de la playa, lo que hace que el proceso de calibración sea complejo.

El hecho de sumar todos los parámetros de calibración de este tipo de modelos a los que ya tiene de por sí el modelo IH-MOEC, complicaría enormemente el proceso de calibración del modelo final y, con ello, su empleo en casos de estudio reales, perdiendo parte de su aplicabilidad.

Sin embargo, Jara et al. (2015) desarrolló un modelo de evolución de la línea de costa debida al transporte transversal y tendente al equilibrio, en el cual se minimizó el número de parámetros libres correlacionando el comportamiento de la línea de costa con las características del oleaje incidente y las características físicas de la playa, esto es, tamaño de grano, profundidad de cierre, volumen de sedimento, etc. Además, se comprobó que dicho modelo representa adecuadamente tanto los procesos erosivos como de acreción, siendo aplicable en el medio plazo, en el que ambos procesos se intercalan alternativamente. Implementando este modelo en el modelo de la tesis se podría tener en cuenta, además, el efecto que tienen a largo plazo los retrocesos (por transporte transversal de sedimento debido a eventos extremos) de la línea de costa acumulados a lo largo de los años, que no se recuperan en las variaciones estacionales de la línea de costa de inviernoverano. Debido a esta serie de características, se ha seleccionado este modelo para su implementación en el IH-MOEC.

5.2. Modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal de sedimento

Para el desarrollo del modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal implementado en el IH-MOEC (Jara et al., 2015), se combinó un modelo dinámico de evolución de la posición de la línea de costa con un modelo estático de equilibrio del

perfil de playa. De esta manera se logró reducir el número de parámetros libres, pudiendo estimar la posición de la línea de costa en estados anteriores al equilibrio.

Gracias al modelo estático se puede determinar la posición de equilibrio de la línea de costa asociada a una energía del oleaje incidente dada, asumiendo que el oleaje incidente es estacionario, esto es, que la duración del estado de mar es infinita.

Mientras que el modelo dinámico define, a partir de la posición inicial y la posición a la que tiende la línea de costa en el equilibrio, la posición que se alcanza verdaderamente al finalizar el estado de mar considerado, que es de una duración finita.

En el medio plazo la hipótesis de oleaje estacionario no es válida, por lo que fue necesario, además, discretizar el periodo de estudio en estados de mar, para que así el modelo desarrollado fuera también aplicable en esta escala temporal. De este modo, mediante un cálculo numérico iterativo (modelo de evolución secuencial) se desarrolló un modelo de evolución válido en el medio plazo, en el que la posición de la línea de costa final de un estado de mar es la inicial del estado de mar siguiente.

5.2.1. Desarrollo teórico del modelo

Para el desarrollo del modelo se partió de la siguiente ecuación cinética que constituye el modelo dinámico, en la cual el cambio instantáneo de la posición de la línea de costa es proporcional al desequilibrio de la energía del oleaje incidente:

$$\frac{dS(t)}{dt} = C^{\pm}(E - E_{\infty}(S)) \tag{5.1}$$

siendo S(t) la posición de la línea de costa en el instante t, donde $t \in [0, \Delta t]$ con Δt igual a la duración del estado de mar; E la energía del oleaje incidente expresada como el momento espectral de orden 0 del oleaje en rotura asociado al estado de mar; E_{∞} la E de equilibrio para la posición S y C^{\pm} los coeficientes de calibración del modelo, con C^+ asociado a los procesos de acreción y C^- a los de erosión.

Para resolver el modelo dinámico, esto es, la integración de la ecuación diferencial 5.1 fue necesaria una función explícita de la energía del oleaje en equilibrio, E_{∞} , expresada en términos de la posición de la línea de costa, S.

Esta correlación se mostrará en el apartado 5.2.1.1, mientras que en el apartado 5.2.1.2 se expone la integración de la ecuación 5.1 y el modelo de evolución de la línea de costa en el medio-largo plazo resultante.

5.2.1.1. Correlación entre la energía del oleaje en equilibrio y la posición de la línea de costa

Una playa puede presentar infinitos perfiles de equilibrio, asociado cada uno de ellos a un oleaje estacionario y de duración suficiente. Sin embargo, se puede considerar que las características físicas de la playa (tamaño de grano, densidad del sedimento, etc.) permanecen constantes en el medio a largo plazo, por lo que existirán características comunes a todos esos perfiles de equilibrio. A estas características fijas de la playa se les denominó en Jara et al. (2015) "invariantes del perfil", proponiendo los siguientes:

- El tamaño medio de grano del sedimento de la playa (D_{50}) y su ángulo de rozamiento interno (Φ) .
- La cota de la línea de costa (nivel de referencia).
- La altura de la berma de la playa seca (B).
- El punto fijo al pie del perfil (x_t, h_t) .
- El volumen de sedimento contenido en el perfil activo (V_s) .

Se consideró un perfil de equilibrio similar al propuesto por Bernabeu (1999), despreciando los efectos de la reflexión, el cual consiste en dos tramos parabólicos de exponente 2/3 (véase figura 5.1), similares cada uno de ellos al perfil de Dean (1977):

• Perfil de rotura: tramo comprendido desde la linea de costa (S) hasta el punto de rotura (x_b, h_b) .

$$h = A(x - S)^{\frac{2}{3}} \tag{5.2}$$

• Perfil de asomeramiento: tramo desde el punto de rotura (x_b, h_b) hasta el punto fijo al pie del perfil (x_t, h_t) .

$$h = A_s (x - x_s)^{\frac{2}{3}} \tag{5.3}$$

donde h y x son la profundidad y la posición horizontal de cada punto del perfil, respectivamente, A el parámetro de escala de la parábola de rotura, S la posición horizontal de la parábola de rotura en el origen (h=0) o posición de la línea de costa en el equilibrio, A_s el parámetro de escala de la parábola de asomeramiento y x_s la posición horizontal de la parábola de asomeramiento en el origen (h=0).

El punto fijo al pie del perfil propuesto (x_t, h_t) es un punto que no se mueve localizado cercano a la profundidad de cierre media anual, estando el perfil de playa activo comprendido entre la altura de la berma y este punto fijo, de tal manera que se considera que no hay transporte transversal de sedimento fuera de este tramo.



Figura~5.1:Esquema del perfil de equilibrio del modelo transversal. (Fuente: Jara et al., 2015)

De esta manera, a pesar de que el perfil de playa de equilibrio tenía, inicialmente, cuatro grados de libertad $(S, A, x_s \neq A_s)$, gracias a la hipótesis de conservación de sedimento en el perfil de playa activo y a otras consideraciones relacionadas con los invariantes del perfil se redujo a tan solo uno, como se explica a continuación.

Para correlacionar el parámetro de escala de la parábola de rotura (A) con la velocidad de caída del grano (w_f) se empleó la siguiente ecuación (Dean, 1987):

$$A = 0.067 w_f^{0.44} \tag{5.4}$$

donde A está definido en m^{1/3} y w_f en cm/s.

Como D_{50} es uno de los invariantes del perfil y está directamente relacionado con w_f , A puede ser considerado como otro invariante.

A partir de la ecuación 5.4, la condición del punto fijo al pie del perfil (x_t, h_t) y la ecuación de conservación del sedimento en el perfil de playa activo (que implica volumen de sedimento contenido en el perfil activo, V_s , constante), los cuatro grados de libertad del perfil de playa de equilibrio se redujeron a uno solo, que es la posición de la línea de costa (S), obteniéndose la siguiente ecuación, en la cual se relaciona el punto de rotura (x_b, h_b) con los invariantes del perfil:

$$x_b = x_t - \frac{\left[x_t(h_t + B) - V_s - \frac{\frac{3}{5}h_b^{5/2} + Bh_b^{3/2}}{A^{3/2}}\right]}{\frac{\frac{3}{5}(h_t^{5/2} - h_b^{5/2})}{(h_t^{3/2} - h_b^{3/2})} + B}$$
(5.5)

Esta ecuación 5.5 representa, por tanto, todas las posiciones del punto de rotura posibles, cada una de ellas asociada a un posible perfil de playa de equilibrio, definiendo de este modo la curva que circunscribe al conjunto de posibles perfiles de playa de equilibrio, denominada envolvente de perfiles de equilibrio, véase figura 5.2



Figura 5.2: Esquema de la envolvente de perfiles de equilibrio. (Fuente: Jara et al., 2015)

La posición de máximo avance de la línea de costa (S_{max}) y de máximo retroceso (S_{min}) se pueden calcular con la siguiente formulación, puesto que la posición de máximo avance corresponde a la situación en la que no hay tramo de rotura en el perfil (la profundidad de rotura, h_b , es nula) y la de máximo retroceso se produce cuando la profundidad de rotura es máxima:

$$\begin{cases} \frac{h_t - h_{bmax}}{\tan \Phi} + \frac{(h_{bmax}^{3/2} - h_t^{3/2}) \left[x_t(h_t + B) - V_s - \frac{\frac{3}{5} h_{bmax}^{5/2} + B h_{bmax}^{3/2}}{A^{3/2}} \right]}{\frac{3}{5} (h_t^{5/2} - h_{bmax}^{5/2}) + B (h_t^{3/2} - h_{bmax}^{3/2})} = 0 \\ S_{min} = x_t - \left(\frac{h_{bmax}}{A}\right)^{3/2} - \frac{h_t - h_{bmax}}{\tan \Phi} \\ S_{max} = x_t - \frac{x_t(h_t + B) - V_s}{\frac{3}{5} h_t + B} \end{cases}$$
(5.6)

La posición de máximo retroceso de la línea de costa (S_{min}) está relacionada con la máxima profundidad de rotura (h_{bmax}) de acuerdo a un criterio de avalancha en la zona de asomeramiento en base al ángulo de rozamiento interno del sedimento de la playa (Φ) , que es uno de los invariantes del perfil.

Nótese que la posición de máximo avance de la línea de costa (S_{max}) es realmente mayor del límite de la posición de máximo avance debido al criterio de inicio de movimiento, basado en la velocidad orbital crítica en el fondo (Van Rijn, 1993). Mientras que S'_{min} , relacionado con h'_{max} , está por debajo del límite de las posiciones de la línea de costa sin considerar el criterio de avalancha. Tanto S'_{min} como h'_{max} pueden ser determinados a partir de los invariantes del perfil:

$$\begin{cases} \frac{3}{5}A(x_t - S'_{min})^{5/3} + B(x_t - S'_{min}) = x_t(h_t + B) - V_s \\ h'_{bmax} = A(x_t - S'_{min})^{2/3} \end{cases}$$
(5.7)

Para integrar la ecuación diferencial 5.1, se desarrolló a partir de la envolvente de los perfiles de equilibrio (expresada a través de la ecuación 5.5) la función de energía de equilibrio, que es una función que correlaciona la energía del oleaje (E) con la posición de la línea de costa de equilibrio (S_{∞}) a la que conduce esta energía.

Se puede expresar la energía del oleaje (E) como una función de la profundidad de rotura en el perfil, estableciendo una relación entre la profundidad de rotura (h_b) y la altura de ola en rotura (H_b) en forma de momento de orden 0, de acuerdo a Thornton and Guza (1983), con $\gamma = 0.6$:

$$E = \left(\frac{H_b}{4.004}\right)^2 = \left(\frac{\gamma}{4.004}\right)^2 h_b^2$$
(5.8)

La elección del momento espectral de orden cero en la rotura como índice de la energía del estado de mar (E) y un criterio de rotura sencillo, satisface la necesidad de una función que relacione la geometría del perfil de playa (h_b) y el forzamiento del modelo (E).

Combinando la ecuación 5.5 con las ecuaciones 5.8 y 5.2, se obtuvo la función de energía de equilibrio como:

$$E = F(S_{\infty}) \begin{cases} E = \left(\frac{\gamma}{4.004}\right)^2 h_b^2 \\ S_{\infty} = x_t - \left(\frac{h_b}{A}\right)^{3/2} - \frac{\left[x_t(h_t+B) - V_s - \frac{\frac{3}{5}h_b^{5/2} + Bh_b^{3/2}}{A^{3/2}}\right]}{\frac{\frac{3}{5}\left(\frac{h_t^{5/2} - h_b^{5/2}}{(h_t^{3/2} - h_b^{3/2})}\right) + B} \end{cases}$$
(5.9)

Por tanto, esta ecuación 5.9 relaciona la posición de la línea de costa en el equilibrio (S_{∞}) con la energía del oleaje incidente (E), como una función analítica de los invariantes del perfil, parametrizada por medio de la profundidad de rotura (h_b) .

A diferencia de la función de pendiente constante obtenida empíricamente por Yates et al. (2009), la ecuación definida por Jara et al. (2015) (ecuación 5.9) muestra una pendiente más suave con oleajes poco energéticos que con oleajes más energéticos y tiene las siguientes características:

- Es positiva, continua y está definida en el dominio $[S_{min}, S_{max}]$.
- Es monótona decreciente y convexa
- Contornos definidos en los puntos $(S_{min}, \frac{\gamma^2}{4.004^2}h_{bmax}^2)$ y $(S_{max}, 0)$.
- Pendiente horizontal en el punto $(S_{max}, 0)$.

Nótese que los contornos de la función de energía de equilibrio se corresponden con la posición de la línea de costa con mayor avance y con mayor retroceso de la envolvente de los perfiles de equilibrio (véase figura 5.3).



Figura 5.3: Esquema de la curva de energía de equilibrio. (Fuente: Jara et al., 2015)

5.2.1.2. Modelo de evolución de la línea de costa en el medio plazo

De acuerdo a la función de energía de equilibrio y dada una energía de oleaje incidente (E), si la posición de la línea de costa es mayor de la posición de la línea de costa de equilibrio correspondiente (S_{∞}) se producirá un retroceso de la misma (erosión), mientras que si es menor de la posición de la línea de equilibrio correspondiente se producirá un avance (acreción), siempre y cuando la energía incidente no cambie.

La velocidad de los procesos de erosión o acreción es controlada por la ecuación diferencial 5.1, la cual fue integrada para obtener el modelo de evolución de la línea de costa.

La forma paramétrica de la función de energía de equilibrio dada por la ecuación 5.9, no permite la integración de la ecuación cinética dada por la ecuación 5.1, que requiere una función explícita de E en términos de S_{∞} .

Por este motivo, se propuso una aproximación parabólica de la función de energía de equilibrio, a través de un polinomio de segundo grado, el cual satisface las características de la ecuación 5.9:

$$E = aS_{\infty}^2 + bS_{\infty} + c \tag{5.10}$$

donde $a, b \le c$ pueden derivarse de los invariantes del perfil mediante un sistema lineal con la ecuación 5.6:

$$\begin{cases}
0 = aS_{max}^{2} + bS_{max} + c \\
\frac{\gamma^{2}}{4.004^{2}}h_{bmax}^{2} = aS_{min}^{2} + bS_{min} + c \\
0 = 2aS_{max} + b
\end{cases}$$
(5.11)

Independientemente de los invariantes del perfil de playa de equilibrio, la aproximación parabólica de la función de energía de equilibrio puede ser calibrada mediante las observaciones de la posición de la línea de costa con el mismo número de parámetros libres que la función lineal propuesta por Yates et al. (2009), conociendo que la pendiente es horizontal en la abscisa en el origen de la forma parabólica.

En la ecuación 5.10, el parámetro E es la energía del oleaje que, para unas condiciones de oleaje estacionarias, se requiere para que la línea de costa alcance la posición de equilibrio (S_{∞}) . Del mismo modo, esta ecuación fue reescrita para expresar la energía del oleaje de equilibrio (E_{∞}) como la energía del oleaje que no origina ningún cambio en la posición de la línea de costa:

$$E_{\infty} = aS^2 + bS + c \tag{5.12}$$

El modelo de evolución de la línea de costa fue obtenido por medio de la integración de la ecuación cinética 5.1 combinándola con las ecuaciones 5.10 y 5.12 para condiciones de oleaje estacionarias:

$$\frac{dS(t)}{dt} = C^{\pm} \left(a(S_{\infty}^2 - S^2) + b(S_{\infty} - S) \right)$$
(5.13)

Así se obtuvo un modelo de evolución de la línea de costa a corto plazo:

$$S(t) = \frac{S_{\infty}(\Psi(t) + 1) + \frac{b}{a}}{\Psi(t) - 1}$$
(5.14)

con $\forall t | t_0 < t < t_0 + \Delta t$ y donde:

$$\Psi(t) = \left(\frac{S_0 + S_\infty + \frac{b}{a}}{S_0 - S_\infty}\right) e^{C^{\pm}a(2S_\infty + \frac{b}{a})(t - t_0)}$$
(5.15)

De acuerdo al modelo de equilibrio estático propuesto por Jara et al. (2015), desde la posición de la línea de costa inicial (S_0) , con un oleaje incidente estacionario (H_b) , se llegará finalmente $(\Delta t \to \infty)$ a una posición de equilibrio (S_{∞}) . Si la duración del estado de mar (Δt) no es lo suficientemente largo, la línea de costa alcanzará una posición intermedia (S), dada por el modelo de evolución a corto plazo definido por las ecuaciones 5.14 y 5.15, como se puede ver en la figura 5.4.



Figura 5.4: Modelo dinámico de evolución de la línea de costa a corto plazo para oleaje estacionario. (Fuente: Jara et al., 2015)

El modelo numérico de la evolución de la línea de costa en el medio plazo para un conjunto de N estados de mar, caracterizado por las alturas de ola en rotura, se derivó directamente del modelo de corto plazo por medio de un cálculo iterativo, empleando la posición de la línea de costa final de un estado de mar como la posición inicial del siguiente, asumiendo oleaje constante durante cada estado de mar.

5.2.2. Hipótesis fundamentales del modelo

Debido a la gran complejidad de los sistemas morfodinámicos en playas, fue necesario asumir las siguientes hipótesis simplificadoras a la hora de desarrollar el modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal de sedimento:

 Ortogonalidad de los procesos; todos los procesos morfodinámicos de una playa son esencialmente tridimesionales. Sin embargo, para facilitar su estudio y comprensión, es necesario asumir la hipótesis de ortogonalidad de los procesos longitudinales y transversales de la playa, de tal manera que cualquier movimiento de la misma puede ser analizado estudiando por separado ambos movimientos longitudinales y transversales.

- Forzamientos del modelo; la energía del oleaje fue el único forzamiento considerado por el modelo de evolución de la línea de costa.
- Condición de estacionario del oleaje durante el estado de mar; a pesar de que las características del oleaje se encuentran en permanente cambio, con una escala temporal de variación del orden de segundos (periodo de una ola), se discretizó temporalmente el registro continuo en intervalos de una hora para simplificar la caracterización del oleaje. Las características promedio del oleaje durante este intervalo constituyen un estado de mar.
- Conservación de las características físicas de la playa; estas características físicas, denominadas invariantes del perfil de playa, son el tamaño medio de grano del sedimento de la playa y su ángulo de rozamiento interno, la cota de la línea de costa, la altura de la berma de la playa seca, el punto fijo al pie del perfil activo y el volumen de sedimento contenido en dicho perfil activo.
- Unicidad del perfil de equilibrio; una playa puede presentar infinitos perfiles de equilibrio; se asocia uno y sólo uno de ellos a cada oleaje incidente, siempre que dicho oleaje se mantenga estacionario durante el tiempo suficiente para que el perfil de equilibrio se pueda desarrollar completamente. Esta hipótesis de unicidad del perfil de equilibrio implica que existe una relación biunívoca entre la energía del oleaje incidente y la forma de su correspondiente perfil de equilibrio, no dependiendo esta última de la forma inicial.

Esta hipótesis es aceptable en los casos de oleaje muy energético, mientras que en los casos de oleaje poco energético es posible que la parte más profunda del perfil activo de la playa considerado inicialmente no pueda movilizarse (Kriebel and Dean, 1993), dando lugar a una forma del perfil de equilibrio dependiente del perfil inicial.

• Forma del perfil durante su evolución hacia el equilibrio; cuando el perfil de playa no se encuentra en su estado final de equilibrio, se asume que su forma corresponde a la de un perfil de equilibrio asociado a un oleaje incidente distinto al reinante (Wright et al., 1985). De esta manera, el perfil de playa tendrá siempre la forma de un perfil de equilibrio y, por tanto, la relación entre la energía del oleaje incidente y la forma de su perfil de equilibrio correspondiente derivada de la anterior hipótesis, es recíproca. Para garantizar esto es necesario considerar la energía del oleaje en rotura.

5.2.3. Validación del modelo

Este modelo desarrollado en Jara et al. (2015) fue validado en la playa de Nova Icaria, situada en Barcelona (véase figura 5.5), la cual fue seleccionada también para validar el modelo IH-MOEC de la presente tesis, validación que se mostrará en el capítulo siguiente. En dicho capítulo se describirá, asimismo, el caso de estudio, por lo que en este apartado sólo se procede a mostrar los resultados obtenidos por Jara et al. (2015) para la calibración y validación del modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal de sedimento.



Figura 5.5: Situación de la playa de Nova Icaria. (Fuente: Martínez, 2013)

Para la calibración del modelo, se emplearon los datos de las posiciones de la línea de costa medidas en Nova Icaria de los primeros seis meses del año 2005 (panel superior de la figura 5.6).

Aunque se requieren dos parámetros de calibración, C^+ y C^- , para simular diferentes velocidades de los procesos de erosión y acreción, el mejor ajuste entre los datos observados y modelados se obtuvo para valores iguales de C^+ y C^- . La igualdad entre ambos parámetros sugerida anteriormente por Yates et al. (2011) tras el estudio de varias playas en Norteamérica se confirma, por tanto, con esta calibración en la playa de Nova Icaria.

El resto de los dos años de mediciones disponibles se emplearon para la validación del modelo (de julio del 2005 a diciembre del 2006).



Figura 5.6: Resultados del modelo de evolución para el periodo 2005 y 2006 en Nova Icaria, junto con las posiciones medidas y la altura de ola en rotura. (Fuente: Jara et al., 2015)

Como se puede comprobar en la figura 5.6, las tendencias de la erosión y acreción están, en general, bien representadas con el modelo, tanto a nivel cualitativo como a nivel cuantitativo. Las posiciones de la línea de costa medidas y modeladas muestran una erosión rápida tras los temporales y una acreción más lenta en el periodo de recuperación tras dichos temporales.

El error cuadrático medio (RMSE) obtenido entre las posiciones observadas y modeladas fue de 1.14 metros durante el periodo de calibración, similar al esperado por el error cometido en el procedimiento de la rectificación de las imágenes a partir de las cuales se sacaron las mediciones de las líneas de costa (1 metro en el extremo norte de la playa), siendo un 43 % mayor durante el periodo de validación. Por su parte, el coeficiente de correlación (ρ) entre ambas posiciones de línea de costa fue de 0.737 durante la calibración y un 40 % menor durante la validación.

5.3. Implementación del modelo de evolución del perfil de playa

En virtud de la hipótesis de ortogonalidad de los procesos morfodinámicos de una playa, el movimiento de la línea de costa debido al transporte longitudinal de sedimento se puede analizar separadamente del movimiento de traslación de la línea de costa debido al transporte transversal a lo largo del perfil.

Es importante destacar que la hipótesis de ortogonalidad es suficientemente aproximada a la realidad en el caso de playas abiertas con estados morfodinámicos extremos (reflejantes o disipativas). Sin embargo en playas encajadas, con una forma en planta de gran curvatura, o con estados morfodinámicos intermedios, existe una interacción planta-perfil notable, por lo que el análisis por separado de los dos movimientos debe hacerse con cautela.

Puesto que en el modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal se emplea la línea de costa promedio y se considera un único perfil de playa, a la hora de implementar este modelo en el IH-MOEC se ha considerado un perfil tipo para toda la línea de costa, cuya posición inicial es el promedio de la posición inicial de la línea de costa de partida del IH-MOEC. Mientras que los invariantes del perfil tipo se deben dar como parámetros de entrada del modelo.

Del mismo modo, el modelo de evolución por transporte transversal se alimenta de la altura de ola en rotura (obtenida en cada intervalo de tiempo mediante el modelo de propagación Oluca-MC) promedio, para que tenga consistencia con las bases teóricas del mismo.

Por lo demás, ambos modelos son independientes, cumpliendo de esta forma la condición de continuidad, de tal manera que en el segundo intervalo de tiempo parten de su posición final calculada en el paso de tiempo anterior, sin considerar el movimiento producido por el otro tipo de transporte. A la hora de calcular la posición de la línea de costa al final del periodo de simulación, o en los pasos de tiempo intermedios que se definan, es cuando se suma linealmente el cambio en la posición de la costa por transporte transversal y el cambio por transporte longitudinal.

El modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal de sedimento implementado en el IH-MOEC, proporciona el cambio en la posición de la costa originado por este tipo de transporte, pero no calcula los cambios batimétricos que se producen a lo largo del perfil. Por este motivo no tiene importancia que los dos modelos se ejecuten en paralelo y éste no influya en la regeneración de la batimetría. Por el contrario, al considerar el cambio en la posición de la línea de costa por transporte longitudinal en la regeneración de la batimetría y, por consiguiente, en la propagación del oleaje, el modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal sí tiene la influencia del movimiento longitudinal indirectamente a través de la altura de ola en rotura.

Para ilustrar el comportamiento del modelo de transporte transversal de sedimento que se ha incluido en el modelo IH-MOEC se muestran, a continuación, los resultados de una simulación de evolución de la línea de costa sometida a una serie de oleaje de 500 horas, con incidencia normal sobre una batimetría recta y paralela con pendiente del 1%.

En la figura 5.7 se muestran las características del modelo de perfil de equilibrio empleado, en el que la profundidad de rotura varía entre 0 y 2.95 metros (h_{bmax}) para el perfil de playa que presenta, respectivamente, el máximo avance $(S_{max}=150 \text{ metros})$ y el máximo retroceso $(S_{min}=78.68 \text{ metros})$.



Figura 5.7: Modelo de perfil de equilibrio del caso de estudio.

La posición del punto fijo al pie del perfil se encuentra a 250 metros respecto de la línea de referencia en el trasdós de la playa (x_t) y a una profundidad de 6.5 metros (h_t) .

El perfil presenta una berma (B) de 1 metro y el tamaño de grano de la playa se ha considerado de 0.2 milímetros (D_{50}) .

Este modelo de perfil de equilibrio se traduce en la curva de energía de equilibrio que muestra la figura 5.8, en la que se representa la energía del oleaje incidente (E), frente a

la posición de equilibrio de la línea de costa a la que tiende la playa si ese oleaje incidente se mantiene constante (S_{∞}) .



Figura 5.8: Curva de energía de equilibrio del modelo de transporte transversal de sedimento.

Partiendo de una línea de costa recta situada a 120 metros de la línea de referencia en el trasdós de la playa, la posición media de la línea de costa evoluciona avanzando en los periodos de calma y retrocediendo cuando se producen oleajes más energéticos, como muestra la figura 5.9. Sin embargo, debido a la condición de conservación de sedimento del modelo, la evolución temporal de la posición de la línea de costa sometida a un oleaje normal no muestra ningún cambio si se prescinde de la componente de transporte transversal de sedimento.

IH-MOEC es, por tanto, capaz de reproducir los fenómenos de erosión y acreción que se producen en la playa durante temporales y periodos de calma respectivamente, debido a los movimientos transversales de sedimento a lo largo de un perfil de playa.



Figura 5.9: Evolución de la línea de costa con y sin transporte transversal de sedimento (panel superior), junto a la energía del oleaje (panel inferior).

Capítulo 6

Validación del modelo final de evolución de medio-largo plazo en la playa de Nova Icaria

6.1. Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados de la comparación entre la línea de costa modelada empleando IH-MOEC y la línea de costa medida en la playa de Nova Icaria (Barcelona) a modo de validación del modelo desarrollado en los capítulos anteriores.

Para llevar a cabo la simulación de la evolución de la línea de costa con el modelo IH-MOEC es necesario establecer los siguientes datos de partida:

- Posición inicial de la línea de costa.
- Forzamientos del modelo.
- Parámetros de configuración.

Así, en el presente capítulo, en primer lugar se describe la metodología empleada para medir la posición de la línea de costa en Nova Icaria; posteriormente se describen las fuentes de datos disponibles y el tratamiento de los mismos para obtener los forzamientos del modelo (oleaje) y a continuación se definen los parámetros de configuración del modelo, algunos de los cuales han tenido que ser calibrados por lo que también se expone el procedimiento seguido para llevar a cabo la calibración de los mismos. Finalmente, se muestran los resultados de la simulación de la línea de costa en el caso de Nova Icaria y se comparan con las posiciones medidas a través de las imágenes de video cámara.

Como se ha descrito en capítulos anteriores, IH-MOEC consiste en un modelo de evolución de la línea de costa de una línea en el cual se han introducido numerosas mejoras respecto de los modelos tradicionales de este tipo. Por ello, el presente capítulo incluye también la valoración de la incidencia de estas mejoras en los resultados arrojados por el modelo IH-MOEC y se comparan estos resultados con los del modelo de partida UnaLinea.

6.2. Medición de la línea de costa a partir de imágenes de video cámara

La playa de estudio escogida corresponde a Nova Icaria, la cual se encuentra encajada entre el Puerto Olímpico de Barcelona a poniente y un espigón doble a levante, que la separa de la playa de Bogatell como muestra la figura 6.1. Además de los diques emergidos entre los que se encaja la playa, existen dos espigones semi-sumergidos con cota de coronación en torno al nivel medio del mar a ambos lados de la playa.



Figura 6.1: Localización de la playa de Nova Icaria y la Estación Litoral de Barcelona (ARGUS). (Fuente: adaptada de Google Earth)

Próximo al extremo occidental de la playa de Nova Icaria se encuentra la Estación Litoral de Barcelona (sobre la terraza de la Torre Mapfre en la figura 6.1), que consta de un sistema de video ARGUS (Holman and Stanley, 2007) para obtener imágenes de la playa, las cuales permiten extraer la posición de la línea de costa como se explicará más adelante. Estas mediciones de la línea de costa son necesarias tanto para establecer la condición inicial del modelo de evolución, como para llevar a cabo la validación del modelo.

A continuación, se resume la metodología empleada para la extracción de la línea de costa a partir de las imágenes de video cámara de la playa de Nova Icaria obtenidas por la Estación Litoral de Barcelona.

Se han utilizado las imágenes de video cámara de la playa de Nova Icaria realizadas por el sistema de video ARGUS de la Estación Litoral de Barcelona, el cual pertenece al Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), durante el periodo 2001-2007.

Desde la terraza de la Torre Mapfre, junto al Puerto Olímpico, a 142 metros de altura, se adquieren fotografías desde 5 cámaras que proporcionan imágenes de parte del litoral, incluyendo el Puerto Olímpico y las playas de La Barceloneta, Somorrostro, Nova Icaria y Bogatell, como muestra la figura 6.2.



Figura 6.2: Video cámara del sistema ARGUS (panel superior) y fotografías tomadas por sus 5 video-cámaras. (Fuente: Martínez, 2013)

Así se dispone de una imagen diaria tomada aproximadamente a las 10:00 a.m. GMT durante los años 2001 a 2007.

Sin embargo, debido a situaciones que reducen la visibilidad (bien por cuestiones meteorológicas o por una alta ocupación de la playa), un reducido porcentaje de imágenes (inferior al 5%) no han podido ser utilizadas. Sobre cada una de las imágenes se ha trazado una línea poligonal siguiendo la línea de costa a lo largo de la playa de Nova Icaria en la imagen original (Toulemonde, 2011), que posteriormente se rectifica mediante transformación linear directa (DLT) (Abdel-Aziz and Karara, 1971), de modo que se obtiene en coordenadas normalizadas (x, y, z) tanto la imagen como la línea de costa digitalizada, de forma que es posible tomar mediciones sobre ellas. En la figura 6.3 se muestra un ejemplo de imagen rectificada junto con su correspondiente línea de costa digitalizada.



Figura 6.3: Imagen rectificada de la playa de Nova Icaria y línea de costa digitalizada (en azul).

El proceso de rectificación tiene en cuenta el nivel medio del mar que tiene lugar en el instante en el que se toma la imagen (cota de la línea de costa digitalizada), el ángulo de inclinación de la cámara respecto a un plano horizontal, los parámetros ópticos de la cámara y la correspondencia entre las coordenadas de la imagen y coordenadas normalizadas para varios puntos de control como muestra la figura 6.4.



Figura 6.4: Esquema del proceso de rectificación de una fotografía. (Fuente: Turki, 2011)

El nivel del mar asociado a la imagen se ha obtenido como la suma del nivel de marea (marea astronómica y marea meteorológica) y el set-up estático (debido a la transferencia de momento del oleaje a la columna de agua en las proximidades de la costa).

Los datos de marea astronómica (MA) y marea meteorológica (MM) han sido extraídos del mareógrafo del Puerto de Barcelona perteneciente a la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) y el máximo set-up estático ($\bar{\eta}_{max}$) se ha calculado de acuerdo a la siguiente ecuación (Dean and Walton, 2009):

$$\bar{\eta}_{max} = \frac{5\gamma}{16} H_b \tag{6.1}$$

donde H_b es la altura de ola en rotura y γ el coeficiente de rotura. La altura de ola en rotura se ha obtenido de la propagación hasta la rotura del oleaje de la base de datos DOW, descrita en apartados posteriores.

Como la línea de costa extraída presenta una cota variable e igual al nivel del mar antes descrito, ha sido necesario corregir las mediciones para que todas las líneas de costa queden referidas a una misma cota. Para ello se ha considerado un frente de playa con pendiente constante extraído de la batimetría disponible en la playa de Nova Icaria correspondiente al año 2008.

6.3. Forzamientos del modelo: oleaje

El oleaje se ha obtenido de la base de datos DOW, "Downscaled Ocean Waves" (Camus et al., 2013), desarrollada por el IH Cantabria, la cual proporciona datos de altura de ola significante, periodo de pico y dirección media del oleaje a 15 metros de profundidad frente a la playa de Nova Icaria, con resolución horaria desde 1948 hasta 2008.

La base de datos DOW supone un aumento de la resolución espacial y simulación de los procesos de transformación del oleaje en su propagación hasta la costa de los datos de la base GOW "Global Ocean Waves" (Reguero et al., 2012), ejecutado con el modelo WaveWach III (Tolman, 2002) y calibrados en profundidades indefinidas. El modelo de propagación empleado es el SWAN (Simulating WAves Nearshore) desarrollado por Delf University of Technology, que está basado en la ecuación de acción de onda que promedia la fase (Booij et al., 1999).

Los resultados de la base de datos DOW se han validado con la boya de la red costera del OPPE en Barcelona. A continuación, en la figura 6.5, se muestran los resultados correspondientes al año 2005.



Figura 6.5: Validación del oleaje de la base de datos DOW con la boya de Barcelona de la red Costera del OPPE (año 2005).

6.4. Parámetros de configuración del modelo IH-MOEC

En esta sección se describen los parámetros de entrada del modelo en el caso de estudio de Nova Icaria.

El esquema de cálculo para la modelización de Nova Icaria con IH-MOEC consiste en un sistema coordenado de 21 nodos equi-espaciados 20 metros a lo largo del eje x, con una orientación N45°E (véase la figura 6.6), sensiblemente paralela a la orientación media de la playa. La posición de la línea de costa se expresa en abscisas de este sistema coordenado en cada uno de los 21 nodos. Los nodos laterales incluyen una condición de contorno de transporte de sedimento nulo, coincidiendo con los diques entre los que se encaja Nova Icaria.



Figura 6.6: Malla de cálculo de Oluca-MC y ejes de referencia del modelo IH-MOEC (en rojo).

Para la propagación del oleaje con el modelo Oluca-MC se ha empleado una malla de 21 x 19 nodos equi-espaciados 20 metros, coincidente con el sistema coordenado del modelo IH-MOEC, como muestra la figura 6.6. Los nodos situados en los extremos laterales de la playa, correspondientes con los diques en los extremos laterales de la misma, han sido

simulados a la cota -2 (cotas negativas representan zonas emergidas) como puntos fijos (no afectados por los cambios morfológicos de la batimetría), del mismo modo que los espigones semi-sumergidos a la cota 0 que se encuentran a ambos lados de la playa, con arranque en las esquinas de la malla de cálculo y 60 metros de longitud el espigón a poniente y 100 metros el de levante.

Los parámetros de configuración de la componente de IH-MOEC que simula el transporte transversal de sedimento han sido extraídos de Jara et al. (2015), al igual que el propio modelo de transporte transversal, el cual fue calibrado y validado en Nova Icaria basándose en las mismas mediciones de la línea de costa descritas en esta tesis para los años 2005 y 2006.

El parámetro K_1 de la fórmula del transporte longitudinal del CERC (SPM, 1984) implementada en el modelo IH-MOEC, se ha obtenido de la siguiente formulación (del Valle et al., 1993):

$$K_1 = 1.4e^{-2.5D_{50}} \tag{6.2}$$

donde D_{50} es el tamaño de grano del sedimento en milímetros, el cual en Nova Icaria resulta ser de 0.75 mm (Ojeda and Guillén, 2008), por lo que el valor de K_1 obtenido es 0.2147.

El parámetro K_2 de la componente del transporte longitudinal asociada al gradiente de altura de ola se ha asumido igual a K_1 .

La profundidad de cierre del perfil activo de la playa, h_* , que limita los movimientos de la batimetría (Hallermeier, 1981) resulta de 6.6 metros como promedio durante el periodo simulado. Esta es la profundidad empleada en los casos en los cuales se ha considerado h_* constante.

El paso de tiempo empleado y la duración de las simulaciones varía en función del experimento realizado, tal y como se describe en el apartado siguiente.

6.5. Resultados obtenidos con IH-MOEC y comparación con otros modelos de una línea

Para estudiar el comportamiento de la playa de Nova Icaria se han llevado a cabo dos tipos de experimentos:

- 1. Evolución de la posición promedio de la línea de costa a lo largo de un mes bajo forzamientos variables.
- 2. Evolución de la línea de costa hasta el equilibrio sometida a forzamientos constantes.

En primer lugar, partiendo de la posición media de la línea de costa medida el 1 de enero de 2005, se ha modelado, tanto con el modelo desarrollado en esta tesis IH-MOEC como con el modelo original UnaLinea, un mes de evolución de la línea de costa con paso de tiempo horario correspondiente con la resolución temporal de los datos de oleaje disponibles.

Debido a la condición de conservación de sedimento en los modelos tradicionales de una línea, cuando se representa la evolución temporal de la posición promedio de la línea de costa en una playa encajada, como es el caso de Nova Icaria, no se observa ningún cambio en la misma. Sin embargo, gracias a la componente de transporte transversal de sedimento implementada en el modelo IH-MOEC, la línea de costa obtenida con este modelo avanza en promedio durante los periodos de calma y retrocede cuando acontece un temporal, como se muestra en la figura 6.7, ajustándose notablemente mejor a las observaciones.

El siguiente experimento realizado en Nova Icaria consiste en dejar evolucionar la línea de costa hasta su posición de equilibrio, sometida a un oleaje constante correspondiente al oleaje promedio del periodo en el que se disponen de mediciones de la línea de costa (altura de ola significante, H_s , de 0.54 metros, periodo de pico, T_p , de 5.17 segundos y dirección media S45°E) y partiendo de una línea de costa rectilínea.

En la figura 6.8 se muestra la propagación del oleaje promedio de los años 2001 y 2007 mediante el modelo Oluca-MC empleando la batimetría de la playa de Nova Icaria, la cual incluye los diques laterales que contienen a la playa, así como los espigones semisumergidos, los cuales abrigan la playa a la vez que generan una importante difracción del oleaje, dando lugar tanto a un giro del oleaje incidente hacia el exterior de la playa (de sentido puesto en cada extremo), como a una reducción muy importante de la altura de ola en los extremos de la playa respecto del centro de la misma.



Figura 6.7: Evolución de la línea de costa promedio a lo largo de un mes (panel superior) bajo forzamientos variables (panel inferior).



Figura 6.8: Propagación del oleaje promedio de los años 2001-2007 en Nova Icaria.

En la figura 6.9 se muestran los resultados obtenidos con el modelo IH-MOEC para la playa de equilibrio en comparación con las observaciones, los cuales arrojan un error cuadrático medio (RMSE) de 5.68 metros; notablemente inferior a los 14.68 metros a los que da lugar el modelo clásico de una línea.



Figura 6.9: Línea de costa de equilibrio en Nova Icaria bajo forzamientos constantes.

El resultado del experimento mostrado en la figura 6.9, ilustra como la línea de costa de equilibrio obtenida con el modelo IH-MOEC reproduce la curvatura observada en la playa gracias a que, a pesar de que el oleaje con el que se fuerza el modelo es normal a la línea de costa inicial, éste gira en su propagación hasta la rotura (véase figura 6.8), generando un transporte longitudinal desde el centro de la playa hacia los extremos.

Asimismo, el término relativo al transporte longitudinal de sedimento debido al gradiente de altura de ola, modulado con el parámetro K_2 , contribuye a dar esta forma a la playa

de equilibrio debido a la reducción de altura de ola que producen los espigones semisumergidos en los laterales de la playa respecto del centro de la misma, lo cual acentúa el transporte de sedimento del centro hacia los extremos de la playa.

Por último, también la consideración de una profundidad de cierre (h_*) variable en lugar de constante, contribuye a una mayor curvatura de la línea de costa debido a que el sedimento que se transporta del centro de la playa a los extremos se reparte a lo largo de un perfil de playa más corto en éstos, haciendo que el avance de la línea de costa en los laterales sea mayor que el retroceso que se genera en el centro de la playa.

Por el contrario, con el modelo clásico de partida UnaLinea, la línea de costa inicial rectilínea se mantiene igual indefinidamente debido a la incidencia normal del oleaje sobre la playa. Esto es debido a que la propagación del oleaje según teoría lineal en el modelo clásico de una línea no tiene en cuenta los efectos de los diques laterales, ni de los espigones sumergidos sobre el oleaje, ni de la propia batimetría de la playa sumergida.

Es más, el alcance simplificado del modelo tradicional UnaLinea tiene como consecuencia que la forma de la línea de costa tienda a evolucionar durante la simulación hacia una línea recta, incluso partiendo de una línea curva, como se puede comprobar en la figura 6.10.

En dicha figura, a pesar de que se inicia la simulación a partir de una línea de costa muy parecida a la línea de costa observada, se puede comprobar como, a partir de la tercera semana, la línea de costa ya ha evolucionado a una recta.

Una de las consecuencias del alcance simplificado de los modelos de una línea tradicionales es que la forma de la línea de costa tiende a evolucionar hacia la forma original de la malla. Si se trata de una malla lineal, como es el caso del modelo de partida UnaLinea, la forma de la línea de costa tiende, efectivamente, a evolucionar durante la simulación hacia una línea recta. Del mismo modo, si se tratara de una malla curvilínea la línea de costa tendería a evolucionar hacia la forma original de la malla curva.

Aunque no es una de sus hipótesis fundamentales, está comprobado que los modelos de una línea tradicionales tienden a representar mejor regiones que son relativamente rectas. Las líneas de costa complejas se han formado a menudo en escalas temporales geológicas por procesos que no están incluidos en los modelos de una línea, por lo que no es de extrañar que estos modelos representen mejor regiones rectas (Thomas and Frey, 2013).



Figura 6.10: Evolución de la línea de costa hacia el equilibrio con el modelo tradicional de una línea.

Los modelos GENESIS y GenCade, por ejemplo, abordan este problema mediante la aplicación de un contorno regional, que es un método matemático para obligar a la línea de costa a que evolucione hacia una forma predefinida, en lugar de hacerlo hacia la línea recta. LITPACK o UnaLinea, por su parte, no incluyen este contorno regional.

Cabe señalar que los resultados mostrados hasta este punto para la playa de Nova Icaria han sido obtenidos sin realizar ninguna calibración de los parámetros de configuración del modelo, ya que todos ellos se han extraído de la literatura existente.

Ahora bien, si se lleva a cabo la calibración del parámetro K_1 buscando minimizar el error cuadrático medio (RMSE) entre la línea de costa de equilibrio modelada con IH-MOEC y la línea de costa media medida (véase figura 6.11), el resultado obtenido mejora reduciéndose el RMSE hasta los 2.28 metros para un K_1 de 3.17, como se muestra en la figura 6.12.



Figura 6.11: Error cuadrático medio, RMSE, obtenido entre la línea de costa de equilibrio medida y modelada con IH-MOEC empleando distintos valores de K_1



Figura 6.12: Línea de costa de equilibrio en Nova Icaria bajo forzamientos constantes, con K_1 calibrado.

En la figura 6.12 se observa, además, que si en el modelo IH-MOEC se considera la profundidad de cierre constante en lugar de variable, empeoran ligeramente los resultados, llegando a un RMSE de 2.42 metros. Del mismo modo, si se desconecta el término de transporte longitudinal de sedimento debido al gradiente de altura de ola, haciendo $K_2=0$, el resultado empeora en mayor medida, alcanzando un RMSE de 11.09 metros, ilustrando de esta manera la contribución individual de las mejoras introducidas en el modelo IH-MOEC respecto del modelo de partida UnaLinea.

Cabe destacar que el paso de tiempo para la ejecución del modelo en este último experimento ha sido de 30 minutos para el valor de K obtenido de la ecuación 6.2, mientras que valores mayores de K han requerido pasos de tiempo menores para conseguir la convergencia del modelo (por ejemplo 15 minutos para K > 2 y 10 minutos para K > 3). La convergencia hacia el equilibrio en todos los casos tarda en producirse entre 1 y 2 meses.

6.6. Conclusiones

Por tanto, IH-MOEC presenta ciertos componentes adicionales respecto del modelo de partida UnaLinea, que son:

- Inclusión de la componente de transporte transversal de sedimento.
- Propagación del oleaje hasta la rotura con el modelo Oluca-MC, el cual considera la batimetría real del caso de estudio y reproduce los fenómenos de refracción y difracción particularmente bien en comparación con el método de propagación del oleaje en el modelo UnaLinea (ley de Snell).
- Inclusión del término de gradiente longitudinal de altura de ola en rotura en la formulación del transporte longitudinal de sedimento.
- Consideración de la profundidad de cierre variable en el tiempo y en el espacio, en función del oleaje en rotura.

En el presente capítulo se ha demostrado que todas estas componentes contribuyen a mejorar los resultados obtenidos al aplicar el modelo a la playa de Nova Icaria.

En particular, IH-MOEC es capaz de reproducir los fenómenos de erosión y acreción que se producen en la playa de Nova Icaria durante temporales y periodos de calma respectivamente, debido a los movimientos transversales de sedimento a lo largo de un perfil de playa. Mientras que el modelo de partida UnaLinea no muestra ningún cambio
en la posición media de la línea de costa, debido a que el sedimento que se transporta longitudinalmente se reparte en un perfil de playa constante.

Asimismo, IH-MOEC tiene en cuenta en el largo plazo los efectos de los temporales en el perfil transversal que no se recuperan en las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, tratándose de un proceso acumulativo.

Por otro lado, la simulación de la evolución de la línea de costa hacia el equilibrio en Nova Icaria, muestra que IH-MOEC es capaz de alcanzar la línea de costa que representa la curva promedio en dicha playa (particularmente bien si se calibra el valor del parámetro K_1), sin necesidad de artificios matemáticos (como en el caso de los modelos GENESIS o GenCade), incluso partiendo de una línea de costa recta. Por el contrario, UnaLinea tiende a una recta en todo caso, incluso partiendo de una línea curva similar a la media observada, al no tener en cuenta los fenómenos de refracción y sobre todo difracción que experimenta el oleaje debido a la presencia de una batimetría irregular y varios espigones semi-sumergidos en el caso particular de Nova Icaria.

Cabe destacar que, en Nova Icaria, se ha observado que es especialmente importante la contribución del término de transporte longitudinal de sedimento debido al gradiente longitudinal de altura de ola, al existir un importante gradiente producido por los diques laterales y espigones semi-sumergidos que hay en esta playa.

Capítulo 7

Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1. Conclusiones

En el presente apartado se recogen las conclusiones derivadas del desarrollo de la tesis, así como las contribuciones de la misma al estado del arte actual.

Del análisis del estado del arte llevado a cabo al inicio de la tesis, se dedujo que la línea de investigación más idónea a la hora de desarrollar un modelo numérico aplicable en el medio-largo plazo es el desarrollo de un modelo híbrido en el que se combinen varios modelos. De hecho, ésta es la línea que se está siguiendo en la actualidad en otras universidades y centros de investigación.

Hasta no hace mucho tiempo, las herramientas predictivas se desarrollaban para cubrir escalas espaciales y temporales muy específicas, con un rango de aplicación limitado. Sin embargo, la tendencia actual ya no se centra en mejorar los modelos individualmente, sino en desarrollar un sistema en el que se integren distintos modelos para, de esta manera, considerar los procesos de pequeña escala en escalas espacio-temporales grandes. Un único modelo numérico no es capaz de resolver todas las escalas relevantes, por lo que se hace indispensable desarrollar modelos híbridos en los que se combinen dos o más modelos.

No obstante, los modelos híbridos existentes presentan diversos problemas que limitan su uso. En general, no incluyen la difracción o, si lo hacen, es de una manera simplificada, centrándose principalmente en simular los procesos de refracción y asomeramiento. Sin embargo, es muy habitual que la difracción esté presente en los casos de aplicación de este tipo de modelos, puesto que en ellos es común la presencia de diques exentos, espigones, salientes, cabos, muros paralelos a la costa, etc. Asimismo, generalmente tampoco pueden simular el cambio de la posición de la línea de costa producido por transporte transversal de sedimento.

Con base en dicho análisis, se ha desarrollado en la presente tesis un modelo numérico explícito de evolución de la línea de costa aplicable en escalas de medio a largo plazo (IH-MOEC), partiendo de un modelo de una línea tradicional (modelo de evolución de la línea de costa a largo plazo) al que se le han implementado los modelos y mejoras necesarias para solventar las carencias que presentan en la actualidad este tipo de modelos.

Los modelos de evolución de la línea de costa tradicionales (modelos de una línea) tienen en cuenta únicamente los fenómenos de asomeramiento y refracción en la propagación del oleaje hasta la rotura. Sin embargo, es muy común en los casos de estudio de este tipo de modelos la existencia de estructuras, que hacen que el hecho de considerar el fenómeno de la difracción sea trascendental a la hora de obtener las características del oleaje en rotura correctamente.

Asimismo, en los modelos de una línea tradicionales se considera batimetría recta y paralela, por lo que no se puede tener en cuenta la batimetría real de la zona de estudio. Sin embargo, ésta puede tener diversos elementos morfológicos, tales como bajos o barras, que determinan la propagación del oleaje incidente, influyendo por tanto en el cálculo del oleaje en rotura.

Ambas limitaciones se han solventado implementando en el modelo inicial de una línea el modelo de propagación de oleaje monocromático Oluca-MC, que es un modelo de refracción-difracción ampliamente validado, que permite tener en cuenta la batimetría detallada de la zona de estudio, como barras, islas, bajos o la evolución de la morfología alrededor de las estructuras y salientes. Además, es un modelo muy rápido por lo que se puede aplicar en estudios a largo plazo siendo computacionalmente muy eficiente.

Igualmente, en el IH-MOEC se tiene en cuenta la interacción entre el modelo de oleaje y el cambio de la línea de costa, puesto que a medida que ésta cambia se regenera la batimetría, influyendo por tanto en la propagación del oleaje hasta la rotura

En el capítulo 3 se ha llevado a cabo, además, un estudio comparativo entre los métodos simplificados empleados para la estimación de las características del oleaje en rotura por los modelos tradicionales de una línea y el modelo de propagación Oluca-MC implementado en el IH-MOEC, concluyendo que la zona de refracción-difracción se está evaluando de una manera incorrecta con dichos métodos simplificados.

De igual modo, con los modelos que resuelven la refracción del oleaje mediante la teoría del rayo es imposible calcular la altura de ola detrás de un bajo, ya que el oleaje se concentra al refractarse por ambos lados del mismo, apareciendo una zona de cáusticos. Sin embargo, con el modelo de refracción-difracción Oluca-MC es posible modelar dicha zona de concentración energética, puesto que la difracción reduce el efecto de acumulación de energía que se produciría considerando sólo la refracción.

Es importante destacar que una determinación incorrecta de las características del oleaje en rotura influye fuertemente en la estimación de la línea de costa, siendo tan importante el método para determinar la altura de ola y la dirección en rotura que ciertas características de la línea de costa, como la forma en planta de equilibrio, no van a poder ser representadas empleando un método erróneo de propagación, independientemente de la calibración que se lleve a cabo.

Igualmente, los modelos de evolución de la línea de costa a largo plazo tradicionales consideran profundidad de cierre constante tanto en el tiempo como en el espacio. Sin embargo, el perfil de playa no tiene la misma anchura en las zonas expuestas que en las zonas abrigadas. Un valor elevado de la profundidad de cierre conlleva una sección ancha de la playa en la cual se lleva a cabo el movimiento del sedimento, siendo la respuesta de la línea de costa ante las perturbaciones más lenta. Mientras que en las zonas abrigadas, por ejemplo por una estructura o un saliente, el perfil de playa es mucho más estrecho que en las playas abiertas, por lo que la respuesta de la línea de costa ante los cambios es mucho más rápida. **Por este motivo, se ha incorporado en el IH-MOEC una profundidad de cierre variable temporal y espacialmente, dependiente de la altura de ola en rotura, ya que la implementación del Oluca-MC permite tener en cuenta la variabilidad longitudinal de esta altura de ola.**

En la validación del IH-MOEC en el caso real de Nova Icaria (capítulo 6) se comprobó que la consideración de una profundidad de cierre variable en lugar de constante, contribuye a una mayor curvatura de la línea de costa debido a que el sedimento que se transporta del centro de la playa a los extremos de la misma, se reparte a lo largo de un perfil de playa más corto en éstos, haciendo que el avance de la línea de costa en los laterales sea mayor que el retroceso que se genera en el centro de la playa.

Además, en las proximidades de las estructuras la difracción produce un cambio considerable en la altura de ola en rotura sobre una longitud de playa importante. **Por esta razón, se ha incorporado en el IH-MOEC el transporte de sedimento asociado al gradiente longitudinal de altura de ola en rotura en la formulación del CERC, mejorando notablemente los resultados del modelo en Nova Icaria, observándose que en este caso de estudio en concreto es especialmente importante la contribución del término del transporte longitudinal de sedimento** debido al gradiente de altura de ola en rotura, ya que hay un importante gradiente producido por los diques laterales y espigones semi-sumergidos existentes en esta playa.

Los modelos de evolución de la línea de costa tradicionales, como UnaLinea, GENESIS, ONELINE, etc. prescinden de la información del transporte transversal de sedimento y el único cambio de la línea de costa calculado es el asociado a las variaciones del transporte longitudinal. A causa de esta limitación, estos modelos son sólo aplicables en el largo plazo, donde se asume que los efectos del transporte transversal de sedimento, tales como la erosión producida por tormentas o el movimiento cíclico de la posición de la línea de costa asociado a las variaciones estacionales de invierno-verano del oleaje, se cancelan en un periodo de simulación suficientemente largo.

Gracias a la incorporación en el modelo IH-MOEC de la variabilidad del perfil de playa mediante la implementación de un modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal de sedimento a lo largo del perfil y tendente al equilibrio, se ha obtenido un modelo de evolución de la línea de costa aplicable en el medio-largo plazo, el cual tiene en consideración tanto la variación de la línea de costa debida al transporte transversal como al transporte longitudinal.

Como se comprobó en los capítulos 5 y 6, dedicados a la implementación del modelo de evolución de línea de costa por transporte transversal y a la validación del modelo final IH-MOEC en un caso real, respectivamente, el modelo desarrollado en la presente tesis es capaz de reproducir los fenómenos de avance de la línea de costa en los periodos de calma y retroceso de la misma cuando se producen oleajes más energéticos, debido a los movimientos transversales de sedimento a lo largo del perfil de playa. IH-MOEC es, por tanto, capaz de reproducir los fenómenos de erosión y acreción que se producen en la playa durante temporales y periodos de calma, respectivamente, siendo un modelo de evolución aplicable en el medio plazo.

Del mismo modo, gracias a esta implementación, IH-MOEC también tiene en cuenta el efecto que tienen a largo plazo los retrocesos (por transporte transversal de sedimento debido a eventos extremos) de la línea de costa acumulados a lo largo de los años, que no se recuperan en las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano.

Asimismo, se ha comprobado en el capítulo anterior que IH-MOEC es capaz de alcanzar la línea de costa que representa la curva promedio en la playa de Nova Icaria, sometida a un oleaje promedio constante, incluso partiendo de una línea de costa recta. Mientras que la evolución de la línea de costa, en el mismo caso de estudio, con un modelo de una línea tradicional tiende a una recta, incluso iniciando la simulación con una línea curva similar a la media observada, al no tener en cuenta los fenómenos de refracción y, especialmente, difracción que experimenta el oleaje debido a la batimetría irregular.

Por tanto, en la presente tesis se ha desarrollado un modelo numérico de evolución de la línea de costa aplicable en el medio-largo plazo, el cual emplea la batimetría real de la zona de estudio, simula correctamente los fenómenos de refracción-difracción, considera profundidad de cierre variable tanto en el tiempo como en el espacio, tiene en cuenta el gradiente longitudinal de la altura de ola en rotura en el cálculo del transporte de sedimento longitudinal y simula el cambio de la posición de la línea de costa tanto por transporte longitudinal como por transporte transversal.

Todos estos aspectos mejoran, considerablemente, el cálculo de la altura de ola y dirección del oleaje en rotura con respecto a los modelos de una línea tradicionales, así como el del transporte de sedimento, mejorando por consiguiente la predicción de la evolución de la línea de costa.

Debido a estas implementaciones y mejoras, IH-MOEC tiene una serie de parámetros de calibración. Los principales son los parámetros K_1 y K_2 de la formulación del transporte longitudinal de sedimento del CERC y el parámetro C^{\pm} del modelo de evolución de la línea de costa por transporte transversal. No obstante, también están presentes otros parámetros de calibración que hay que considerar, tales como el parámetro adicional γ del criterio de rotura añadido en el modelo IH-MOEC, donde se ha propuesto una meto-dología de calibración en el capítulo 3, y el parámetro C_c del cálculo de la profundidad de cierre variable en el tiempo y en el espacio.

Hay que señalar que es importante validar el modelo IH-MOEC en playas con características diferentes a las de Nova Icaria (empleada como caso de validación en la presente tesis), para llevar a cabo un análisis de sensibilidad y definir cuáles son los parámetros de calibración que mejor se ajustan.

7.2. Futuras líneas de investigación

Para finalizar, en el presente apartado se propone una serie de líneas futuras de investigación para la mejora del modelo de evolución de línea de costa aplicable en el medio a largo plazo desarrollado (IH-MOEC). Estas líneas se han clasificado en tres grupos:

- 1. Con respecto al esquema numérico:
 - Implementar un esquema de solución numérica implícito; el modelo IH-MOEC actual es un modelo explícito. Las principales ventajas de los esquemas explícitos frente a los implícitos son su fácil programación y expresiones de las condiciones de contorno más sencillas. Sin embargo, su desventaja principal es la dificultad que tienen para conservar la estabilidad de la solución, lo que obliga a que los tiempos de cálculo tengan que ser mucho menores que para el caso de esquemas implícitos, aumentando el coste computacional.

Es importante, por tanto, implementar un esquema de solución numérica implícito para poder calcular la evolución de la línea de costa cuando el esquema explícito sea inestable, lo que puede ser común en casos de estudio reales con configuraciones complejas.

Definir una malla dinámica; en realidad los perfiles deberían definirse perpendiculares a la línea de costa, sin embargo por simplicidad la mayoría de los modelos tradicionales de una línea, como el modelo de partida de esta tesis, los define perpendiculares al eje x del sistema coordenado en el cual se define la línea de costa y que debe estar orientado paralelo a la tendencia general de la misma.

No obstante, la definición de los perfiles perpendiculares a la línea de costa es especialmente importante en zonas en las que ésta tiene una gran curvatura, puesto que en estas zonas los perfiles perpendiculares a la costa difieren mucho de los perfiles perpendiculares al eje x del sistema coordenado definido.

- 2. Con respecto a la aplicación del modelo:
 - Explorar la extensión del modelo IH-MOEC a escalas de muy largo plazo; para estudios de muy largo plazo son necesarias series de oleaje muy largas y una escala espacial mucho mayor que la considerada en el IH-MOEC, la cual implica tener que implementar procesos de transporte adicionales más allá de la profundidad de cierre y nuevas condiciones de contorno.

En los últimos años ha crecido considerablemente el interés en el conocimiento de las morfodinámicas a muy largo plazo, especialmente para estudios de cambio climático. Con el objetivo de generar largas series temporales de oleaje y aplicar el modelo morfodinámico de evolución a grandes escalas espaciales y temporales, Antolínez et al. (2016) han desarrollado una metodología para reducir la dimensionalidad de los forzamientos del oleaje para modelos morfodinámicos, dependientes de los patrones globales atmosféricos y relacionados con la variabilidad estacional, inter-anual, tendencias a largo plazo y una función de autocorrelación con la altura de ola, periodo y dirección, lo que se ha denominado el emulador del clima. Asimismo, es posible reproducir series temporales de clima marítimo futuras, teniendo en cuenta posibles cambios en el sistema climático global.

Desarrollar un modelo probabilístico; el modelo IH-MOEC es actualmente un modelo determinista, obteniéndose un único resultado de la posición final de la línea de costa, calculado a partir de una única serie de oleaje. Sin embargo, las predicciones de los modelos de evolución de la línea de costa son sensibles a la secuencia del oleaje que se introduzca en ellos, por lo que el intervalo de tiempo de simulación para la entrada de datos del oleaje, así como la secuencia de éste, son factores importantes en los resultados obtenidos con el modelo, siendo necesaria la ampliación del IH-MOEC para poder aplicarlo de manera probabilística.

El modelo probabilístico se llevará a cabo teniendo en cuenta las incertidumbres de los forzamientos y será aplicable tan solo para las escalas temporales de largo y muy largo plazo, pudiendo ser aplicable a problemas de tipo de cambio climático, donde las incertidumbres futuras son significativas. Los forzamientos que se tendrán en cuenta serán tanto los aportes fluviales como el oleaje.

Para tener una evaluación de la envolvente de las diferentes posiciones de la línea de costa durante un cierto periodo de tiempo, se emplearon en el pasado simulaciones de Monte-Carlo, como en Southgate et al. (2000), donde el efecto de la cronología o secuencia de los oleajes eran estudiados para desarrollar predicciones probabilísticas de la posición de la playa. Sin embargo, en la actualidad se están desarrollando nuevas metodologías aplicables al muy largo plazo, como la mencionada en el punto anterior del emulador del clima (Antolínez et al., 2016).

Implementar un nuevo criterio para la ejecución del modelo Oluca-MC; en el IH-MOEC se han implementado dos criterios sencillos para la regeneración de la batimetría y ejecución del modelo de propagación del oleaje Oluca-MC, dependientes de las características del oleaje incidente y del cambio originado en la posición de la línea de costa.

Sin embargo, una futura línea de investigación es adaptar la metodología desarrollada en Méndez and Medina (2001) en la cual, para evitar tener que propagar el oleaje monocromático cada paso de tiempo morfológico, mide el cambio que se ha originado en la batimetría con respecto al paso de tiempo anterior y si dicho cambio es menor a un umbral predefinido perturba el campo de oleaje mediante unas variaciones de altura de ola y ángulo inducidas por las variaciones del fondo. Si el cambio producido en la batimetría supera dicho umbral, entonces se propaga el oleaje. Por tanto, este método se aplica siempre y cuando las variaciones sean pequeñas en cada paso de tiempo.

Esta línea de investigación es un tema a explorar para intentar implementar esta metodología en simulaciones morfodinámicas en escalas de muy largo plazo.

 Análisis de sensibilidad y validación del modelo IH-MOEC en otro tipo de playas; es importante validar el modelo en playas con características distintas a las de Nova Icaria para así confirmar su aplicabilidad en casos reales.

Asimismo, se debe hacer un estudio de sensibilidad del modelo en diferentes playas para analizar, por ejemplo, cuál es el parámetro de calibración definido en la formulación del cálculo de la profundidad de cierre variable que mejor se ajusta.

- 3. Con respecto a los procesos del modelo:
 - Explorar nuevas formas de integrar los modelos de evolución de la línea de costa por transporte longitudinal y transversal; en la versión actual de IH-MOEC los modelos de evolución de la línea de costa por transporte longitudinal y por transporte transversal se ejecutan en paralelo y sólo se comunican entre sí para que el modelo longitudinal transfiera al transversal la información de la altura de ola en rotura (obtenida en cada intervalo de tiempo mediante el modelo de propagación Oluca-MC) promedio, así como para sumar linealmente los cambios de la línea de costa debido a ambos tipos de transporte y calcular la posición de la línea de costa al final del periodo de simulación, o en los pasos de tiempo intermedios que se consideren oportunos.

Sin embargo, habría que analizar como afecta a los resultados el hecho de integrar ambos modelos de manera distinta. Una segunda opción podría ser considerar la variabilidad longitudinal de la altura de ola en rotura en el cálculo del cambio de la posición de la línea de costa por transporte transversal de sedimento. De este modo, la posición de la costa en todos los perfiles sería diferente y para calcular la posición inicial de la línea de costa en el siguiente intervalo de tiempo se emplearía la posición final promedio del paso de tiempo anterior. En esta opción ambos modelos se seguirían ejecutando en paralelo pero se incluirían distintos avances y retrocesos a lo largo de la costa por transporte transversal, fomentando la forma aconchada en playas encajadas. Una tercera opción sería considerar en cada paso de tiempo, en el modelo de evolución por transporte transversal, tanto la variabilidad longitudinal de la altura de ola en rotura como el movimiento de la línea de costa por transporte longitudinal y, tras el cálculo del cambio de la costa por transporte transversal, calcular el promedio. En este caso ambos modelos no podrían ejecutarse en paralelo.

 Implementar nuevos elementos que afectan al transporte de sedimento; tales como muros, lajas, bypass en diques exentos, interacción de la línea de costa con dunas y acantilados, etc.

Apéndice A

Validación del modelo Oluca Monocromático

A.1. Introducción

El modelo de oleaje monocromático Oluca-MC es un modelo que está ampliamente validado, tanto con soluciones analíticas como con ensayos de modelos físicos en laboratorio. En GIOC (2001) se pueden consultar dichas validaciones y en este anejo se recoge una muestra de las mismas.

A.2. Fenómenos de propagación con solución analítica conocida

Para validar el fenómeno de asomeramiento se propagó un tren de ondas en la dirección del eje x sobre una playa como se muestra en la figura A.1, y se comparó ese resultado numérico con la solución analítica que se obtiene a partir de la hipótesis de conservación del flujo de energía $EC_g = cte$, que da lugar a la siguiente ecuación:

$$\frac{H_i}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_{g1}}} = K_S \tag{A.1}$$

donde K_S es el coeficiente de asomeramiento, C_{g0} y C_{g1} son la celeridad de grupo en el punto inicial y final respectivamente, H_0 la altura de ola inicial y H_i la altura de ola final, como se mostró en el segundo capítulo (ecuación 2.33).



Figura A.1: Esquema de una batimetría recta y paralela. (Fuente: GIOC, 2001)

En la figura A.2 se muestra el coeficiente de asomeramiento en función de kh, siendo k el número de onda y h la profundidad. El error cuadrático medio relativo para la altura de ola fue de orden 10^{-4} .

Los resultados, dada la linealidad de las ecuaciones, no dependen de la altura de ola inicial. Asimismo, se comprobó la influencia de la pendiente y del peralte de las olas (relación entre la altura de ola y la longitud de la onda, $\frac{H_0}{L_0}$), observándose que los resultados dependen muy ligeramente de dicho peralte. Concretamente, se observó que los errores relativos aumentan ligeramente al aumentar el periodo de la onda, en especial para el caso de ondas largas en aguas poco profundas, aunque su influencia no es cuantitativamente significativa. Respecto a la pendiente, los resultados no dependen prácticamente del valor de la misma.



Figura A.2: Fenómeno de asomeramiento sobre una pendiente. (Fuente: GIOC, 2001)

Si se suma, además, el efecto de la refracción por fondo se obtiene que el coeficiente de propagación total es:

$$K_R K_S = \frac{H_i}{H_0} \tag{A.2}$$

con K_R igual al coeficiente de refracción.

Para la validación del fenómeno de refracción por fondo se propagó un tren de ondas sobre un fondo plano inclinado (véase figura A.1) con ángulos de incidencia de 15° , 30° , 45° , 50° y 60° .

En las figuras A.3 y A.4 se puede apreciar como, a medida que aumenta el ángulo de incidencia, los errores cuadráticos medios relativos crecen para la altura de ola y para el ángulo de propagación.

Admitiendo errores relativos del 3% el ángulo de incidencia debe ser menor que 50° , puesto que para 60° se obtuvieron errores del 8%.



Figura A.3: Fenómeno de refracción por fondo. Coeficiente de propagación total y dirección de propagación en función de kh. Ángulos de incidencia de 15° y 30°. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.4: Fenómeno de refracción por fondo. Coeficiente de propagación total y dirección de propagación en función de kh. Ángulos de incidencia de 45°, 50° y 60°. (Fuente: GIOC, 2001)

Por su parte, la solución teórica de la difracción tras un obstáculo no se suele presentar de forma analítica debido a su complejidad, pues requiere el uso de integrales de Fresnel, que deben resolverse numéricamente. Se suele mostrar dicha solución mediante tablas y gráficos en los que se representan las isolíneas de difracción en un determinado dominio, esto es, las líneas que unen los puntos en los que el coeficiente de difracción K_0 es el mismo. Estos gráficos se conocen con el nombre de ábacos de Wiegel (1962), puesto que fue él quien los presentó por primera vez.

De esta forma, en las figuras A.5, A.6, A.7, A.8 y A.9, se muestran las isolíneas de difracción producidas tras un obstáculo semi-infinito, recto, rígido e impermeable en un dominio con profundidad constante, evitando así la interferencia de los fenómenos ya calibrados de asomeramiento y refracción, en los cuales la profundidad era fundamental. La leyenda de cada isolínea representa el coeficiente de difracción, definido como la relación entre la altura de ola en cada punto y la altura de ola incidente sobre el obstáculo.

Aunque los ábacos de Wiegel (1962) y los ábacos del SPM (1984) son adimensionales, en el estudio de la difracción que se realizó con el modelo numérico se consideraron diferentes relaciones h/L variando la profundidad y el período de la onda. Los casos que se estudiaron fueron:

 $T = 3 \ s; \ h = 10 \ m; \ h/L = 0.712$ $T = 7 \ s; \ h = 25 \ m; \ h/L = 0.336$ $T = 10 \ s; \ h = 5 \ m; \ h/L = 0.074$

Todos estos casos se analizaron para cinco ángulos de incidencia diferentes, que fueron -30° , -15° , 0° , 15° y 30° , los cuales se corresponden con las figuras A.5, A.6, A.7, A.8 y A.9, respectivamente.

En dicho estudio se pudo comprobar que los resultados numéricos son mejores para períodos de 7 y 10 segundos, esto es, para relaciones h/L próximas a las correspondientes a aguas intermedias y poco profundas. Asimismo, al igual que ocurre en los ábacos de Wiegel (1962), en las proximidades del extremo del dique se observa que la solución es altamente variable, ya que en este punto los gradientes de altura de ola y dirección de propagación son muy grandes.

Respecto al ángulo de incidencia sobre el dique, hay que destacar la bondad del modelo para los cinco casos analizados. En todos ellos, especialmente con ángulo de incidencia de 30° , la zona de sombra que se crea a sotamar del dique es la que presenta los mayores errores. Así todo, se puede concluir que el fenómeno de la difracción está bien modelado por el modelo Oluca-MC.



Figura A.5: Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica. Ángulo de incidencia -30°. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.6: Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica. Ángulo de incidencia -15°. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.7: Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica. Ángulo de incidencia 0°. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.8: Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica. Ángulo de incidencia $15^\circ.$ (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.9: Diagrama de difracción del oleaje. Comparación con la solución analítica. Ángulo de incidencia 30°. (Fuente: GIOC, 2001)

El modelo de rotura del oleaje incorporado en el Oluca-MC, el cual incluye tanto el inicio de la rotura como la disipación de energía producida en el interior de la zona de rompientes, fue calibrado y verificado por Dally et al. (1985), empleando datos de laboratorio obtenidos por Horikawa and Kuo (1966). Puesto que el modelo de propagación es válido para oleaje regular, se tomó como base para la comparación de los resultados numéricos, un conjunto de datos de laboratorio presentados por Stive (1985) y obtenidos con oleaje regular. De esta manera se pudo contrastar el modelo de rotura.

El programa de medidas llevado a cabo consistió en ensayos en canal de oleaje; un primer ensayo en un canal de escala grande y otro en un canal de pequeña escala.

En la figura A.10 se compararon las medidas experimentales con los resultados del modelo, observándose que los resultados del modelo se ajustan bastante bien a los datos experimentales, especialmente en el ensayo a pequeña escala. En el ensayo a gran escala el modelo no llega a reproducir fielmente el punto de inicio de rotura (el cual se corresponde con el valor máximo de H en la gráfica), sin embargo hay que resaltar una cierta dispersión de las medidas experimentales. Por su parte, esta figura indica que la variación de la altura de ola se aproxima bastante a la de los ensayos, con una disipación inicial intensa tras el punto de rotura, y una disipación posterior ligeramente más suave.



Figura A.10: Resultados para el test de rotura. Perfil de altura de ola en función de la distancia a la costa. (Fuente: GIOC, 2001)

Por último, dentro de las limitaciones del modelo de rotura, hay que destacar que éste no incluye las variaciones del nivel medio provocadas por el oleaje, como el "set-up" y el "set-down". Particularmente, las variaciones debidas al "set-up" son importantes en la zona de rompientes, ya que pueden llegar a alcanzar valores relativos del 10-20 % respecto a la altura de ola.

A.3. Fenómenos de propagación (refracción-difracción) en un ensayo físico

Asimismo, se validó el modelo Oluca-MC con resultados experimentales obtenidos a partir de un modelo reducido. Las medidas experimentales fueron obtenidas de un ensayo realizado por Berkhoff (1982); Berkhoff et al. (1982). Dicho modelo reducido constaba de una batimetría con un bajo elíptico, con una serie de secciones donde se tomaron las medidas (véase figura A.11). En el contorno final del ensayo existía una playa para que la energía propagada se disipara casi totalmente por el proceso de rotura del oleaje. Una descripción analítica detallada de la batimetría se puede encontrar en Kirby and Dalrymple (1986a).

Se eligió este caso de validación porque el dominio presentado daba lugar a cáusticos y, por tanto, se producía un cruce de ortogonales si se empleaban métodos de refracción por rayos. De esta manera, los resultados numéricos del modelo Oluca-MC mostraron la utilidad del mismo en casos donde es necesario considerar el efecto combinado de refracción-difracción.

Este caso de estudio fue también útil para comprobar las diferencias entre el modelo lineal y los modelos no lineales de Stokes y de Dalrymple compuesto, ya que se utilizaron tres modelos posibles diferentes en función de la elección del término no lineal: modelo lineal, modelo de Stokes y modelo compuesto de Kirby and Dalrymple.

Los resultados de los tres modelos para las distintas secciones se pueden ver en las figuras A.12, A.13 y A.14. Dichas figuras, las cuales comparan los datos experimentales con los resultados numéricos, muestran la utilidad de incluir el término no lineal. Con un modelo de refracción de rayos sería imposible calcular la altura de ola detrás del bajo, ya que el oleaje se concentra al refractarse por ambos lados del mismo, apareciendo una zona de cáusticos y de cruce de rayos. Sin embargo, empleando un modelo de refracción-difracción como el Oluca-MC, es posible modelar dicha zona de concentración energética, puesto que la difracción reduce el efecto de acumulación de energía que se produciría considerando únicamente el fenómeno de refracción.

No obstante, como también se puede observar en las mismas figuras, el modelo de refracción-difracción lineal tiende a calcular por exceso los picos de altura de ola en las zonas de concentración de energía (por ejemplo en las secciones 4 y 7), donde el peralte de la onda se hace grande y los efectos no lineales son importantes. Por este motivo, se puede concluir que los resultados numéricos para los modelos no lineales son mejores que para el modelo lineal, en especial cuando las variaciones transversales de la altura de ola son importantes (como es el caso de la sección 5). Analizando las diferentes zonas, se puede apreciar que en la sección 1 los efectos de concentración de energía no son aún aparentes y hay poca diferencia entre los tres modelos. Las secciones 2 y 3 muestran la región de desarrollo de cáusticos y los modelos no lineales predicen por defecto la altura de ola máxima en casi un 10% en ambas secciones. Sin embargo, en las secciones 4 y 5, donde el oleaje ya ha atravesado el pico de la zona de cáusticos, los modelos no lineales predicen tanto la altura de ola como la anchura del cáustico con gran exactitud, así como la forma de los lóbulos laterales originada por la difracción.

Por su parte, la similitud de resultados en las secciones longitudinales 6, 7 y 8 entre los datos experimentales y los modelos no lineales es también muy buena. En el centro del pico de la zona de cáusticos (sección 7), los modelos no lineales predicen tanto la altura de ola en el pico como el desvanecimiento de ésta al aproximarse a la costa. En la sección 6 existe una gran diferencia entre el modelo lineal y los modelos no lineales, puesto que éstos predicen con gran precisión el valor mínimo de la altura de ola; ésta es la mejor sección para mostrar la utilidad de los modelos no lineales frente al modelo lineal.

Tras el análisis de los resultados en su conjunto, es evidente que la aproximación de los modelos no lineales es mejor que la del modelo lineal, excepto en el inicio de la formación de los cáusticos, lo cual puede ser debido a la limitación del modelo para permitir una rápida concentración de las olas.

La diferencia entre los dos modelos no lineales es casi imperceptible, debido a la validez del modelo de Stokes en la región donde se comparan ambos, si bien es cierto que los resultados en la sección 6 pueden declinar la elección hacia el modelo compuesto de Kirby and Dalrymple.



 $Figura \ A.11:$ Batimetría del ensayo de Berkhoff (1982) y perspectiva tridimensional. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.12: Comparación de resultados experimentales y numéricos para las secciones 1 y 2. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.13: Comparación de resultados experimentales y numéricos para las secciones 3, 4 y 5. (Fuente: GIOC, 2001)



Figura A.14: Comparación de resultados experimentales y numéricos para las secciones 6, 7 y 8. (Fuente: GIOC, 2001)

Bibliografía

- Abbott, M.B., Price, W.A., 1994. Coastal, estuarial and harbour engineers' reference book. M.B. Abbott and W.A. Price (Eds.). Chapman & Hall. London, 736 pp.
- Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H.M., 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates in close-range photogrammetry. Proc. AS-P/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry. Ed. A. S. of Photogrammetry, Falls Church, VA, pp. 1–18.
- Antolínez, J.A., Méndez, F.J., Camus, P., González, M., Ruggiero, P., Barnard, P., Vitousek, S., 2016. A multi-scale climate emulator for long-term morphodynamics (MUSCLE-morpho). Journal of Geophysical Research .
- Bailard, J.A., 1981. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. Journal of Geophysical Research 86, C11, pp. 938–954.
- Bakker, W.T., 1968. The dynamics of a coast with a groin system. Proc. 11th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 492–517.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 471–490.
- Berkhoff, J.C.W., 1982. Verification computations with linear wave propagation models. Delft Hydraulics Laboratory, Report W 154-VIII .
- Berkhoff, J.C.W., Booij, N., Radder, A.C., 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. Coastal Engineering 6, pp. 255–279.
- Bernabeu, A.M., 1999. Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas. Tesis Doctoral. Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.
- Birkemeier, W.A., 1985. Field data on seaward limit of profile change. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE 111 (3), pp. 598–602.

- Booij, N., 1983. A note on the accuracy of the mild-slope equation. Coastal Engineering, 3 , pp. 191–203.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 104 (C4), pp. 7649–7666.
- Bretschneider, C.L., 1959. Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves. Beach Erosion Board, Tech. Memo. US Army Corps of Engineers, N^o 113, 192 pp.
- Bretschneider, C.L., 1968. Significant waves and wave spectrum. Ocean Industry , pp. 40–46.
- Camus, P., Méndez, F.J., Medina, R., Tomas, A., Izaguirre, C., 2013. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. Coastal Engineering, 72, pp. 56–68.
- Capobianco, M., Larson, M., Nicholls, R.J., Kraus, N.C., 1997. Depth of closure: A contribution to the reconciliation of theory, practice and evidence. Proc. Coastal Dynamics '97, ASCE, pp. 506–515.
- Carslaw, H., Jaeger, J., 1959. Conduction of heat in solids. Clarendon Press, Oxford .
- Connell, K.J., Kraus, N.C., 2006. Cascade Version 1: User 's guide. ERDC TN-SWWRP-06-5. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.
- Crank, J., 1975. The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford, pp. 1–414.
- Dabees, M.A., 2000. Efficient modeling of beach evolution. Ph.D. Thesis, Queen´s University, Kingston, Ontario, Canada .
- Dabees, M.A., Kamphuis, J.W., 1997. Numerical modelling and coastal processes: Overview of a modelling system for simulating shoreline change. Proc. Canadian Coastal Conference 1997, pp. 161–175.
- Dabees, M.A., Kamphuis, J.W., 1998. Oneline, a numerical model for shoreline change. Proc. 26th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2668–2681.
- Dabees, M.A., Kamphuis, J.W., 1999. Beach evolution modelling. Proc. Canadian Coastal Conference 1999, pp. 29–42.
- Dabees, M.A., Kamphuis, J.W., 2000. NLINE: Efficient modeling of 3-D beach change. Coastal Engineering 2000, pp. 2700–2713.

- Dally, W.R., Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. Journal of Geophysical Research, 90, C6, pp. 11917–11927.
- Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Hwang, P.A., 1984a. Wave diffraction due to areas of energy dissipation. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 110, nº1, pp. 67–79.
- Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Mann, D.W., 1984b. Wave propagation in the vicinity of islands. Proc. 16th Offshore Technology Conference, n^o 4675, Houston, pp. 249–254.
- Damgaard, J.S., Soulsby, R.L., 1996. Longshore bed-load transport. Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, pp. 3614–3627.
- Davidson, M.A., Splinter, K.D., Turner, I.L., 2013. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. Coastal Engineering, 73, pp. 191–202.
- Dean, R.G., 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and gulf coasts. Ocean Engineering, Technical Report n^{0} 12, University of Delaware .
- Dean, R.G., 1987. Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. Proc. Coastal Sediments'87, 1, Specialty Conference Advances in Understanding of Coastal Sediment Processes, ASCE, New Orleans, Louisiana, pp. 1–24.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced series on ocean engineering, Vol. 2, 353 pp.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 2002. Coastal processes with engineering applications. New York, NY: Cambridge University Press.
- Dean, R.G., Walton, T.L., 2009. Cross-shore sediment transport processes. Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Ed. Y.C. Kim, World Scientific .
- DHI, 2001. LITPACK: Coastline evolution. User 's Guide and Reference Manual. Lingby, Denmark .
- Drønen, N., Kristensen, S., Taaning, M., Elfrink, B., Deigaard, R., 2011. Long term modeling of shoreline response to coastal structures. Coastal Sediments 2011, pp. 965–978.
- Frey, A.E., Connell, K.J., Hanson, H., Larson, M., Thomas, R.C., Munger, S., Zundel, A., 2012. GenCade Version 1 model theory and user's guide. ERDC/CHL TR-12-25. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.
- GIOC, 2001. Modelo de propagación de oleaje monocromático: Manual de referencia Oluca-MC 2.0. Universidad de Cantabria y Ministerio de Medio Ambiente , 112 pp.

- GIOC, 2003. Documento temático: Regeneración de playas. Universidad de Cantabria y Ministerio de Medio Ambiente.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press, Japan .
- Goda, Y., Takayama, T., Suzuki, Y., 1978. Diffraction diagrams for directional random waves. Proc. 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 628–650.
- Gravens, M.B., Kraus, N.C., Hanson, H., 1991. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Report 2, Workbook and User's Manual. Instruction Report CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Hallermeier, R.J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. Coastal Engineering, 4, pp. 253–277.
- Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jiménez, J.A., Larson, M., Nicholls, R.J., Plant, N.G., Southgate, H.N., Steetzel, H.J., Stive, M.J.F., de Vriend, H.J., 2003. Modelling of coastal evolution on yearly to decadal time scales. Journal Of Coastal Research Vol. 19, N^o 4, pp. 790–811.
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1986a. Forecast of shoreline change behind multiple coastal structures. Coastal Engineering in Japan, Vol. 29, pp. 195–213.
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1986b. Seawall boundary condition in numerical models of shoreline evolution. Technical Report CERC-86-3. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Report 1, Reference Manual and Users Guide. Technical Report CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers.
- Hanson, H., Larson, M., 1998. Seasonal shoreline variations by cross-shore transport in a one-line model under random waves. Proc. 26th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2682–2695.
- Hanson, H., Larson, M., 2000. Simulating coastal evolution using a new type of N-line model. Coastal Engineering 2000, pp. 2808–2821.
- Hanson, H., Larson, M., Kraus, N.C., Capobianco, M., 1997. Modelling of seasonal variations by cross-shore transport using one-line compatible methods. Proc. Coastal Dynamics '97, ASCE, pp. 893–912.

- Hashimoto, H., Uda, T., 1980. An application of an empirical prediction model of a beach profile change to the Ogawara Coast. Coastal Engineering in Japan, Vol. 23, pp. 191–204.
- Holman, R., Stanley, J., 2007. The history and technical capabilities of Argus. Coastal Engineering, 54, pp. 477–491.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A., Booij, N., 2003. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models. Coastal Engineering 2003, Vol. 49, pp. 291–305.
- Horikawa, K., 1988. Nearshore dynamics and coastal processes: Theory, measurement, and predictive models. University of Tokyo Press, Japan , 522 pp.
- Horikawa, K., Kuo, C.T., 1966. A study on wave transformation inside surf zone. Proc. 10th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vol. 1, pp. 217–233.
- Hsu, J.R.C., Silvester, R., 1990. Accretion behind single offshore breakwater. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 116, n^o 3 , pp. 326–380.
- Hunt, J.N., 1979. Direct solution of wave dispersion equation. Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol. 105, N^o 4 , pp. 457–459.
- Jara, M.S., González, M., Medina, R., 2015. Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile. Coastal Engineering 99, pp. 1–14.
- Kamphuis, J.W., 1993. Effective modelling of coastal morphology. 11th Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering: Coastal Engineering a Partnership with Nature; Preprints of Papers , 173 pp.
- Kamphuis, J.W., 1999. Marketing uncertainty. Proc. 5th Int. Conf. on Coastal and Port Eng. in Developing Countries, Capetown .
- Kamphuis, J.W., 2000. Introduction to coastal engineering and management. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 10, World Scientific, Singapur.
- Kirby, J.T., 1986a. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves. Journal of Geophysical Research, 91, C1, pp. 933–952.
- Kirby, J.T., 1986b. Open boundary condition in parabolic equation method. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE Vol. 112, pp. 460–465.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 1986a. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. Coastal Engineering 9, pp. 545–561.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 1986b. Modeling waves in surfzones and around islands. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 112, nº 1 , pp. 78–93.

- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., 1994. Combined refraction/diffraction model REF/DIF 1, version 2.5. Documentation and user's manual. Research Report No. CACR-94-22, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
- Kirby, J.T., Özkan, H.T., 1994. Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions REF/DIF S, version 1.1. Documentation and user's manual. Research Report No. CACR-94-04, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
- Komar, P.D., Inman, D.L., 1970. Longshore sand transport on beaches. Journal of Geophysical Research, Vol. 75, N^o 30, pp. 5914–5927.
- Kraus, N.C., 1983. Applications of a shoreline prediction model. Proc. Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers, pp. 632–645.
- Kraus, N.C., 1984. Estimate of breaking wave height behind structures. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 110, N^o 2 , pp. 276– 282.
- Kraus, N.C., 2000. Reservoir model of ebb-tidal shoal evolution and sand bypassing. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 126(6), pp. 305–313.
- Kraus, N.C., 2006. Coastal inlet functional design: Anticipating morphologic response. Proc. Coastal Dynamics 2005, ASCE, pp. 1–13.
- Kraus, N.C., Hanson, H., Harikai, S., 1984. Shoreline change at Oarai Beach: Past, present and future. Proc. 19th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2107– 2123.
- Kraus, N.C., Harikai, S., 1983. Numerical model of the shoreline change at Oarai beach. Coastal Engineering 1983, Vol. 7, pp. 1–28.
- Kraus, N.C., Larson, M., 1988. Prediction of initial profile adjustment of nourished beaches to wave action. Proc. Annual Conference on Shore and Beach Preservation Technology, Florida Shore and Beach Preservation Association, pp. 125–137.
- Kriebel, D.L., Dean, R.G., 1993. Convolution method for time-dependent beach-profile response. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 119 (2), pp. 204–226.
- Larson, M., Kraus, N.C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm induced beach change. Technical Report CERC-89-9. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
- Larson, M., Kraus, N.C., 2003. Modeling regional sediment transport and coastal evolution along the Delmarva Peninsula. Proc. Coastal Sediments'03, ASCE.
- Larson, M., Kraus, N.C., Connell, K.J., 2006a. Cascade Version 1: Theory and model formulation. ERDC TN-SWWRP-06-7. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.
- Larson, M., Kraus, N.C., Connell, K.J., 2006b. Modeling sediment storage and transfer for simulating regional coastal evolution. Proc. 30th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 3924–3936.
- Larson, M., Kraus, N.C., Hanson, H., 1990. Decoupled numerical model of threedimensional beach range. Proc. 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2173–2185.
- Larson, M., Kraus, N.C., Hanson, H., 2003. Simulation of regional longshore sediment transport and coastal evolution - The Cascade model. Proc. 28th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2612–2624.
- Larson, M., Rosati, J.D., Kraus, N.C., 2002. Overview of regional coastal sediment processes and controls. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note CHETN XIV-4, Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.
- Liu, P.L.F., Dalrymple, R.A., 1984. The damping of gravity water-waves due to percolation. Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 33–49.
- Liu, P.L.F., Tsay, T.K., 1984. On weak reflection of water waves. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 131, pp. 59–71.
- Luijendijk, A., De Vroeg, H., Swinkels, C., Walstra, D.J.R., 2011. Coastal response on multiple scales: a pilot study on the Ijmuiden Port. Coastal Sediments 2011, pp. 602–615.
- MacCamy, R.C., Fuchs, R.A., 1954. Wave forces on piles: A diffraction theory. Technical Memorandum N^0 69, Beach Erosion Board .
- Massel, S.R., 1989. Hydrodynamics of coastal zones. Elsevier Amsterdam, Oceanography Series, 335 pp.
- Matsuoka, M., Ochi, Y., 1979. Applicability of a shoreline prediction model. Proc. 26th Japanese Conference on Coastal Engineering, JSCE, pp. 220–224.
- McCormick, M.E., 1993. Equilibrium shoreline response to breakwaters. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, n^o 6, pp. 657–670.

- McCowan, J., 1891. On the solitary wave. Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. 32, n^o 5, pp. 45–48.
- Méndez, F.J., Medina, R., 2001. A perturbation method for wave and wave-induced currents computations in beach morphology models. Coastal Dynamics '01 , pp. 393– 402.
- Miller, J.K., Dean, R.G., 2004. A simple new shoreline change model. Coastal Engineering, 51, pp. 531–556.
- Mimura, N., Shimizu, T., Horikawa, K., 1983. Laboratory study on the influence of detached breakwater on coastal change. Proc. Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers, pp. 740–752.
- Mitsuyasu, H., 1968. On the growth of the spectrum of wind-generated waves (I). Rept. Res. Inst. for Applied Mech. Kyushu University, Vol. XVI, n^o 55, pp. 459–482.
- Nicholls, R.J., Larson, M., Capobianco, M., Birkemeier, W.A., 1998. Depth of closure: Improving understanding and prediction. Proceedings of the Coastal Engineering Conference, 3, pp. 2888–2901.
- Ojeda, E., Guillén, J., 2008. Shoreline dynamics of embayed beaches. Marine Geology 253, pp. 51–62.
- Ozasa, H., Brampton, A.H., 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls. Coastal Engineering, Elsevier, Vol. 4, pp. 47–63.
- Pelnard-Considère, R., 1956. Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. 4ème Journées de l'Hydraulique, les Énergies de la Mer, Question III, Reporte nº 1, pp. 289–298.
- Penney, W.G., Price, A.T., 1952. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters. Philos. Trans. Roy. Soc. A, Vol. 244 (882), pp. 236–253.
- Perlin, M., Dean, R.G., 1979. Prediction of beach planforms with littoral controls. Proc. 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 1818–1838.
- Perlin, M., Dean, R.G., 1983. A numerical model to simulate sediment transport in the vicinity of coastal structures. Technical Report CERC 83-10. US Army Corps of Engineers, 119 pp.
- Phillips, O.M., 1966. The dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press, 261 pp.

- Reguero, B.G., Menéndez, M., Méndez, F.J., Mínguez, R., Losada, I.J., 2012. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. Coastal Engineering, 65, pp. 38–55.
- Requejo, S., 2005. Análisis y mejoras en la evaluación de diversos términos de los modelos de evolución de playas en escalas de medio plazo. Tesis Doctoral. Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria .
- Requejo, S., Medina, R., González, M., 2008. Development of a medium-long term beach evolution model. Coastal Engineering 2008, Vol. 55, pp. 1074–1088.
- Shimizu, T., Kumagai, T., Watanabe, A., 1996. Improved 3-D beach evolution model coupled with the shoreline model (3D-Shore). Proc. 25th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2843–2856.
- Sommerfeld, A., 1896. Mathematische theorie der diffraction. Mathematische Annalen, 47, pp. 317–374.
- Soulsby, R.L., 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Thomas Telford .
- Southgate, H.N., Brampton, A.H., López de San Román Blanco, B., 2000. Predicting long term coastal morphology. Proc. Coastal Management, ICE, pp. 87–96.
- SPM, 1984. Shore protection manual. CERC, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
- Stive, M.J.F., 1985. A scale comparison of waves breaking on a beach. Coastal Engineering 9, pp. 151–158.
- Stive, M.J.F., De Vriend, H.J., Nicholls, R.J., Capobianco, M., 1992. Shore nourishment and the active zone: A time scale dependent view. Proc. 23rd Coastal Engineering Conference, ASCE, New York, pp. 2464–2473.
- Swart, D.H., 1976. Predictive equations regarding coastal transports. Proc. Int. Conference Coastal Engineering, pp. 1113–1132.
- Thomas, R.C., Frey, A.E., 2013. Shoreline change modeling using one-line models: General model comparison and literature review. ERDC/CHL CHETN-II-55. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center .
- Thornton, E.B., Guza, R.T., 1983. Transformation of wave height distribution. Journal of Geophysical Research, 88 (C10), pp. 5925–5938.
- Tolman, H.L., 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note , pp. 1–139.

- Toulemonde, B., 2011. Rapport des images vidéo pour l'étude de la variabilité des processus côtiers: Cas des plages méditerranéennes (Barcelona). Memoire de stage Master 1 Ingénierie et Géosciences du Littoral. Université de Caen Basse-Normandie-Universidad de Cantabria.
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., González, M., 2013. An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. Marine Geology 346, pp. 220–232.
- del Valle, R., Medina, R., Losada, M.A., 1993. Dependence of coefficient K on grain size. Technical Note No. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, nº 5, September/October, pp. 568–574.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands .
- Weishar, L.L., Byrne, R.J., 1978. Field study of breaking wave characteristics. Proc. 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 487–506.
- Wiegel, R.L., 1962. Diffraction of waves by a semi-infinite breakwater. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 88, n^o HY1 , pp. 27–44.
- Wright, L.D., Short, A.D., Green, M.O., 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. Marine Geology, 62, pp. 339–364.
- Yates, M.L., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., 2009. Equilibrium shoreline response: Observations and modeling. Journal of Geophysical Research, Vol. 114, C09014.
- Yates, M.L., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., Hansen, J.E., Barnard, P.L., 2011. Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach. Journal of Geophysical Research, Vol. 116, C04014.