

La costa construida, el cambio de clima y el número de Iribarren

Built Coast, Climate Change and the Iribarren Parameter

José María Grassa Garrido^{1*}

Resumen

Se tratan algunas cuestiones a las que se enfrenta la costa construida en las actuales condiciones de cambio de clima y creciente presión de población y urbanización. Motivado por el 50 aniversario del fallecimiento de Ramón Iribarren, fundador y director del actual Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, se celebra una de sus aportaciones al conocimiento de las olas en la costa, útil para evaluar riesgos y guiar la defensa y adaptación de las costas construidas. Se describen cambios recientes en la urbanización litoral en España, tratando aspectos del cambio de clima y factores de peligrosidad con referencia a tormentas recientes de características anómalas. Se rememoran experimentos de Iribarren sobre olas en un talud, presentando una simulación numérica del efecto del número de Iribarren en la inundación. Finalmente se realizan algunas consideraciones sobre la protección de la costa construida.

Palabras clave: oleaje, playas, cambio de clima, Iribarren, ciudades, costa.

Abstract

This article deals with some questions relevant for built-in coasts under climate change and growing population and urbanization pressure. On the occasion of the 50th anniversary of the death of Ramón Iribarren, founder and director of CEDEX's Centro de Estudios de Puertos y Costas, the article celebrates one of his contributions to the knowledge of waves at the coast, useful for risk evaluation and guide for defense and adaptation on constructed coasts. Recent changes in the system of Spanish coastal cities are described, as well as some aspects of climate change and dangerous factors of storms exemplified in recent anomalous events. Iribarren's experiments on waves in a slope are revisited, showing a numerical approximation of the effect of the Iribarren number on coastal flooding. Finally, some ideas on the protection of built-in coasts are presented.

Keywords: waves, beaches, climate change, Iribarren, cities, coast.

1. INTRODUCCIÓN

La orilla del mar es un entorno expuesto a la dinámica marino – atmosférica, sometido a la acción directa de los eventos de la meteorología que inducen cambios, variabilidad de las condiciones físicas del medio, incluso en las más pequeñas escalas de tiempo, horas o días, junto a dinámicas evolutivas cíclicas o acumulativas en plazos más largos, bajo el gobierno del clima y sus eventos extremos asociados.

Entre las cuestiones políticas, económicas, sociales y ambientales generales, las especiales características del territorio costero ponen de relieve algunos temas y tendencias tanto en el contexto global como en el particular de España: población y turismo, transporte marítimo y desarrollo portuario, demanda de agua, vulnerabilidad de la costa construida ante el cambio climático.

Este artículo se refiere a la vulnerabilidad de la costa urbana o costa construida, por lo que no trata detalladamente otros usos y demandas de la costa. Sí se trata la significativa tendencia de desarrollo del sistema urbano costero que caracteriza la costa construida. A continuación y en el contexto del cambio climático en la costa se describen los factores de peligrosidad de las tormentas en la línea de orilla y

se exponen tormentas recientes que han producido daños singulares en la costa y se consideran de especial significado. Finalmente se repasa el número de Iribarren presentando una aproximación numérica del comportamiento de las olas en una pendiente y sus implicaciones en lo que respecta a la vulnerabilidad de la costa. Se concluye con unas conclusiones sobre aspectos de la protección de la costa en los ámbitos urbanos.

A lo largo de la exposición se han empleado, cuando ello es relevante, ejemplos e ilustraciones tomadas del paisaje costero más cercano a Ramón Iribarren, fundador del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

2. USOS Y PRESIONES SOBRE LA COSTA

Como se ha indicado no se van a tratar aspectos relacionados con el desarrollo portuario, el tráfico marítimo o las demandas hídricas, todos ellos de indudable importancia en el litoral, pero sí se quiere ilustrar brevemente la singularidad de estas temáticas en las costas españolas. La figura 1, obtenida mediante la superposición de datos de posición de mensajes AIS de buques correspondientes a 4.000 instantes aleatorios en el periodo julio 2015 a diciembre 2017 muestra la posición central que ocupa España en las principales rutas marítimas: el tramo del Mediterráneo occidental de la ruta alrededor del mundo, el de la costa occidental de África que se ramifica a la altura de Canarias hacia el Golfo de Cádiz y Norte de Europa.

* Autor de contacto: Jose.M.Grassa@cedex.es

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Adjunto a la Dirección del CEDEX.

La cercanía a estas rutas marítimas globales implica un tráfico soportado muy superior al que tiene origen o destino en España y riesgos asociados de situaciones accidentales y vertidos que podrían afectar a la costa. Por otro lado esta posición estratégica hace de puertos españoles “hubs” de primer nivel, apropiados para trasbordo, consolidación y distribución de mercancías, contribuyendo, junto al crecimiento del comercio y del transporte por vía marítima, a la expansión de puertos y desarrollo de nuevas terminales portuarias exteriores: se ha reportado la construcción en España por parte de los Puertos de Titularidad Estatal de 25 diques portuarios en grandes calados con un total de más de 30 kilómetros de longitud desde finales del siglo XX (Gutierrez Serret y Grassa, 2015), ello sin incluir las numerosas, aunque de menor entidad individual, actuaciones de desarrollo de puertos pesqueros y deportivos en todo el litoral, todas ellas con potencial incremento de ocupación de la costa y generación de desequilibrios sedimentarios.

Junto a los usos tradicionales, emergen nuevos usos del mar, (Grassa et al., 2016) en buena medida relacionados con la mitigación del cambio climático, ej. el uso de energías renovables marinas para reducir las emisiones de gases, o la adaptación a sus escenarios, ej. generación de recursos hídricos para paliar mayores sequías en el sur de Europa: a nivel global, se ha estimado que el crecimiento de la población junto con el cambio climático puede producir una notable disminución de recurso hídrico disponible por persona en 2050 (Hulot, 2004)

Con una incidencia particular en España, la irregularidad fluvial ha implicado una fuerte regulación de los cauces y reducción de aportes de sedimentos a la costa, a la vez que la escasez general de agua en algunas zonas costeras ha promovido la desalación de agua de mar, con fuerte intensidad en la costa de levante. En su revisión de la actividad en el Levante Español (Benayas et al., 2014) mencionan la existencia de 12 grandes plantas en diferentes fases de implantación con capacidad de suministro para 5 millones de personas y riego de 250.000 ha.

2.1. Tendencias en el sistema de ciudades costeras españolas

En la primera mitad del siglo XXI, las ciudades están experimentando un cambio especialmente acelerado. En la actualidad (Zenghelis, 2018), la mitad de la población mundial, 7.000 millones de personas, vive en ciudades, mientras que en 2050 será el 75% de la población proyectada. Según este mismo autor en el siglo la población de las ciudades se duplicará de 4.000 a 8.000 millones de habitantes, evolucionando a un ritmo mucho más lento posteriormente, por lo que las políticas que se tomen en su desarrollo durante las próximas décadas tendrán un impacto perdurable.

Según el Atlas de los Océanos de Naciones Unidas, un 44% de la población mundial vive a menos de 150 km de la costa y 8 de las 10 mayores ciudades del mundo son costeras. Pero además las ciudades costeras crecen más rápidamente: una tasa un 6% superior a otras zonas en el periodo

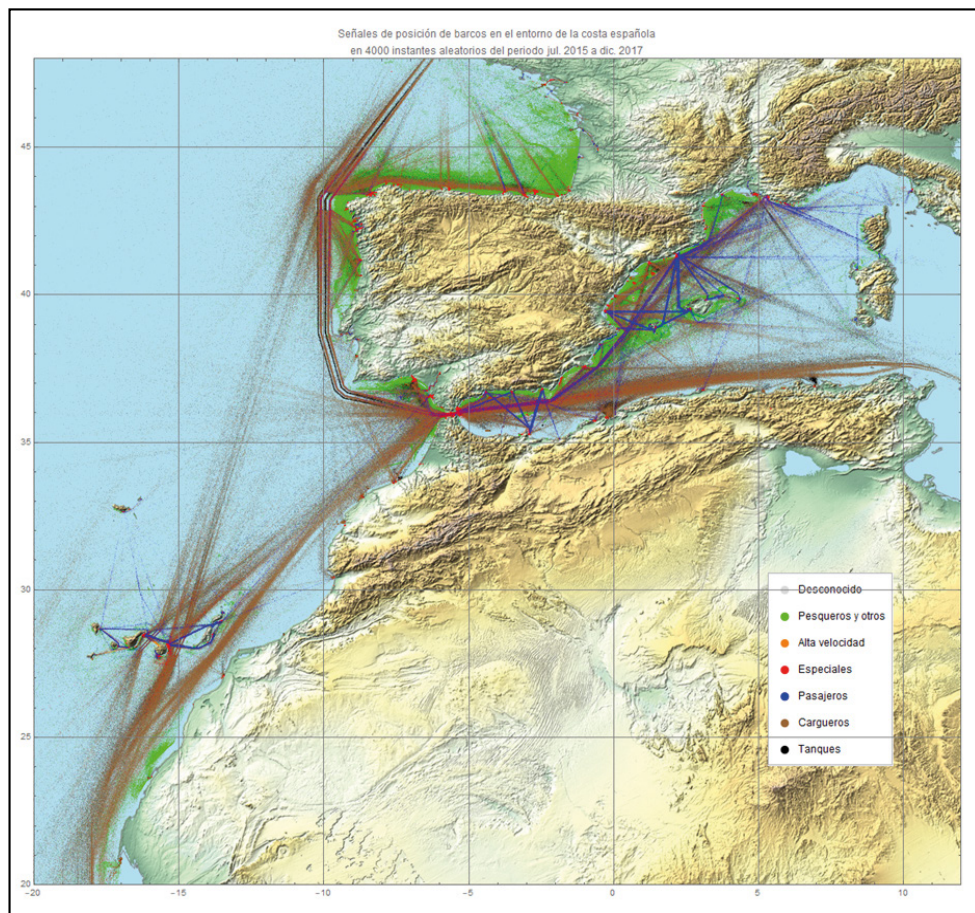


Figura 1. Representación de rutas mediante superposición de datos AIS. Fuente: elaboración del autor con datos proporcionados por SASEMAR en el proyecto PRISMA, CEDEX para la DGMM del Ministerio de Fomento; Malla ETOPO, NOAA.

entre 1970 y 2000 (Fragkias y Seto, 2012) y soportan además un porcentaje elevado de los flujos turísticos. En el caso de China el crecimiento de las ciudades costeras triplica la tasa media (Neumann et al., 2015). Y tanto en China como en otros países de Asia (India, Malasia) ha comenzado el desarrollo de embalses litorales para proveer de suministro de agua al creciente número de ciudades costeras (Findikakis, ed., 2018).

En el caso español (Grassa y Lechuga, 2013) el 46% de la población reside en una franja costera de 20 km desde la orilla del mar. La figura 2 muestra la distribución de la población española, de acuerdo con el censo de 2011, mediante círculos de área proporcional al número de habitantes de cada población, coloreados según la distancia a la costa y estando también representadas isolíneas de distancia a la

costa, española o de otros países. Se aprecia el papel de la costa como lugar central de población y las ciudades lineales que discurren prácticamente de forma continua a lo largo de grandes trechos de litoral, p.ej. en la costa de Levante.

La función de atractor de población de la costa queda demostrada midiendo la población acumulada que se sitúa en sucesivos rangos de distancia a la orilla. Según se puede ver en la figura 3, esta variación es de tipo exponencial con un decrecimiento continuo hasta al menos 200 km de la costa. Además, la población en la franja costera de 20 km desde la orilla, ha crecido más rápido que la media, pasando a representar de un 45,3 a un 46,4% de la población total en el periodo 1999-2012.

La costa urbana constituye por tanto un lugar central para la población y con ella para la actividad social y

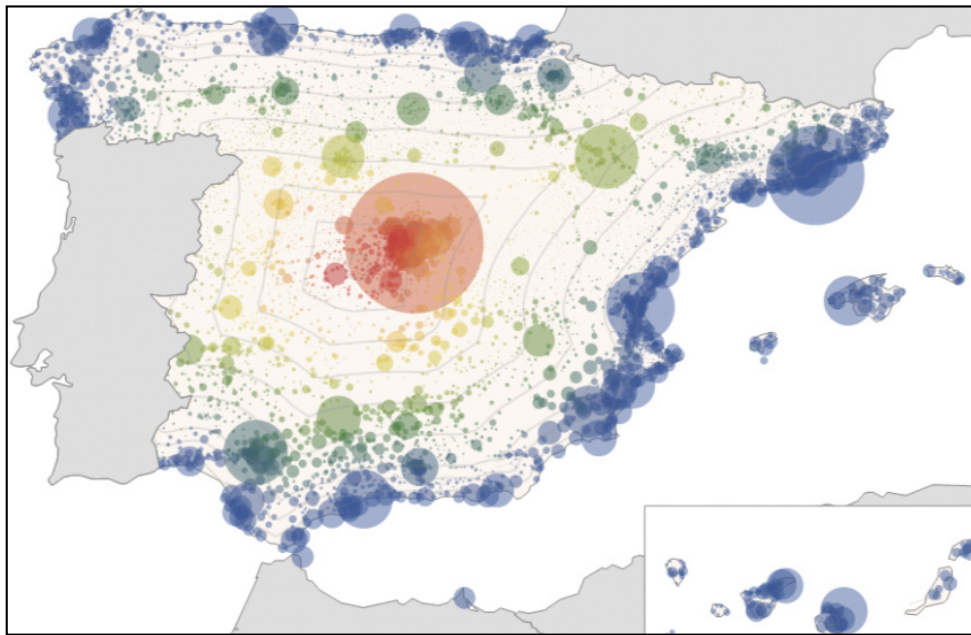


Figura 2. Distribución de la población española y distancia a la costa. Tomado de (Grassa y Lechuga, 2013) con datos del censo 2011 del INE, localización de municipios del IGN, línea de costa y fronteras de WRI (Wolfram Research Inc.).

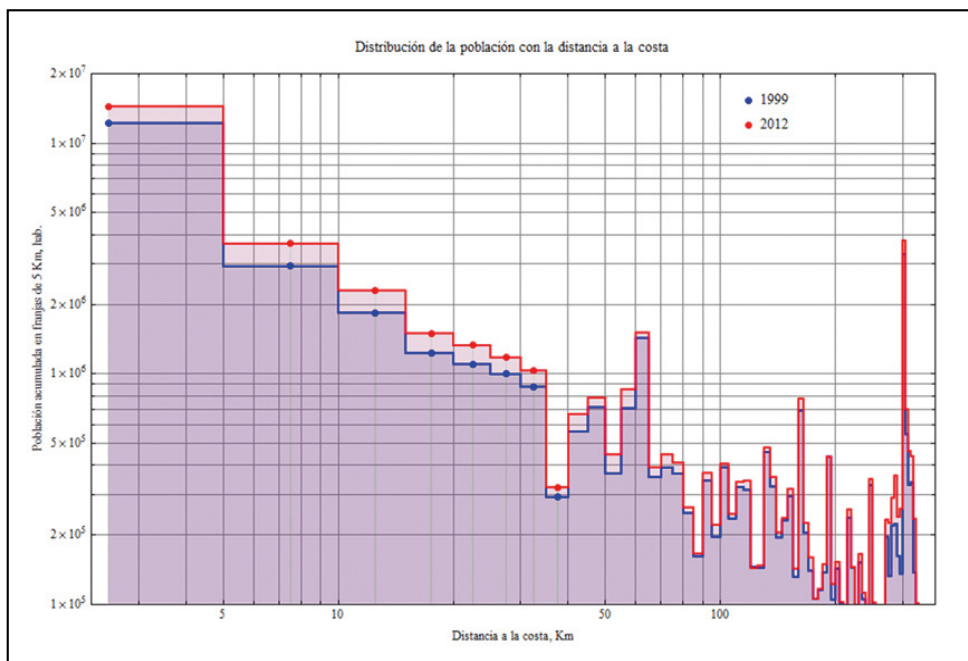


Figura 3. Distribución de la población española con la distancia a la costa, 1999 (azul) y 2011 (rojo).

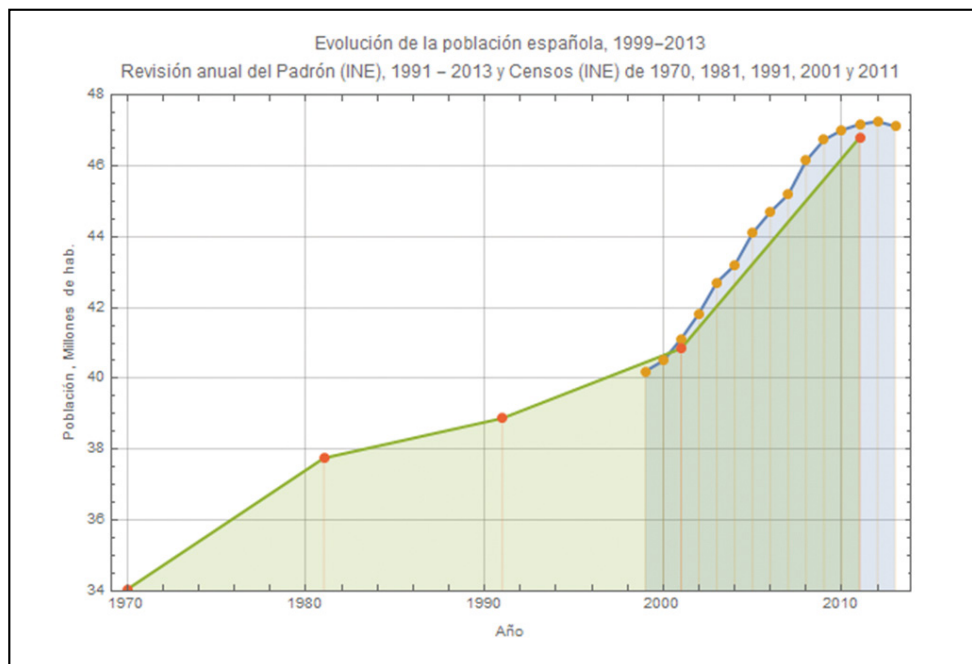


Figura 4. Evolución de la población española, 1970 – 2013, datos INE.

económica – no hay que recordar su importancia turística – residiendo también en ella un patrimonio cultural, ej. (Durandeu, 1996) para un lugar en el paisaje de Iribarren, e identitario a proteger.

Para estudiar la evolución del sistema de ciudades costeras españolas, en el sentido de la distribución de sus tamaños respecto a su rango, Ley de Zipf, véase (Dericke, 1970), se tomaron datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre la población española, las revisiones anuales de los padrones municipales en el periodo 1989 a 2012 y censos de 2001 y 2011. La primera década del siglo XXI ha tenido una dinámica poblacional debida sobre todo a efectos no vegetativos (movimientos migratorios), con un crecimiento global de un 16% aproximadamente,

muy superior a la de décadas anteriores, véase la figura 4. La selección de ubicación de esta población nueva que se incorpora en el territorio posiblemente está menos sujeta a criterios inerciales y más a la percepción del dinamismo y oportunidades socio – económicas de cada localización.

Para el conjunto del territorio, la población de ciudades con más de 10.000 habitantes, que representa ya un 80% del total, se ajusta muy bien a la Ley potencial de Zipf:

$$P_i r_i^\alpha = c \quad [1]$$

Donde P es la población, r = 1, 2,... el rango de las poblaciones, ordenadas de mayor a menor y c y α coeficientes, con el exponente generalmente próximo a la unidad.

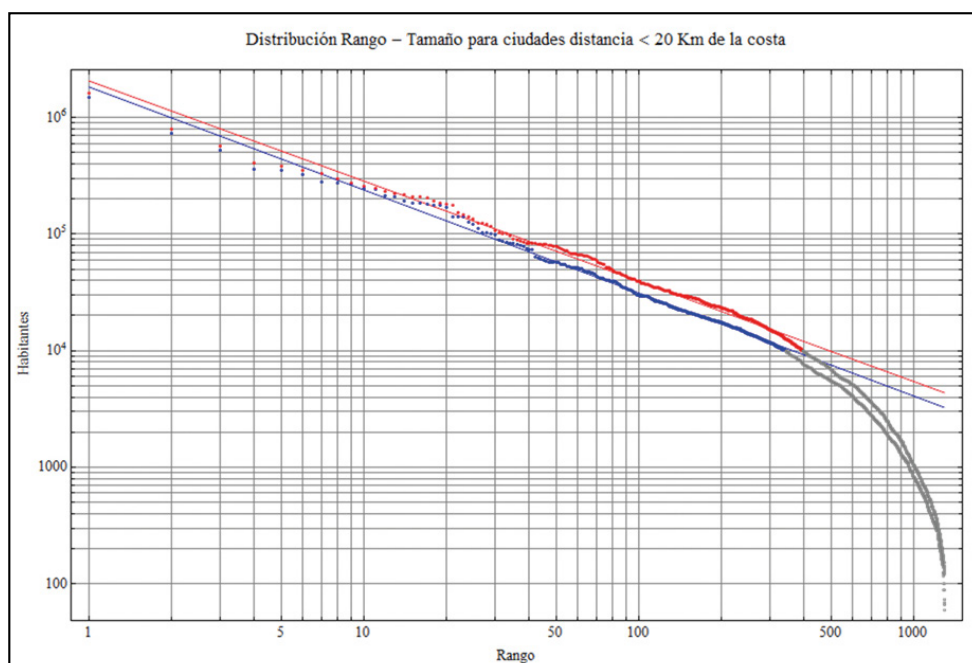


Figura 5. Distribución rango tamaño de las ciudades costeras españolas en los años 1999 (azul) y 2012 (rojo) y ajuste a la Ley de Zipf.

En el caso de España, los coeficientes de regresión resultan superiores a 0.99 y los exponentes inferiores a la unidad, disminuyendo ligeramente a lo largo del periodo. En el caso de las poblaciones costeras, figura 5, la distribución rango-tamaño sigue también la Ley de Zipf con exponentes menores que los medios para todo el territorio y en descenso, con mayor peso por tanto de las ciudades de menor tamaño y con un crecimiento que hace que el sistema se vaya aproximando hacia los equivalentes de países como Francia o Italia.

Se ha estudiado la evolución de las ciudades costeras en función de su tamaño en el periodo 1999-2012, agrupando las poblaciones según sus tamaños en 1999 en 5 clases, pequeñas (P), pequeñas-medianas (P-M), Medianas (M), medianas-grandes (M-G) y grandes (G) de forma que cada grupo representa inicialmente un cuantil del 20% del total aproximadamente y se ha seguido la evolución de las poblaciones individuales inicialmente incluidas en cada clase a lo largo del periodo hasta 2012. La tabla I muestra los resultados, con trayectorias diferentes en función del tamaño, llegando a triplicar el crecimiento las inicialmente medianas - pequeñas respecto a las grandes.

Tabla I. Evolución de las ciudades costeras españolas en función de su tamaño, 1999-2012

Grupo	Número	Rango hab., miles	Total 1999, miles hab.	Total 2012, Miles hab.	% variación, 1999 - 2012
P	1038	0-14	3633	4807	32
P-M	171	14-37	3626	4705	29
M	59	39-121	3607	4419	22
M-G	18	128-284	3560	3870	9
G	6	327-1503	3813	4127	8

Esta preferencia por las ciudades de tamaño mediano-pequeño puede deberse a razones como la percepción de mejor calidad de las ciudades menores, de más baja densidad, junto a la pérdida de las ventajas de aglomeración por saturación en las ciudades mayores, los ya mencionados criterios flexibles de localización de la población inmigrante y, muy posiblemente, la viabilidad de habitar más lejos del lugar de trabajo o estudio por mejora generalizada de la movilidad y accesibilidad a servicios públicos (salud, educación, cultura) en España en las últimas décadas. Este crecimiento diferenciado dentro del incremento de población costera, que de por sí implica un aumento de la urbanización del litoral, puede incrementarla aún más en cuanto a uso urbano del suelo ya que el crecimiento de esos municipios tiene presumiblemente una mayor proyección sobre la costa que el crecimiento, en población equivalente acumulada, de los de mayor tamaño. En una primera visión simplista y lineal, el radio de la ciudad / proyección sobre la costa crecerá con la raíz cuadrada de la población pero el efecto de escala se hace mayor si se tiene en cuenta las densidades medias en habitantes por km cuadrado de las diferentes clases de tamaño, que puede ser 10 veces mayor en las ciudades más grandes, pasando de 300 habitantes por km cuadrado en las P-M frente a más de 3.000 en las de clase G. En este escenario de fuerte ritmo de cambio de uso del suelo en la costa las características del desarrollo

urbanístico condicionarán la vulnerabilidad de esas costas construidas ante el cambio climático y en su caso la intensidad de medidas de adaptación requeridas.

3. EL CAMBIO DE CLIMA Y LA COSTA URBANA

La costa ha sido identificada como una de las regiones principales a considerar en el análisis de las implicaciones del cambio climático. Además de los documentos monográficos dedicados a la problemática costera por parte del IPCC, la mayoría de planes de adaptación e informes de situación en las escalas nacionales y regionales le dedican un apartado específico. Otro ámbito fundamental en todos los estudios es, por supuesto, el de las ciudades. En ambos casos se reconoce por tanto que, dentro de la diversidad, la categoría plantea cuestiones generales de importancia a afrontar y la ciudad costera – costa urbana, como intersección de ambas clases, hace converger en un escenario múltiples vulnerabilidades ante el cambio climático.

Uno de los efectos menos inciertos del cambio climático es la relativamente rápida elevación del nivel del mar, derivada de una conjunción de causas y con diferentes intensidades en función de los modelos y escenarios considerados: desde 0,26 a 0,98 m de incremento en 2100 de acuerdo con los diferentes escenarios de emisiones y modelos en el 5º informe de evaluación del IPCC (Church et al., 2013). Las tasas de variación del nivel contempladas no son sin embargo desconocidas en la historia reciente de la tierra: al final de la última glaciación, hace sólo 15.000 años, en el momento de la colonización de América desde Asia a través de Beringia, el nivel del mar se estima se encontraba 120 m por debajo del actual, por lo que su variación promediada hasta la actualidad sería de 0,80 metros por siglo. Un mapa de relieve de una parte de Europa occidental, véase la figura 6.a, supuesta la ausencia de cambios por otros efectos, muestra una configuración de la tierra emergida muy diferente de la actual con Inglaterra e Irlanda unidas al continente, Mallorca y Menorca formando una sola isla y amplias llanuras costeras en la desembocadura del Ródano y en la costa valenciana.

La situación -figura 6.b- con un nivel 6 m sobre el actual que se estima correspondería la desaparición de la cobertura de hielo de Groenlandia, muestra lógicamente menos cambios a esta escala, aunque es apreciable la inundación del tramo inferior del valle del Ródano, costa Norte francesa del Golfo de Vizcaya (Poitou-Charentes y País del Loira) y sobre todo los Países Bajos.

La pequeña edad de hielo entre los siglos XV y comienzos del XIX en Europa representa un clima reciente muy diferente al actual. El Támesis a su paso por Londres se helaba cada cierto número de años permitiendo que sobre el hielo se celebrara la “Frost fair”, que ha quedado representada en varios cuadros, quizás el más conocido la acuarela de Luke Clennel en el Museo de Londres; el 7 de febrero de 1814, en la época de las guerras napoleónicas, finalizó la última y desde entonces el Támesis no ha vuelto a helarse lo suficiente para repetir el evento.

Por su parte, la costa es un medio natural dinámico, en permanente adaptación a las cambiantes condiciones a las que se ve sometido. Por ejemplo, es bien conocida la evolución cíclica entre invierno y verano de las playas, adaptándose la disposición de sus masas de arena a la estación

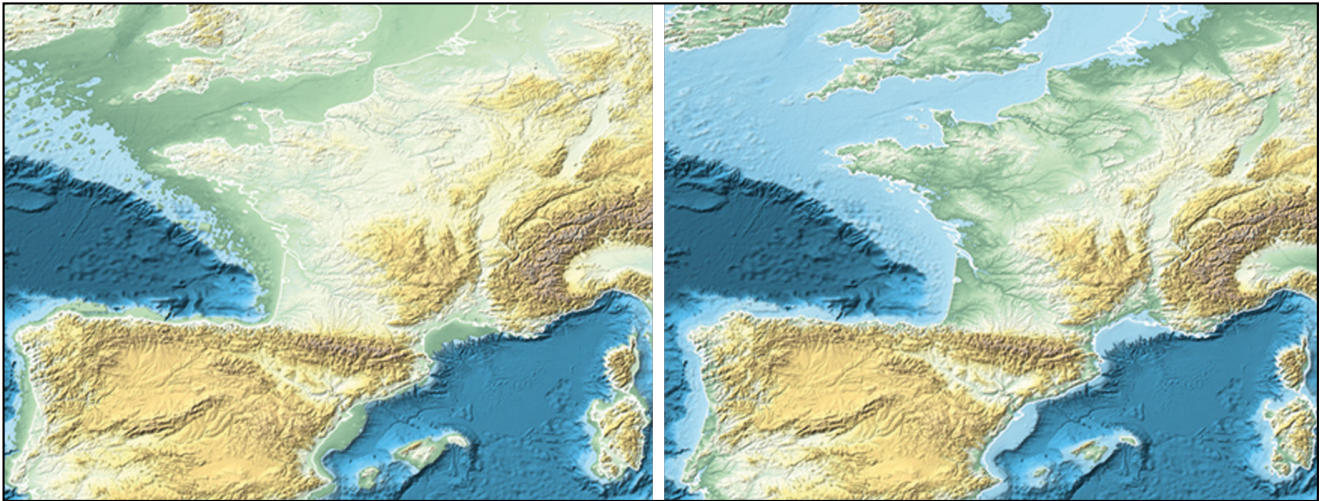


Figura 6. Mapa de relieve con situaciones hipotéticas de la costa a) 15.000 años AP, nivel del mar -120 m y b) nivel del mar 6 m sobre el actual. Datos: modelo de elevaciones GTOPO, NOAA, línea de costa actual (color blanco) GSHHS, (Smith y Wessel, 1996).

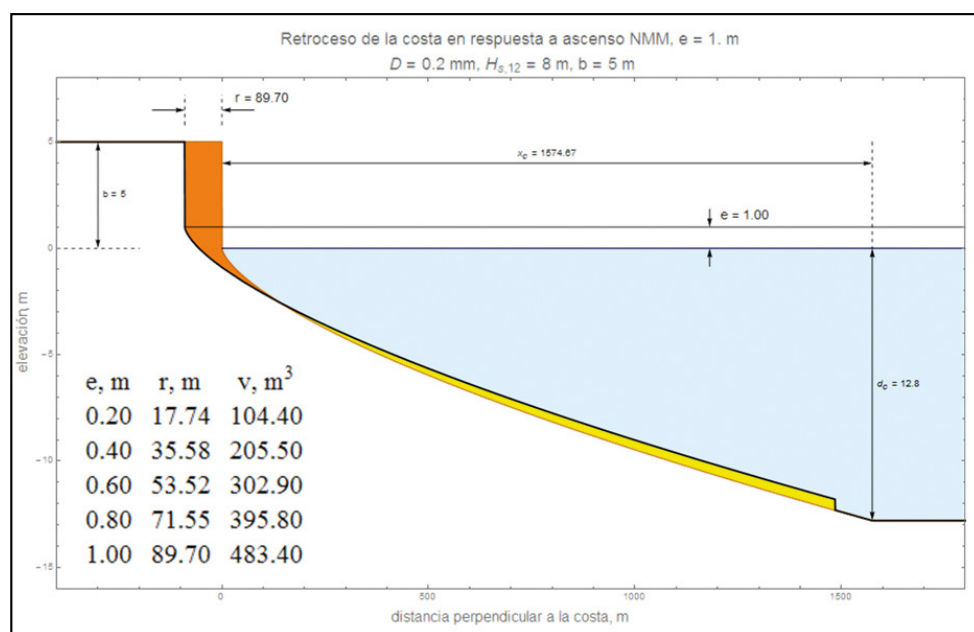


Figura 7. Respuesta de un perfil de playa a la elevación del nivel del mar de acuerdo con la regla de Bruun.

y recurriendo, en caso de eventos extremos, a los depósitos dunares para alimentar el perfil activo ante la acción del oleaje. Las playas son un ejemplo de entorno auto adaptativo ante el ascenso del nivel del mar, de acuerdo con la conocida regla de Bruun (Bruun, 1962). La figura 7 muestra un ejemplo de aplicación, con distorsión entre las escalas horizontal y vertical. Para unas determinadas características de tamaño de arena, altura de berma o duna y oleaje, las elevaciones del nivel e metros implican un retroceso r e involucran la movilización en perfil de v metros cúbicos por metro lineal, sin contar con el previsiblemente requerido transporte adicional de sedimentos hacia tierra para incrementar del nivel de la berma o duna y mantener el equilibrio a largo plazo del perfil (Rosati et al., 2013). En este ejemplo, el retroceso de la línea de orilla es del orden de 100 veces la elevación del nivel del mar.

Por el contrario, la costa construida para usos ciudadanos: playas urbanas con perfil limitado por tierra, paseos, muros, puertos deportivos y pesqueros, carece de esa adaptabilidad tanto en lo estructural como en lo funcional, y

por consiguiente requieren medidas de adaptación con opciones que naturalmente están muy restringidas en el caso de entornos urbanos consolidados.

3.1. Factores de la peligrosidad de las tormentas en la costa y escenarios de clima.

Aunque la ingeniería de costas comparte con la portuaria un importante tronco común de conocimiento básico, algunos aspectos de los efectos y peligrosidad de las tormentas en el entorno de la orilla, deben ser objeto de atención particularizada. La altura de las olas en mar abierto es un factor principal de su peligrosidad pero en el entorno de la costa cobran gran relevancia otros factores. En primer lugar, la dirección de arribada de los temporales y el grado de exposición de la costa frente a esa dirección: una forma parcial de visualizar este factor es el concepto de Fetch de un emplazamiento, muy utilizado en la época de Iribarren para predecir las características extremas del oleaje en un emplazamiento. El Fetch puede definirse

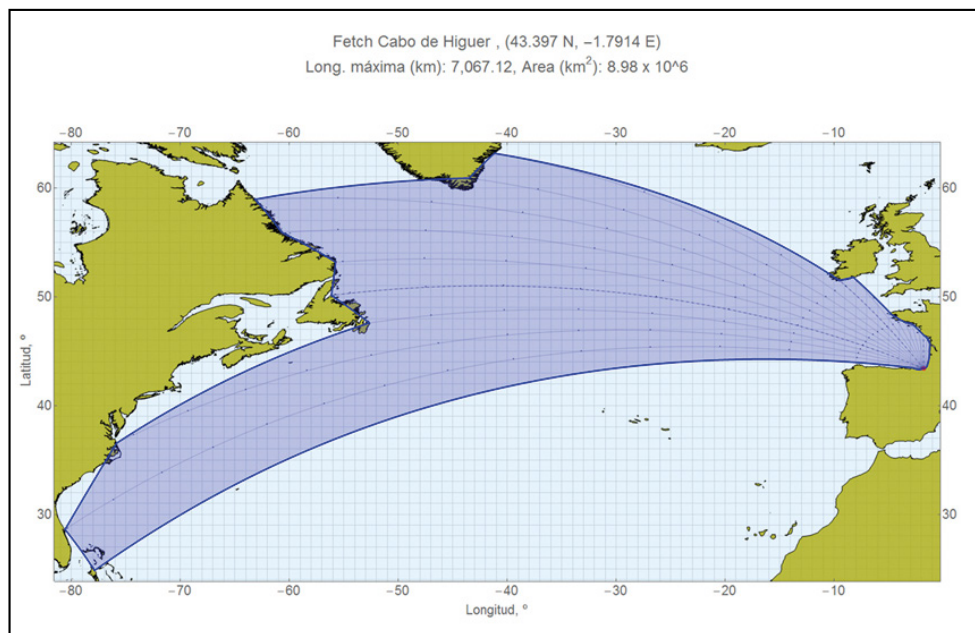


Figura 8. Fetch calculado (proyección azimutal equidistante) para el Cabo de Higer. Datos: Costa GSHHS.

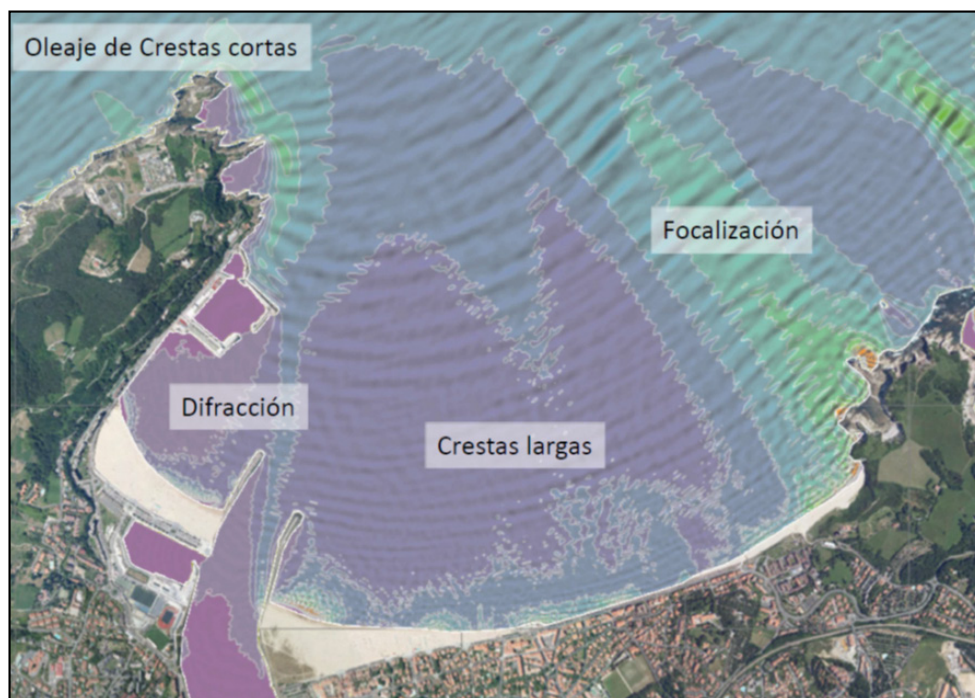


Figura 9. Transformación del oleaje en la Rada de Higer. Oleaje irregular multidireccional, periodo de pico 10 s, Modelo MDSL (Grassa, 2000). Datos: Cartografía y sondas del IHM, orto fotografía PNOA, IGN.

como una distancia característica (en un rango de direcciones) y el área de mar, tal y como se muestra (en una interpretación moderna) en la figura 8, desde la que el oleaje puede arribar a un emplazamiento siguiendo líneas geodésicas, de mínima distancia sobre el globo y sin ser obstaculizado por masas de tierra. En este caso se ha representado el correspondiente la entrada a la Bahía de Fuenterrabía o Rada de Higer (lugar referente para Iribarren) que cubre una buena parte del Atlántico Norte entre el paralelo 40° y el 60° alcanzando las costas de Terranova a 4.000 km de distancia. La magnitud de esa área marina generadora de tormentas permite visualizar el grado de amenaza al que esta zona está sometida potencialmente. En su comunicación al Congreso de Lisboa (Iribarren y Nogales, 1949) Iribarren estimaba, basándose en la longitud de este Fetch, en

9,5 m de altura y 18 segundos de periodo las características máximas del oleaje que podría arribar a estas costas. La caracterización del oleaje se basa hoy en día mucho más en medidas in situ y modelos de predicción de oleaje basados a su vez en modelos de viento pero, no obstante, el concepto de Fetch de un emplazamiento continúa siendo de utilidad como expresión del grado de exposición a los fenómenos marinos y como explicación razonada de las diferencias de severidad del clima de oleaje entre diferentes emplazamientos incluso próximos.

Conjuntamente con la dirección del temporal, juega un papel su mayor o menor direccionalidad. Aunque en la orilla el oleaje es siempre unidireccional (no así frente a los diques en grandes calados) debido a la regularización producto de la refracción y difracción, los oleajes de crestas cortas

tienden a suavizar procesos de focalización y a incrementar la agitación en zonas de difracción, véase (Grassa, 1990).

En segundo lugar el grado de exposición queda determinado por los fenómenos de transformación que sufre el oleaje en su propagación desde aguas abiertas hasta un emplazamiento concreto de la costa, lo que puede magnificar o reducir su costa. Una de las principales contribuciones de Iribarren fue precisamente el método de los Planos de Oleaje, una técnica numérico-gráfica pionera en el estudio de estos fenómenos de transformación, que permite estimar la intensidad del oleaje en un lugar concreto de la costa teniendo en cuenta su transformación bajo los efectos de la refracción, difracción y reflexión al propagarse las olas sobre fondos irregulares. El método fue publicado en 1941 y rápidamente adoptado como referente internacional, formando parte del canon de la ingeniería marítima durante 40 años. Sólo al comienzo de la década de 1980 la irrupción de la modelización numérica en ordenador dejó el método en desuso.

Un modelo numérico equivalente de entre los utilizados hoy en día se muestra en la imagen de la figura 9 proporcionando un catálogo bastante completo de los diferentes fenómenos de la transformación de oleaje. La zona presentada es la Rada de Higuier, en la que Iribarren pudo encontrar en la observación del oleaje desde la ladera del Cabo de Higuier, de la que hay numerosos testimonios gráficos en sus obras, una justificada motivación para el estudio ingenieril de la transformación de las olas propagándose en fondos irregulares.

El cabo de Higuier abriga parcialmente la bahía frente al oleaje, reduciendo la exposición de su parte más occidental frente a los temporales frecuentes del Noroeste. Un observador situado en el cabo puede ver hacia poniente las olas de crestas cortas propias de las aguas profundas y hacia la bahía, como estas se convierten en olas de crestas largas debido a la refracción al propagarse en aguas de profundidad más reducida. Asimismo, puede observar la difracción que se produce en el Cabo y en el dique del puerto del refugio de Hondarribia y la expansión del oleaje en la Bahía que le hace perder altura para luego recuperarla parcialmente debido al asomeramiento en la playa. Y también la focalización de las olas frente a las Rocas Gemelas en el extremo Este de la playa de Hendaya, donde las de periodo más largo se concentran en un cáustico y rompen en aguas profundas. En resumen, estos

fenómenos de transformación condicionan fuertemente la intensidad del oleaje en la costa.

Un tercer factor de peligrosidad, directamente vinculado con el ascenso del nivel del mar, es su nivel actual durante la ocurrencia de una tormenta. Un nivel del mar más elevado traslada en vertical el oleaje incrementando su alcance en la costa y la inundación que pueda producir en zonas contiguas a la orilla. El fenómeno de remonte y rebase es común en todo tipo de situaciones, tanto en aguas profundas, típicas de los grandes puertos como en las cercanías de la orilla. No obstante, una diferencia fundamental es que la mayor profundidad no modifica la intensidad de la acción en aguas profundas, ya que el oleaje no está limitado por el calado, mientras que en la costa esa elevación reduce directamente la disipación de energía asociada a la rotura en una ubicación dada ya que la ola puede propagarse sin romper por limitación de profundidad en zonas más próximas, incrementándose por tanto su acción: se tiene por tanto en la orilla una mayor altura de ola y, a la vez, actuando a una mayor cota sobre el nivel medio del mar.

Un cuarto factor es el periodo del oleaje. Los oleajes de mayor periodo poseen un mayor flujo de energía, avanzan más rápido hacia la costa (ello puede sorprender sin tiempo a resguardarse a observadores en lugares expuestos) sufren en mayor medida los efectos de transformación en su propagación por fondos irregulares y pueden incrementar notablemente su altura en la costa debido a la conservación de su flujo de energía. De esta manera, una zona que queda abrigada frente a oleajes de largo periodo debido a la atenuación por refracción puede no estarlo tanto, comparativamente, si el oleaje tiene un periodo muy elevado. Adicionalmente, véase la figura 10, las olas largas que se propagan en aguas poco profundas toman una forma muy asimétrica respecto al nivel medio del mar, mostrando una cresta elevada y un seno más prolongado pero de elevación pequeña bajo el nivel medio. En casos extremos la elevación de la cresta sobre el nivel medio es prácticamente igual a la altura total de la ola: ello facilita el que la cresta pueda impactar con, p.ej. la parte inferior del tablero de un puente en la desembocadura de un río y provocar fuerzas intensas sobre sus pilares de apoyo.

Un quinto factor de la peligrosidad de un oleaje en la costa es la relación entre la pendiente de las olas y la

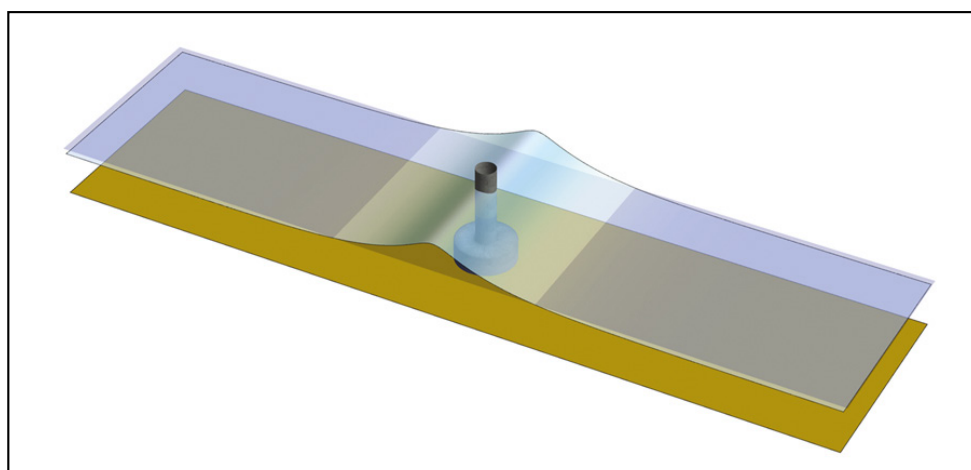


Figura 10. Ola de elevado periodo propagándose en aguas poco profundas de acuerdo con la teoría de ondas numéricas no lineales (Altura 3 m, Profundidad 5 m, periodo 12 s).

pendiente del fondo en la zona próxima a la costa: englobada en el Número de Iribarren, este factor gobierna muchos aspectos del comportamiento de las olas en la costa y por tanto su peligrosidad. La investigación sobre esa relación se trata más adelante y se ha considerado (Romero y Grassa, 2000) una aportación al conocimiento general que trasciende los límites de la ingeniería práctica.

En esencia, el valor del número de Iribarren indica si una ola se desestabilizará y romperá en una pendiente, disipando localmente su energía, o bien ascenderá y descenderá por el talud costero reflejándose sin haber sufrido una pérdida apreciable de energía y/o por supuesto, todos los estadios intermedios entre ambas situaciones extremas. Desde el punto de vista del efecto sobre la costa es especialmente destacable que cuando las pendientes son reducidas y el peralte (pendiente) de las olas es alto se tiende a producir la rotura y se limita el ascenso por el talud; al contrario, cuando el peralte es bajo (a igualdad de altura de ola mayor periodo y por tanto mayor longitud) y la pendiente es más elevada no se produce rotura y a igualdad de altura de ola el ascenso por el talud es considerablemente mayor, magnificando eventuales rebases e inundación de las zonas inmediatas a la orilla.

3.2. El cantábrico, invierno de 2014 y el Golfo de Cádiz, febrero de 2018

Con carácter general, las obras marítimas en aguas profundas están expuestas a la acción de temporales de oleaje cuya altura no queda limitada por la profundidad, mientras

que en los calados pequeños el oleaje tiende a romper cuando la altura de ola es una fracción de la profundidad, lo que limita la intensidad de la acción marina sobre el medio natural y las obras en las proximidades de la línea de orilla. Por tanto y como regla general se suele asumir que el grado de exposición aumenta con el calado y de hecho algunos fallos en la historia de la ingeniería marítima pueden haberse debido a la mera extrapolación de diseños en menores calados aplicados a obras en aguas más profundas.

No obstante en el invierno de 2013-2014, se produjeron una serie de tormentas en el Cantábrico que produjeron daños extraordinarios precisamente en zonas de calados reducidos en las costas del País Vasco Español y Francés, Cantabria y Asturias sin afectar particularmente a los grandes puertos. La figura 11 muestra valores representativos, registrados instrumentalmente, de nivel de marea, altura de ola y periodo del oleaje en el periodo diciembre 2013 a marzo 2014. Dos de estas tormentas, destacadas en la figura, los días 2 de febrero y 3 de marzo, tuvieron unos efectos especialmente catastróficos. En el caso del 3 de marzo no se dispone de datos instrumentales de oleaje y se han consignado los estimados mediante previsión numérica. Las tormentas de esas dos fechas se produjeron en un intervalo de 29 días y coincidiendo con las mareas vivas del mes lunar correspondiente (duración 29,5 días), ya próximas a las máximas anuales correspondientes al equinoccio de primavera y por tanto estuvieron acompañadas de los dos valores más extremos de elevación del nivel del mar en el periodo, realzados además por la cercanía al máximo del ciclo de marea de 18,6 años que se produjo en 2015.

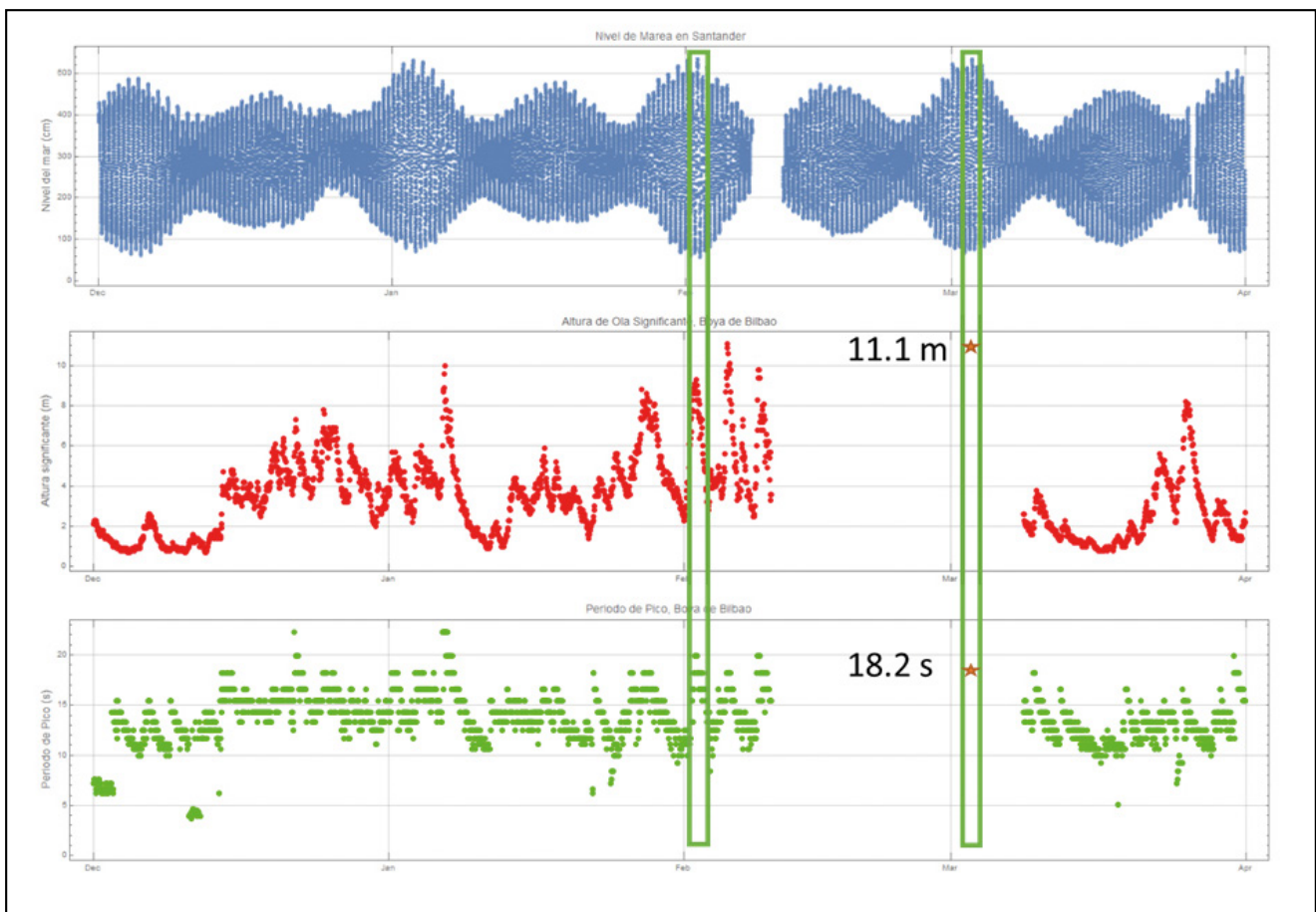


Figura 11. Datos de elevación de marea, altura de ola y periodo del oleaje en el cantábrico en el periodo diciembre de 2013 a marzo 2014. Datos de oleaje de la Boya de Bilbao, marea registrada en Santander, Puertos del Estado.

La altura de ola fue elevada el 2 de febrero y, según la predicción, también el 3 de marzo pero sin alcanzar en la primera de estas fechas otros valores registrados en los meses de enero y febrero. Otro valor excepcional durante estas tormentas fue el periodo del oleaje, de 18 segundos, extraordinariamente alto en coincidencia con el pico de las tormentas.

El 2 de febrero se produjeron daños en, entre otros lugares, la playa de la Zurriola y los puentes sobre la desembocadura del río Urumea en San Sebastián, en los diques de los puertos de Bermeo, Castro Urdiales y Cudillero y en la playa del puntal de Laredo. El 3 de marzo fueron notables en las playas de Zarautz, Somo, San Lorenzo de Gijón y Orzán de Coruña, agravándose las averías ya sufridas por los diques de Bermeo y Cudillero.

Estos daños, que también se sufrieron en la costa de Aquitania sucedieron de forma preponderante en los entornos de pequeños calados de las costas construidas: playas urbanas, paseos marítimos, puertos pesqueros y en general en el entorno de la línea de orilla, en zonas costeras de muy escasa profundidad. Por ejemplo, en el caso del Puerto de Bermeo la zona más afectada del dique fue su arranque desde tierra, zona de mínima profundidad, mientras que en la Playa de la Zurriola el espigón, véase la figura 12, sufrió daños próximos al inicio de la destrucción (Sánchez-González y Díez, 2016) pero no en su morro exterior, tramo en mayor calado, sino en una zona intermedia en un calado considerablemente menor.

Estos daños dieron lugar a actuaciones de emergencia por parte de la Administración General del Estado (Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar) por importe de 30 millones de euros, además de las correspondientes realizadas en sus puertos por las Comunidades Autónomas del País Vasco y Asturias.

Un hecho a destacar es el buen funcionamiento de los servicios de previsión y de protección civil que hizo que pese a la afección a las costas urbanas solo se produjeran un número muy reducido de daños a personas en las dos fechas mencionadas.

Cuatro años antes, la tempestad Xynthia produjo los días 27 y 28 de febrero de 2010 estados del mar en el Cantábrico muy notables que también coincidieron con mareas de coeficientes superiores a 100. La predicción de Puertos del Estado de oleaje en Bilbao fue, para las 3 de la mañana del día 28 de febrero, 9,7 m de altura significativa, con dirección del W y periodo relativamente reducido, 12 segundos. Esta tormenta



Figura 12. Playa de la Zurriola, San Sebastián, 23/3/2014. Fotografía del autor.

causó importantes inundaciones en toda la costa francesa del Golfo de Vizcaya y 60 víctimas mortales en Europa, de ellas más de 50 en Francia. Según Meteo-France, se produjo una sobre elevación de 1,5 metros de la marea por efecto del viento soplando en aguas someras hacia la costa (véase la amplia plataforma continental frente a la costa francesa, figura 6), lo que unido al elevado coeficiente de marea astronómica propició la penetración del oleaje y la inundación. Los efectos sobre la costa española del Cantábrico no fueron de mayor importancia posiblemente debido a la dirección de arribada de la tormenta, desplazándose desde el SW por lo que la península apantallaba el oleaje en la costa española -no así en la francesa- y su reducido periodo que le hacía perder buena parte de su altura al refractarse hacia la orilla.

Otra tormenta que ha provocado daños importantes en zonas urbanas costeras, véase la figura 13, sin tener efectos notables en Puertos ha sido en el invierno de 2018 la perturbación Emma que se generó en el Atlántico Norte a la altura de Irlanda y descendió hasta situarse en una latitud atípicamente baja, al sur del Golfo de Cádiz. Desde esa posición, la depresión generó olas que atacaron la costa de Huelva y Cádiz con una altura excepcional y, de nuevo, coincidiendo con valores extremos de nivel del mar, durante la marea viva de primeros de marzo, cerca del equinoccio de primavera. En este caso la altura de ola era la mayor registrada instrumentalmente en la zona estimándose un periodo de retorno superior a los 40 años.

Por su parte, el nivel de marea alta registrado en el mareógrafo de Huelva 5 el 1/3/18 a las 1:10 era de 418 cm (398 a



a)



b)

Figura 13. Daños en la Costa de Huelva provocados por la Tormenta Emma. A) Islantilla, T.M. de Lepe, B) Reconstrucción de frente de duna tras el temporal, El Portil. . Fotografías del autor, 26 de marzo de 2018.

las 13:40), sólo 5 cm por debajo de la máxima observada en el periodo 1996-2018. Significativamente, niveles iguales o superiores a 418 cm sólo se han registrado durante un acumulado de 80 minutos en los más de 21 años de registro del mareógrafo, lo que representa un porcentaje de sólo 7×10^{-6} del tiempo total de medida. Ello da una idea de la anomalía representada por la simultaneidad de los valores extremos de dos variables estadísticamente independientes; sin quitar valor a lo anterior hay que matizar que un 10% de la marea, como se observa en la figura 14, era un residuo meteorológico que si se correlata con la tormenta.

El periodo del oleaje no era excesivamente elevado pero la dirección de arribada era del SW, tercer cuadrante, 30° más al Sur de la dirección habitual en los temporales que

inciden en el golfo de Cádiz, donde se produce usualmente un fenómeno como el descrito en relación a la tormenta Xynthia: El cabo San Vicente abriga la costa del Golfo de Cádiz respecto a los temporales del atlántico Norte que arriban por difracción con dirección del Oeste (270° en la figura 14).

Por su parte la figura 15 muestra los valores de altura y periodo de los picos de tormenta registrados en la boya del Golfo de Cádiz, que desde 2006 proporciona también valores de dirección del oleaje. En la figura se han superpuesto vectores orientados para significar la dirección de cada estado del mar. Se pone también de manifiesto lo anómalo de este temporal en relación a los más intensos registrados anteriormente, donde los oleajes de 11 o más

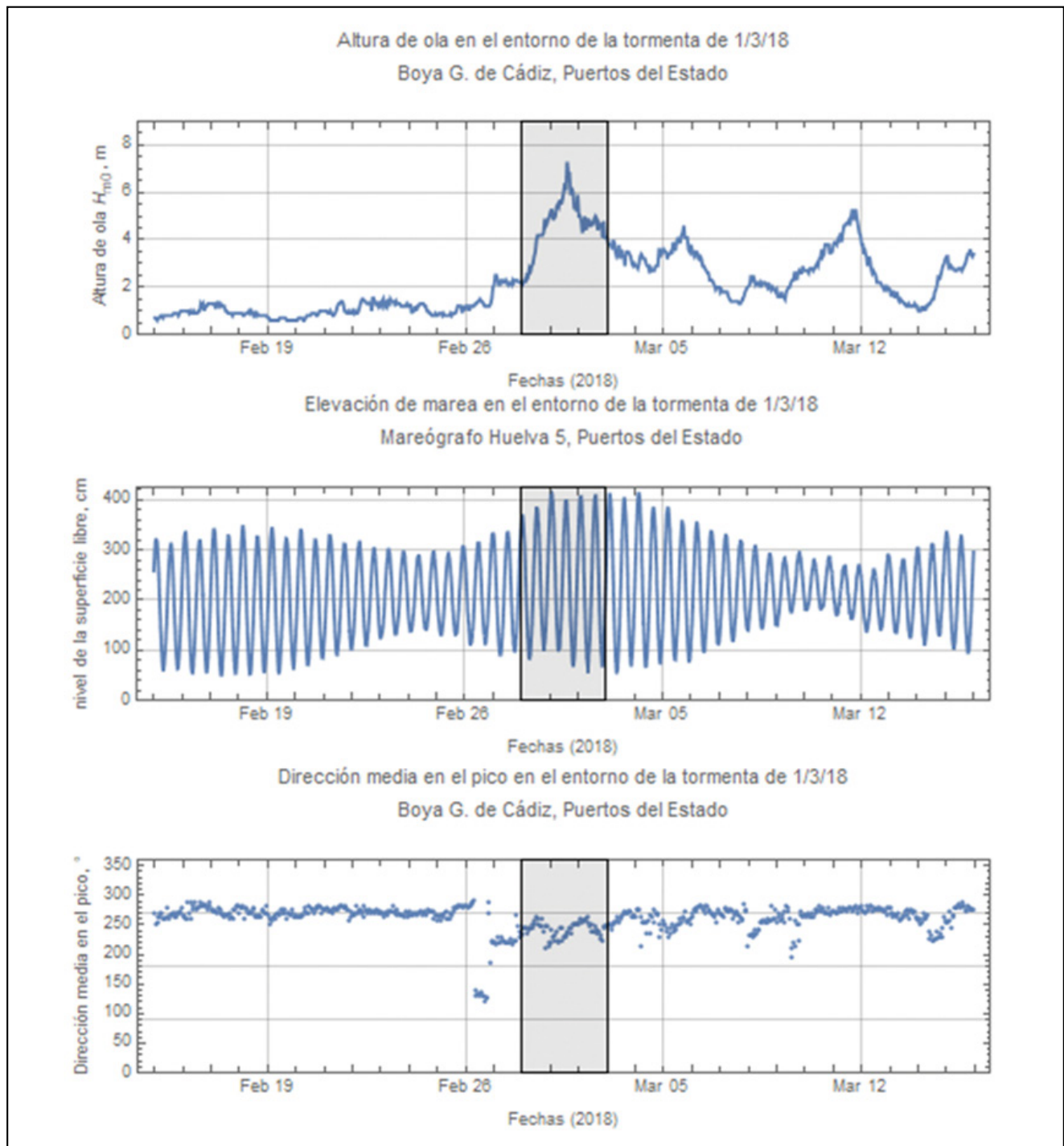


Figura 14. Altura de ola, nivel del mar y dirección del oleaje en el entorno de la tormenta Emma en el Golfo de Cádiz, 1/3/18. Datos Boya de Oleaje del Golfo de Cádiz, Mareógrafo del Puerto de Huelva, Puertos del Estado.

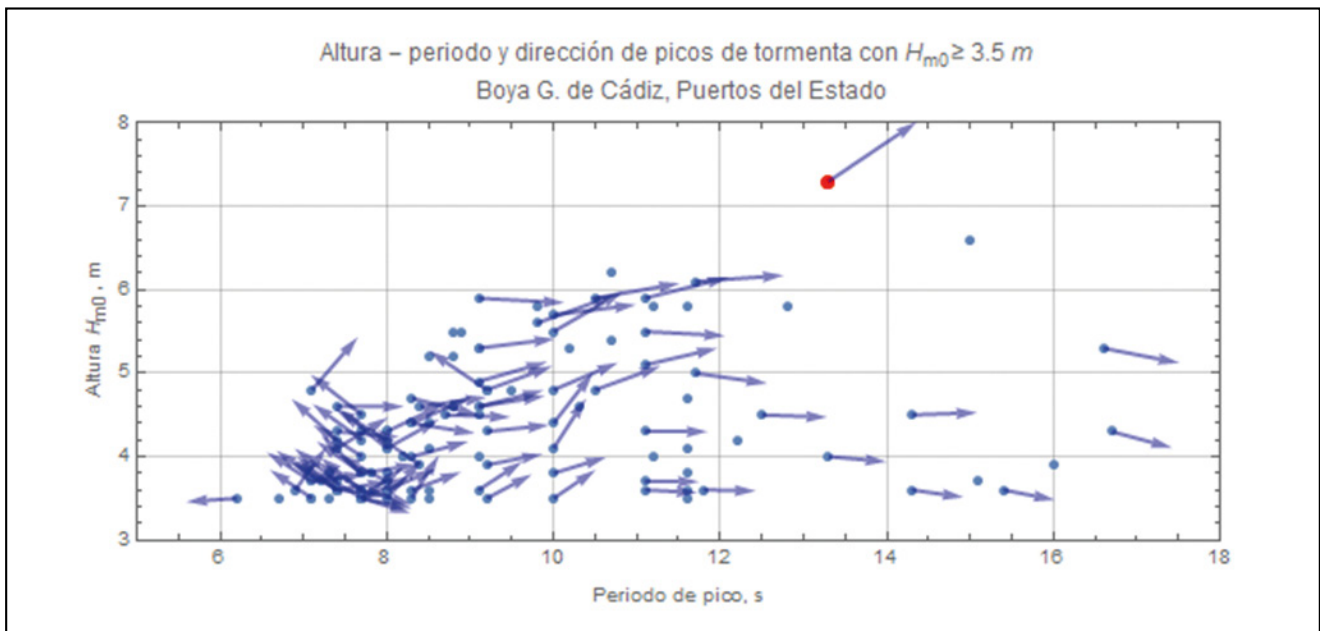


Figura 15. Altura y periodo (1996-2018) y dirección (2006-2018) de los picos de tormenta registrados en la Boya del Golfo de Cádiz. En rojo, tormenta del 1 de marzo de 2018. Datos de Puertos del Estado.

segundos de periodo son generalmente de Levante debido al fenómeno indicado, no siendo habitual que tormentas intensas se trasladen a latitudes tan bajas. Sólo se observan en la figura picos de temporal del tercer cuadrante, correspondientes a tormentas locales en el mismo Golfo de Cádiz, con alturas inferiores a 5 m y periodos menores de 11 segundos

La inferior oblicuidad de este oleaje respecto a la costa posibilita su arribada a las playas de Huelva con mayor altura de ola, al no haberse atenuado por efecto de la refracción. Un modelo elemental de refracción comparado (figura 16) para la situación de esta tormenta y la de los oleajes más habituales de la zona ilustra gráficamente esta situación. Pese a que efectivamente esta tormenta fue de gran intensidad desde la perspectiva de la altura de ola, con una dirección de arribada como la representada en la figura 16.b el oleaje en emplazamientos como isla Antilla o el Portil se hubiera visto muy atenuado, penetrando sólo por efecto de la difracción.

Debido al temporal se produjeron daños de diferente entidad en Isla Cristina, Isla Antilla, El Portil, Mazagón y Matalascañas, con diferencias de afección relacionadas con el diferente grado de exposición de las costas urbanas a las condiciones de este temporal, debido al estado preexistente de la costa y al modelo local de desarrollo urbanístico, resultando en un catálogo de situaciones que permiten identificar los efectos de diferentes prácticas en la vulnerabilidad ante eventos extremos.

Las condiciones de los temporales descritos y sus efectos ponen de manifiesto lo imprescindible, en lo relativo a la exposición de la costa urbana, de valorar los eventos meteorológicos de forma multiparamétrica, no sólo en términos de su altura de ola sino también del periodo del oleaje y de su dirección de arribada. Y más allá de esta descripción más completa del fenómeno, la combinación de sus efectos con otros factores concurrentes, como el nivel del mar derivado de la marea meteorológica. A la vista de las

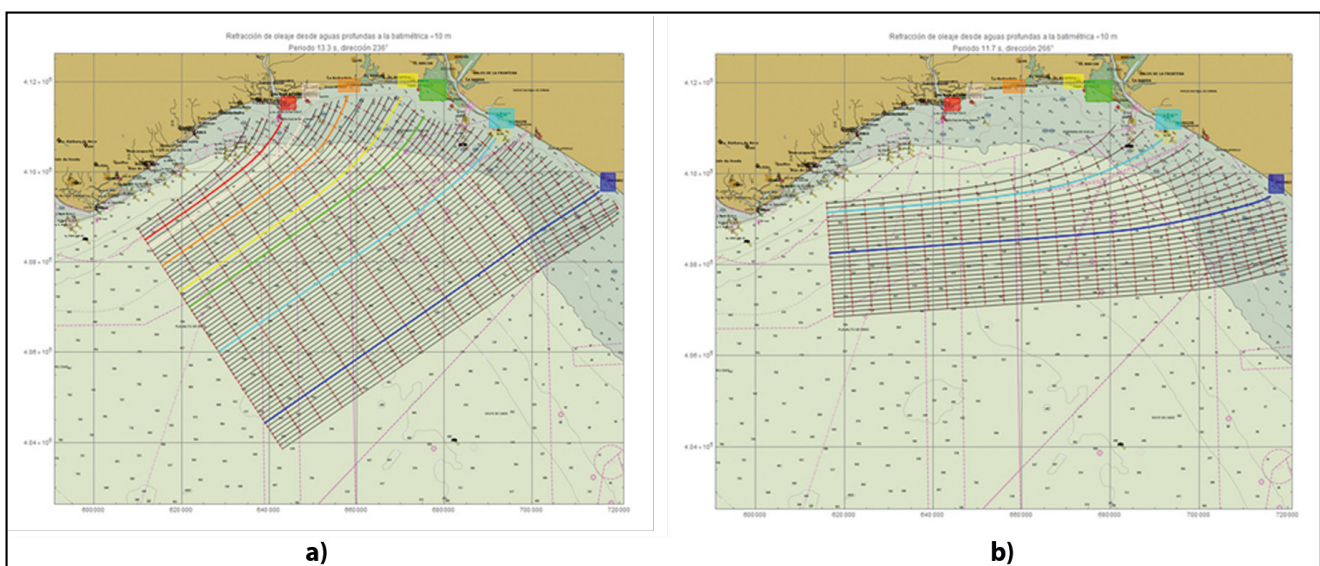


Figura 16. Modelo de refracción de oleaje en el Golfo de Cádiz a) oleaje correspondiente a las condiciones de pico de la tormenta Emma, 1/3/18 b) oleaje de referencia de Poniente (periodo 11.7 s, dirección 266°N). Cartografía y sondas IHM.

condiciones de estas tormentas parece razonable recomendar una consideración amplia de escenarios que, aunque con una variabilidad de condiciones a primera vista poco probables desde una perspectiva estadística simple, conlleven situaciones o modos de fallo especialmente graves. Sin ignorar la dificultad de esta tarea es necesario avanzar en los métodos de evaluación de las condiciones asociadas a eventos extremos en la costa integrando mejor las incertidumbres asociadas a todas estas variables y estudiando el comportamiento de la costa ante eventuales “cisnes negros” (Taleb, 2010) con el objetivo de reducir su fragilidad.

Una reflexión adicional que se puede extraer de estos casos de gran impacto costero, coincidentes con niveles extremos del mar es su posible papel como modelo adelantado de las tormentas que se producirán en las próximas décadas, cada vez con mayores niveles del mar. El estudio detallado de estas tormentas y de sus efectos en las costas urbanas puede servir para valorar las capacidades del estado actual del conocimiento y detectar áreas necesitadas de desarrollo y no sólo evaluar la capacidad de predecir fallos sino también para destacar los casos de buen comportamiento y extraer lecciones a aplicar en el desarrollo futuro.

4. EL NÚMERO DE IRIBARREN

Como se ha señalado antes, el “número de Iribarren” que resulta en una ubicación concreta de la combinación del peralte del oleaje que incide con la pendiente de los fondos es uno de los factores que influyen en la valoración de la peligrosidad de este oleaje.

A partir de consideraciones teóricas, Iribarren y Nogales (1948) habían encontrado que la pendiente límite que marcaba la separación entre la rotura y la reflexión en el talud costero, i_{lim} , como función del peralte de las olas, H/L_0 :

$$i_{lim} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{H/L_0} \quad [2]$$

En el contexto de su trabajo esta cuestión resultaba relevante para distinguir situaciones en las que la rotura de las olas permitía conseguir disipación de la energía del oleaje residual en el interior de los puertos en vez de su acumulación sucesiva en el interior, conduciendo eventualmente a situaciones en las que la agitación en el interior del puerto puede llegar a ser incluso superior a la que se produce en zonas no abrigadas, una forma de la denominada “paradoja portuaria”, (Miles y Munk, 1961). (Iribarren y Nogales,

1949) presentaron experimentos para tres casos estudiados en el Laboratorio de Puertos de la Escuela de Caminos de Madrid utilizando uno de los primeros canales experimentales de oleaje. Aunque la experimentación con olas se remonta al canal rudimentario construido por el ingeniero escocés Scott Russell en el patio trasero de su casa de Edimburgo (Russell, 1844) para estudiar la “gran ola de traslación” -las olas solitarias-, y la teoría de la generación de olas había sido ya presentada por (Havelock, 1928), no fue hasta la publicación de los trabajos de (Biesel y Suquet, 1951) que la experimentación en canales de oleaje comenzó a formalizarse, desarrollándose de forma simultánea en varios laboratorios de diversos países. La figura 17 muestra dos vistas del modelo a escala, perfectamente funcional, del canal de 30 m de longitud de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, con un sistema de generación sofisticado de traslación-rotación que permitía un ajuste aproximado de la cinemática de la pala generadora a la propia de las olas en profundidades intermedias.

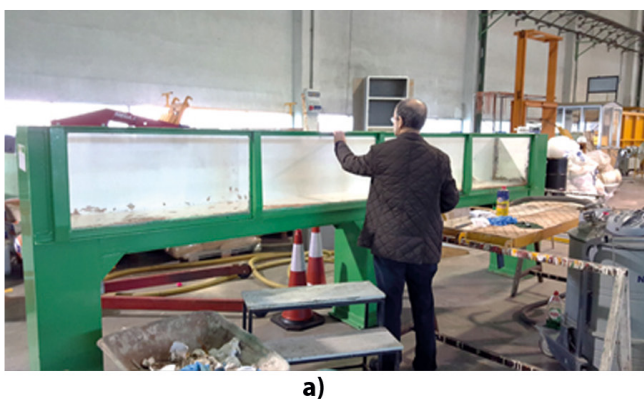
Todos los ensayos fueron realizados con un calado de 20 cm de profundidad disponiéndose una pendiente variable en el extremo opuesto al generador, modificándola sucesivamente y juzgando visualmente la situación de rotura o de reflexión que se producía.

La tabla II muestra las características de los oleajes generados (ondas de altura H y periodo T) en cada uno de los casos de ensayo, olas sucesivamente menos peraltadas en los casos 1 a 3, y sus resultados, máxima pendiente en la que el oleaje se veía romper con claridad (i_{rot}) y la mínima pendiente (i_{ref}), para la que no se apreciaba rotura sino que las olas se reflejaban en el talud. A su vez, la columna i_{med} reflejaba el valor de pendiente media entre los anteriores y el valor i_{lim} el predicho de acuerdo con la fórmula 2, constatándose un acuerdo razonable entre estas últimas.

Tabla II. Características de los ensayos de (Iribarren y Nogales, 1949)

Caso	H, cm	T, s	i_{rot}	i_{ref}	i_{med}	i_{lim}
1	5.5	0.66	0.42	0.86	0.64	0.66
2	4.5	0.92	0.29	0.59	0.44	0.42
3	4.5	1.00	0.33	0.49	0.41	0.38

En los términos expresados, estos son unos ensayos cualitativos, donde debe entenderse que las situaciones reportadas como de rotura y de reflexión deben entenderse



a)



b)

Figura 17. Vista general a) y detalle del generador del oleaje b) del modelo del primer canal de gran escala del Laboratorio de Puertos de la Escuela de Madrid. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

como situaciones en las que se observaba un predominio de la rotura o de la reflexión respectivamente.

Tras la presentación de estos resultados en el Congreso de Lisboa, Iribarren obtuvo una copia de un trabajo contemporáneo realizado en el Laboratorio Holandés de Puertos (Schoemaker y Thijssse, 1949) en el que se postulaba como parámetro principal para la evaluación de la reflexión la relación entre la longitud de la pendiente y la de la ola, utilizando como parámetro secundario la profundidad adimensional del oleaje al pie del talud. (Iribarren y Nogales, 1950) criticó esta parametrización y presentó sus resultados en función de la pendiente, quedando bien estructurados de acuerdo con sus peraltes. Años más tarde, el Ingeniero holandés y profesor de la Universidad de Delft, Jurgen Batjes, (Batjjes, 1974) propuso dar el nombre de número de Iribarren, Ir, al coeficiente de la ecuación (2):

$$Ir = \frac{i}{\sqrt{(H/L_0)}} \quad [3]$$

En palabras de Batjes:

‘The importance of this parameter for so many aspects of waves breaking on slopes appears to justify that it be given a special name. In the author’s opinion it is appropriate to call it the “Iribarren number” (denoted by “Ir”), in honor of the man who introduced it and who has made many other valuable contributions to our knowledge of water waves.’

4.1 Simulación numérica de los experimentos de Iribarren

En 1996 el prof. J. Liggett indicaba en (Nakato y Ettema, 1996) las limitaciones de los modelos numéricos de oleaje dado que no existían modelos que pudieran reproducir el ciclo completo de generación de olas por el viento, su crecimiento y propagación y finalmente su rotura, ascenso por el talud costero y reflexión parcial hacia el mar. Si bien la teoría de ondas quedó bien establecida por grandes ingenieros y físico-matemáticos del siglo XIX como Poisson, Cauchy y Stokes, y el modelado matemático y numérico para el estudio evolución de oleaje antes de la rotura ha sido desarrollado a partir de la década de 1970, la rotura de las olas ha constituido una barrera más allá de la cual el análisis hidráulico era muy limitado. Y esa zona tras la rotura es precisamente la de mayor interés desde el punto de vista de los efectos en las costas urbanas.

Precisamente a partir de la década de 1990 comenzó a complementarse la modelización hidráulica con la dinámica de fluidos computacional basada en las ecuaciones más generales (Navier - Stokes) que habían sido ya desarrolladas en décadas anteriores primero para flujos industriales confinados y más adelante con la incorporación de superficies libres en el LANL (Los Álamos) con diversos métodos de seguimiento y evolución de la superficie libre (MAC, PIC) y finalmente con el método VOF (Volume Of Fluid). El incremento de potencia de los ordenadores posibilitó el inicio de su empleo para el estudio de fenómenos costeros a partir de finales de los años 90, así como del método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) desarrollado inicialmente en el ámbito de la astrofísica y adaptado por su autor (Monaghan, 1994) para flujos de superficie libre.

El método SPH es una técnica lagrangiana que simula el fluido mediante partículas que representan y se mueven

con el fluido. El método establece una representación integral, promediada, del valor de una función de campo arbitraria A , y de sus derivadas a partir de los valores en su entorno:

$$A(r) \approx \int A(r') W(r - r', h) dr' \quad [4]$$

Siendo r, r' vectores posición y W un Kernel, función de suavizado (tipo campana de Gauss) con una longitud de suavizado característica h . Considerando las partículas b que se encuentran en el entorno de un punto a , se escribe de forma discreta equivalente a (4):

$$A(r_a) = \sum_b V_b A(r_b) W(r_a - r_b, h) \quad [5]$$

Siendo V el volumen de la partícula.

La figura 18 ilustra algunos de estos conceptos. Aceptada la aproximación (4), es posible emplear (5) para obtener versiones discretas de las ecuaciones de Navier - Stokes y, mediante su integración en el tiempo, estudiar la evolución del fluido.

A diferencia de otros métodos que requieren una ecuación adicional para el seguimiento de la superficie libre, en SPH la superficie queda simplemente definida por la posición de las partículas y su evolución, por lo que es especialmente apropiado en aquellos casos en los que la superficie libre se fragmenta, como ocurre cuando hay rotura de las olas, véase ej. (Grassa, 2004). El método es de implementación sencilla y tiene una gran versatilidad derivada del empleo de ecuaciones generales a la vez que una notable robustez. En diversos estudios comparados se ha demostrado también la calidad no solo cualitativa sino también cuantitativa de las simulaciones, ya sea con experimentos en laboratorio ej. (Gomez-Gesteira y Dalrymple, 2003) o con bien establecidas formulaciones analíticas, ej. (Grassa, 2007).

Se presentan aquí los resultados utilizando este método para el caso 1 de los experimentos de Iribarren, realizados simulando el canal de pequeña escala de Iribarren, y discretizando el fluido con partículas de 0,5 cm de lado, esto es 40 partículas en los 20 cm de elevación de la columna de agua. Las paredes del canal y la pala generadora de oleaje se han discretizado también con partículas que ejercen una fuerza de repulsión sobre las partículas de fluido - sometidas a la fuerza de la gravedad - derivada de la formulación de Lennard - Jones de la dinámica molecular. La distancia entre partículas de contorno se hace mitad -0,25 cm- de la existente entre las partículas de fluido para regularizar el potencial del campo de fuerza repulsiva y hacer que una partícula moviéndose paralelamente a un contorno experimente una fuerza uniforme, evitando fenómenos de masa añadida, (Grassa, 2007).

Se ha intentado simular un generador de traslación y rotación similar al empleado por Iribarren. Para ello en las simulaciones se imprime a cada partícula del generador se le impone una ley de movimiento horizontal de acuerdo la teoría de generación de oleaje para este tipo de palas (Hudspeth et al., 1993) con mayores amplitudes en la superficie y menores hacia el fondo. En cuanto a la disposición del canal, se muestran aquí los casos de pendiente correspondientes a los límites de rotura (máxima pendiente de rotura) y reflexión (mínima pendiente de reflexión) correspondientes al caso I. La figura 19 ilustra la disposición y muestran una instantánea de la superficie libre durante la respectiva simulación.

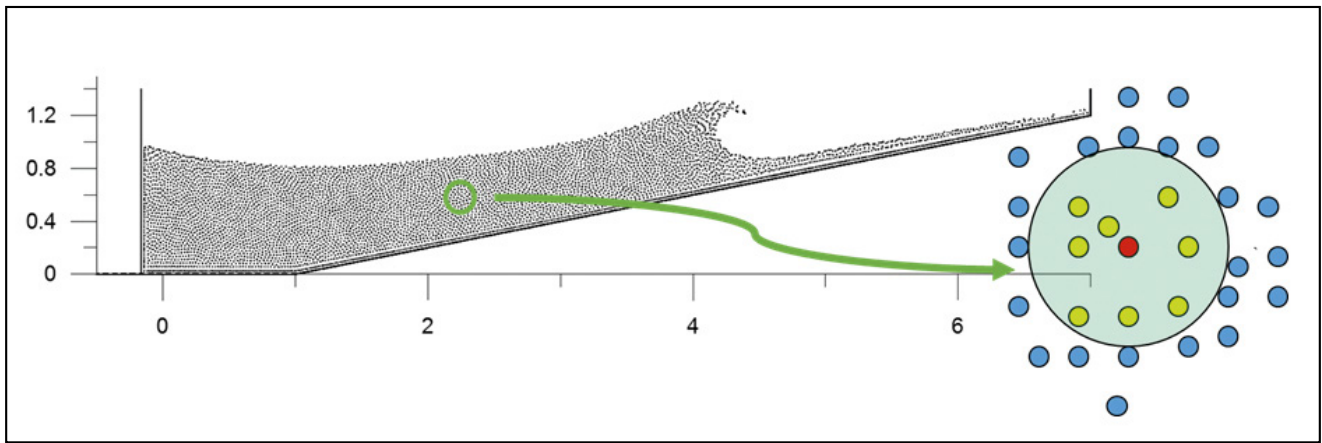


Figura 18. Ejemplo de un canal de olas SPH. Detalle de entorno de partículas y extensión de kernel compacto de suavizado.

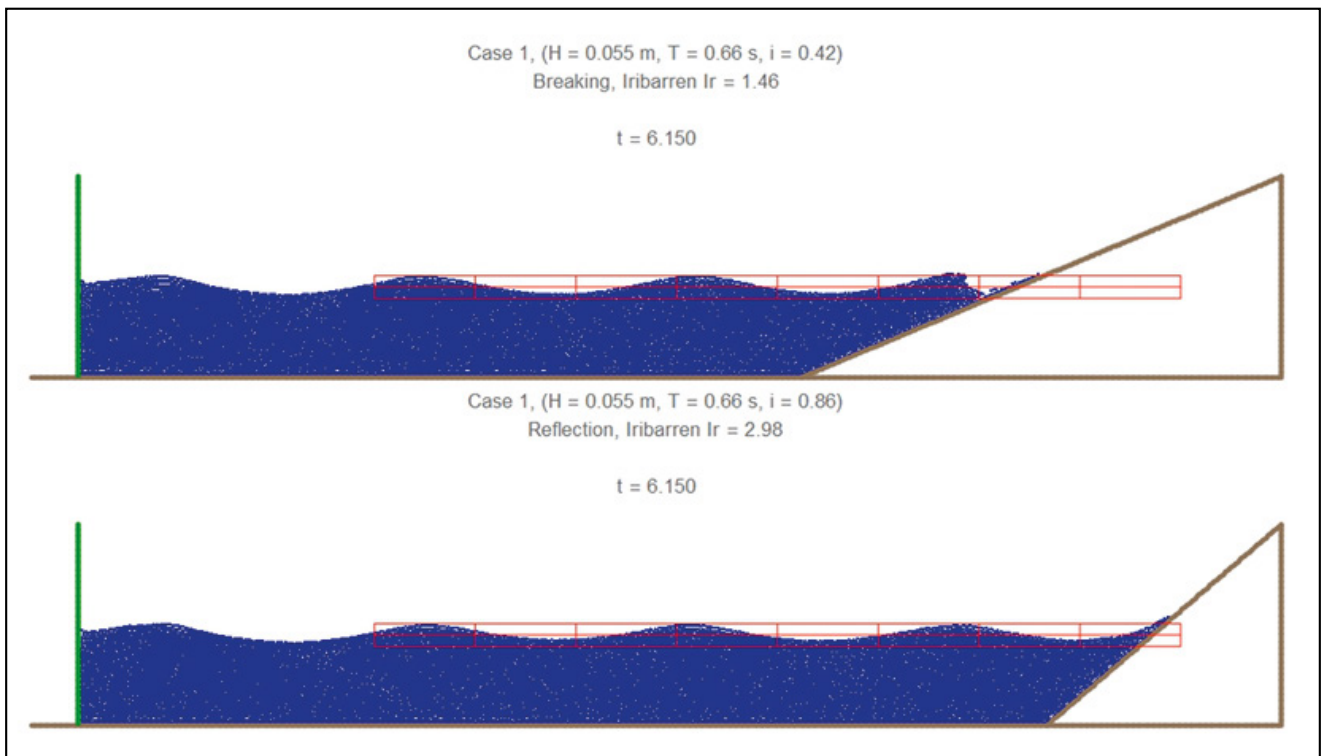


Figura 19. Superficie libre instantánea, Caso 1, límites de rotura y de reflexión.

El comportamiento de las olas en una pendiente puede verse como una evolución desde una rotura con disipación de la energía de la ola casi completa y prácticamente nula reflexión en pendientes muy reducidas hasta una reflexión casi perfecta, con nula disipación.

Por tanto, los casos límites de Iribarren deben entenderse en un sentido cualitativo como “máxima pendiente en la que el fenómeno visualmente dominante en el experimento es la rotura” (rotura completa) y “mínima pendiente en la que el fenómeno dominante es la reflexión” (reflexión total). La figura 20 representa la superficie libre instantánea a lo largo del tiempo en un tramo del canal en cada uno de los dos experimentos. Como se puede ver, la secuencia de nodos y antinodos es mucho más marcada en el caso límite de reflexión debido a la mayor importancia relativa de la ola reflejada y su interacción constructiva / destructiva con la incidente.

Ello confirma un buen resultado cualitativo de los experimentos numéricos que se han realizado sin un objetivo de validación, con una resolución limitada y valores estándar de los parámetros del modelo.

4.2. Trascendencia del número de Iribarren en la costa urbana

Como ya se ha indicado el carácter reflejante o disipativo de una costa ante el oleaje condiciona la amplitud del remonte de las olas y en consecuencia la importancia de la posible inundación en la costa al alcanzar las olas la cota de coronación de muros, paseos, diques y otras estructuras urbanas. Esto sucedió notablemente en los temporales señalados en el Cantábrico en el invierno de 2013-2014 con periodos de oleaje muy altos, de más de 18 s y olas de bajo peralte que con pendientes elevadas típicas de muros y diques resultan en números de Iribarren altos, escasa disipación y elevado remonte.

La figura 21 muestra dos experimentos numéricos realizados, para un mismo oleaje, con dos pendientes del fondo diferentes pero con igual altura en su coronación, que conducen a números de Iribarren en los dominios de rotura y de reflexión respectivamente.

El caso 20 a) puede asimilarse conceptualmente con una pendiente suave, propia de una playa en la que el oleaje rompe,

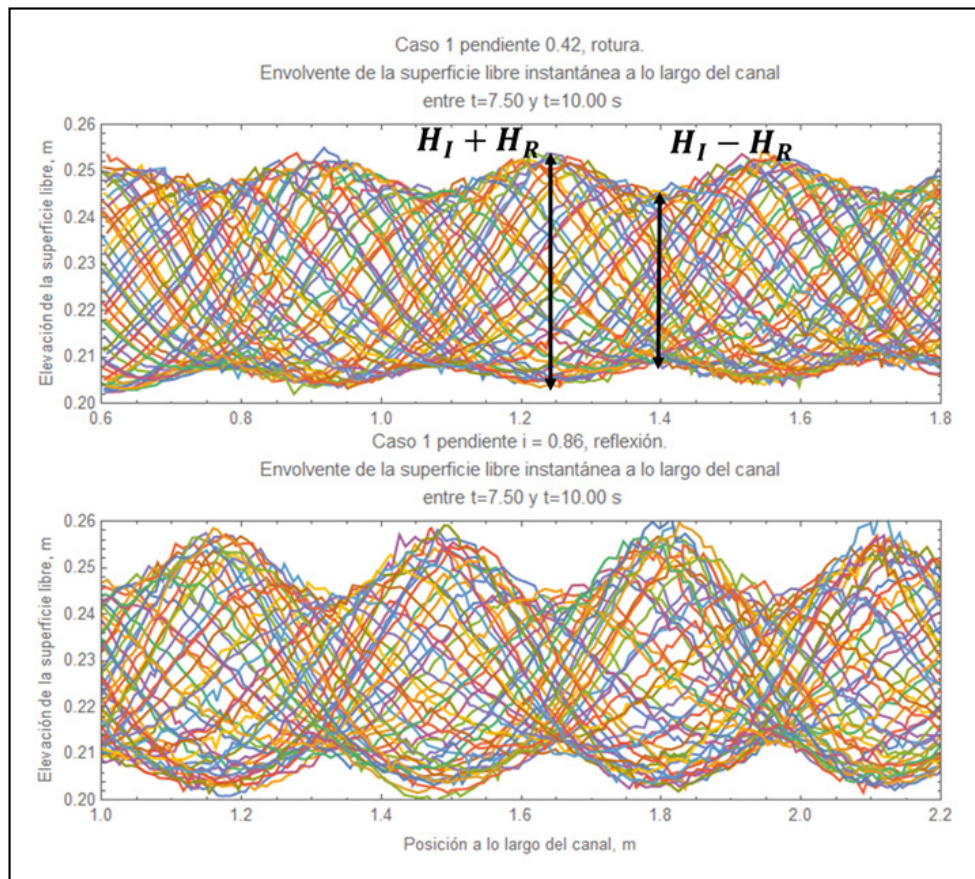


Figura 20. Envoltura de la Superficie libre instantánea, Caso 1.

disipa su energía y ello limita su ascenso por el talud. El caso 20 b) sin embargo puede ser asimilable al de un muro en talud en el que no se disipa energía y la ola asciende mucho más por el talud, eventualmente inundando una zona de menor cota tras la barrera. Ello hace ver que, a igualdad de altura de ola y pendiente, las olas de periodo más largo -como las de los temporales del invierno 13/14 y las de la tormenta Emma- es decir menos peraltadas son más peligrosas que las más cortas. Y a

igualdad de peralte las pendientes suaves como las de las playas son una mejor medida de protección que los muros para una determinada cota de coronación.

Un ejemplo tomado de la realidad -y del paisaje de Iribarren- se muestra en la figura 22. El tramo central de la playa de Ondaraitz, véase también la figura 9, no posee playa seca en su tercio central en situaciones de marea alta, por lo que el oleaje alcanza el muro vertical de soporte del paseo marítimo en la

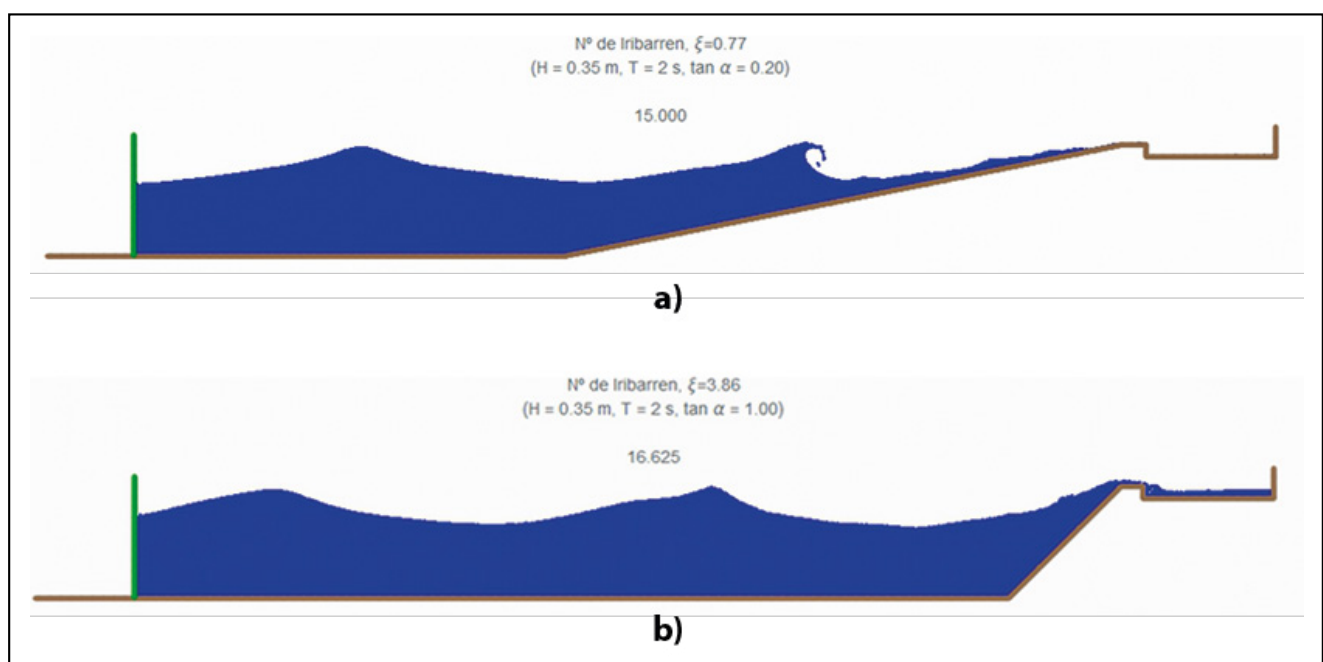


Figura 21. Experimentos numéricos para una onda de altura 0.35 m y periodo 2 s con misma cota superior del canal y a) Número de Iribarren 0.77 (rotura) y b) número de Iribarren 3.86 (reflexión).

zona más inmediata. En estas condiciones con un numerador alto en la ecuación (3) y pese a su reducida altura, la ola llega a proyectarse hasta la parte superior del muro. A 100 metros de distancia el mismo oleaje sobre la pendiente suave de la playa rompe sin generar ningún riesgo de inundación.



Figura 22. Oleaje en la playa de Ondaraitz, Hendaya, 11/8/2014. Fotografía del autor.

5. CONCLUSIÓN. LA PROTECCIÓN Y ADAPTACIÓN EN LAS COSTAS URBANAS

La costa ya construida tiene opciones limitadas de adaptación ante el cambio climático. Junto con la altura de ola, otras características de los temporales son muy importantes para determinar su peligrosidad en el entorno de la orilla: nivel del mar (cuyo ascenso es un efecto seguro del cambio climático), dirección de arribada, periodos y peraltes de los temporales (cambios más difíciles de predecir); estos factores han presentado anomalías en los importantes temporales descritos que han resultado en daños de importancia. Reconociendo las limitaciones debe prestarse atención a los fenómenos posibles y no sólo a los de probabilidad definida.

Identificadas las playas como un excelente elemento de protección frente a eventos extremos, naturalmente auto adaptativas ante cambios de nivel del mar, esta es una de las mejores opciones cuando ello es posible en el entorno urbano aunque aquí esa propiedad se ve muchas veces restringida por la limitación en el retroceso (véase la figura 7) impuesta por la urbanización. Ante escenarios de ascenso de nivel del mar puede ser especialmente necesario alimentar artificialmente las playas de forma que su perfil mantenga una playa seca y berma de dimensiones apropiadas. En algunas situaciones podrá ser necesario para proteger la costa reducir el oleaje que pueda arribar (véase un ejemplo en la figura 23) o bien elevar la cota de las protecciones frente a los temporales (figura 24).



Figura 23. Reducción de oleaje incidente mediante obras de protección. Bahía de Saint Jean de Luz, 14/9/2015. Fotografía del autor.



Figura 24. Protección mediante elevación de la cota. Paseo marítimo de la Playa de Saint Jean de Luz, 14/9/2015. Fotografía del autor.

La figura 24 muestra un ejemplo extremo de paseo marítimo-muro de defensa, con una obra tradicional que protege el barrio del puerto de la ciudad, que sufrió grandes inundaciones en el siglo XVIII.

Por su parte, las costas urbanas constituidas por muros, paseos y obras portuarias pueden perder su funcionalidad debido a niveles incompatibles de rebases e inundación, así como pérdida de estabilidad frente a incrementos del nivel del mar al pie de las estructuras y la consiguiente pérdida de la limitación (por rotura) de altura de ola que las acomete. Los temporales de periodo elevado son un factor de fallo funcional-mayor nº de Iribarren e incremento de rebases. Frente al fallo estructural deberán buscarse soluciones de refuerzo prestando especial atención a las acciones marítimas sobre elementos no concebidos para soportar esas cargas, ej. tableros de puente en zonas próximas a desembocaduras. En relación al de carácter funcional, junto a la elevación de cota de protección cabe también considerar la posibilidad de mejorar la capacidad disipativa mediante una disminución de la pendiente costera, reduciendo el número de Iribarren.

Dado el posible carácter precursor de situaciones comunes en décadas próximas de los temporales descritos en este trabajo, es útil un estudio integrado y homogéneo de los accidentes, averías y casos de buen comportamiento que han ocasionado, con los objetivos de:

1. Analizar cada caso y deducir pautas comunes de situaciones de riesgo que permitan tomar medidas preventivas, en su caso, para otras estructuras y elementos en condiciones próximas a las de las dañadas y deducir buenas prácticas a aplicar en futuros desarrollo de urbanismo litoral.
2. Chequear la capacidad predictiva real de las técnicas de estudio disponibles en el estado del arte de la Ingeniería de Costas y promover el avance en las materias que lo requieren, de forma que puedan comenzar a evaluarse con carácter piloto alternativas concretas de actuación para la reducción de riesgos en el litoral construido ante el cambio climático.

6. AGRADECIMIENTOS

El texto de este artículo refleja aproximadamente los contenidos de la intervención del autor el 22 de febrero de 2017 en el Instituto de la Ingeniería de España en el Acto

promovido por su Comité de Asuntos Marítimos en conmemoración del 50 aniversario del fallecimiento de Ramón Iribarren, 21/2/1967. Se agradece al Comité la iniciativa en recuerdo y homenaje merecido al fundador y Director hasta su muerte del Laboratorio de Puertos, incorporado al CEDEX en 1957 y la oportunidad dada al autor para participar en el mismo y celebrar las aportaciones perdurables de Iribarren al conocimiento del mar, los puertos y la costa.

Una parte significativa del trabajo ha sido objeto de preparación con motivo de intervenciones y conferencias invitadas en diversos foros: Ministerio de Medio Ambiente, 2014; Iberian SPH Workshop, Universidad de Vigo, 2015; Congreso UHINAK, Irún, 2015 (Memorial Iribarren) y 2016; Congreso SIOP, San Antonio, Chile, 2016; Arabian Coast, Dubai, 2016; ETSICCP Madrid, 2018; CoastLab, Santander, 2018.

Se agradece a María Jesús Martín Soldevilla, del CEDEX, la preparación de datos y ejecución de la simulación que se muestra en la figura 9, y tanto a ella como a Puertos del Estado los conjuntos de información de meteorología marina empleados.

Se agradecen también los comentarios del revisor, que han mejorado la legibilidad de este trabajo.

Finalmente, se agradece al Subdirector General de Protección de la Costa, Ángel Muñoz Cubillo, y al Director de CEDEX, José Trigueros Rodrigo, su motivación y soporte a la visita por parte del autor a la costa de Huelva tras el paso de la tormenta EMMA en marzo de 2018.

7. BIBLIOGRAFÍA

Benayas, F., Antequera, M., y González, E. (2014). Corrientes y oleaje en el comportamiento de un vertido hipersalino. Modelo físico reducido. *4th Latin American Congress on Desalination and water reuse, DESAL 2014, Santiago de Chile*.

Biesel, F., y Suquet, F. (1951). Les appareils générateurs a houle en laboratoire. *La Houille Blanche*, vol. 6, pp. 147-165.

Bruun, P. (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbours Division*, 88, pp. 117-130.

Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S. (2013). Sea Level Change. En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1137-1216.

Derycke, P.H. (1970). *L'Economie Urbaine*. Paris : Presses Universitaires de France.

Durandau, J.F. (1996). Edmond Durandau. L'aventure néo-régionaliste en Pays-basque et la construction d'Hendaye-Plage. Bayona: Editions du Mondarrain.

Findikakis, A.N. (2018). Coastal reservoirs (varios autores). *Hidrolink*, nº 1/2018, IAHR.

Fragkias, M., y Seto, K.C. (2012). The rise and rise of urban expansion. *Global Change*, Issue 78 (March).

Grassa, J.M. (1990). Directional random waves propagation on beaches. *Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, pp. 798-811.

Grassa, J.M. (2000). Un modelo sencillo de la ecuación de la pendiente suave para estudios de agitación y ondas largas en puertos. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina*.

Grassa, J.M. (2004). El método SPH. Aplicaciones en Ingeniería Marítima. *Ingeniería Civil*, 133, pp. 37-56.

Grassa, J.M. (2007). Wave forces on a wavemaker. SPH simulation and comparison with analytical results. *XXXII IAHR Congress*.

Grassa, J.M., y Lechuga, A. (2013). Sistema de ciudades y Litoral: Aspectos cuantitativos de la evolución reciente en España, 1999-2012. *Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Cartagena, 7-8 mayo 2013*.

Grassa, J.M., Gutiérrez Serret, R.M., Lechuga, A., y Lloret, A. (2016). Climate Change Driven Activities at the Coastal and Maritime Hydraulics center of CEDEX, Spain. *Hydrolink*, nº 2/2016, pp. 58-59.

Gutiérrez Serret, R.M., y Grassa, J.M. (2015). Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX. *Ribagua-Revista Iberoamericana del Agua*, 2(2): pp. 80-96.

Havelock, T.H. (1929). LIX. Forced surface-waves on water. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 8(51): pp. 569-576.

Hudspeth, R.T., Grassa, J.M., Medina, J., y Lozano, J. (1994). Type E double actuated wavemakers. *Journal of Hydraulic Research*, 32(3): pp. 387-400.

Hulot, N. (2004). *Le syndrome du Titanic*. París: Calmann-Levy.

Iribarren, R., y Nogales, C. (1948). Corrientes y oscilaciones de resacas en el interior de los puertos. *Revista de Obras Públicas*, nº 2796, pp. 150-157.

Iribarren, R., y Nogales, C. (1949). Protection des Ports. *Proceedings XVII Congress of PIANC, S.II - C.4, Lisbon*. Iribarren, R., y Nogales, C. (1950). Talud Limite entre la rotura y la reflexión de las olas, *Revista de Obras Públicas*, nº 2818, pp. 65-72.

Miles, J., y Munk, W. (1961). Harbor paradox. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 87(3): pp. 111-132.

Monaghan, J.J. (1994). Simulating free Surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110(2): pp. 399-406.

Nakato, T., y Ettema, R. (1996). *Issues and directions in hydraulics*. Balkema.

Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., y Nicholls, R.J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLoS ONE*, 10(3): e0118571. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>

Romero, D., y Grassa, J.M. (2000). Introducción. En Romero, D. (ed.), *Iribarren, Ingeniería y Mar*. Madrid: CEHOPU (CEDEX).

Rosati, J.D., Dean, R.G., y Walton, T.L. (2013). The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340(340): pp. 71-81.

Russell, S. (1844). Report on waves. *Fourteenth meeting of the British Association for the Advancement of Science*.

Sánchez-González, J.F., y Díez, G. (2016) Estudio en modelo físico 3D de las averías del espigón de la playa de La Zurriola (San Sebastián). *Ribagua-Revista Iberoamericana del Agua*, 3(2): pp. 35-45. Doi: 10.1016/j.riba.2016.07.002

Schoemaker, H.J., y Thijsse, J.T. (1949). Investigations of the reflection of waves. *III Meeting, IAHSR, Grenoble, 1-2 september, 1949*.

Taleb, N.N. (2010). *The black swan: the impact of the highly improbable* (2nd ed.). Londres: Penguin Books.

Wessel, P., y Smith, W.H.F. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research*, 101(B4): pp. 8741-8743.

Zenghelis, D. (2018). Sustainable Cities and the Economics of innovation. En *London School of Economics (LSE) Masterclass: Cities, Growth and Climate Change: Liveable Cities, 4-6 July, Fundación Ramón Areces, Madrid*.