



EVALUACION DE RIESGO COSTERO POR INUNDACION

Aplicado a la playa de Boca Barranco, Isla de Gran
Canaria, España

GUILHERME CLARINDO MARCOS

Tutor: Profesor Doctor Germán Alejandro Rodríguez Rodríguez

Co-Tutoras: Doctora Ingeniera Conceição Juana Fortes
Doctora Ingeniera Maria Teresa Reis

Tesis redactada para el cumplimiento de los requisitos del título

Máster Oficial en Gestión Costera

Curso 2013/2014

EVALUACION DE RIESGO COSTERO POR INUNDACION

Aplicado A La Playa De Boca Barranco, Isla De Gran Canaria, España

Datos personales

Nombre: GUILHERME CLARINDO MARCOS

Título universitario: Licenciado en Ciencias del Mar

Titulación que se persigue: Máster Oficial en Gestión Costera

Promoción: 2012-2014

Tutor

Doctor Germán Alejandro Rodríguez Rodríguez

Catedrático de Universidad. Departamento de Física, Grupo de investigación en Física Marina y Teledetección Aplicadas, ULPGC.

Cotutoras

Doctora Ingeniera Conceição Juana Fortes

Jefa de Núcleo. Núcleo de Puertos y Estructuras Marítimas. Departamento de Hidráulica y Ambiente. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Lisboa, Portugal).

Doctora Ingeniera María Teresa Reis

Investigadora. Núcleo de Puertos y Estructuras Marítimas. Departamento de Hidráulica y Ambiente. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Lisboa, Portugal).

Proyecto al que este trabajo se encuentra vinculado

Proyecto HIDRALERTA – Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias.

Organismo financiador: Fundação para a Ciência e Tecnologia.

El alumno,	El tutor,	La cotutora,	La cotutora,
Lic. Guilherme Clarindo Marcos	Dr. Germán Rodríguez Rodríguez	Dra. Ing. Conceição Juana Fortes	Dra. Ing. María Teresa Reis

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

MÁSTER EN GESTIÓN COSTERA

Se permite la reproducción parcial de este documento siempre que sea mencionado el autor y fecha y la referencia al Máster en Gestión Costera 2012-2014, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2014.

AGRADECIMIENTOS

En primero lugar me gustaría a agradecer mi familia, en particular mis padres que son mis grandes incentivadores, sin ellos este sueño no sería posible, muchas gracias por todo lo que me han enseñado.

También deseo expresar mi agradecimiento al Profesor Doctor Germán Rodríguez Rodríguez por el interés y la disponibilidad como orientador y por su amistad, así como a todos los profesionales del grupo de investigación FIMATA (Física Marina y Teledetección Aplicada).

Un agradecimiento especial a la Doctora Ingeniera Juana Fortes, a la Doctora Ingeniera María Teresa Reis y todo el personal del equipo del Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, y todo el departamento de Hidráulica y Ambientes, del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC) de Lisboa, por su dedicación, extrema hospitalidad y total disponibilidad para guiarme en este proyecto. Su amabilidad e interés constantes han contribuido fundamentalmente al desarrollo de esta tesis.

Gracias a Puertos del Estado y al Doctor Javier González Herrera (PLOCAN) por la ayuda prestada durante este trabajo en el suministro de información.

Tengo que agradecer también a todos mis amigos Españoles, Brasileños y de otras nacionalidades por los debates, discusiones e intercambio enriquecedor de ideas para mi futuro, tanto colegas de la universidad como de otros campos de actuación. En particular a una persona, Nalu Franco Gerent, una gran incentivadora de todos los proyectos planteados por mi persona, gran sujeto e importante ser en mi desarrollo personal y profesional, ayudando a creer que todo es posible si tenemos fe, paciencia y amor.

*Imagen de contraportada: Santa Cruz de Tenerife
en Estado de Alerta por Riesgo de Fenómenos
Meteorológicos Adversos
(Fuente: Diario de Avisos, 22/03/2013).*

RESUMEN

La zona costera representa una estrecha franja de la superficie de nuestro planeta, caracterizada por un comportamiento dinámico extraordinariamente complejo. Esta zona es única por interactuar directamente en ella los medios terrestre, marino y atmosférico. Además, debido al enorme interés del ser humano por utilizar dicho medio, se encuentra sometido a grandes presiones que llevan a la aparición de numerosos conflictos de tipo socioeconómico y ambiental. Aunque este hecho ha experimentado un enorme aumento en los últimos cincuenta años, las zonas costeras han despertado siempre, por diversas razones, un gran interés para el ser humano, motivo por el cual albergan una gran variedad de patrimonio histórico-cultural asociado a las diferentes actividades realizadas en ellas a lo largo del tiempo.

En comparación con su superficie, las Islas Canarias poseen una gran extensión de costa con diferentes grados de exposición a condiciones severas de la dinámica marina, en particular del oleaje. Ello conlleva frecuentes estados de alerta y situaciones de emergencia en algunas zonas de su litoral. En consecuencia, resultan fundamentales el planeamiento y gestión eficaz de las intervenciones por parte de las entidades responsables, así como la realización de estudios de riesgo y la implantación de sistemas de alerta, con el objetivo de minimizar los daños sobre infraestructuras y, especialmente, en términos de vidas humanas.

Un aspecto de enorme interés, desde diferentes puntos de vista que van desde el puramente socioeconómico, al jurídico o al ingenieril, es la determinación de la delimitación entre el mar y la tierra. Este límite es una de las fronteras más antiguas empleadas por la sociedad. A pesar de los siglos de uso de dicho límite natural, resulta obvio que a escala local esta zona de transición no representa un límite fijo, o estable, sino que presenta una elevada variabilidad. La localización de esta interfaz activa se ve modificada por fenómenos de diferente naturaleza. En concreto, la marea astronómica representa un fenómeno determinista modulador de su posición. Por otro lado, fenómenos como las anomalías del nivel del mar inducidas por efectos meteorológicos, conocidos como *storm-surge*, las condiciones del oleaje incidente y fenómenos inducidos por el mismo, tales como variaciones del nivel medio en el rango frecuencial infra-gravitatorio, poseen una naturaleza aleatoria.

Entre los fenómenos inducidos directamente por el oleaje al llegar a la orilla se encuentran el remonte (*run-up*) y el rebase (*overtopping*). El primero de ellos representa el ascenso de la masa de agua resultante de la rotura del oleaje sobre la pendiente de una playa o cualquier otra estructura, natural o artificial, sobre la que incide el oleaje. El remonte del oleaje puede culminar en la superación, o rebase, de una cierta estructura o umbral.

Tanto el remonte como el rebase, como productos derivados de la disipación de energía por parte del oleaje, poseen carácter aleatorio. Además, su intensidad dependerá entre otros, de las características del oleaje incidente, de las condiciones de marea existentes en cada momento, y de las características geomorfológicas de la estructura sobre la que se disipa la energía. La posición instantánea de la interfase entre el mar y la tierra, conocida con diversos nombres, tales como línea de orilla, ribera del

mar, etc., dependiendo del campo de aplicación, variará en función de los factores anteriores y provocará la inundación temporal de diferentes niveles de la zona emergida.

Tanto el estudio de determinación de la cota de inundación, incluyendo su variabilidad, como los riesgos asociados a la misma, constituyen una herramienta clave en la gestión urbanística de las zonas costeras, definiendo la posición de la ribera del mar y estableciendo límites al crecimiento urbano y al posible uso de diferentes áreas.

El objetivo del presente trabajo es examinar la probabilidad de ocurrencia de eventos de remonte, capaces de rebasar diferentes cotas de nivel o inundación del terreno, así como el nivel de riesgo asociado a la inundación de las diferentes áreas en las que se puede segmentar la zona de la playa de Boca barranco, localizada en la Isla de Gran Canaria, España, en el ámbito del proyecto HIDRALERTA.

Para alcanzar el objetivo propuesto se ha hecho uso de un gran volumen de datos de oleaje y niveles del mar, obtenidos de medidas instrumentales directas o mediante el uso de modelos de predicción y han sido suministrados por “Puertos del Estado”. Además, se han empleado diferentes bases de datos batimétricos para reproducir la morfología de la zona de estudio.

La metodología aplicada para estimar la frecuencia de ocurrencia de eventos de remonte de diferente intensidad incluye, en primer lugar, la propagación de las condiciones de oleaje desde los puntos de medida hacia la zona de interés, considerando el nivel de marea asociado, mediante un modelo de propagación de oleaje de tercera generación. Posteriormente, conocidas las condiciones de oleaje a pie de playa, se hace uso de diversas formulaciones empíricas sugeridas en la literatura especializada para evaluar el remonte.

La evaluación del riesgo tiene en cuenta el producto entre los grados de las probabilidades de ocurrencia y el grado de consecuencia. Así, una vez estimada la probabilidad asociada a diferentes niveles de remonte, se asigna un grado de consecuencia empleando la metodología propuesta por Raposeiro et al. (2011), y de estas se deriva el nivel de riesgo. Por último, las conclusiones del estudio quedan reflejadas en un mapa de riesgos asociados al remonte del oleaje en la zona de estudio.

Palabras-Claves: *Análisis de riesgos, inundación costera, remonte del oleaje, Islas Canarias.*

ABSTRACT

The coastal zone represent a narrow strip of the surface of our planet, characterized by an extraordinarily complex dynamic behavior. This zone is unique to interact directly in her land, marine and atmospheric environments. In addition, due to the overwhelming interest of human beings to your use, is under great pressure leading to the appearance of numerous conflicts of socioeconomic and environmental type. Although this has experienced a tremendous increase in the last fifty years, coastal areas have always attracted, for various reasons, of great interest to humans, why support a wide variety of historical and cultural heritage associated with the different activities in it over time.

Compared with the Surface, the Canary Islands have a large expanse of coastline with varying degrees of exposure to severe (harsh) conditions of marine dynamics, in particular, wave climate. This involves frequent states of alert and emergency in parts of its coastline. Consequently, it is essential for the planning and effective management of interventions by the responsible entities and studies of risk and the implementation of early warning systems, with the objective of minimizing the damage to infrastructure and especially in terms of human lives.

One aspect of great interest, from different points of view, from the purely socioeconomic, legal or engineering, is the determination of the boundary between sea and land. This limit is one of the oldest borders used by the society. Despite centuries of use of such natural limit, it is obvious that locally this transition zone is not a fixed limit, or stable, but has a high variability. The location of this active interface is modified by phenomena of different nature. Specifically, the astronomical tide represents a deterministic phenomenon modulator position. Moreover, phenomena such as sea level anomalies induced, weather effects known as storm-surge, conditions and incident wave phenomena induced by the same, such as changes in the mean level in the frequency range infra-gravity, have a random nature.

Among the phenomena induced directly by the waves to reach the shore are the *run-up* and *overtopping*. The first represents the rise of the mass of water resulting from wave breaking on the slope of a beach or any other structure, natural or artificial, on the incident wave. The run-up of the waves can lead to the improvement, or exceeded, a certain structure or threshold.

Both the Run-up and the overtopping as derivatives of the energy dissipation by wave, possess randomness. Moreover, its intensity will depend among others, on the characteristics of incident wave, conditions existing at each time tide and geomorphological features of the structure on which the energy is dissipated. The instantaneous position of the interface between sea and land, known by various names, such as shoreline, seashore, etc..., depending on the field of application will vary depending on the above factors and cause temporary flooding different levels of the emerged area.

Both the study of determining the flood level, including its variability, as the risks associated with it, are a key tool in the planning management of coastal zones, defining the position of the seashore and establishing urban growth boundaries and the possible use of different areas.

The aim of this research is to examine the probability of occurrence of *run-up* events, capable of exceeding different levels of flooding, and the level of risk associated with the flooding of the different areas in which you can target the area of the beach of Boca barranco, located on the island of Gran Canaria, Spain in the field of HIDRALERTA project.

To achieve the objective we have made use of a large volume of data waves and sea levels, obtained from direct instrumental measurements or by using predictive modeling and have been supplied by "Puertos del Estado". Furthermore, it has been used different bases bathymetric data to reproduce the morphology of the study area.

The methodology used to estimate the frequency of occurrence of *runup* events of different intensity includes, first, the propagation of wave conditions from the measurement points to the area of interest, considering the tidal level associated, using a wave propagation model of third generation.

Later, known wave conditions on the beach, using various empirical formulations suggested in the literature to evaluate the runup.

The risk assessment takes into account the product between the degrees of probability of occurrence and the degree of consequence. Thus, once estimated the probability associated with different levels of *runup*, using a degree of consequence proposed methodology is assigned, LNEC (Neves et al., 2010, Santos et al., 2011, Silva et al., 2011, Reis et al., 2011, Neves et al., 2012 Rocha et al., 2013; Poseiro et al., 2013) and of these the risk level is derived. Finally, the study's findings are reflected in a risk map associated to the runup of the waves in the study area.

Key words: *Risk analysis, Coastal inundation, wave run-up, Canary Islands.*

“A mi familia por el apoyo, por el ánimo y por toda confianza”

“Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo”
“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.
Albert Einstein



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ilustración de las contribuciones a la inundación costera por de remonte del oleaje.....	15
Figura 2: Ilustración del fenómeno de remonte del oleaje y acciones contra la erosión.....	15
Figura 3: Triángulo del riesgo.....	17
Figura 4: Zona de estudio	19
Figura 5: Revisión histórica de la zona.....	20
Figura 6: Identificación de la ocupación del suelo.....	21
Figura 7 Modelo de sombras que describe la geología de la zona	21
Figura 8: Imágenes de la Lotus Kunkelii y su habitat	22
Figura 9: Descripción de los usos establecidos en la zona	22
Figura 10: Clasificación del Suelo	23
Figura 11: Mapa de la batimetría y los perfiles.....	23
Figura 12: Sección del terreno (perfil Nº 4 a modo de ejemplo).....	24
Figura 13: Situación del mareógrafo.....	26
Figura 14: Cobertura temporal del mareógrafo	26
Figura 15a-b: Variación anual de marea y semidiurna	27
Figura 16: Protocolo del puerto para instalación del mareógrafo.....	28
Figura 17: Zona de origen de los registros de oleaje.....	29
Figura 18: Diagramas polares de las variables estudiadas.....	30
Figura 19: Esquema cronológico de los datos de partida.....	31
Figura 20: Fragmento de la serie temporal de Hs para el hindcast norte.....	31
Figura 21: Batimetría de la zona de estudio.....	33
Figura 22: Ilustración de las mallas empleadas en el modelo SWAN.....	36
Figura 23: Mallas computacionales.....	37
Figura 24: Batimetría y puntos de estudios.....	38
Figura 25 a-b: Resultados de la propagación y gráficos del SWAN.....	39
Figura 26: Resultados en conjunto de Hs y Tp.....	39
Figura 27: A) Imagen aérea del perfil; B) Vistas del terreno; C) Perfil en planta.....	46
Figura 28: a) Representación gráfica del Run-up máximo para los métodos de <i>Holman, Nielsen y Ruggiero</i> ; a) para los métodos de <i>Guza, Teixeira 1 y 2</i> , resultados presentados al perfil 0.....	48
Figura 29: Representación de los valores de la cota de inundación para el perfil 0.....	49
Figura 30: Esquema para la evaluación del riesgo.....	50
Figura 31: Perfiles trazados en la playa y subsectores atravesados por los mismos.....	51
Figura 32: Perfil 1 incluyendo las descripciones de cada tramo.....	55
Figura 33: Imagen del perfil 1.....	55
Figura 34: Mapa de las aceptabilidades del nivel de riesgo en cada sector.....	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estadísticas de los niveles en el mareógrafo de Las Palmas (en cm.).....	26
Tabla 2: Tabla con los valores máximos/mínimos y sus intervalos para la propagación.....	37
Tabla 3: Coordinadas de los puntos de resultados de la propagación.....	37
Tabla 4: Formulaciones empíricas empleadas en los cálculos de Run-up.....	46
Tabla 5: Resultados de los run-up máximos para el perfil 0 de las diferentes formulaciones.....	46
Tabla 6: Valores de la cota topográfica respecto al C.H. que definen la ocurrencia de inundación en cada sector (casos).....	50
Tabla 7: Definición, clasificación y denominación de los diferentes grados de ocurrencia de valores que exceden los umbrales pre establecidos.....	51
Tabla 8: Guion orientativo para describir las consecuencias en caso de inundación.....	52
Tabla 9: Matriz de los grados de riesgo en términos de los grados de consecuencias y de las probabilidades.....	52
Tabla 10: Escala de aceptabilidad del grado de riesgo resultante.....	53
Tabla 11: Resultados del análisis de riesgo para el perfil 1.....	55
Tabla 12: Resultados del análisis de riesgo para los perfiles y zonas consideradas, así como las aceptabilidades del nivel de riesgo en cada caso.....	56

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XI
INDICE GENERAL.....	XII
1 INTRODUCCION	13
2 ZONA DE ESTUDIO.....	19
2.1 CARACTERIZACION GENERAL	19
2.2 CARACTERIZACION DEL SUELO	20
2.3 GEOLOGIA DE LA ZONA.....	21
2.4 ORDENACION DEL TERRITORIO Y LEGISLACION VIGENTE	22
2.5 DEFINICION DE LOS PERFILES ESTUDIADOS	23
3 CARACTERIZACION DE LA AGITACION MARITIMA EN LA ZONA	25
3.1 DATOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO.....	25
3.1.1 Registros de niveles del mar	25
3.1.2 Registros de oleaje	28
3.1.3 Batimetría y topografía	32
3.2 MODELIZACIÓN DE LA AGITACION EN LA ZONA COSTERA	34
3.2.1 Modelo SWAN	34
3.2.2 Formulación matemática del modelo.....	35
3.3 RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN	39
4 ESTIMACION DEL REMONTE Y EVALUACION DEL RIESGO	40
4.1 MODELOS PARA ESTIMACIÓN DEL REMONTE	40
4.2 ESTIMACIÓN DEL REMONTE Y CÁLCULO DE LA COTA DE INUNDACIÓN	45
4.2.1 Análisis de los Resultados.....	45
4.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA	50
4.3.1 Probabilidad de ocurrencia.....	51
4.3.2 Grado de Consecuencia.....	52
4.3.3 Grado de Riesgo.....	53
4.4 RESULTADOS	55
5 CONCLUSIONES.....	59
6 BIBLIOGRAFIA.....	60

CAPITULO 1

1 INTRODUCCION

A lo largo de su historia el ser humano ha establecido sus asentamientos preferentemente en la costa, por numerosos motivos. Sin embargo, este fenómeno ha experimentado una aceleración drástica en unas pocas décadas. Así, se estima que aproximadamente un cuarto de la población mundial vive a menos de 100 km de distancia del mar y en zonas de elevación inferior a los 100 metros (Small and Nicholls, 2003) y que, aproximadamente, una de cada diez personas vive en zonas costeras con menos de diez metros de altitud sobre el nivel medio del mar, denominadas zonas costeras de baja altitud (LCZ), aunque esta franja apenas representa un 2 por ciento de la superficie emergida del planeta (McGranahan, et al., 2006). En consecuencia, la Conferencia de Naciones Unidas de 1992 sobre el medioambiente y el desarrollo consideró el rápido crecimiento de la población en las zonas costeras como un tema prioritario en el contexto del desarrollo sostenible y el medioambiente (Cassels et al., 2005).

Resulta obvio, y así lo demuestra la experiencia, que el establecer asentamientos en las zonas costeras proporciona una mayor facilidad de acceso a numerosos recursos naturales y oportunidades de mejora socioeconómica. Sin embargo, esto conlleva una mayor exposición de la población y sus bienes a diversos peligros naturales relacionados con el comportamiento dinámico del mar. En particular, el peligro de inundación costera ha estado siempre presente. Debido a la vulnerabilidad del hombre y sus posesiones frente a dicho fenómenos, durante los últimos siglos, el hombre ha actuado sobre el medio para protegerse, con mayor o menor éxito, frente a la acción del mar, construyendo obras de defensa y protección costera.

En términos geofísicos la zona costera se caracteriza por representar la interfaz entre el mar y la tierra emergida. Esta estrecha franja se encuentra sin duda entre las zonas más dinámicas del planeta, dado que en ella interactúan el mar, la atmósfera y la tierra sólida. En particular, procesos como el oleaje, el viento y las mareas interactúan mutuamente y son fuertemente afectados por la geomorfología local, a diferentes escalas espaciales y temporales.

Un buen ejemplo de la complejidad de la dinámica marina en la zona costera lo representan las ya citadas inundaciones de dicha zona, provocadas, generalmente, por la combinación de diversos procesos oceanográficos, en su mayoría de naturaleza aleatoria. Un tipo de inundación costera sustancialmente diferente al aquí considerado es el generado por la incidencia de Tsunamis sobre una zona costera. Aunque con graves repercusiones, los Tsunamis son un fenómeno muy puntual, tanto espacial como temporalmente. Por el contrario, las inundaciones costeras provocadas por la combinación de niveles del mar elevados y temporales de oleaje representan un fenómeno que afecta de forma recurrente prácticamente a todas las costas de baja elevación expuestas a temporales de oleaje.

Los distintos factores físicos que contribuyen a la generación de fenómenos de inundación costera del tipo considerado en el presente trabajo se comentan brevemente a continuación y se ilustran esquemáticamente en la figura 1. Una exposición detallada puede encontrarse en Dean y Dalrymple (2002).

La cota máxima alcanzada por el nivel de agua sobre la zona de costa emergida resulta fundamentalmente de la ocurrencia conjunta de temporales de oleaje y niveles del mar altos. La elevación del nivel medio del mar incluye normalmente, además de la contribución de la marea astronómica generada por las fuerzas de atracción gravitatoria entre los elementos del sistema dinámico Tierra-Luna-Sol, varios términos inducidos por efectos meteorológicos y por la transformación del oleaje en aguas de profundidad reducida.

Las condiciones meteorológicas reinantes pueden provocar variaciones del nivel medio del mar local dando lugar a lo que se denomina marea de origen meteorológico, o *storm surge*. Éste fenómeno presenta dos contribuciones diferenciadas. Así, la presencia de una borrasca conlleva un descenso de la presión atmosférica que induce un ascenso del nivel del mar, efecto que recibe el nombre de sobreelevación barométrica, mientras que el campo de vientos asociado a dicha borrasca puede producir el arrastre de la masa de agua hacia la costa, provocando un aumento del nivel medio adicional por acumulación del agua contra los contornos sólidos, conocido como elevación por arrastre del viento, o *wind-setup*.

Por otro lado, al propagarse sobre aguas de profundidad reducida el oleaje comienza a experimentar transformaciones significativas por efectos de fricción con el fondo. Cuando la profundidad se reduce sustancialmente, respecto a su altura, el oleaje comienza a disipar energía en forma de rotura y la altura de ola disminuye progresivamente hasta que su estructura termina por desaparecer. Parte de la energía transportada por el oleaje hacia la zona de rompientes se invierte en generar oscilaciones del nivel medio del mar de tipo infra-gravitatorio, conocidas con el nombre de *wave-setup*, que se superponen a las antes citadas contribuyendo al aumento del nivel medio del mar en la zona. Esta contribución puede ser significativa durante una tormenta. Otra parte de la energía remanente se invierte en inducir el ascenso de una cierta cantidad de agua sobre la cara de las estructuras, naturales o artificiales, sobre las que incide el oleaje. Este último fenómeno recibe el nombre de remonte, o *wave-runup* (ver figura 2). Es importante resaltar que tanto el *wave-setup* como el *runup* representan desplazamientos verticales inducidos por la disipación energética del oleaje, mientras la zona de la superficie por la que asciende y desciende la lámina del agua tras la rotura recibe el nombre de *zona de swash*. Un análisis detallado de estos fenómenos puede encontrarse en Svendsen, I. A., (2006).

El fenómeno de la inundación puede ser definido como la ocupación temporal por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de ésta. En general, la combinación de los procesos descritos anteriormente tiene como resultado la inundación, de forma rítmica, de la zona emergida hasta diferentes cotas de nivel, dependiendo de las características e intensidad de cada uno de ellos, sus interacciones mutuas y con los contornos sólidos. La cota de inundación alcanzada en cada caso queda definida por el valor máximo del remonte, motivo por el cual este parámetro resulta de enorme interés en la planificación costera, al ser empleado para identificar el riesgo de inundación y decidir la localización de posibles infraestructuras en una zona dada.

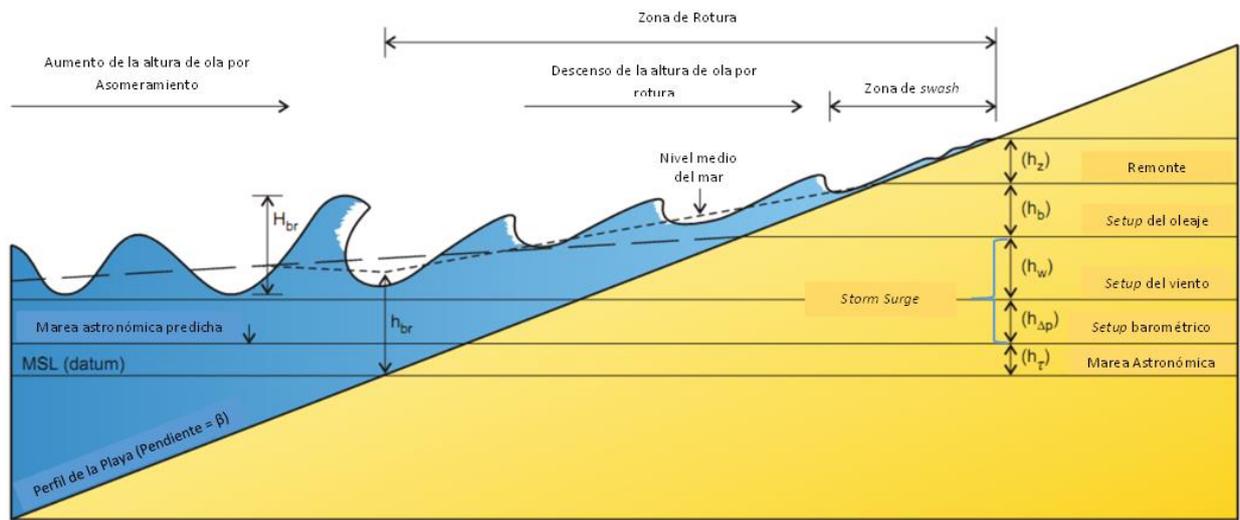


Figura 1: Ilustración esquemática de las contribuciones a la inundación costera por de remonte del oleaje.

Entre los procesos físicos involucrados en el fenómeno de inundación costera, sólo la marea astronómica posee un carácter determinista. Tanto el *storm-surge* como el oleaje tienen una naturaleza aleatoria. Además, el remonte del oleaje depende de otros factores como la pendiente y morfología de la zona de rompientes y de la playa, así como de posibles barreras naturales o artificiales. A todo lo anterior hay que añadir los efectos de la no-linealidad de la transformación del oleaje, la refracción, difracción y reflexión del mismo, así como otros factores relacionados con la naturaleza del fondo, tales como porosidad, rugosidad, permeabilidad, etc. Consecuentemente, los valores máximos de remonte constituyen una variable aleatoria que cuyo comportamiento debe ser caracterizado en el dominio de los procesos estocásticos. Por ello, el remonte no suele ser expresado mediante su valor máximo sino en términos de un parámetro que representa la cota vertical superada por un determinado porcentaje de olas.

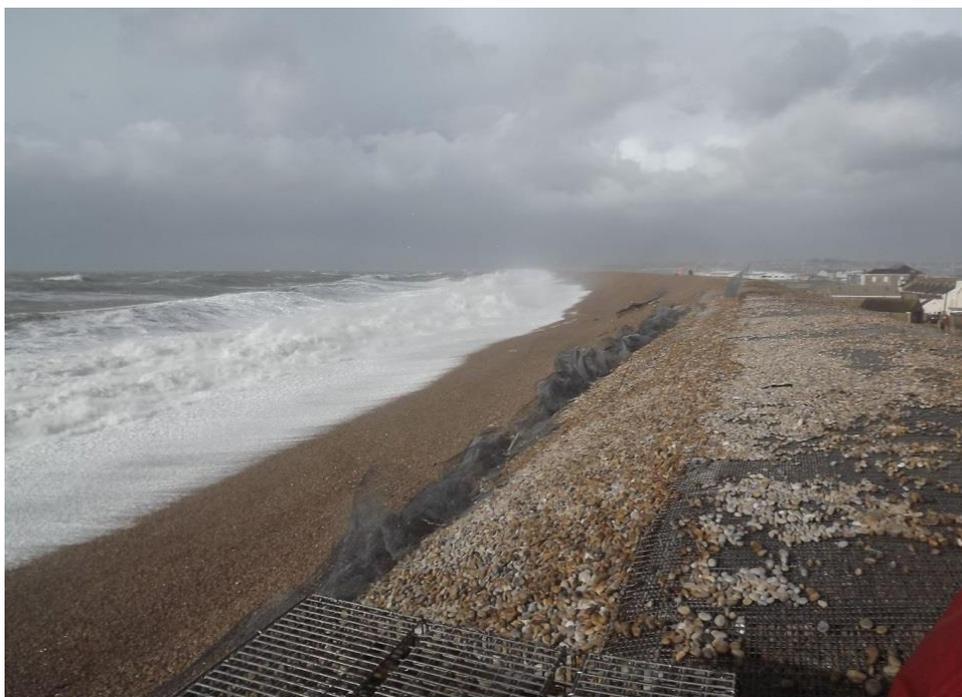


Figura 2: Ilustración del fenómeno de remonte del oleaje y acciones contra la erosión (Ian West)

La ocurrencia de condiciones severas de oleaje durante periodos en los que el nivel medio del mar es considerablemente elevado propicia la inundación de zonas extensas de tierra emergida, rebasando incluso posibles estructuras de defensa existentes. En consecuencia, éste fenómeno natural suele tener importantes repercusiones adversas, especialmente en zonas de baja altitud, en términos de vidas humanas, daños en infraestructuras, erosión de playas y acantilados, etc.

La necesidad de desarrollar sistemas de protección frente a la acción del mar, especialmente del oleaje, ha generado un aumentado considerable del conocimiento científico sobre el comportamiento de los procesos costeros durante el último siglo. No obstante, en el caso particular de la determinación de la cota de inundación, la elevada complejidad del fenómeno convierte su adecuada caracterización en una tarea extraordinariamente complicada. En consecuencia, aunque todo el esfuerzo realizado durante más de medio siglo ha permitido lograr avances notables en este campo, su conocimiento dista mucho de ser suficiente para posibilitar su caracterización en condiciones generales. La mayoría de los modelos propuestos para predecir el remonte máximo han sido desarrollados mediante estudios en canales hidrodinámicos y pueden presentar limitaciones al ser aplicados en playas naturales. Otros modelos están basados en estudios experimentales realizados en una o en unas pocas playas naturales, de modo que su aplicabilidad en playas con dinámica y geomorfología diferente puede no ser adecuada.

No obstante, teniendo en cuenta la importancia de la estimación de la cota de inundación, con el fin de diseñar e implementar planes para minimizar los riesgos asociados a los mismos, así como para realizar una adecuada planificación de la zona costera, resulta imprescindible poder evaluar la probabilidad de ocurrencia e intensidad de eventos de inundación costera peligrosos.

En el párrafo anterior se ha hecho uso de términos como peligro, riesgo y probabilidad de ocurrencia. En realidad, todos estos términos están relacionados entre sí y con otros conceptos en el contexto de lo que se conoce como análisis de riesgos. En este sentido, el concepto de riesgo tiene un significado diferente del empleado coloquialmente y entraña una idea de gran importancia, complementaria con el concepto de probabilidad.

Para exponer con claridad dicha idea resulta interesante introducir el concepto de *evento* como aquel que se presenta cuando una variable aleatoria, característica de un proceso hidrodinámico potencialmente peligroso, alcanza una magnitud igual o superior a un cierto valor umbral prestablecido arbitrariamente. Así, por ejemplo, se produce un fenómeno de inundación costera cuando el remonte del oleaje, combinado con otros factores citados previamente, alcanza o supera una determinada cota. Es decir, cuando la cota de inundación alcanza o supera una elevación dada del terreno.

El que un fenómeno natural sea potencialmente peligroso implica la posibilidad de que la ocurrencia de un evento de magnitud dada sea capaz de provocar efectos indeseables sobre el ser humano o sus bienes, o no. La diferencia entre un evento normal y un *evento extremo o peligroso* radica únicamente en el grado o nivel de intensidad, y por tanto de su rareza o baja frecuencia de ocurrencia. Nótese que la magnitud de un evento raro, asociado a un umbral considerablemente elevado, es inversamente proporcional a su probabilidad de ocurrencia. Esto es, la frecuencia de ocurrencia de eventos débiles es superior a la de eventos moderados, y los eventos de intensidad muy alta tienen una posibilidad de ocurrencia muy baja.

Por otra parte, la ocurrencia de un evento raro, de escasa posibilidad de presentación o de magnitud elevada, no implica necesariamente que este tenga consecuencias indeseables sobre un sistema, natural o artificial, localizado en la zona y momento de presentación. Para que esto ocurra es necesario que dicho sistema se encuentre expuesto al fenómeno y que sea vulnerable al mismo, tal como se ilustra en el denominado triángulo del riesgo, mostrado en la figura 3. Naturalmente, los grados de exposición y vulnerabilidad variarán en función de la magnitud del evento.

En la literatura pueden encontrarse diversas definiciones de riesgo. De manera informal, el término riesgo suele ser utilizado para hacer referencia a la posibilidad de que ocurra una determinada amenaza, o evento peligroso, sin considerar las posibles consecuencias del mismo. El concepto de riesgo combina ambos elementos y, en consecuencia, el riesgo puede ser definido como una cantidad derivada de la posibilidad de que un determinado evento ocurra y la magnitud de sus consecuencias indeseables.

Tanto la posibilidad de ocurrencia de un evento como la magnitud de sus consecuencias pueden ser expresadas en términos cualitativos o cuantitativos. En el presente trabajo se adopta un enfoque cuantitativo para expresar el riesgo asociado al fenómeno de la inundación costera. En este contexto, una definición bastante aceptada de riesgo es la dada por Kaplan y Garrick (1981), quienes definen el riesgo como un conjunto de escenarios, S_i , cada uno de los cuales posee una probabilidad de ocurrencia, P_i , y una consecuencia, X_i .

Un concepto estrechamente ligado a la noción de riesgo es el de *análisis de riesgos*, entendido como un procedimiento sistemático y riguroso para obtener una medida de la probabilidad de ocurrencia de un cierto evento peligroso y sus efectos indeseables. La necesidad de cuantificar el riesgo reside en posibilitar la toma de decisiones y la ejecución de acciones coherentes conducentes a minimizar el riesgo, proceso conocido como *gestión de riesgos*. No obstante, es importante tener en mente el notable grado de subjetividad que posee, y la dificultad que entraña, la asignación de un valor numérico a las consecuencias indeseables asociadas a la ocurrencia de un evento peligroso en un medio expuesto y vulnerable al mismo.



Figura 3: Triangulo del riesgo (Crichton, 1999)

A modo de resumen de todo lo anterior, la gestión de las zonas costeras, tan dinámicas y densamente pobladas, representa un enorme reto para el hombre. Por ello, los avances en este sentido resultan de gran interés para los entes responsables de su planificación. En particular, comprender la dinámica de los procesos físicos que tienen lugar en la costa y conocer sus impactos potenciales sobre el comportamiento e integridad de esta estrecha franja del planeta, son aspectos clave para poder valorar de forma cuantitativa el grado de riesgo asociado a los mismos y posibilitar una gestión adecuada de la costa.

En este contexto, el objetivo principal del presente trabajo es aplicar una metodología robusta para la evaluación cuantitativa del nivel de riesgo asociado a los eventos de inundación costera por remonte y, en su caso rebase, del oleaje en la playa de Boca Barranco, en la costa Este de la Isla de Gran Canaria, España.

Para cumplir el objetivo antes planteado se emplea la metodología desarrollada por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa, LNEC, (Neves et al., 2010, Santos et al., 2011, Silva et al., 2011, Reis et al., 2011, Neves et al., 2012 Rocha et al., 2013; Poseiro et al., 2013).

El trabajo se ha estructurado de la siguiente forma. Tras éste primer capítulo introductorio, en el que se han expuesto la motivación y el objetivo de trabajo, en el segundo capítulo se describen diferentes aspectos característicos relevantes de la zona de estudio y que justifican su elección. En el capítulo tres se indican las principales características de las bases de datos oceanográficos de partida empleados, se expone la metodología aplicada para disponer de la información requerida para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos de inundación costera. La metodología específica utilizada en la evaluación de la frecuencia de ocurrencia de eventos de remonte de oleaje de diferente magnitud se expone en el capítulo cuatro, conjuntamente con el procedimiento seleccionado para asignar el grado de consecuencia, y los resultados del análisis de riesgos correspondiente. Las principales conclusiones y los posibles trabajos futuros se presentan en el capítulo cinco.

CAPITULO 2

2 ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta una descripción general de la zona de estudio, incluyendo su clasificación en términos de sus posibles usos y su geología, así como la legislación aplicable a la misma como zona de interés científico. Además, en la última sección, se definen los perfiles seleccionados para estimar la frecuencia de ocurrencia de eventos de remonte hasta diferentes umbrales y evaluar el riesgo asociado a los mismos.

2.1 CARACTERIZACION GENERAL

La playa de Boca Barranco está situada en el sector nororiental de la isla de Gran Canaria, abarcando una superficie de 29,6 hectáreas que se reparte entre los términos municipales de Las Palmas de Gran Canaria (93,2%) y Telde (6,8%) (Figura 4). El principal acceso a este espacio lo constituye la Autovía GC-1, a través del enlace que desde la citada vía conecta con el Polígono de Jinámar.

La playa se encuentra en la desembocadura del Barranco de las Goteras y está sometida a diferentes tipos de usos. Además, la zona emergida está declarada como zona SIC (sitio de interés científico) y alberga infraestructuras adyacentes de gran valor social y económico.

La zona adyacente a la playa ha experimentado cambios significativos desde principios de siglo hasta la actualidad, tal como queda reflejado en las fotografías aéreas mostradas en la figura 5. Entre los cambios más notables destacan la construcción del centro comercial Las Terrazas y sus vías de accesos.

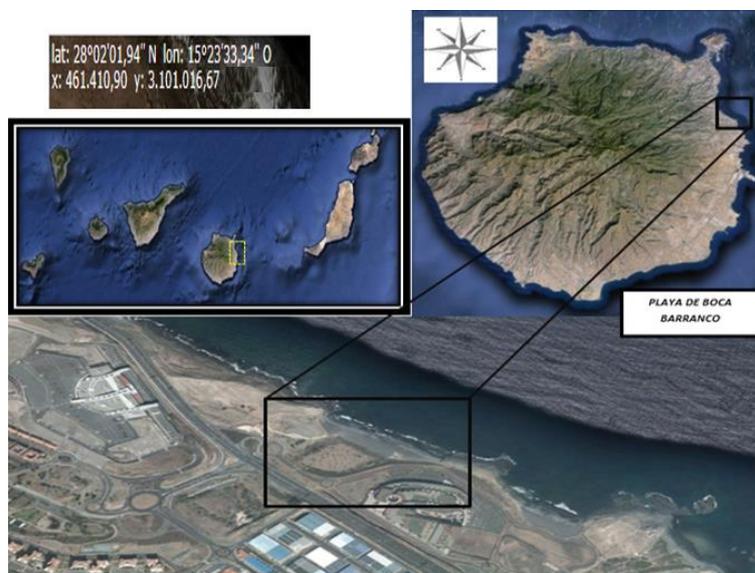


Figura 4: Zona de estudio (Google Earth 2014)

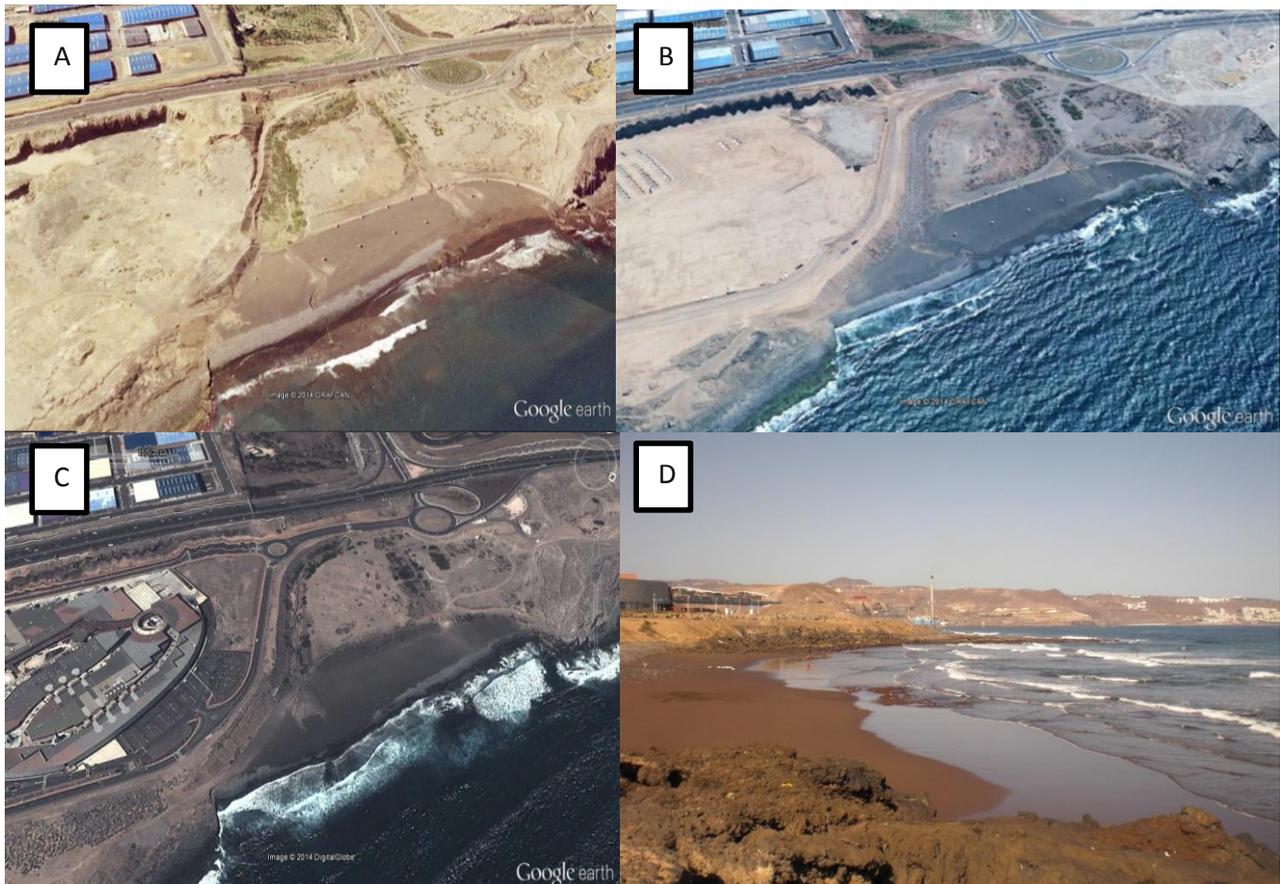


Figura 5: Revisión histórica de la zona: A) 2000; B) 2004, C) 2013, D) En la actualidad.

2.2 CARACTERIZACION DEL SUELO

El Instituto Geográfico Nacional (IGN), centro nacional de referencia en ocupación del suelo, dependiente del Ministerio de Medio Ambiente, es la institución responsable de coordinar la información en materia de ocupación del suelo (coberturas y usos) en España. De la información suministrada por dicho organismo para los diferentes sectores de la zona de estudio, indicados con el símbolo de información, se desprende que:

La totalidad de la playa de Boca barranco está constituida por playas, dunas y arenales (PDA), tal como se ilustra en la Figura 6a.

El 45% de las zonas inmediatamente adyacentes (Figura 6b) son catalogadas como suelos desnudos, zonas carentes o con escasa vegetación, mientras que el 55% restante no es considerado como tal.

Por otra parte, se identifican dos subzonas consideradas como suelos no edificados (Figura 6c) y otros dos sectores clasificados como de uso comercial y oficinas (Figura 6d).

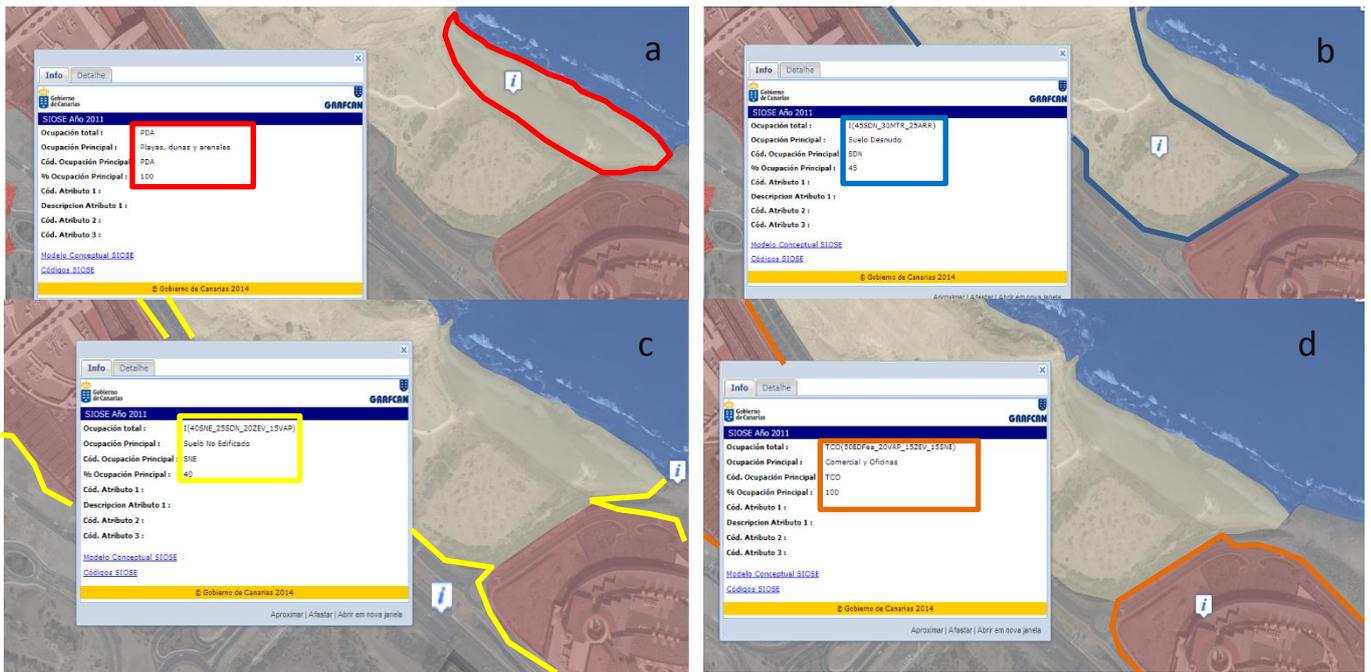


Figura 6: Identificación del tipo de ocupación del suelo en la zona de la playa de Boca Barranco como: (a) zona PDA, (b) Suelo desnudo, (c) no edificado, (d) comercial y oficinas. (IGN, 2011).

2.3 GEOLOGIA DE LA ZONA

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio presenta una importante variación, tal como se ilustra en el mapa geológico de sombras de la figura 7.

En la zona de la playa se encuentran depósitos que son básicamente arenas y arenas con cantos, con dunas asociadas en algunas ocasiones (a). En las zonas adyacentes a la playa se encuentran otros tipos de materiales geológicos, básicamente Piroclastos con espesores de 1,5 - 4 m (b), depósitos de 1 a 5 m de espesor, formados por arenas oscuras y gravas (c), y lavas basálticas, basáltico olivinico-piroxénicas, y tefríticas.

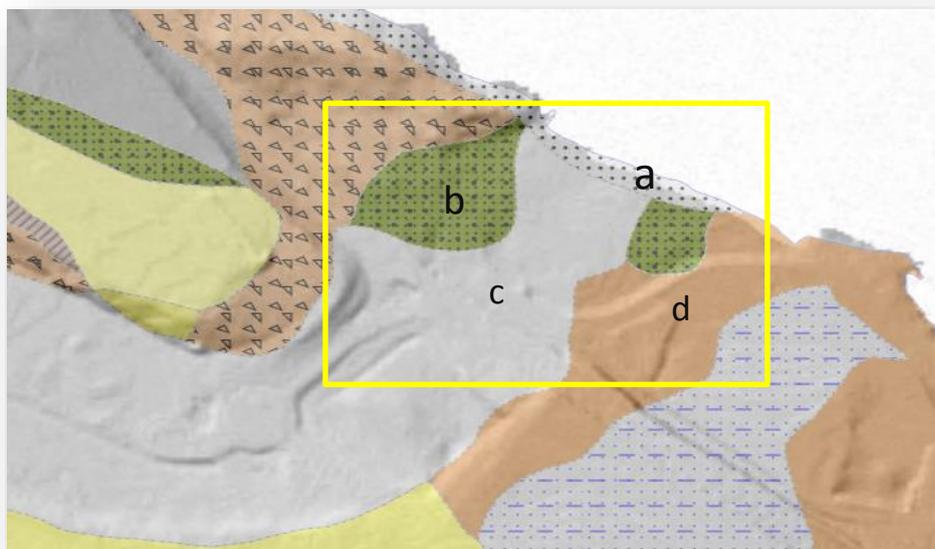


Figura 7: Modelo de sombras geológico de la zona de la Playa de Boca Barranco (GRAFSCAN, 2014)

2.4 ORDENACION DEL TERRITORIO Y LEGISLACION VIGENTE

Los límites de este espacio protegido se encuentran descritos literal y cartográficamente en el anexo del Decreto Legislativo 1/2000, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Texto Refundido de las Leyes de Ordenación del Territorio de Canarias y de Espacios Naturales de Canarias (C-29). Dicho decreto publicado en el BOC 60 de 15/05/2000. Según el mismo, la zona de estudio está incluida en el denominado sitio de interés científico (SIC) de Jinámar.

La finalidad de protección de cualquier SIC, atendiendo a la definición de dicha categoría establecida en el artículo 48.13 es: "... la preservación de elementos naturales de interés científico, especímenes o poblaciones animales o vegetales amenazadas de extinción o merecedoras de medidas específicas de conservación temporal que se declaren." En el caso concreto de la zona de estudio, y de acuerdo con el artículo 240.5, el objetivo primordial es la preservación de la especie *Lotus kunkelii* y su hábitat (Figura 8). Esta zona alberga una población de dicha especie endémica, catalogada como amenazada y que requiere protección especial.



Figura 8: Imágenes de la *Lotus kunkelii* y su hábitat en la zona de la Playa de Boca Barranco

El artículo 22.2 del decreto citado, confiere a los instrumentos de planeamiento de los Espacios Naturales Protegidos la capacidad de establecer zonas diferenciadas dentro del ámbito de estos espacios según sus exigencias de protección. En el caso concreto del Sitio de Interés Científico de Jinámar, la necesidad de compatibilizar la protección estricta de la especie *Lotus kunkelii* y su hábitat con el uso público del espacio natural, ha motivado la zonificación del SIC en tres sectores con distintos niveles de uso y protección (Figura 9). Estos son, una zona de exclusión o acceso prohibido (ZEX), otra de uso moderado (ZUM) y una tercera de uso general (ZUG).

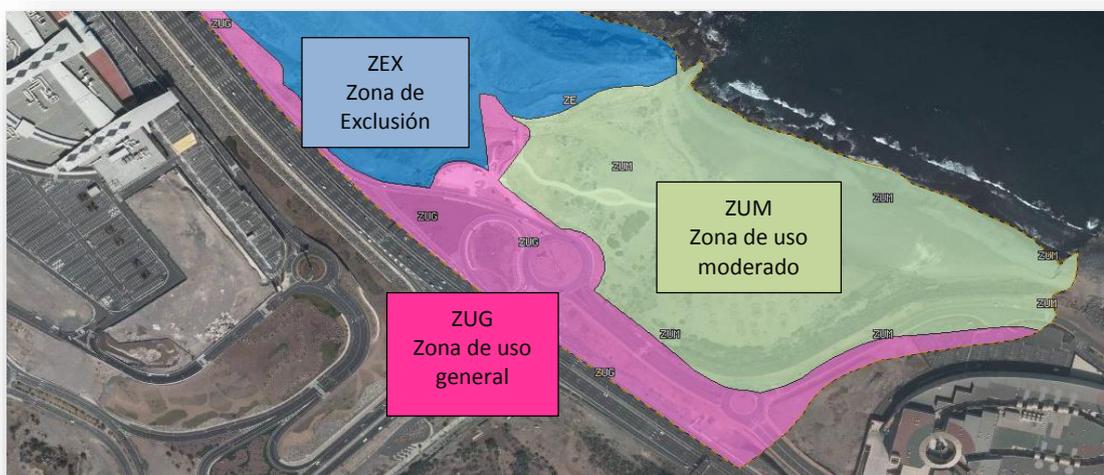


Figura 9: Descripción de los usos establecidos por decreto en la zona.

De acuerdo con el artículo 22.7 del decreto Legislativo 1/2000, de 8 de mayo, respecto a la categoría del suelo la zona de estudio sólo podrá establecer en su ámbito *suelo rústico*. En base a lo anteriormente expuesto, se clasifica el ámbito del Sitio de Interés Científico de Jinámar como Suelo Rústico, estableciéndose las categorías que a continuación se señalan, cuyos límites aparecen reflejados en el Plano de Clasificación y Calificación del Suelo (Figura 10).



Figura 10: Clasificación del suelo de la zona de estudio como suelo rústico

2.5 DEFINICION DE LOS PERFILES ESTUDIADOS

Para realizar la estimación de la frecuencia de ocurrencia de eventos de remonte hasta diferentes umbrales y evaluar el riesgo asociado a los mismos en la zona de estudio se han seleccionado seis perfiles, aproximadamente perpendiculares a la línea de orilla, tal como se ilustra en la Figura 11. La selección de los perfiles se ha realizado de modo que cada uno de ellos atraviese los tres sectores definidos en base a los criterios de cobertura y usos del suelo indicados en la sección 1.2. Es decir, zona de playa, zona con cobertura vegetal y suelo no urbanizado o de uso comercial. Esta última zona engloba todos los sectores conteniendo infraestructuras. El perfil 0 representa un caso particular por no atravesar la zona con cobertura vegetal.

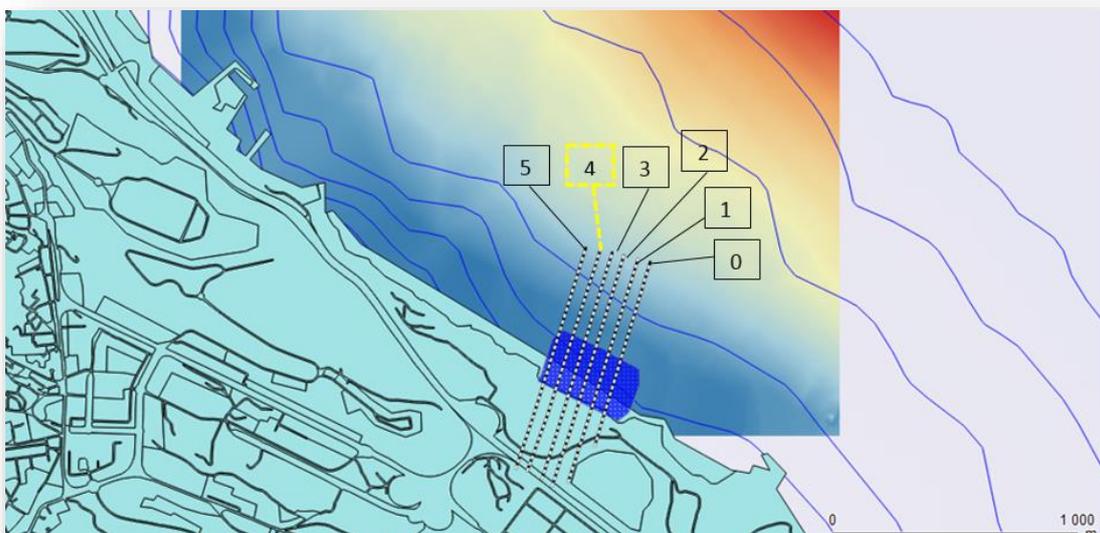


Figura 11: Mapa de la zona, con la batimetría, la playa y los perfiles estudiados.

Las bases de datos batimétricas y topográficas empleadas para obtener estos perfiles se describen en el siguiente capítulo.

A modo de ejemplo, en la figura 12 se representa el perfil número 4, indicando, en el eje y, la cota Z en metros referida al cero hidrográfico y, en el eje x, la distancia horizontal desde la batimétrica -10. Sobre el perfil se indican las diferentes zonas atravesadas por el mismo, mientras que en la imagen incluida en dicha figura se muestra su trazado en planta.

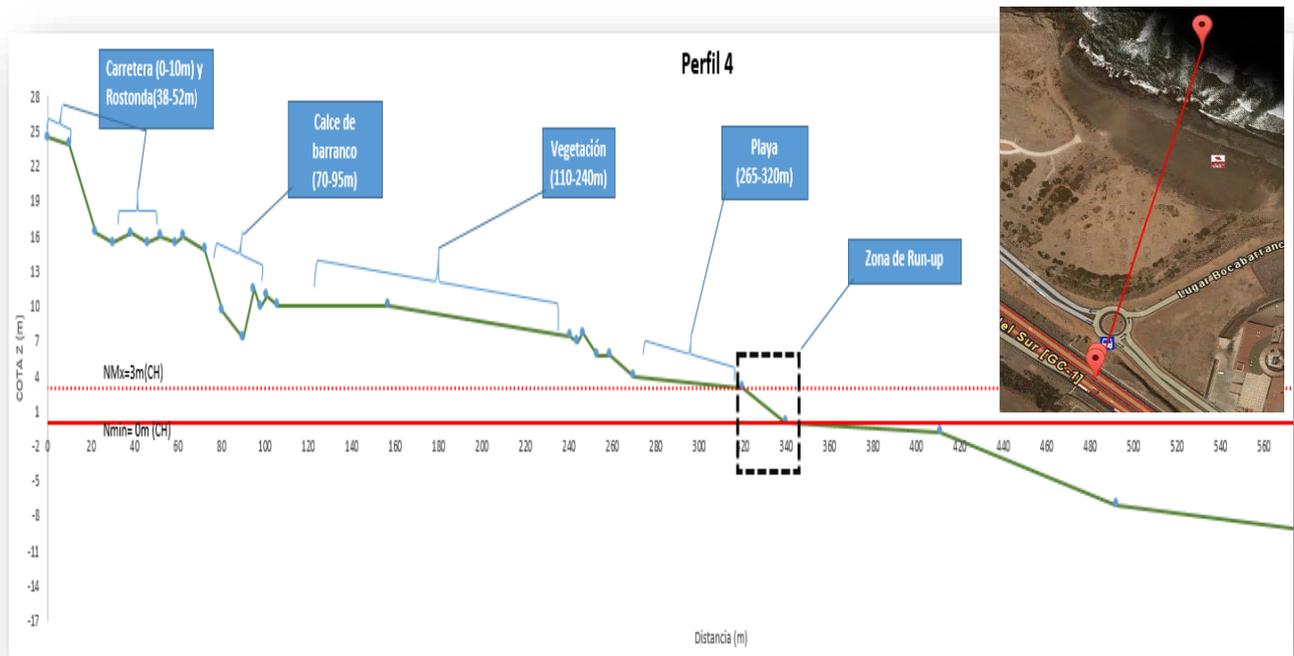


Figura 12: Sección del terreno definida por el perfil N°4 y trazado en planta del mismo.

CAPITULO 3

3 CARACTERIZACION DE LA AGITACION MARITIMA EN LA ZONA

El conocimiento adecuado del clima marítimo resulta imprescindible para el adecuado diseño, construcción y explotación de diversos tipos de infraestructuras, tales como estructuras de protección costera y portuaria, estructuras de explotación petrolífera “offshore”, o actividades relacionadas con la navegación marítima y la operatividad de las infraestructuras destinadas a dar abrigo a las embarcaciones. Naturalmente, dada la naturaleza del fenómeno de inundación costera, su caracterización requiere un adecuado conocimiento de las condiciones de oleaje, mareas astronómicas y meteorológicas como punto de partida.

Raramente se dispone de datos reales obtenidos mediante dispositivos de medida adecuados para abordar la caracterización del clima marítimo en las zonas en las cuales se pretende actuar. Este hecho es especialmente frecuente en zonas costeras, donde realizar medidas rutinarias de la dinámica marina, en particular del oleaje, resulta extraordinariamente complicado. No obstante, con cierta frecuencia es posible hacer uso de información correspondiente a zonas de elevada profundidad, alejadas de los contornos costeros, y transferirla hasta la zona de interés recurriendo a procedimientos adecuados para tal fin y que serán brevemente explicados en secciones posteriores.

En este capítulo se describen las principales características de los datos de partida empleados y se presentan los fundamentos básicos de los modelos utilizados para transferir dicha información a la zona de interés, así como la metodología aplicada para ello.

3.1 DATOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO

La base de datos oceanográficos empleados en el presente trabajo incluye registros de marea medidos en el puerto de Las Palmas y series de parámetros de oleaje derivados mediante modelos de predicción y retroanálisis en zonas de aguas profundas relativamente próximas en puntos próximos a la zona de estudio. Estos conjuntos de datos han sido suministrados por Puertos del Estado y son descritos de forma detallada en los siguientes apartados.

3.1.1 Registros de niveles del mar

Los datos de niveles del mar han sido obtenidos mediante dos mareógrafos instalados por Puertos del Estado en el puerto de Las Palmas (figura 13) durante períodos de tiempo sucesivos, con un pequeño intervalo de coincidencia. Estos períodos son entre julio de 1992 y enero de 2009 para el mareógrafo “Las Palmas” y desde 2009 hasta hoy para la estación “Las Palmas II” (figura 14).

Este conjunto de datos incluye tres variables, además de fecha y hora de medida. Estos son: el nivel del mar observado, la marea astronómica predicha y los residuos meteorológicos, obtenidos éstos últimos como diferencia de los dos anteriores. La variable utilizada en este trabajo es el nivel del mar observado, puesto que éste incluye tanto la marea astronómica como los efectos de origen meteorológico, o *storm-surge*.

Debido a la proximidad entre los puertos de Las Palmas y la playa de Boca Barranco y las características de la onda de marea, resulta aceptable admitir que los registros obtenidos en el primero de ellos son representativos del comportamiento del nivel del mar en la zona de interés.

La marea en la isla es de tipo semidiurno, con dos pleamares y dos bajamares ligeramente diferentes cada día, tal como se observa en los datos obtenidos para el día 01 de diciembre de 1992, (figura 15-A). La figura 15B muestra los niveles medios diarios para el año de 2012 del mareógrafo Las Palmas 2.

En la tabla 1 se muestran los valores característicos de los niveles del mar absolutos y la marea astronómica durante las pleamares y bajamares ordinarias, así como las pleamares y bajamares correspondientes a condiciones de mareas vivas y mareas muertas.



Figura 13: Situación del mareógrafo de Las Palmas. Fuente: www.puertos.es

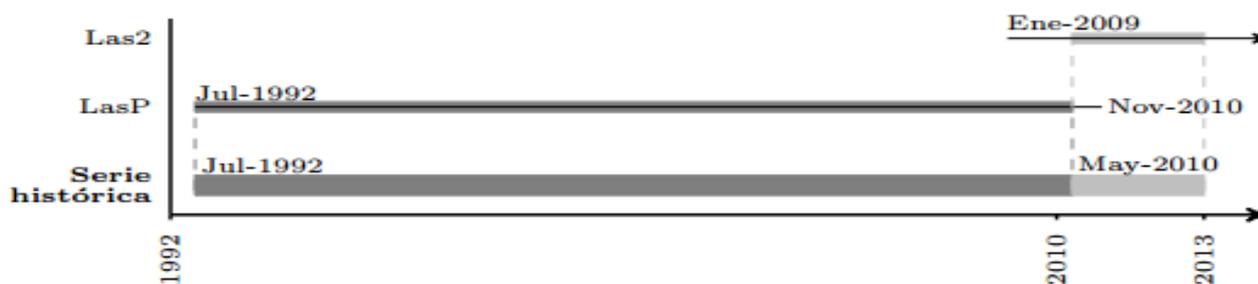


Figura 14: Cobertura temporal de las series obtenidas con los mareógrafos del Puerto de Las Palmas.

Tabla 1: Estadísticas de los niveles en el mareógrafo de Las Palmas (en cm.) Fuente: www.puertos.es

	Niveles (cm)							
	Observados				Marea astronómica			
	Máx	Mín	Med	D.E.	Máx	Mín	Med	D.E.
Pleamar	319	169	239	27	311	172	238	26
Bajamar	146	0	76	26	140	13	78	25
Pleamar viva	319	244	278	16	311	246	276	15
Bajamar viva	112	0	43	18	73	13	44	14
Pleamar muerta	258	169	199	12	223	172	198	11
Bajamar muerta	146	82	116	12	140	94	116	10

Los valores de la tabla 1 están referidos al cero del mareógrafo, que no coincide con el cero hidrográfico. A todos los valores suministrados por Puertos del Estado se les aplicó una corrección de -0,14 m. para referirlas al cero hidrográfico, tal y como se indica en los protocolos y en los archivos de información del mareógrafo (figura 16). En consecuencia, los cálculos han sido efectuados para un rango de niveles del mar entre los -0,14 y los 3,05 m.

El mareógrafo de Las Palmas lleva operando desde 1992 y es desde entonces cuando comienza el rango de datos utilizados en este trabajo. Es decir, el período de datos de niveles del mar y oleaje considerado cubre un rango superior a 20 años (1992-2013).

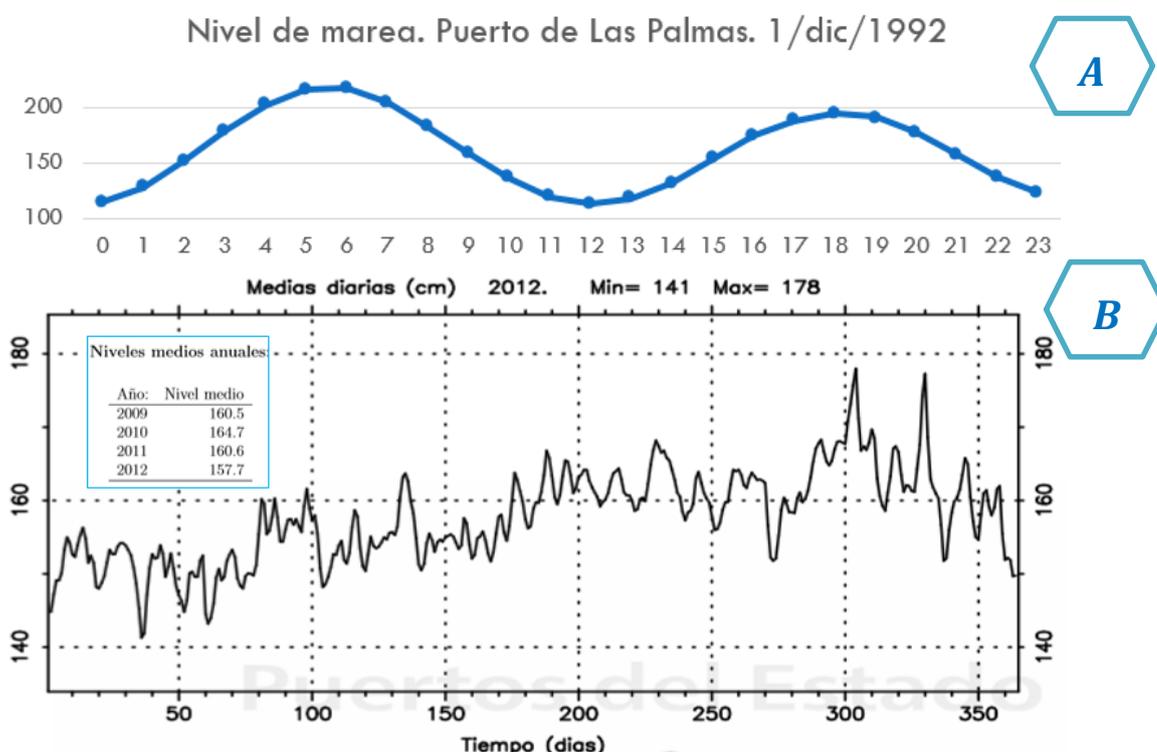


Figura 15: A) Variación del nivel de marea para el día 01 de diciembre de 1992 en el puerto de Las Palmas. B) Registros de la variación del nivel medio diario en el puerto de Las Palmas en 2012. El cuadro interior indica los niveles medios anuales en el periodo 2009-2012 (REDMAR 2012).

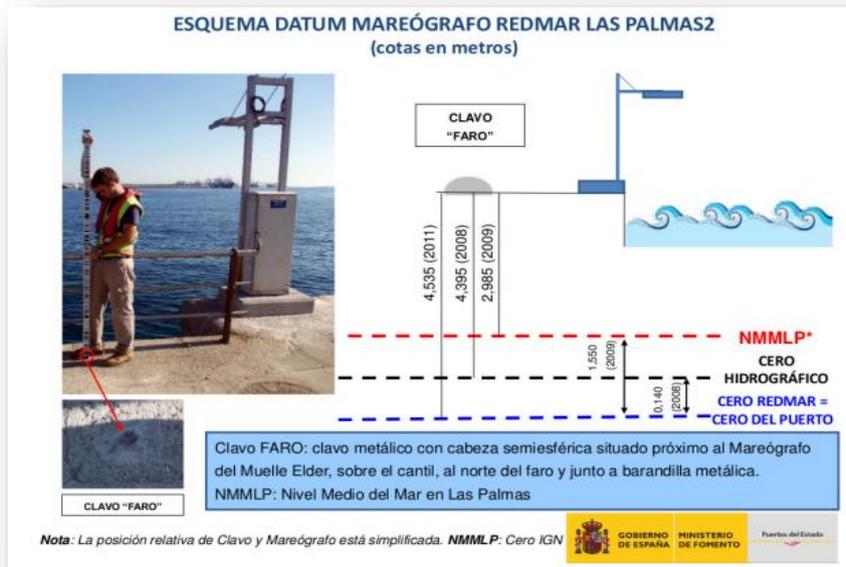


Figura 16: Relación de medida entre mareógrafo LP y cero hidrográfico. Fuente: www.puertos.es

Es importante destacar que en el presente estudio cada condición de oleaje ha sido propagada con el nivel de marea correspondiente, motivo por el cual los registros de nivel de marea, cuyo inicio es posterior al comienzo de las series de oleaje disponibles, actúan como factor limitante en la extensión temporal de las bases de datos empleados.

3.1.2 Registros de oleaje

Próxima a la zona de estudio se encuentra situada una boya de medida de oleaje. Desafortunadamente dicha boya registra información sobre altura y periodo del oleaje, pero no de su dirección de propagación, lo cual limita fuertemente su uso para propagar el oleaje hacia la zona de estudio. En consecuencia, la información de dicha boya sólo ha sido considerada para la calibración de los datos de retrospección y los resultados de la propagación desde estos.

En el presente estudio se han considerado varios nodos de una malla en los que existe información de oleaje. Esta información puede ser obtenida mediante la aplicación del modelo de WAM, modelo de tercera generación desarrollado por el grupo internacional "Wave Modelling Group" (Komen et al, 1994), al que se le suministra información de campos de vientos que pueden haber sido predichos para instantes futuros, procedimiento denominado predicción, o bien medidos previamente, metodología conocida como retrospección.

La base de datos obtenida en cada nodo de la malla mediante predicción recibe el nombre de WANA, mientras la derivada aplicando una técnica de retrospección es denominada como SIMAR-44. En la figura 17 se muestran los puntos de predicción y retrospección de clima marítimo disponibles cercanos a la playa de Boca barranco.



Figura 17: Zona de origen de los registros de Oleajes utilizados (Fuente: Puertos del Estado).

El análisis preliminar de la climatología del oleaje en ambos nodos revela la gran similitud de las características del fenómeno en ambos puntos. La figura 18 incluye los diagramas polares de altura de ola significativa (parte superior de la figura) y periodo de pico (parte inferior) en función de la dirección de propagación del oleaje, agrupada en ocho sectores direccionales.

A la izquierda de dicha figura se presentan los resultados para el nodo situado al Norte y a la derecha los correspondientes al nodo localizado más al Sur. Estos resultados ponen de manifiesto la semejanza existente entre la información obtenida de ambos nodos. Como consecuencia, se decidió seleccionar sólo el punto situado al norte, denominado 1019013, o punto de HINDCAST NORTE, dado que éste es suficiente para la caracterización del clima marítimo en la zona de interés y carece de sentido realizar la propagación desde dos nodo con comportamiento estadísticamente similar.

A continuación se describen las principales características de los conjuntos de datos asociados al punto de retrospección/predicción considerado.

La incertidumbre asociada a los resultados de una predicción meteorológica es considerablemente mayor que la asociada a un reanálisis. En consecuencia, la información de oleaje derivada mediante una técnica de predicción presenta una incertidumbre significativamente superior a la que presenta la información obtenida mediante retrospección. Por ello, la base de datos de trabajo correspondiente al punto 101913 ha sido configurada empleando los datos de retroanálisis desde 1958 hasta 2001 y completada con los datos de predicción desde 2001 hasta 2013.

Tal como se indicó anteriormente, cada estado de mar debe ser propagado considerando el nivel del mar correspondiente. En consecuencia, la longitud temporal de los registros de marea existentes actúa como factor limitante, de modo que la serie de estados del mar resultante debió ser truncada al periodo 1992-2013, tal como se indica en la figura 19.

Los parámetros de oleaje incluidos en dicha serie son la altura de ola significativa, el periodo de pico y la dirección media de propagación, para cada estado de mar. En la figura 20 se muestra, a modo de ejemplo, la serie de alturas de ola significativa para el nodo y el periodo considerados.

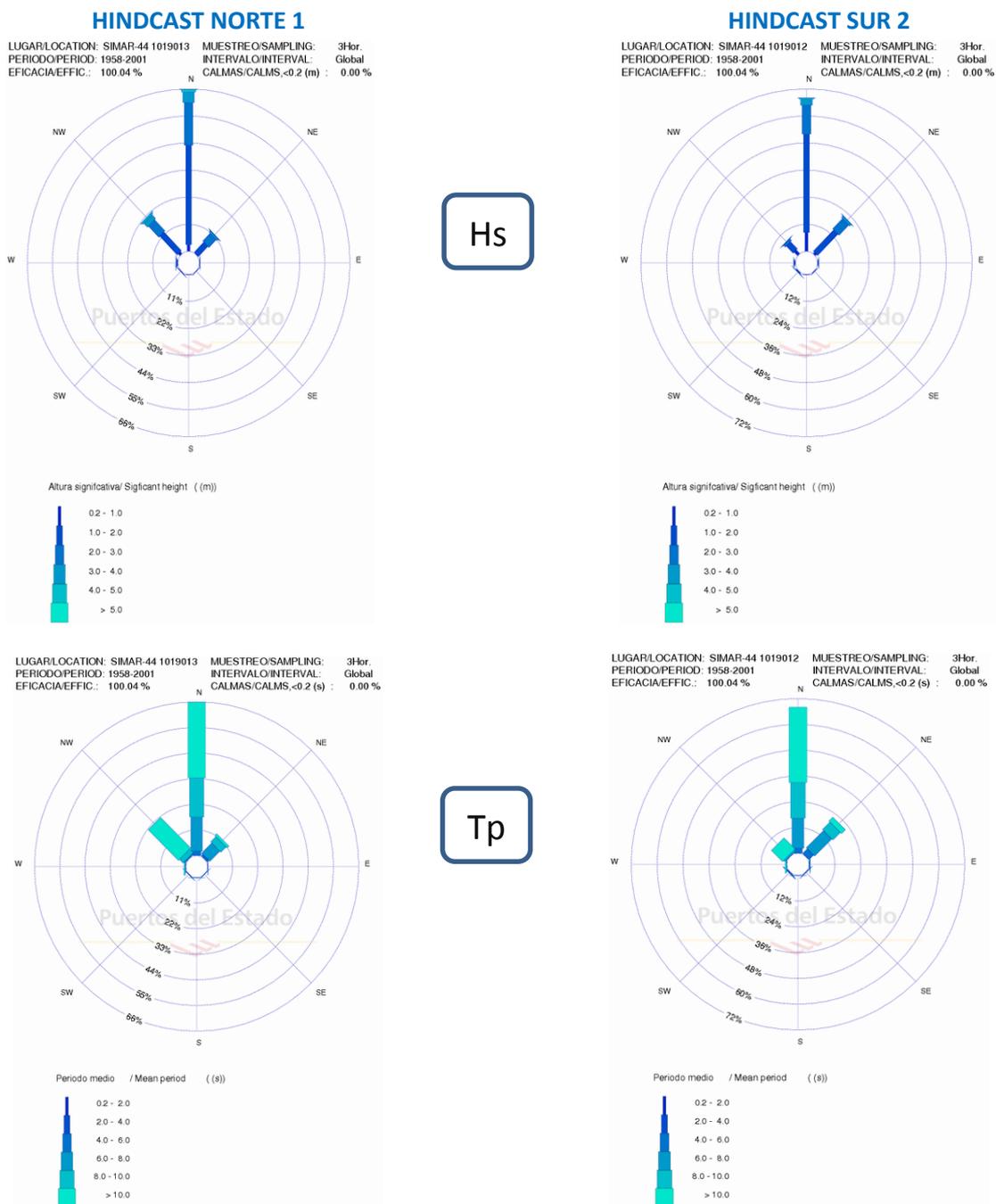


Figura 18- Climatología de comparación entre los valores de los puntos Hindcast norte y sur (Fuente: Puertos del Estado).

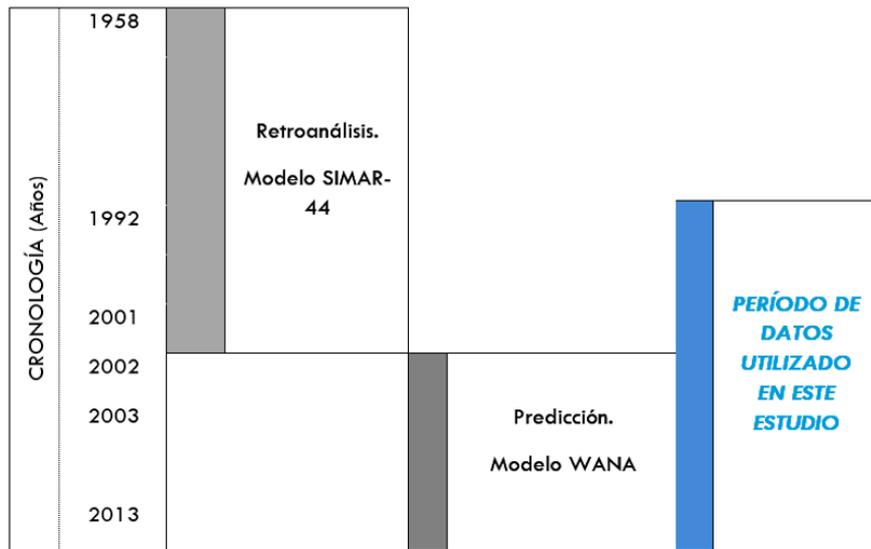


Figura 19: Esquema cronológico de la existencia de los datos de partida y su relación en este trabajo.

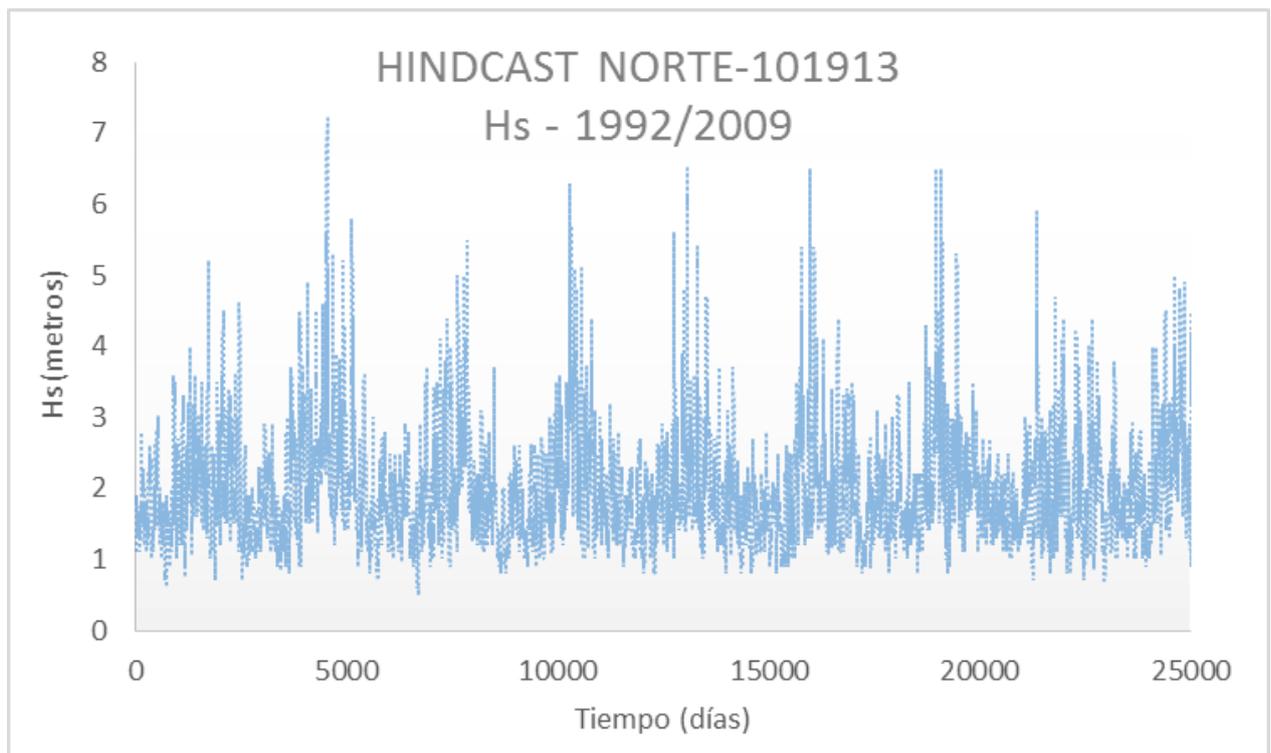


Figura 20: Fragmento de la serie temporal de alturas significativas en el punto 101913 entre 1992 y 2009.

3.1.3 Batimetría y topografía

Un aspecto esencial para la implementación de un modelo de propagación de oleaje sobre profundidades reducidas es la disponibilidad de datos batimétricos con una resolución adecuada. Además, el cálculo del remonte requiere conocer la estructura topográfica de la superficie emergida sobre la cual se produce dicho fenómeno.

La batimetría de la zona de estudio fue obtenida a partir de dos fuentes distintas. Para la batimetría próxima a la playa se utilizaron los datos suministrados por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2005). Ésta información, conseguida en la primera etapa de elaboración del presente trabajo no resultó suficiente para el objetivo perseguido, al no incluir la ubicación de los puntos de obtención de datos (boya y retroanálisis/predicción).

La batimetría de aguas de mayor profundidad, que sí incluía la localización de las fuentes de datos de oleaje, fue proporcionada por el British Oceanographic Data Centre (BODC), con una resolución de malla de 30 arco-segundos.

La información topográfica para caracterizar el relieve de la zona emergida fue adquirida a GRAFCAN y corresponde a medidas altimétricas de gran resolución.

Con el fin de homogeneizar las bases de datos batimétricas, se aplicó la herramienta “Contour” (ArcGIS) al archivo ráster del BODC. En este proceso se empleó un intervalo de contorno de 30 metros. No fue posible seleccionar una mayor resolución, ni tampoco necesario, puesto que se trata de aguas profundas donde la influencia del fondo en el oleaje es despreciable o inexistente y donde las variaciones son pequeñas y lentas.

Una vez homogeneizadas las bases de datos batimétricos, y con el fin de obtener la batimetría correspondiente a la zona sobre la cual se realiza la propagación del oleaje desde el punto de retrospección hasta la zona de interés, se extrajo la información del BODC correspondiente a un cuadrado que incluye dicho punto.

El siguiente paso consistió en interpolar los datos batimétricos para obtener una malla regular, tal como requiere el modelo SWAN. Éste proceso fue realizado haciendo uso de un método de interpolación (“kriging”) y una herramienta de selección de puntos equiespaciados (“fishnet”) a partir de los resultados de la interpolación. Como resultado del proceso anterior se obtuvo la batimetría representada en la figura 21.

El relieve de la superficie comprendida entre la batimétrica de 10 m y la cota superior situada entre 12 y 17 metros de altitud fue obtenido mediante la fusión de los datos batimétricos y topográficos.

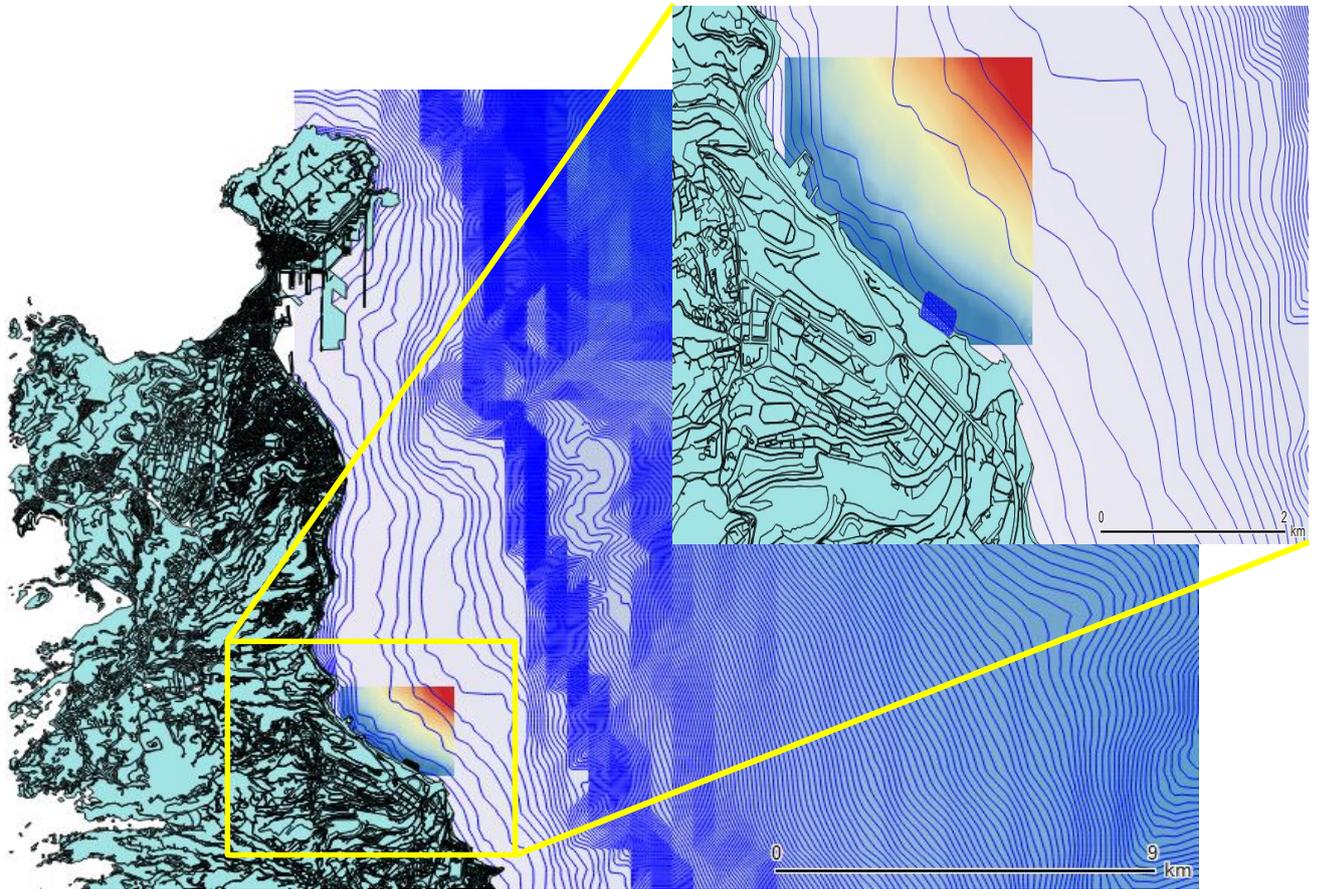


Figura 21: Batimetría de la zona de estudio. En la ampliación se destaca la malla anidada (nested grid).

3.2 MODELIZACIÓN DE LA AGITACION EN LA ZONA COSTERA

3.2.1 Modelo SWAN

Los modelos de tercera generación constituyen el “estado del arte” en el campo de la predicción del oleaje a media y gran escala.

Este tipo de modelo resuelve la ecuación del balance energético, o la ecuación del balance de la acción espectral, sin imponer restricciones previas sobre la forma del espectro del oleaje. Entre esta clase de modelos destaca el desarrollado por el grupo SWAN (Tu Delft, Holanda), denominado también como SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Booji et al., 1999a, 1999b).

La eficiencia de este modelo ha sido puesta de manifiesto por numerosos autores. En particular, se ha observado el buen comportamiento del modelo en comparaciones experimentales de parámetros característicos de estados de mar como altura significativa, período de pico y dirección media.

Este modelo SWAN fue desarrollado con el fin de eliminar la limitación de aplicación en aguas costeras que presentan modelos como el WAM. En general, los modelos de oleaje de tercera generación resuelven la ecuación del balance de energía, también denominada ecuación del transporte de energía, dada por

$$\frac{dE(f, \theta, x, y, t)}{dt} = S$$

Esta expresión describe la evaluación del espectro del oleaje, $E(f, \theta)$, según las dimensiones temporal, t , y espacial (x, y) , siendo S la función fuente expresada en términos de densidad de energía.

No obstante, las versiones más recientes de los modelos espectrales de tercera generación de oleaje consideran el espectro de densidad de acción, $N(f, \theta)$, en lugar del espectro de densidad de energía $E(f, \theta)$. El espectro de densidad de acción es igual a $E(f, \theta)$ dividido por la frecuencia relativa,

$$N(f, \theta) = \frac{E(f, \theta)}{f}$$

Este hecho es debido a que $N(f, \theta)$ se conserva en presencia de corrientes mientras que $E(f, \theta)$ no.

Nótese que si el medio en el que se propaga el oleaje se encuentra asimismo en movimiento con velocidad \vec{u} la frecuencia de una onda que pasa por un punto dado es desplazada por efecto Doppler, de modo que la frecuencia absoluta (observada), σ , será

$$\sigma = f + \vec{k} \cdot \vec{u}$$

mientras f es la frecuencia relativa (intrínseca) correspondiente a la frecuencia medida desde un sistema de referencia que se mueve con la corriente.

En términos de $N(f, \theta)$, la ecuación del balance de energía se transforma en la denominada ecuación del balance de acción y adopta la siguiente forma básica

$$\frac{dN(f, \theta)}{dt} = S/f$$

Es importante destacar que la función fuente es una función extremadamente compleja que representa los mecanismos físicos que controlan los diferentes fenómenos por los cuales se aporta, elimina o redistribuye energía hacia, desde o dentro de un campo de oleaje. Es decir, en ella se encuentra acumulado todo el conocimiento sobre la generación, crecimiento y disipación del oleaje obtenido hasta el momento.

3.2.2 Formulación matemática del modelo

La ecuación del balance de acción anteriormente citada puede expresarse de forma más desarrollada tal como sigue:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

Donde C_x , C_y , C_σ , C_θ representan velocidades de propagación en los espacios x , y , σ , θ , respectivamente.

En esta ecuación, el primer término representa el cambio local de N con el tiempo, el segundo y tercer término representan su propagación en las direcciones x e y con velocidades C_x y C_y , el cuarto término representa el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a las variaciones en la profundidad de la columna de agua y a corrientes mientras el quinto término representa la refracción inducida por la profundidad. El término S_{tot} a la derecha de la ecuación representa el término fuente, tal como se comentó anteriormente.

Para el caso de aguas profundas, la función fuente incluye tres componentes principales que corresponden a la transferencia de energía desde la atmósfera, S_{in} , las interacciones no lineales cuádruples, S_{nl} , que redistribuyen la energía entre determinadas componentes dentro del espectro de energía, y la disipación de energía por inestabilidades inducidas por la saturación energética del oleaje, S_{dis} .

En aguas someras, a los términos anteriores es necesario añadir otros representativos de diferentes fenómenos característicos de zonas de profundidad reducida. Entre estos cabe destacar como mecanismos de disipación la fricción con el fondo, S_{bf} , y la rotura inducida por la profundidad, S_{br} . En relación con la redistribución de energía dentro del espectro, es importante señalar que, mientras las interacciones cuádruples son relevantes en aguas profundas e intermedias, en aguas de profundidad reducida las interacciones triples entre componentes, S_{tri} , despreciables en aguas profundas, adquieren un papel fundamental.

En consecuencia, la función fuente adquiere la expresión:

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} + (S_{bf} + S_{br} + S_{tri} + \dots) \quad (2)$$

Un análisis detallado de cada uno de éstos términos y una aplicación de verificación del modelo pueden encontrarse en Booij et al., 1999 y en Ris et al, 1999, respectivamente.

Para la aplicación de cualquier modelo es necesario definir mallas espaciales de los factores físicos dominantes (fricción del fondo, disipación, etc.) así como una malla computacional sobre la cual el modelo realiza los cálculos espectrales: balance de energía sobre cada celda de la malla computacional. Las mallas pueden tener diferente resolución espacial y extensión. Este procedimiento se ilustra de manera esquemática en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 22.**

La localización de las mallas principal y anidada empleadas en este estudio se muestra en la figura 23, conjuntamente con la batimetría y la ubicación del punto de retrospección/predicción y del mareógrafo.

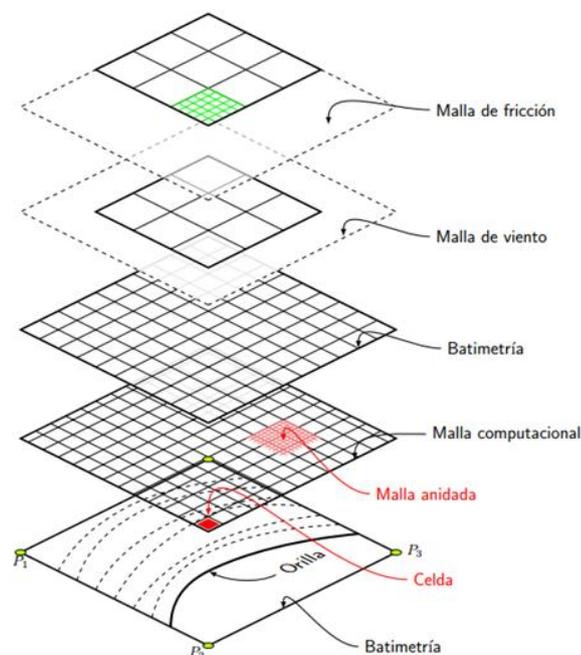


Figura 22: Ilustración de las diferentes mallas empleadas en el modelo SWAN.

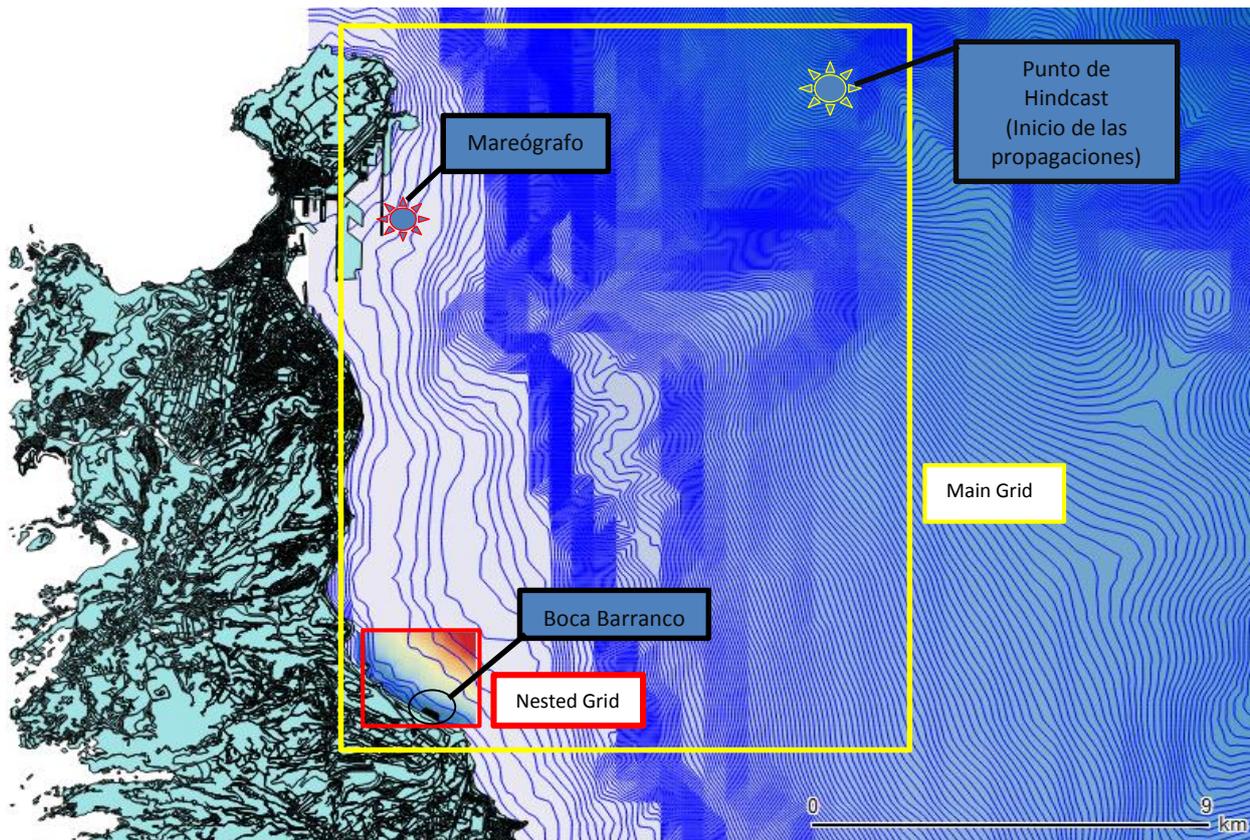


Figura 23: Ilustración de las mallas computacionales, batimetría de la zona y ubicación de puntos de observación de niveles del mar y oleaje

3.2.2.1 Características de las simulaciones

Para realizar la propagación de las condiciones de oleaje en el punto de retroanálisis/predicción viajando en dirección a la zona de interés se eliminaron todos aquellos estados de mar procedentes de los sectores tercero y cuarto.

Tras este proceso de filtrado, el número total de estados de mar a propagar es aproximadamente de 150.000. El tiempo de computación necesaria para realizar la propagación de todas estas condiciones de oleaje es extremadamente elevado. El tiempo medio para propagar un estado de mar es de aproximadamente de tres minutos, de modo que la propagación de todas las condiciones de oleaje implicaría un tiempo de procesado de unos diez meses.

Por razones obvias, se optó por agrupar los estados de mar en intervalos de altura, período de pico y dirección media tal como se indica en la Tabla 2. Para ello, se tuvieron en cuentas los valores máximos y mínimos de los cuatro parámetros característicos (altura de ola, período de pico, dirección y altura de marea) y se agruparon en subdivisiones empleando los incrementos indicados en dicha tabla.

Tabla 2: Tabla con los valores máximos/mínimos y sus intervalos para la propagación.

	Mínimo	Máximo	Intervalo
Hs (m)	0,5	7,5	0,5
Tp (s)	6	22	2
Dirección referida al norte (grados sexagesimales)	0	180	20
Altura de marea	0	3	0,5
Número de ondas a propagar	47.452		

En definitiva, se realizó la propagación en modo estacionario de una situación representativa para cada una de las combinaciones resultantes. De esta manera, las olas a propagar fueron 47.452 en lugar de 150.000 y el tiempo de procesado pasó de diez meses a 25 días para un ordenador. Para finalizar, en la propagación se utilizaron cuatro equipos informáticos, obteniendo los resultados tras aproximadamente cuatro días de cálculos computacionales.

Con las condiciones de agitación en el nodo Hindcast indicado anteriormente se realiza la propagación de dichas condiciones para los puntos de estudios frente la playa cuyas coordenadas se indican en la tabla 3. Como restricción del modelo se recomienda tomar estos puntos sobre la batimétrica de 10m y antes de la zona de rompiente (Figura 24).

Tabla 3: Coordenadas de los puntos de resultados de la propagación.

PUNTOS	COORDINADAS (UTM)(X , Y)
P1	461686.688149 - 3101038.54618
P2	461575.676767 - 3101063.15276
P3	461450.78854 - 3101100.05963
P4	461339.773791 - 3101141.07158
P5	461256.516096 - 3101186.18264
P6	461159.381557 - 3101247.69609

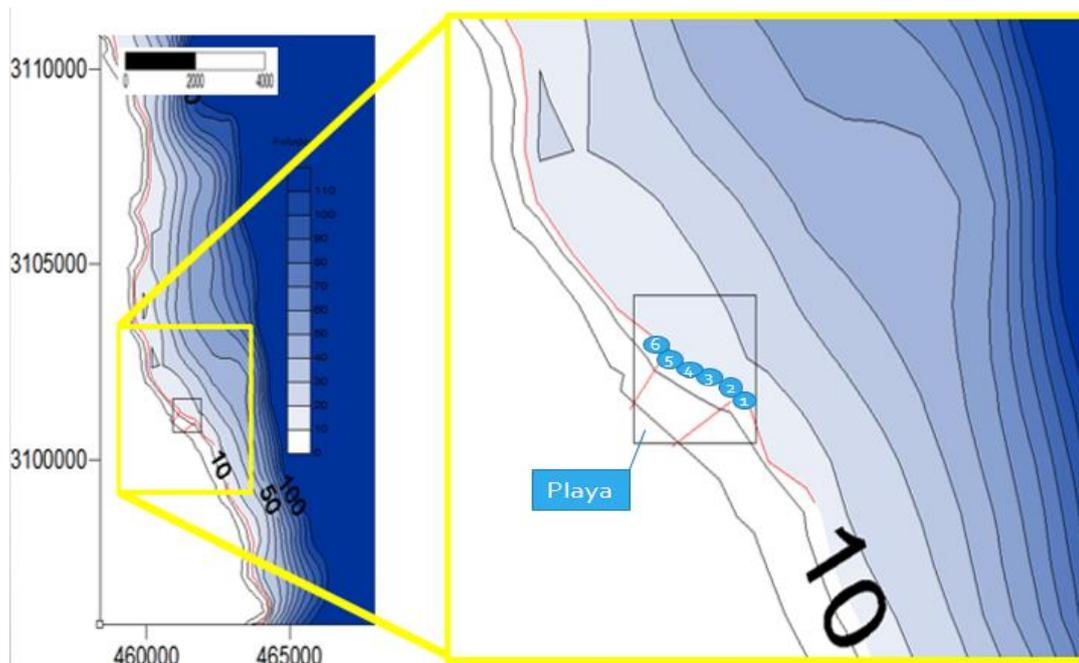


Figura 24: Batimetría de la zona de estudio próxima a la playa, en la que se destaca la cota Z-10m (línea roja).

3.3 RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN

Después de ejecutar el modelo SWAN, se tienen las series de alturas de ola significativa, periodo de pico y dirección media de propagación para cada uno de los seis puntos de estudio señalados anteriormente. A modo de ejemplo, en las figuras 25a y 25b se muestran las series de altura y periodo para el punto número 1, y para el punto número 5, en la figura 26.

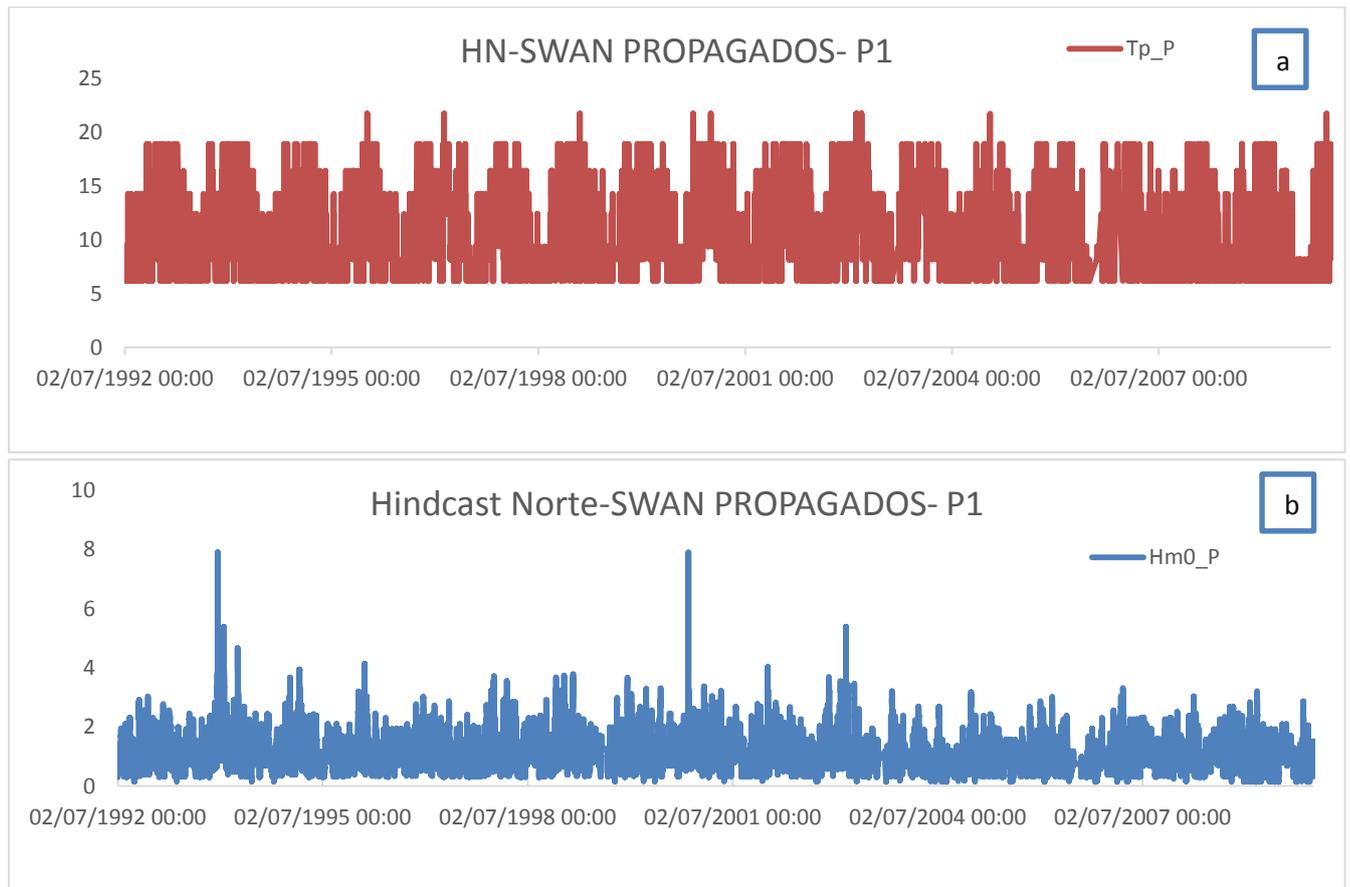


Figura 25: Graficas de las olas propagadas hasta los puntos de estudios. a) Periodo de pico; b) Altura significativa.

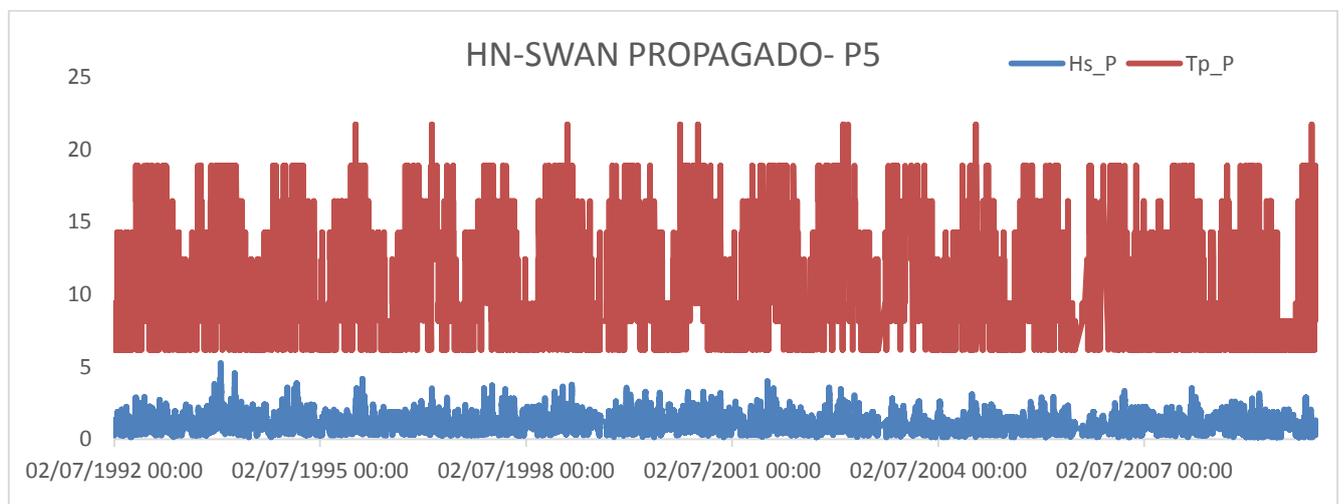


Figura 26: Grafica en conjunto de altura significativa (Hs) y periodo de pico (Tp) de las olas propagadas.

CAPITULO 4

4 ESTIMACION DEL REMONTE Y EVALUACION DEL RIESGO

4.1 MODELOS PARA ESTIMACIÓN DEL REMONTE

Conocidas las condiciones de oleaje en las proximidades de la línea de orilla es posible proceder a la estimación del remonte y sus respectivas cotas máximas de inundación en la zona de estudio. No obstante, ya se ha comentado anteriormente la complejidad que entraña la caracterización de este proceso, fuertemente dependiente de las condiciones de oleaje, de los niveles del mar asociados, las propiedades y naturaleza de la superficie sobre la que tiene lugar, etc. En consecuencia, no existe un modelo de validez universal, aplicable en cualquier zona y bajo condiciones dinámicas arbitrarias, que permita predecir el remonte de forma consistente.

En la actualidad existen numerosos modelos empíricos que han sido propuestos con el fin de aliviar el problema de la caracterización analítica del remonte. La validez relativa de estos modelos suele estar restringida a condiciones más o menos particulares, en función del rango de condiciones experimentales consideradas en su desarrollo. Así, muchos de los modelos existentes para caracterizar el remonte están basados en datos obtenidos en condiciones de laboratorio. En tales casos, la aplicabilidad a condiciones reales suele ser bastante limitada. Otro grupo de modelos lo constituyen los basados en resultados de experimentos realizados en una única playa, o en un reducido número de ellas, de modo que su rango de aplicación se reduce a zonas de características dinámicas y morfológicas con cierto grado de similitud. En consecuencia, la aplicabilidad de estos modelos a una zona concreta debe ser previamente contrastada.

Aunque en la bibliografía existen numerosos modelos empíricos para la estimación del remonte solo un número reducido de ellos suele ser empleado en la práctica, bien para diseño en ingeniería de costas, bien para evaluación de riesgos de inundación costera. En el presente trabajo se han considerado los modelos empíricos de uso más común en la práctica y algunos sugeridos recientemente. Partiendo de las condiciones de oleaje y niveles del mar descritos en el capítulo anterior y considerando las condiciones geomorfológicas de la zona de interés, se han comparado los resultados derivados del uso de cada uno de ellos. Los diferentes modelos considerados son descritos brevemente a continuación.

Antes de presentar los diferentes modelos empleados, resulta importante destacar que, tal como se ha indicado previamente, considerando el nivel medio del mar definido por la marea meteorológica y las condiciones meteorológicas reinantes localmente, la componente del remonte asociada estrictamente al oleaje está constituida por el *set-up* y por el *swash*. La primera componente, *set-up*, representa una sobreelevación del nivel medio local que genera un gradiente de presiones para contrarrestar el exceso de flujo de momento en dirección a la playa (tensión de radiación), originado por la transformación del oleaje en su propagación hacia la orilla, especialmente durante su rotura.

La componente *swash* representa el ascenso del agua sobre la cara de la playa con la aproximación a la orilla de cada ola individual, disipando así la energía remanente tras haber atravesado la zona de rompientes. En este sentido, mientras existen autores que caracterizan de forma independiente ambas componentes y consideran como remonte sólo la elevación asociada al *swash*, existen otros que engloban la elevación asociada a ambos fenómenos como un único proceso, denominando remonte a la sobreelevación resultante. Para evitar confusiones, y dado que la finalidad del estudio es estimar la elevación vertical alcanzada por el mar para cada una de las condiciones de oleaje-nivel del mar considerado, se ha optado seguir la segunda de las opciones.

Hunt (1959) propone un modelo simple que relaciona el remonte con las condiciones de oleaje en aguas profundas y la pendiente de la playa. Para ello empleó los resultados de experimentos en un canal con ondas monocromáticas incidente sobre playas planas e impermeables, con pendientes superiores a 1:10. Estos resultados fueron adaptados por Battjes (1974) para expresarlos en términos del peralte del oleaje en aguas profundas y la pendiente de la playa, relacionados directamente a través del denominado Número de Iribarren (Iribarren y Nogales, 1948), o parámetro de semejanza de rotura, dado por

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$$

donde H_0 y L_0 son la altura y la longitud de onda en aguas profundas, respectivamente, mientras β representa la pendiente de la playa. Así, el remonte puede ser expresado como

$$R = H\xi = H \left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \right) \quad (1)$$

La altura de ola característica utilizada por el autor en su formulación es la altura de ola significativa, H_s . Es importante resaltar que los taludes considerados son continuos e impermeables.

Guza y Thornton (1982) utilizan medidas experimentales realizadas en playas disipativas y observan que el remonte significativo, R_s , es linealmente proporcional a la altura de ola significativa en aguas profundas. El modelo sugerido por estos autores es el siguiente

$$R_s = 0.71H_s + 0.035 \quad (2)$$

Holman (1986) realizó un análisis de los valores extremos del remonte sobre una playa natural. Los resultados del estudio pusieron de manifiesto que el número de Iribarren debe ser corregido durante condiciones severas de oleaje, tal como sigue

$$\xi_{storm} = 6.3\beta$$

de modo que el nivel superado por el remonte en un 2% de las observaciones puede ser expresado como:

$$R_{2\%} = (5.2\beta + 0.20)H_S \quad (3)$$

Nielsen & Hanslow (1991) evaluaron el remonte en seis playas de Nueva Gales del Sur (Australia) con condiciones que oscilaban entre moderadamente disipativas (playas con pendiente próxima a 0.026) y reflectivas (pendiente de 0.19). Según estos autores, en playas con pendientes fuertes (> 0.1, approx.) el remonte es una función de la altura de ola y del número de Iribarren), mientras que para playas planas o disipativas (<0.1) el remonte resulta independiente de la pendiente de la playa. El modelo sugerido por dichos autores adopta la expresión.

$$R_{2\%} = 1.98 L_{RU} \quad (4)$$

donde

$$L_{RU} = 0.6\sqrt{H_{0,rms} + L_{0,rms}} \tan\beta \quad \text{para } \tan\beta \geq 0.1$$

$$L_{RU} = 0.05\sqrt{H_{0,rms} + L_{0,rms}} \quad \text{para } \tan\beta \leq 0.1$$

Ruggiero et al. (2001) observan que en varias playas disipativas de Oregon el remonte es fundamentalmente dependiente de la altura de ola significativa en aguas profundas, siendo la dependencia con el periodo y con el número de Iribarren muy débil. Combinando los resultados obtenidos en dichas playas con los registrados en una playa reflectiva para derivar un modelo que asignase igual peso a la pendiente de la playa que a las condiciones de oleaje en aguas profundas. La expresión analítica sugerida es:

$$R_{2\%} = 0.27(\tan\beta H_0 L_0)^{1/2} \quad (5)$$

Stockdon et al (2006), analizaron datos de una decena de experimentos en playas de diferentes zonas (EE.UU, Pacífico y Atlántico, Holanda). Considerando por separado el swash en las bandas frecuenciales incidente e infragravitatoria observan que la caracterización de la componente incidente resulta adecuada mediante una expresión que incorpora el parámetro de Iribarren, mientras la banda infragravitatoria es mejor descrita considerando la altura y la longitud de onda, no observándose dependencia estadística significativa con la pendiente de la playa. La expresión resultante para el remonte es:

$$R_{2\%} = 1.1(0.35 \beta_f (H_0 L_0)^{1/2}) + \frac{[H_0 L_0 (0.563 \tan \beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \text{ para } \xi_0 \geq 0.3$$

Para el caso de playas fuertemente disipativas, donde el swash es dominado por el movimiento infragravitatorio, la expresión sugerida es

$$R_{2\%} = 0.043(H_0 L_0)^{1/2}, \text{ para } \xi_0 < 0.3 \quad (6)$$

Teixeira (2009) partiendo de observaciones realizadas en siete playas del litoral del Algarve, Portugal, bajo condiciones medias de oleaje. En una primera aproximación se derivó una expresión para el remonte que sólo incluye la altura de ola significativa en aguas profundas como parámetro controlador del remonte máximo. Esta es

$$R_{max} = 0.80H_S + 0.62 \quad (7)$$

Por otro lado, un análisis de regresión considerando la pendiente de la playa y los parámetros característicos del oleaje, altura y periodo, o longitud de onda, permiten sugerir el siguiente modelo para la predicción del remonte máximo

$$R_{max} = 1.08H_S \xi_0 \quad (8)$$

De forma resumida, el desarrollo de los modelos empíricos presentados tienen como punto de partida medidas locales del remonte y la pendiente de la cara de la playa, mientras las condiciones de oleaje corresponden a observaciones a largo plazo en puntos alejados de la costa, excepto en Holman 1986, que utiliza datos de una boya a 20m de profundidad. En consecuencia, las condiciones de agitación marítima debieron ser propagadas hasta las proximidades de la playa en cuestión.

Las expresiones analíticas de los modelos empíricos empleados se presentan conjuntamente en la tabla 4.

Tabla 4: Formulaciones empíricas empleadas en los cálculos de Run-up

Autores	<i>Run-up</i> , R	
Hunt (1959)	$R = H\xi = H \left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \right)$	(1)
Guza & Thornton (1982)	$R_S = 0.71H_S + 0.035$	(2)
Holman (1986)	$\xi_{storm} = 6.3\beta$ $R_{2\%} = (5.2\beta + 0.20)H_S$	(3)
Nielsen & Hanslow (1991)	$R_{2\%} = 1.98 * L_{RU}$ $L_{RU} = 0.6 * \tan \beta * (H_{orms} L_0)^{0.5}$ para $\tan\beta \geq 0.10$ $L_{RU} = 0.05 * (H_{orms} * L_0)^{0.5}$ para $\tan\beta \leq 0.10$	(4)
Ruggiero <i>et al.</i> (2001)	$R_{2\%} = 0.27(\tan \beta H_0 L_0)^{1/2}$	(5)
Stockdon <i>et al.</i> (2006)	$R_{2\%} = 0.043 * (H_0 L_0)^{0.5}$ para $\xi_0 < 0.3$	(6)
Teixeira (2009)	$R_{m\acute{a}x.} = 0.80 * H_S + 0.62$	(7)
	$R_{m\acute{a}x.} = 1.08 * H_S * \xi_0$	(8)

4.2 ESTIMACIÓN DEL REMONTE Y CÁLCULO DE LA COTA DE INUNDACIÓN

La aplicación de las expresiones anteriores permite obtener la sobreelevación instantánea del nivel del mar por la acción del oleaje incidente. Por consiguiente, a estas elevaciones habrá que añadir las contribuciones de la marea astronómica, MA , y la asociada a efectos meteorológicos, SM , para determinar las cotas de inundación, CI , (referidos al cero hidrográfico, CH). Es decir,

$$C.I. = M.A. + S.M. + R_{\max}$$

De este modo, para unas condiciones de oleaje y un dado perfil de playa dados, es posible estimar el correspondiente valor del remonte, empleando las formulaciones antes descritas y finalmente el correspondiente nivel máximo de inundación.

4.2.1 Análisis de los Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la estimación del remonte en cada una de las condiciones oceanográficas consideradas, así como para cada uno de los modelos de remonte empleados, y la cota de inundación resultante. Con el fin de simplificar la presentación de los mismos, se muestran sólo los correspondientes al perfil 0, trazado en la zona sur de la playa y que incluye zonas de ocio (playa e infraestructuras correspondientes al centro comercial).

En la figura 27 se muestran una imagen aérea del perfil cero (a), las vistas del terreno desde el mar hacia tierra (b) y el perfil en planta (c).

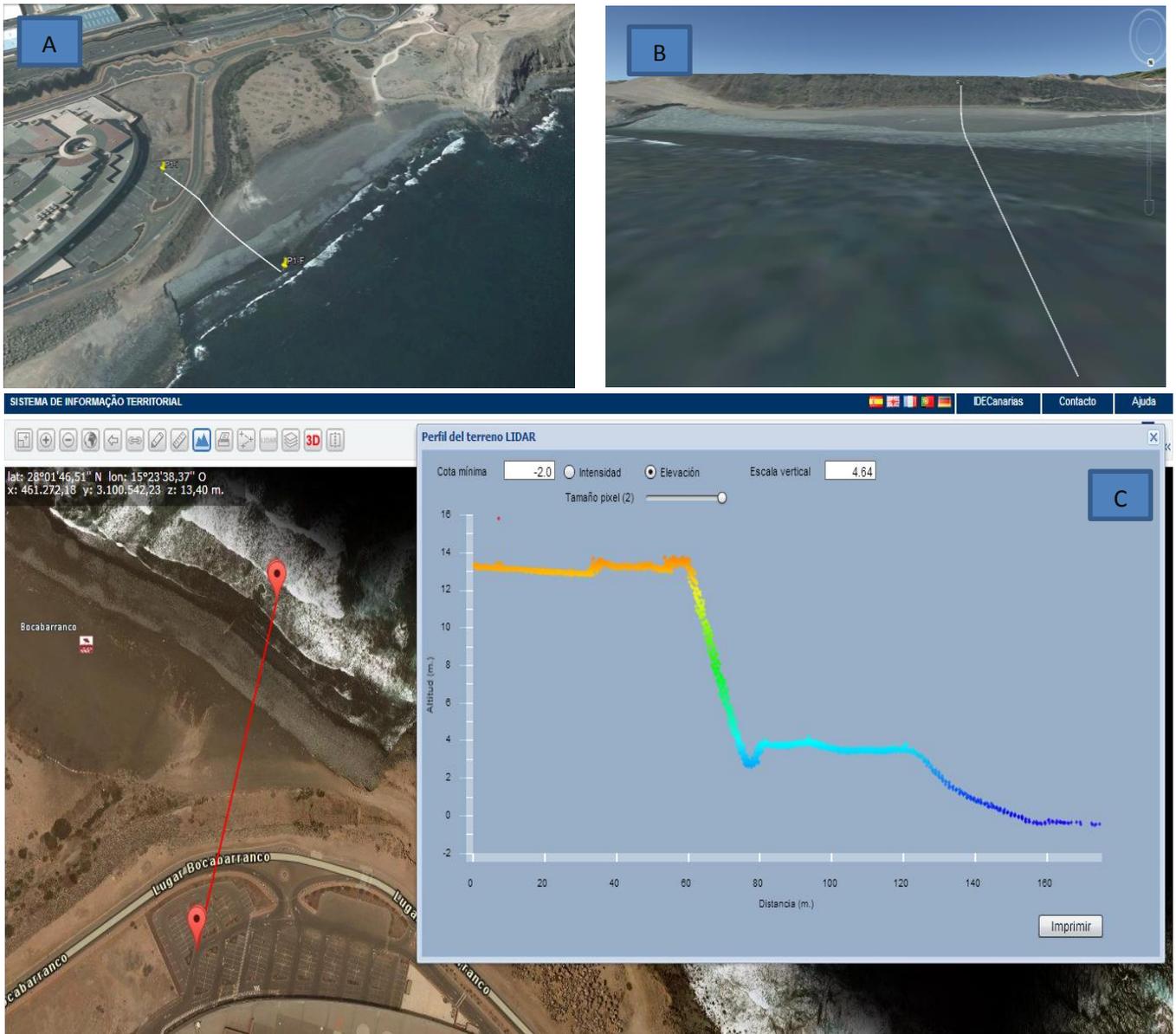


Figura 27: A) Imagen aérea del perfil estudiado; B) Vistas del terreno desde mar hacia tierra; C) Perfil en planta.

En la tabla 5 se presentan los valores promedio, mínimo y máximo, del remonte máximo, R_{max} , obtenidos mediante los distintos modelos empíricos. Los niveles mínimos varían entre 0.21m (CH) y 0.85m (CH), mientras los máximos varían entre 3.43m (CH) y 12.61m (CH).

Los valores promedio obtenidos con diferentes modelos son muy similares, excepto en el caso del modelo de Hunt y en el de Stokdon, que no siguen esta misma tendencia. En consecuencia, dada la desviación de los resultados proporcionados por estos dos modelos en relación a los restantes, se decide no emplear los mismos para la determinación de la cota de inundación en los distintos perfiles.

Tabla 5: Resultados de los run-up máximos para el perfil 0 de las diferentes formulaciones, en metros referidos al Cero Hidrográfico.

R_{max} PO	Promedio	Máximo	Mínimo
Hunt (1959)	2.205	12.61	0.5
Holman (1986)	1.162	4.092	0.309
Stockdon <i>et al.</i> (2006)	3.258	8.902	0.856
Nielsen <i>et al.</i> (1991)	1.180	3.465	0.313
Ruggiero <i>et al.</i> (2001)	1.001	3.643	0.271
Guza <i>et al.</i> (1982)	1.246	7.771	0.219
Teixeira 1 (2009)	1.504	6.341	0.743
Teixeira 2 (2009)	1.220	3.434	0.33

En las Figuras 28-a y 28-b, se representan, a modo de ejemplo, los resultados de los valores de remonte máximo para cada método utilizado, y en la figura 29 aparecen graficados los valores de la cota de inundación correspondiente, para el perfil 0.

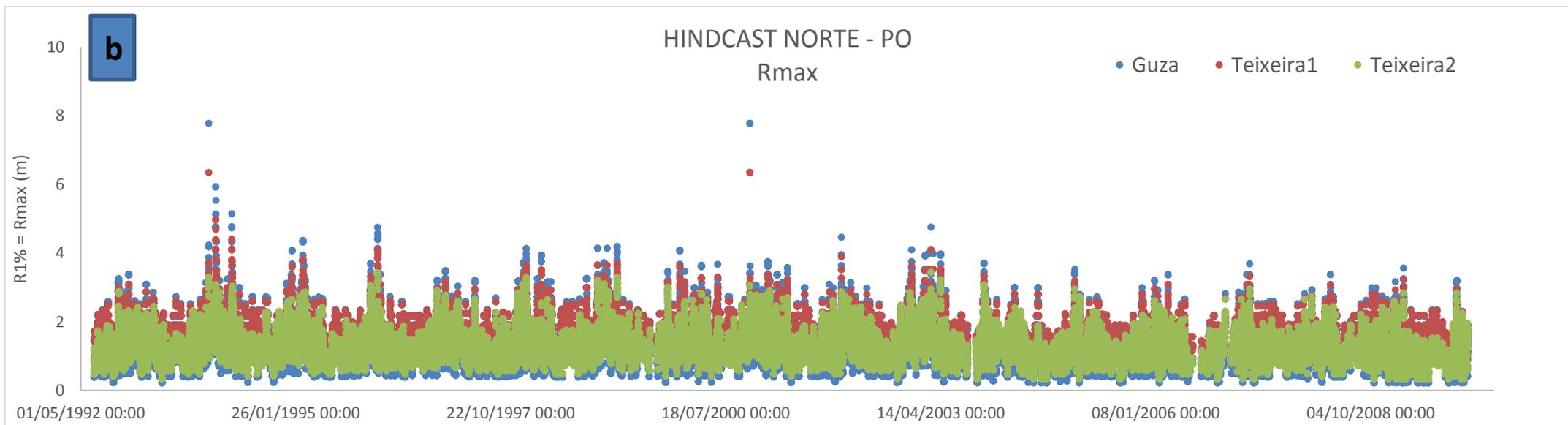
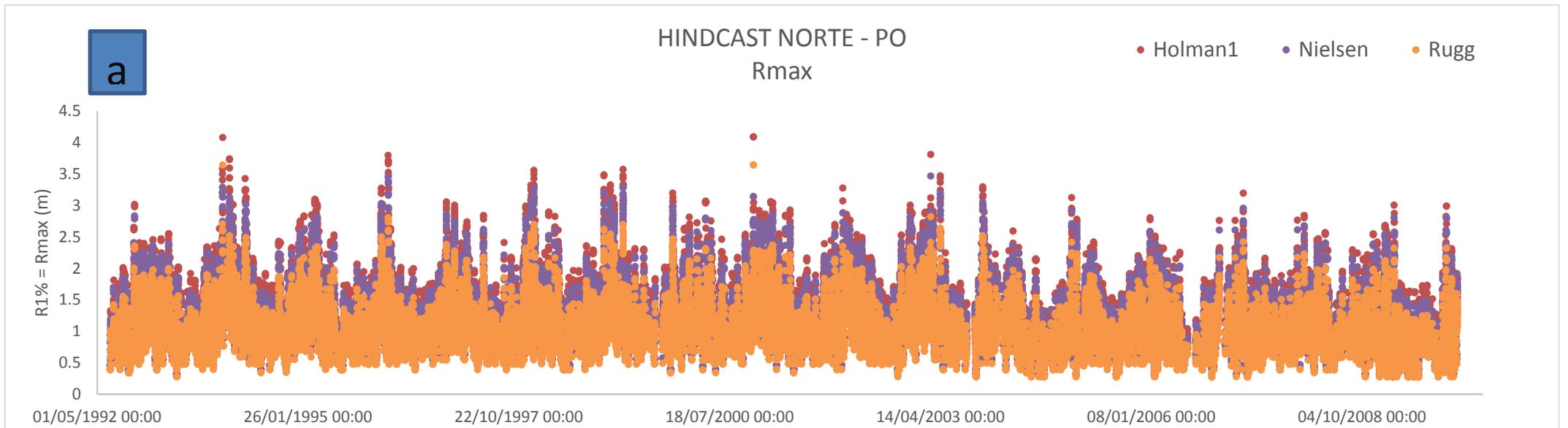


Figura 28: a) Representación gráfica del Run-up máximo para los métodos de *Holman*, *Nielsen* y *Ruggiero*; b) Lo mismo para los métodos de *Guza*, *Teixeira 1* y *2*, resultados presentados al perfil 0.

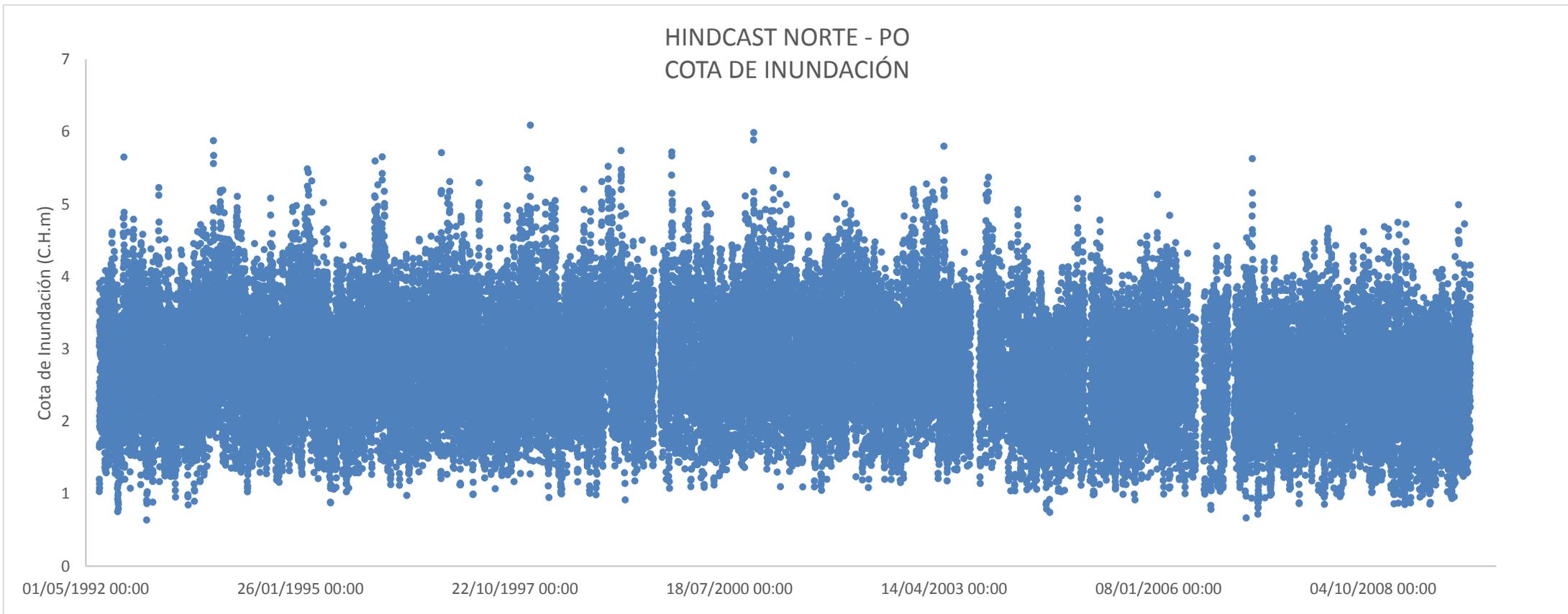


Figura 29: Representación de los valores de la cota de inundación para el perfil 0

4.3 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Una metodología que permita evaluar y gestionar el riesgo asociado a la inundación en zonas costeras por remonte del oleaje bajo condiciones severas, así como el posible rebase en estructuras de defensa representa un aspecto de enorme interés para una mejor gestión integrada y sostenible de la zona costera, evitando la degradación y pérdidas irreversibles de sus recursos. La disponibilidad de tal metodología, conjuntamente con el conocimiento de las repercusiones que tales eventos tienen, posibilita la determinación del riesgo asociado a los mismos. Esta idea se ilustra de forma esquemática en la figura 30.

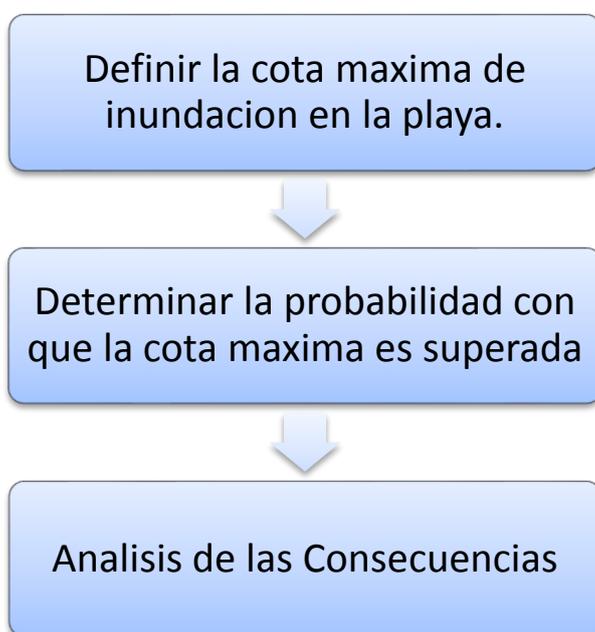


Figura 30: Esquema para la evaluación del riesgo

Tal como se ha comentado en capítulos previos, la evaluación cuantitativa del riesgo de inundación debe estar basada en la consideración conjunta y ponderada de la frecuencia de ocurrencia de los eventos de remonte que superan la cota máxima establecida y sus consecuencias.

La metodología específica aplicada en el presente estudio está basada en los trabajos de Raposeiro & Ferreira (2011). Estos autores, con el fin de simplificar el procedimiento, consideran una escala de grados de probabilidad para agrupar los valores del rango completo de probabilidades de ocurrencia del acontecimiento peligroso, así como una escala con diferentes grados de consecuencias asociadas a tal acontecimiento. De este modo, el grado de riesgo queda definido por:

$$\text{GRADO DE RIESGO} = \text{Grado de probabilidad de Ocurrencia} * \text{Grado de las Consecuencias}$$

4.3.1 Probabilidad de ocurrencia

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento, es necesario en primer lugar establecer los límites que determinan la existencia de inundación de una zona dada. Dichos valores se presentan, para los seis perfiles considerados (ver figura 31), en la tabla 6.

Recuérdese que el área de estudio fue dividida, atendiendo a su uso, en sectores denotados como caso 1, que representa la zona de ocio o zona de playa y es atravesada por todos los perfiles, caso 2, que representa la zona situada detrás de la playa, denominada como zona de vegetación, y es atravesada por los perfiles del 2 al 5, y por último el caso 3, que representa la zona de las infraestructuras costeras e incluye a todos los perfiles.



Figura 31: Perfiles trazados en la playa y subsectores atravesados por los mismos.

Tabla 6: Valores de la cota topográfica respecto al C.H. que definen la ocurrencia de inundación en cada sector (casos)

COTA DE INUNDACIÓN PARA DIFERENTES SECTORES (metros)					
Nº del Perfil	Zona de ocio	Zona de vegetación	Estructuras		
	caso 1	caso 2	caso 3		
P0	3.5	---	14.0		
P1	3	3.4	14.8		
P2	3	3.8	15		
P3	3	4	15.3 (Carretera1 -A)	16.8 (Rotonda -B)	26.5 (Carretera 2 -C)
P4	3	5.8	14.8		
P5	3	5.1	9		

En la tabla 7 se presenta la clasificación sugerida por Raposeiro & Ferreira (2011) para asignar los grados de frecuencia de ocurrencia asociados a diferentes intervalos de frecuencia de presentación de eventos adversos. Es decir, que superan el valor límite establecido. Para denotar cada uno de los cinco grados considerados en dicha escala se emplea la terminología dada en la primera columna.

Tabla 7: Definición, clasificación y denominación de los diferentes grados de ocurrencia de valores que exceden los umbrales pre establecidos (Raposeiro & Ferreira, 2011).

Terminología	Probabilidad de Ocurrencia	Grado
Improbable	0 – 3%	1
Raro	3 – 15%	2
Ocasional	15 – 35%	3
Probable	35 – 60%	4
Frecuente	> 60%	5

4.3.2 Grado de Consecuencia

Los grados de consecuencias asociados a cada uno de los grados de ocurrencia de eventos que superan un determinado valor umbral de cota de inundación se dan en la tabla 8.

La elaboración de esta tabla implica tener en cuenta las características, exposición y vulnerabilidad, del medio frente la ocurrencia de un evento de inundación, teniendo como objetivos la identificación de valores naturales, culturales, androgénicos y socioeconómicos.

Los criterios considerados tienen en cuenta el reconocimiento de los *hábitats* con valor ecológico, la ocupación del suelo, la densidad de las construcciones y la ubicación de los edificios/infra-estructuras en relación a su exposición al fenómeno considerado como potencialmente peligroso, la permanencia de los hábitats y otros valores absolutamente singulares cuya pérdida puede ser irreparable.

Obviamente, la asignación de estos valores numéricos para cuantificar las repercusiones de un determinado evento de remonte severo en un perfil concreto posee una considerable carga de subjetividad.

Tabla 8: Guion orientativo para describir las consecuencias en caso de inundación.

Descripción	Consecuencias (Guion)	Grado
Insignificantes	Locales con características geológicas estables, playa de arenas naturales, locales ocupados para ocio ocasionales y valor ecológico reducido.	1
Considerables	Locales con características geológicas débiles o que poseen alguna vegetación del tipo arbusto, áreas de ocio frecuentes.	2
Serias	Locales con infraestructuras de protección costera; locales con actividades económicas relevantes; características geológicas muy débiles y vegetación poco estable.	5
Muy serias	Locales con ocupación humana permanente (zonas urbanas); locales con elementos naturales de gran valor ecológico que sea difícil de recuperar	10
Catastróficas	Locales con ocupación humana permanente; locales absolutamente singulares con un gran valor histórico/natural donde la pérdida sea irrecuperable; sistema playa-duna.	25

4.3.3 Grado de Riesgo

Establecidos los grados atribuidos a la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso (tabla 7) y las consecuencias asociadas a la ocurrencia de los mismos (tabla 8), resulta inmediata la construcción de una matriz de grados de riesgo, a partir de su definición como producto de ambos factores, tal como se muestra en la tabla 9. En la tabla 10, se indica el grado de aceptabilidad del grado de riesgo obtenido en la tabla anterior.

Tabla 9: Matriz de los grados de riesgo en términos de los grados de consecuencias y de las probabilidades.

GRADO DE RIESGO		Consecuencias				
		1	2	5	10	25
Probabilidad de Ocurrencia	1	1	2	5	10	25
	2	2	4	10	20	50
	3	3	6	15	30	75
	4	4	8	20	40	100
	5	5	10	25	50	125

Tabla 10: Escala de aceptabilidad del grado de riesgo resultante (Raposeiro & Ferreira, 2011)

Grado	Descripción	Control de riesgo (Guion Orientativo)
1-3	Insignificante	Riesgo despreciable; no es necesario llevar a cabo medidas de control de riesgo.
4-10	Reducido	Riesgo que puede ser considerado aceptable/tolerable caso se seleccione un conjunto de medidas para su control, posibles daños materiales de pequeña dimensión
15-30	Indeseable	Riesgo que debe ser evitado se es razonable en términos prácticos; requiere una investigación detallada y análisis del costo-beneficio; es esencial un monitoreo.
40-125	Inaceptable	Riesgo intolerable; tiene que ser proceder al control de riesgo (p.e. Eliminar el origen de los riesgos, alterar la probabilidad de ocurrencia o las consecuencias, transferir el riesgo, etc.)

4.4 RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados del análisis de riesgo de inundación costera por remonte del oleaje en la zona de la Playa de Boca Barranco. Con el fin de simplificar la exposición, en primer lugar se presentan de forma detallada los resultados para uno de los perfiles trazados a través de la playa, (perfil 1, figura 32) y posteriormente se presentan de forma más sintética los resultados globales, para todos los perfiles examinados y los diferentes sectores en los que se ha zonificado el área de estudio.

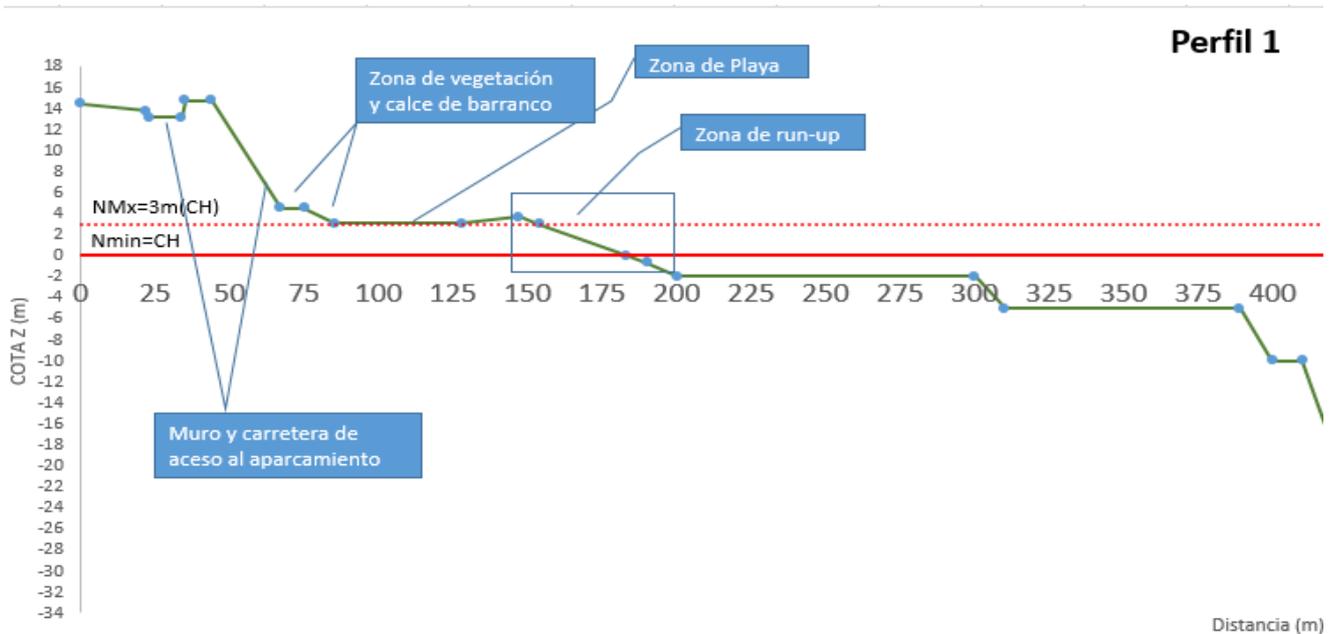


Figura 32: Perfil 1 incluyendo las descripciones de cada tramo

El perfil 1 atraviesa el tramo sur de la playa y abarca una pequeña zona con vegetación, cruza por el nuevo cauce modificado del barranco de Las Goteras y llega hasta una cota bastante alta donde se ubica el aparcamiento del centro comercial Las Terrazas, tal como se ilustra en la figura 33.



Figura 33: Imagen del perfil 1

En la tabla 11 se presenta el número de eventos de remonte en los que se superan las elevaciones umbrales que definen los diferentes sectores en los que se ha segmentado la zona de estudio, para el perfil P1.

Tabla 11: Resultados del análisis de riesgo para el perfil 1

P1	
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3m (zona ocio) - caso 1	16374
Número de eventos que superan - 3.4m – (escasa vegetación) - caso 2	8258
Número de eventos que superan - 14.8 (Infraestructuras) - caso 3	0
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	34.51
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	17.40
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3	0
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	3
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	3
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3	1
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	5
Grado de consecuencia - caso 3	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad x Grado de Consecuencia)	3
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad x Grado de Consecuencia)	15
Grado de Riesgo - caso 3 (Grado de la Probabilidad x Grado de Consecuencia)	5
Aceptabilidad - caso 1	Insignificante
Aceptabilidad - caso 2	Indeseable
Aceptabilidad - caso 3	Reducido

De las 47452 condiciones de oleaje y niveles del mar consideradas, en 16374 se supera la cota máxima para el caso 1, que es de 3m, generando una probabilidad de inundación de 34.51%, con grado para la probabilidad de ocurrencia 3 y grado de consecuencia 1, lo cual implica un grado de riesgo de nivel 3, su aceptabilidad es considerada “insignificante”, y se puede entender como un riesgo despreciable, de modo que no es necesario llevar a cabo medidas de control de riesgo.

Esto se debe a que el caso 1 (zona de playa) es considerada una zona con características geológicas estables, playa de arenas naturales, usada con fines de ocio ocasionalmente y valor ecológico reducido.

Del total de condiciones de oleaje consideradas, 8258 provocarían eventos de inundación en la zona del caso 2 (escasa vegetación) ubicada en una cota ligeramente superior. El porcentaje de ocurrencia se sitúa en torno al 17.40% , lo cual representa un grado de probabilidad 3 y para la consecuencia el nivel 5, representando por tanto un grado riesgo de nivel 15. La aceptabilidad correspondiente resulta “indeseable”. Este tipo de riesgo que debe ser evitado, puesto que suelen generar algún daño económico. En consecuencia, son necesarios estudios de coste-beneficios para su mitigación.

Es una zona que puede presentar serios riesgos ya que en ella se encuentran infraestructuras, locales con actividades económicas relevantes, características geológicas muy débiles y vegetación poco estable.

Para el perfil 1, el caso 3 es el más sencillo, teniendo en cuenta que la cota máxima que se debe rebasar para apreciar inundación está en una cota muy por encima del nivel del mar (14.8m). Con esas características, en el tramo sur de la playa ninguna de las 47452 condiciones oceanográficas consideradas llegaría a superar la cota máxima establecida como umbral. En este caso la aceptabilidad es reducida, porque aunque no hay probabilidad de ocurrencia, la zona tiene las características de local con infraestructuras generales, locales con actividades económicas relevantes.

En la tabla 12 se presentan de forma conjunta los resultados del análisis de riesgo para los seis perfiles examinados y los tres sectores en que se ha zonificado el área de estudio. Además del nivel de riesgo asociado al fenómeno de inundación costera por remonte del oleaje en condiciones adversas, se presenta también el grado de aceptabilidad del mismo en cada sector y perfil. Estos resultados se muestran de forma más concisa y fácilmente identificable en la figura 34, en la se ilustran las aceptabilidades del grado de riesgo asociado a cada sector de la zona de estudio.

Tabla 12: Resultados del análisis de riesgo para los perfiles y zonas consideradas, así como las aceptabilidades del nivel de riesgo en cada caso

Perfil	Caso	Grado Riesgo	Aceptabilidad
P0	1	3	Insignificante
	3	5	Reducido
P1	1	3	Insignificante
	2	30	Indeseable
	3	5	Reducido
P2	1	3	Insignificante
	2	10	Reducido
	3	5	Reducido
P3	1	4	Reducido
	2	50	Inaceptable
	3	5	Reducido
P4	1	5	Reducido
	2	50	Inaceptable
	3	5	Reducido
P5	1	5	Reducido
	2	50	Inaceptable
	3	25	Indeseable

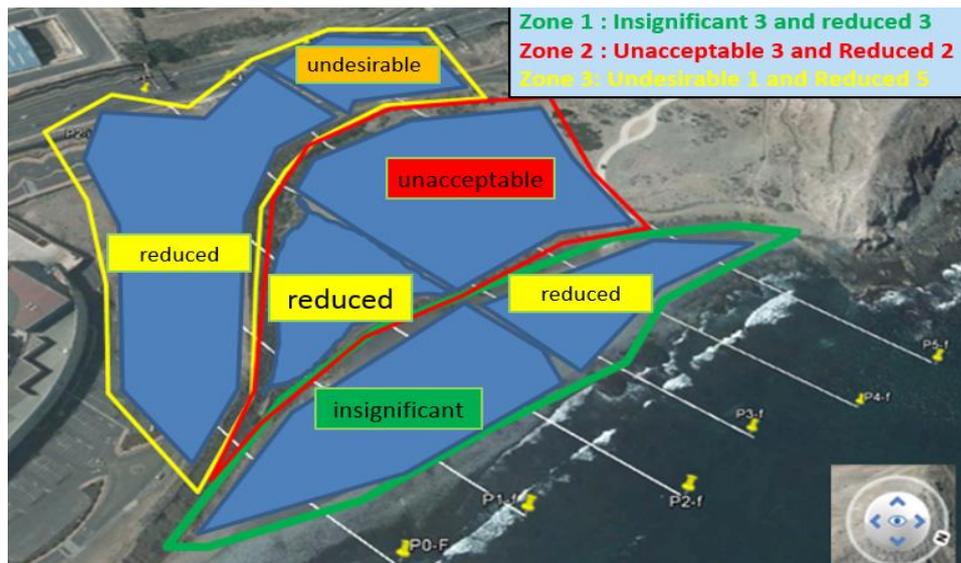


Figura 34: Mapa de las aceptabilidades del nivel de riesgo en cada sector.

La zona considerada como caso 1 presenta riesgos de inundación por remonte del oleaje insignificantes en los tres primeros perfiles (P0, P1, P2), ubicados en el tramo sur de la playa, y reducidos en los tres siguientes perfiles dispuestos en el tramo norte de la misma.

En la zona correspondiente al caso 2 existen niveles de riesgo superiores. Así, mientras en el tramo sur (Perfiles P1 y P2) el riesgo es reducido, en la zona norte se considera crítico. Los tres últimos perfiles (P3, P4, P5) de este tramo presentan riesgos inaceptables. Eso se debe a la existencia de un grado de probabilidad de ocurrencia de inundación bajo, pero no nulo, (ver tabla de probabilidades para cada perfil en anexo) asociado a la presencia en este sector de la especie vegetal Lotus Kunkelli.

En el caso 3 los riesgos son de tipo reducido en los cinco primeros, mientras que para el perfil P5 el riesgo es indeseable. Esto es debido a que, a pesar de que el nivel de riesgo de inundación costera es reducido, esta zona incluye infraestructuras, como un aparcamiento, desembocadura del barranco, carreteras de acceso al centro comercial, rotonda y un tramo de la autovía principal GC-1.

5 CONCLUSIONES

El presente estudio constituye una aplicación de una combinación de herramientas avanzadas y bien contrastadas para simular la propagación del oleaje bajo diferentes condiciones de nivel medio del mar. Una vez propagadas las condiciones de oleaje hacia las proximidades de la playa, con sus correspondientes niveles del mar medio, se evalúan la probabilidad de ocurrencia de eventos en los cuales el remonte del oleaje supera determinados niveles umbrales de elevación del terreno, las consecuencias asociadas con dichos eventos en función de las características de los sectores definidos por los umbrales especificados, y finalmente el nivel de riesgo asociado a la ocurrencia de tales eventos, así como la aceptabilidad de estos niveles de riesgo.

La metodología ha sido adecuadamente adaptada para su uso en el caso de la playa de Boca Barranco. En este sentido, se debe destacar que dicha metodología no ha sido empleada con anterioridad haciendo uso del nivel de marea real asociado a cada estado de mar considerado. Así mismo, es la primera vez que dicha metodología se emplea disponiendo de una base de datos hidrodinámicos tan extensa. Esto, aunque claramente permite mejorar la fiabilidad de los resultados, ha forzado a introducir variaciones en la metodología estándar para hacer el procedimiento viable computacionalmente.

A partir del presente estudio se deriva que:

- La zona 1, zona de playa, es ocasionalmente inundada, presentando riesgo insignificante en el tramo sur o reducido en el norte.
- La zona 2 experimenta eventos de inundación con frecuencia sustancialmente inferior. Los riesgos son reducidos para los perfiles 1 y 2, e inaceptables para los perfiles 3, 4, 5, debido a la presencia en la misma de una especie vegetal endémica.
- La zona 3 presenta un riesgo reducido para los perfiles 0, 1, 2, 3, e riesgo indeseable en el sector correspondiente a los perfiles 4 y 5. La elevada cota topográfica a la que se encuentran ubicadas las infraestructuras hacen que los eventos de superación del umbral correspondiente sea prácticamente nula.

Todo lo anterior pone en manifiesto la importancia de los sistemas operacionales para la predicción de las condiciones hidrodinámicas en costa, como base de los sistemas de alerta frente a eventos peligrosos, así como en la gestión de los recursos y la adecuada planificación de los usos del territorio en zonas costeras.

6 BIBLIOGRAFIA

- Almeida, B. A. (Maio de 2010). Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. II-Congresso internacional de risco ambientais – II CR,VIENR. RISCO_E_GESTAO_DO_RISCO
- Alves, J. H. G. M., Banner, M. L. (2003). Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 33, p. 1274-1298.
- Battjes, J. A. (1971). Run-up Distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*.
- Cassels, S., Curran, S.R. & Kramer, R. (2005), Do migrants degrade coastal environments?. Migration, natural resource extraction and poverty in North Sulawesi, Indonesia. *Human Ecology*, Vol. 33, No. 3, pp.329–363.
- Crichton, D., (1999). The Risk Triangle, pp. 102-103 in Ingleton, J. (ed.), *Natural Disaster Management*, Tudor Rose, London.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A., (2002). *Coastal Processes with Engineering Applications*, Cambridge University Press.
- Eldeberky, Y., Battjes, J. A. (1996). Spectral modeling of wave breaking: application to boussinesq equation. *Journal of Geophysical Research*, 101, p. 1253-1264.
- Guza, R. T., & Thornton, E. B. (1982). Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 87 (C1), 483-491.
- Hunt, I. A. (1959). Design of seawalls and breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division*, 85, 123-152.
- Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. *Boundary-Lyer Meteorology*, 6, p. 107-127.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., Barnett, T. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15, p. 1378-1391.
- Holman, R. A. (1986). Extreme Value Statistics for wave Run-up on a natural beach. In *Coastal Engineering* (p.527-544).
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Iribarren R. & Nogales C. Corrientes y oscilaciones de resacas en el interior de los puertos. *Revista de obras públicas*. 1948-pg 150.
- Janssen, P. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21, p. 1631-1642.
- Kaplan, S. & Garrick, B.J., (1981). On the quantitative definition of risk, *Risk Analysis*, 1, 11-27.
- Komen, G., Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14, p. 1271-1285.

- McGranahan, Gordon, Deborah Balk & Bridget Anderson. 2006. Low Coastal Zone Settlement, *Tiempo* 59, 23-26.
- Small, C., & Nicholls, R. J., 2003. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research* 19 (3), 584-599.
- Nielsen, P., & Hanslow, D. J. (1991). Wave Runup Distributions on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research*, 7.
- Neves, D. R. C. B., Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Rodrigues S., Simões A., Azevedo E. B. (2010). Avaliação do risco para a navegação em dois portos portugueses. (SEMENGO – 2010), *Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, Novembro 2010*.
- Neves, D. R. C. B., Santos, J. A., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Rodrigues S., Simões A., Azevedo E. B. (2012). Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. *Revista de Gestão Costeira* (em publicação).
- Owen, M. W. (1980). Design of seawalls allowing for wave overtopping. Report no. 924, *Hydraulics Research Station*, p. 281-307.
- Owen, M. W. (1982). The hydraulic design of seawall profile. *Proceedings of the Coastal Protection Conference, Institution of Civil Engineers*, Thomas Telford Publishing, London, UK, p.185-192.
- Puertos del Estado. Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria (Puerto de Las Palmas). REDMAR. RED de mareógrafos de Puertos del Estado. *Informes Dirección Técnica*.
- Reis, M.T., Fortes, C. J. E. M., Neves, D. R. C. B., Rodrigues, S., Vieira, A. S., Simões, A., Azevedo, E. B. (2011) Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta. *VI Congresso Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras, Zonas Costeiras 2011*, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde, 4 a 8 de Abril.
- Santos, J. A., Reis, M. T., Neves, D. R. C. B., Fortes, C. J. E. M., Rodrigues, S., Azevedo, E. B., Rodrigues, M. C., Simões, A., Ramalheira, J., Raposeiro, P. (2011). Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no Porto da Praia da Vitória. *7ª Jornadas Portuguesas de Ingeniería Costera y Portuaria, AIPCN/PIANC, Oporto, 6 y 7 de Octubre de 2011*.
- The SWAN Team (2008). SWAN Scientific and Technical Documentation. SWAN Cycle III version 40.85, *Delft University of Technology, Delft*.
- Raposeiro, P. D., Reis, M. T., Neves, D. R. C. B., Fortes, C. J. E. M., Santos, J.A., Vieira, A.S., Ramalheira, J., Simões, A., Azevedo, E. B., Rodrigues, M.C. (2011). Methodology for evaluation of flood risk in port áreas. Application to the Port of Praia da Vitória – Azores. *Proc. 5th International Short Conference on Applied Coastal Research (SCACR)*, 6 a 9 de Junho, Aachen, Alemanha.
- Raposeiro, P. D., & Ferreira, J. C. (2011). Evaluation of Coastal Flood Risk Areas and Adaption Strategies for a Sustainable Planning. *Journal of Coastal Research*.
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Capitão, R., Reis, M. T., Ferreira, J. C., Pereira, M. T., et al. (2013). Preliminary phases of the Hidralerta System: Assessment of the flood levels at S. João da Caparica beach, Portugal. *Journal of Coastal Research*.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J., & Beach, R. A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17, 407-419.

- Sancho, F., Oliveira, F. S., & Freire, P. (2011). Níveis Máximos do espriamento no Litoral da Ria Formosa. 7ª *Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.
- Silva, F. S., (2009). Calibração e validação do modelo espectral de previsão da agitação marítima SWAN em zonas costeiras. *Tesis de Máster, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade do Algarve, Faro, Portugal*.
- Silva, E., Santos, J. A., Reis, M. T. (2011). Porto da Praia da Vitória. Estimativa dos galgamentos da proteção marginal da baía. 7ª *Jornadas Portuguesas de Ingeniería Costera y Portuaria*, AIPCN/PIANC, Oporto, 6 y 7 de octubre de 2011.
- Silva, D., Fortes, C. J., Reis, M. T., Carmo, J. S., Simões, A., & Rodrigues, C. (2012). Avaliação do Galgamento de Estruturas Portuárias: Porto de Ponta Delgada. *Recursos Hídricos*, 33.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr., A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*.
- Svendsen, I. A., (2006). Introduction to nearshore hydrodynamics, World Scientific.
- Teixeira, S. B. (2009). Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve. *Administração da Região Hidrográfica do Algarve, Faro*.
- Tolman, H. (2002). User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22.
- Van Vledder, G. (2006). The WRT method for the computation of non-linear four-wave interactions in discrete spectral wave models. *Coastal Engineering*, 53, p. 223-242.
- Veloso Gomes, F. (2011). Agitação Regular, Texto de apoio. *FEUP*.
- Westhuysen, A. J., Zijlema, M., Battjes, J. A. (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54, p. 151-170, Elsevier.
- Yan, L. (1987). An improved wind input source term for third generation ocean wave modeling. *Scientific report WR-No 87-8, De Bilt, The Netherlands*.
- Zijlema, M. (2009). Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. *Coastal Engineering*, 57, p. 267-277, Elsevier.

PAGINAS WEB'S

Ian West, (<http://www.southampton.ac.uk/~imw/chestorm.htm#contact-ian>)

Gobierno de Canarias, (<http://www.gobiernodecanarias.org/libroazul/pdf/19368.pdf>)

Puertos del Estado de España (www.puertos.es)

ABREVIATURAS

BOCD – *British Oceanographic Data Centre*

FEUP – *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto*

LNEC – *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil*

MMA – *Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de España*

REDEXT – *Red de boyas de aguas profundas (red exterior)*

SIG – *Sistemas de Información Geográfica*

SWAN – *Simulating Waves Nearshore*

UTM – *Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator*

WAM - *Wave Modelling group*

DIA - *Discrete interaction Aproximation*

WRT - *Webb-Resio-Tracy*

IGN – *Instituto geográfico nacional*

SIOSE – *Sistema de información sobre ocupación del suelo en España*

PEPEN – *Plan Especial de protección de espacios naturales protegidos*

SIC – *Sitio de interés científico*

ASE – *Área de sensibilidad ecológica*

ZEX – *Zona de exclusión*

ZUM – *Zona de Uso moderado*

ZUG – *Zona de Uso general*

LIDAR - *Laser Imaging Detection and Ranging*

MDT – *Modelo digital del Terreno*

ALS – *Aerotransportado laser Scanner*

C.H. – *Cero hidrográfico*

EIOMED - *Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente*

SIMBOLOGÍA UTILIZADA

c – celeridad de la onda

c_x, c_y – velocidades de propagación de la onda en el espacio

c_σ, c_θ – velocidades de propagación de la onda en el espectro

d – profundidad

$E(f, \theta)$ – energía del espectro del oleaje (función de la frecuencia y la dirección)

f – frecuencia relativa de la onda

g – aceleración de la gravedad

h – altura da agua en el pie de la playa

H – altura de la onda

H_{m0} y H_{m0} – altura significativa espectral en el pie de la playa

H_s – altura significativa de la onda

L – longitud de onda

N.M. – nivel de marea

$N(f, \theta)$ – densidad de acción del espectro (función de la frecuencia y la dirección)

ρ – coeficiente ajustable para el cálculo del coeficiente de peralte

S – función fuente del balance de energía

s – peralte de la ola

S_{bf} – término de disipación de energía correspondiente a la fricción con el fondo

S_{br} – término de disipación de energía correspondiente a la rotura inducida por la profundidad

S_{dis} – término de disipación de energía correspondiente a inestabilidades por la saturación energética del oleaje

S_{in} – término de disipación de energía correspondiente a la transferencia de energía desde la atmósfera S_{nl}

S_{tri} – término de disipación de energía correspondiente a las interacciones triples entres componentes

s_0 – peralte de la ola en aguas profundas

t - tiempo

T – período de la onda

T_p – período de pico del espectro

\vec{u} – velocidad de la onda

β – ángulo que representa la pendiente de la playa

γ – parámetro de rotura

θ – dirección de la agitación

θ_p – dirección de pico de la agitación

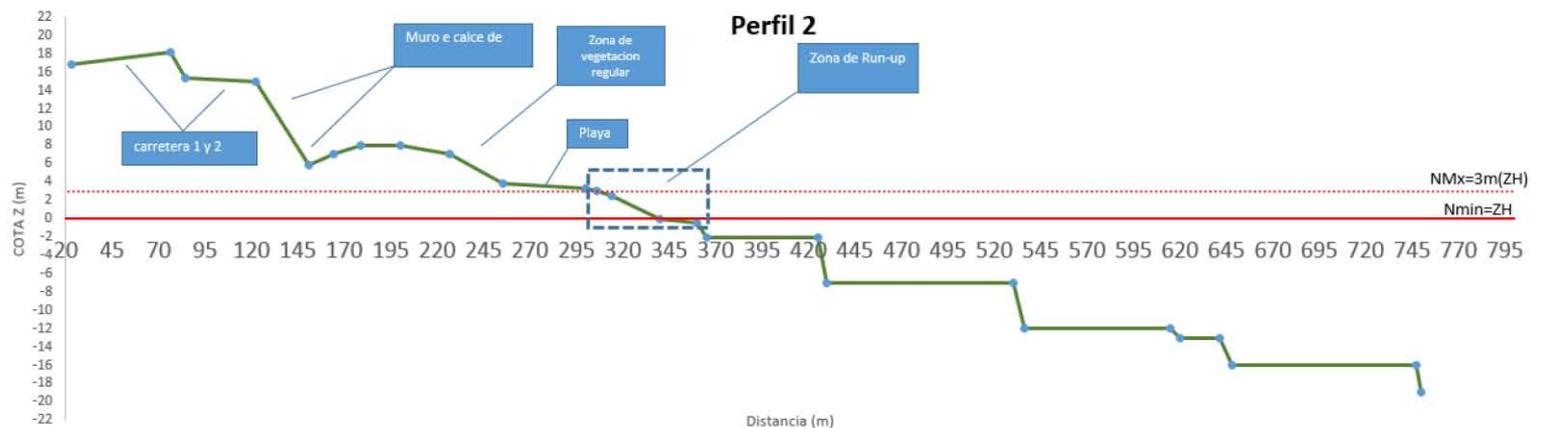
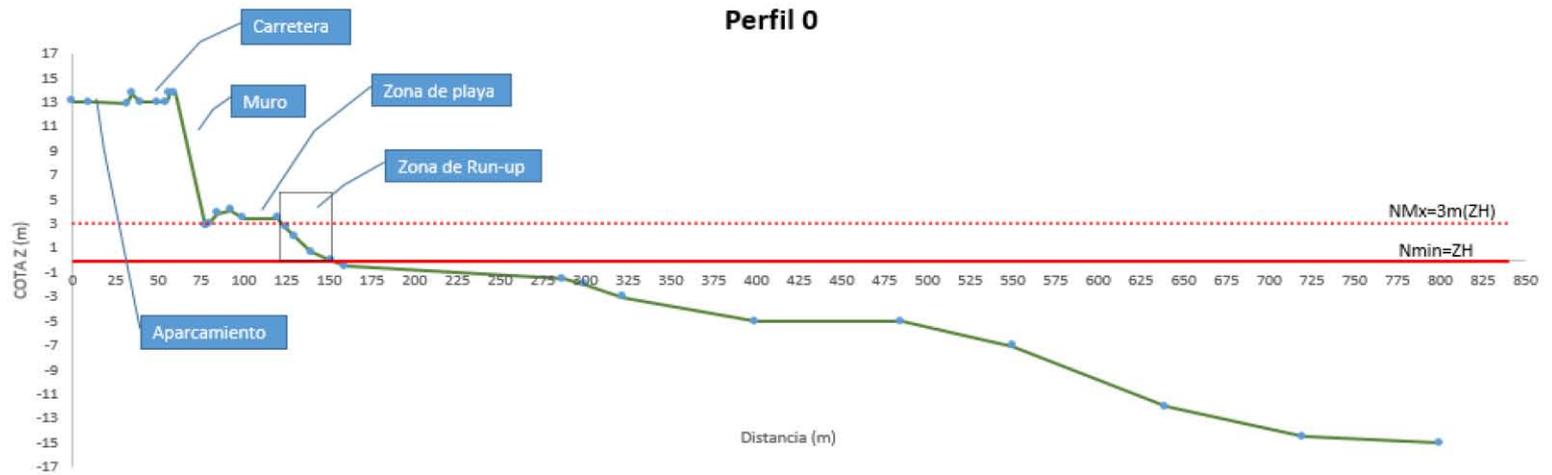
ξ_0 – parámetro de rotura (número de Iribarren)

σ – frecuencia relativa de la onda

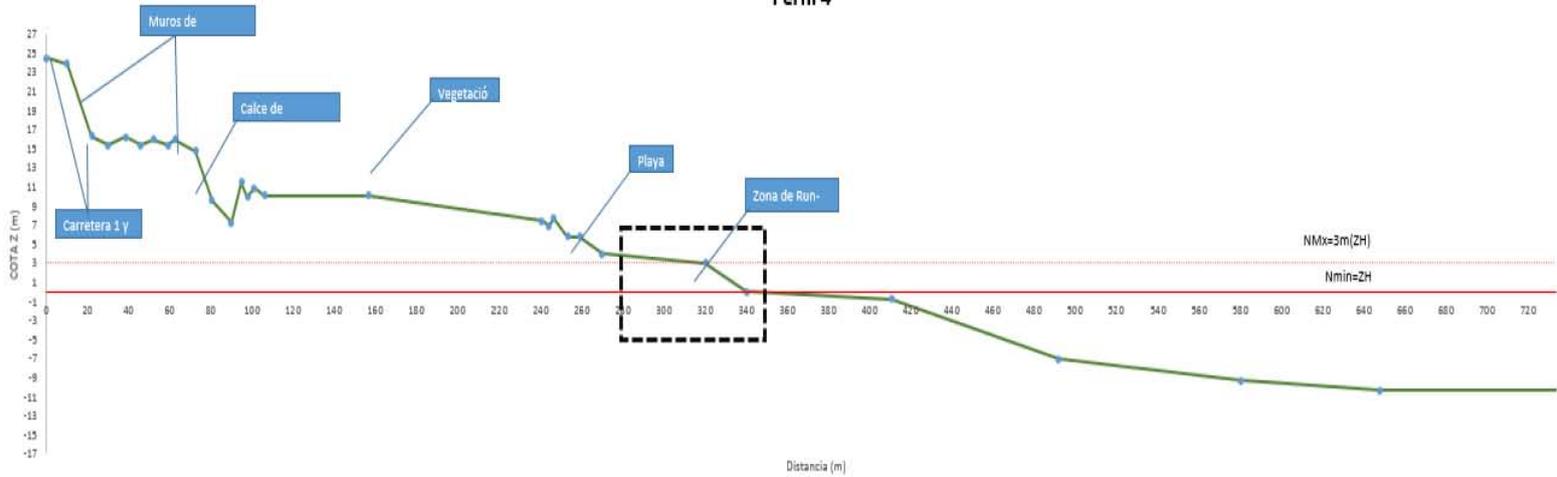
Z – cota batimétrica

Anexos

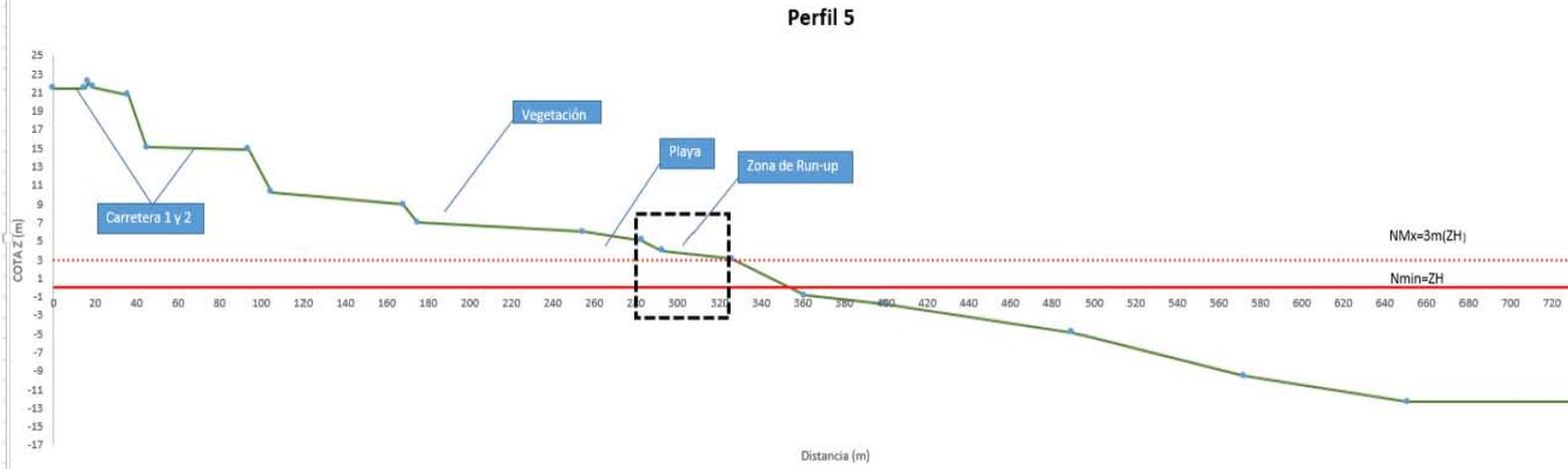
-PERFILES ESTUDIADOS



Perfil 4



Perfil 5



- TABLAS DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR PERFILES

Tabla con los cálculos de las probabilidades de ocurrencia, los grados de consecuencias y los grados de riesgo para cada caso estudiado

P0	C.I
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3.5m (zona ocio) - caso 1	7925
Número de eventos que superan - sin vegetación - caso 2	
Número de eventos que superan - 14 (Infra-estructuras) - caso 3	0
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	16,7
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	no hay
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3	0,0
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	3
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	no hay
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3	1
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	no hay
Grado de consecuencia - caso 3	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	3
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	no hay
Grado de Riesgo - caso 3 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Aceptabilidad - caso 1	insignificante
Aceptabilidad - caso 2	no hay
Aceptabilidad - caso 3	reducido

P1	C.I
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3.7m (zona ocio) -caso 1	4073
Número de eventos que superan - 3m - caso 2	16374
Número de eventos que superan - 14.8 (Infra-estructuras) - caso 3	0
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	8,58
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	34,51
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3	0
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	2
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	5
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3	1
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	10
Grado de consecuencia - caso 3	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	2
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	50
Grado de Riesgo - caso 3 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Aceptabilidad - caso 1	insignificante
Aceptabilidad - caso 2	inaceptable
Aceptabilidad - caso 3	reducido

P2	C.I
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3m (zona ocio) -caso 1	9626
Número de eventos que superan - 3.8m - caso 2	759
Número de eventos que superan - 15 (Infra-estructuras) - caso 3	0
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	20,29
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	1,60
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3	0
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	3
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	1
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3	1
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	10
Grado de consecuencia - caso 3	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	3
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	10
Grado de Riesgo - caso 3 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Aceptabilidad - caso 1	insignificante
Aceptabilidad - caso 2	reducido
Aceptabilidad - caso 3	reducido

P3	CI
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3m (zona ocio) - caso 1	25897
Número de eventos que superan - 7.8m - caso 2	0
Número de eventos que superan - 15.3m(Infra-estructuras) - caso 3 -A	0
16.8m - Caso 3 - B	0
26.5m - Caso 3 - C	0
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	54,58
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	0,00
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3 - A	0,00
Caso 3 - B	0,00
Caso 3 - C	0,00
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	4
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	1
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3 - A	1
Caso 3- B	1
Caso 3 - C	1
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	10
Grado de consecuencia - caso 3 - A	5
Caso 3 - B	5
Caso 3 - C	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	4
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	10
Grado de Riesgo - caso 3 -A (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Caso 3 - B	5
Caso 3 - C	5
Aceptabilidad - caso 1	reducido
Aceptabilidad - caso 2	reducido
Aceptabilidad - caso 3 - A	reducido
Aceptabilidad - caso 3 - B	reducido
Aceptabilidad - caso 3 C	reducido

P4	C.I
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3m (zona ocio) - caso 1	23219
Número de eventos que superan - 7.7m - caso 2	0
Número de eventos que superan - 14.8m(Infra-estructuras) - caso 3	0
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	48,93
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	0,00
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3	0
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	5
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	1
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3	1
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	10
Grado de consecuencia - caso 3	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	10
Grado de Riesgo - caso 3 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Aceptabilidad - caso 1	reducido
Aceptabilidad - caso 2	reducido
Aceptabilidad - caso 3	reducido

P5	C.I
Número de eventos	47452
Número de eventos que superan - 3m (zona ocio) - caso 1	16726
Número de eventos que superan - 5.1m - caso 2	49
Número de eventos que superan - 9(Infra-estructuras) - caso 3	91
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 1	35,25
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 2	0,10
Probabilidad de ocurrencia (%) - caso 3	0,192
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 1	5
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 2	5
Grado de probabilidad de ocurrencia - caso 3	5
Grado de consecuencia - caso 1	1
Grado de consecuencia - caso 2	10
Grado de consecuencia - caso 3	5
Grado de Riesgo - caso 1 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	5
Grado de Riesgo - caso 2 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	50
Grado de Riesgo - caso 3 (Grado de la Probabilidad * Grado de Consecuencia)	25
Aceptabilidad - caso 1	reducido
Aceptabilidad - caso 2	inaceptable
Aceptabilidad - caso 3	indeseable