

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS  
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE

---

TESIS DOCTORAL

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL RECURSO  
SURF: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

---

Presentada por: ANTONIO ESPEJO HERMOSA

Dirigida por: IÑIGO J. LOSADA RODRIGUEZ  
FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA

Junio 2011

## CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS

CONDICIONES DE SURF EN EL

CANTÁBRICO ORIENTAL



## 7.1. Introducción

La evaluación global de las condiciones de surf desarrollada en el Capítulo 6 está basada en los datos disponibles de oleaje del reanálisis GOW 1.0 (IH Cantabria). Debido a la resolución espacial de las mallas globales ( $1.5^\circ \times 1^\circ$ ), en la mayoría de las ocasiones el oleaje es conocido a una gran distancia de la costa, y casi siempre en profundidades indefinidas.

Al disminuir la dimensión del análisis (*downscaling*), es posible resolver con mayor detalle los procesos de propagación, considerando, en este caso, la presencia de bajos que concentran el oleaje, cabos que provocan la difracción, o cañones submarinos por donde el oleaje es capaz de incidir en la costa sin apenas sufrir ningún cambio. Al mismo tiempo es posible disponer de otro tipo de variables espectrales, como la dispersión angular y frecuencial, que pueden contribuir a definir con un alto nivel de detalle las condiciones de surf a pie de rompiente. Estos parámetros están íntimamente ligados al grado de organización (grado de desarrollo, o edad) del estado de mar. Al disponer de una línea de costa más detallada, es posible aplicar criterios que evalúen las variables consideradas en esta escala de una forma más rigurosa y realista.

La evaluación que aquí se presenta está basada en las consideraciones sobre las condiciones regionales de surf expuestas en el Capítulo 5. Para conocer las características del oleaje en las inmediaciones de la rompiente se presenta una metodología integral para la transferencia de éste desde aguas profundas a profundidades reducidas. Esta metodología ha sido aplicada en el Golfo de Vizcaya, para las costas de Cantabria y País Vasco. Este tramo del litoral español se caracteriza por presentar rompientes de diferentes tipologías y con diferentes orientaciones, *Beach-breaks* de alta calidad (Playa de Liencres, Playa de Sopelana), *point-breaks* (La Isla de Santa Marina), *reef-breaks* (Meñakoz) y *rivermouths* internacionalmente conocidos (Mundaka).

Este capítulo se ha estructurado en once apartados. En el apartado 7.2 se realiza una descripción de la zona de estudio, haciendo especial hincapié en aquellos aspectos singulares y diferenciadores en el Cantábrico Oriental. Se describe la geología de la

costa, la climatología de la zona y la marea astronómica, aspectos de gran relevancia para caracterizar el recurso surf en la región. En el apartado 7.3 se presenta un resumen de la metodología empleada para caracterizar las condiciones de surf a pie de rompiente. En el apartado 7.4 se describen y se justifica la utilización de diferentes bases de datos de oleaje, viento y nivel del mar. De los apartados 7.5 a 7.9, se describen los diferentes pasos de la metodología general para transferir el oleaje desde aguas profundas a aguas someras. Esta metodología consta de la etapa de calibración de los datos, selección de mallas de propagación, selección de casos a propagar y reconstrucción de las series temporales mediante técnicas de interpolación. En el apartado 7.10 se presenta un análisis de la variabilidad espaciotemporal de la ocurrencia de condiciones de surf en el Cantábrico oriental, haciendo especial énfasis en el conocimiento de la forma espectral como indicador de la calidad del oleaje. Por último, en el apartado 7.11 se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo de este capítulo.

## 7.2. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se extiende desde la frontera oeste de Cantabria hasta la frontera este del País Vasco. Se trata de un tramo litoral de aproximadamente 250 km de longitud con una orientación media sur-norte, situado en el Golfo de Vizcaya, perteneciente al Atlántico Norte.

Uno de los aspectos más destacables de la morfología del Golfo de Vizcaya es la singular diferencia entre la forma costera francesa y la cantábrica, que refleja su origen geológico, los procesos de acumulación del sedimento y los cambios ocurridos durante la última glaciación. La plataforma costera es particularmente importante en la parte norte del golfo, donde su extensión supera los 140 km. La plataforma cantábrica, sin embargo, se caracteriza por sus reducidas dimensiones (apenas 10 km de longitud) con puntos singulares como el Cabo de Ajo o Machichaco cuyo efecto en el oleaje es vital para determinar las condiciones de surf en la región.

La plataforma continental cantábrica es, en su orientación y disposición, muy similar a la de la costa emergida, aunque más fracturada si cabe. Estas fracturas son patentes en el borde de la plataforma y dan lugar a cañones submarinos de cierta entidad, como el

cañón de Llanes, con repercusión en la dinámica de las corrientes de la zona. Especial mención merece el cañón de Cap Breton, donde la isóbata de 1000 m se encuentra a sólo 3 km de la línea de costa, generando un canal por donde los oleajes pueden incidir en la costa sin apenas ser modificados por el fondo.

El contacto entre la plataforma y la costa cantábrica se produce de modo abrupto, dando lugar a una costa recortada, en su mayor parte acantilada, en la que se suceden cabos y ensenadas. Algunas de estas ensenadas reúnen las condiciones necesarias para albergar pequeñas playas de arena o grava, si bien ninguna alcanza las dimensiones de las playas en la costa mediterránea o suratlánticas. De hecho, en la zona de estudio, tan sólo un 6% de la longitud del litoral analizado está constituido por playas, siendo este un factor fundamental que marca el tipo, calidad y cantidad de las rompientes presentes en la costa.

Son también puntos singulares en la zona de estudio las desembocaduras de los numerosos cursos de agua dulce que nacen en la cercana Cordillera Cantábrica, a escasos 50 km de la costa. Sus aguas van a parar a algunas de las ensenadas antes mencionadas. Este encuentro entre los ríos y el mar da lugar a varios estuarios y rías, que por el escaso desarrollo fluvial, nunca alcanzan dimensiones considerables. Cabe destacar los estuarios de Santoña o Santander por ser los de mayores dimensiones, pero también otros como el de Urdaibai o el de Liencres que, gracias al carácter natural de sus dinámicas, sus barras de arena adquieren disposiciones relativamente estables que producen la rotura del oleaje de manera singular, generando condiciones de surf excepcionales. Estas zonas de transición son, además, lugares de alto valor ecológico, muchos de ellos amparados bajo diversas figuras de protección ambiental.

### 7.2.1. Geología y sedimentos

Existen muchas razones por las que en este tramo de costa se dan olas tan diferentes unas de otras, pero la razón subyacente es la forma de la plataforma sobre las que estas rompen. La forma del fondo, depende de los materiales que lo forman, de la intensidad de los elementos modeladores (oleaje, corrientes) y de su edad geológica. Por este

motivo, la geología es un factor a analizar, ya que condiciona el recurso surf en cualquier zona, y especialmente en el Cantábrico oriental.

Respecto al origen geológico de la zona, si bien existen diversas teorías para explicar la evolución geotectónica del Golfo de Vizcaya, hay un consenso general de que la llamada microplaca Ibérica sufrió una deriva de la placa Euroasiática dando lugar a lo que hoy se conoce como Golfo de Vizcaya. La mayor parte de los autores sugieren que el inicio de la apertura ocurrió durante el Triásico (250 millones de años), aunque el periodo más activo tuvo lugar durante el final del Cretácico y principios del Eoceno (145-65 millones de años).



Figura 7.1. Plataforma de abrasión sobre estratos sedimentarios buzados en Meñakoz, Vizcaya.

En el periodo de conclusión de la apertura del golfo, la costa actual estaba a unos 1500 m de profundidad. Durante el oligoceno y el mioceno (34-23 millones de años) ocurrió un proceso de deformación orogénica (buzamiento de los estratos) en diversas fases que dio lugar a la conformación de la costa actual. En la configuración final han jugado un papel importante sucesivos cambios en el nivel del mar acontecidos durante el cuaternario (2.5-0.1 millones de años), que han ido generando los depósitos sedimentarios de la plataforma, las playas y los estuarios, así como la geometría de las plataformas de abrasión costeras (ej. Meñakoz en Sopelana, Vizcaya).

Aunque una pequeña parte de los sedimentos encontrados en la plataforma continental cantábrica tiene su origen en la erosión de los acantilados, la mayor parte proviene de la

carga sedimentaria aportada por los ríos. Éstos, de corto recorrido pero con una gran pendiente, generan, debido a la alta pluviometría de la región, una carga de sedimentos superior a la de los ríos de latitudes similares. No obstante, el encauzamiento de las márgenes de los ríos, la construcción de innumerables azudes y represamientos, junto a los dragados de las bocanas de numerosos puertos que aprovechan el abrigo de los estuarios más importantes, han generado un déficit sedimentario que se hace palpable en la desaparición o empeoramiento de varias rompientes, especialmente en aquellas donde se enfrentan diferentes usos del hombre.



Figura 7.2. Playa de Berria, Cantabria.

### 7.2.2. El clima en el Cantábrico Oriental

El clima de la zona de estudio es similar al de Europa Occidental. Se trata de un clima oceánico o atlántico, templado y húmedo, que es característico de las regiones más occidentales de las grandes masas continentales. El clima está definido por ser templado mesotermal sin estación seca y con veranos suaves. En Santander, por ejemplo, la temperatura media del mes más frío está en torno a los 9° C, la temperatura media del mes más cálido se estima en 20° C y la precipitación total anual supera los 1200 mm.

La zona de estudio disfruta de un régimen de temperaturas suaves y templadas, con una oscilación térmica limitada por la presencia del océano, y por la presencia de lluvias repartidas a lo largo de todo el año, siendo éstas considerablemente menos frecuentes durante el verano.

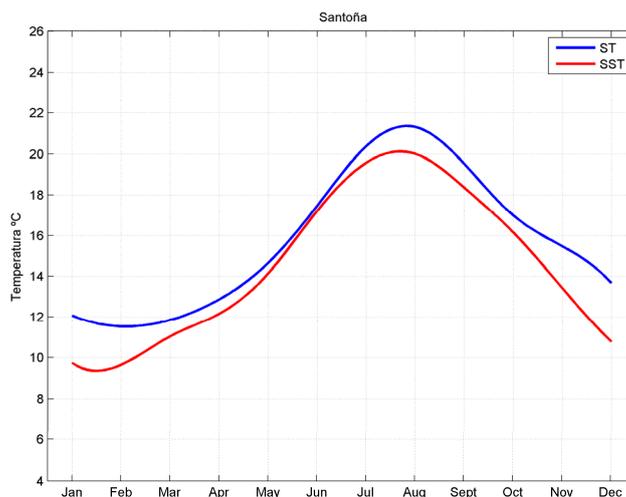


Figura 7.3. Temperatura media mensual del agua (SST) y del aire (ST) durante los años 2009-2010 en la posición de la boya de Santoña.

En relación a la temperatura superficial del agua, se tiene que durante los meses de invierno, la temperatura cae por debajo de los 10° C, superando los 15° C en primavera y otoño y alcanzando los 20° C durante el verano. En la figura 7.3 se puede apreciar como la temperatura del aire (ST) está claramente influenciada por el océano, siguiendo un patrón estacional muy similar.

La variabilidad en el corto plazo (días) de la temperatura del agua está muy influenciada por el sistema de afloramientos intermitentes característico del Cantábrico. Éstos son más intensos en la zona oeste de la plataforma cantábrica, aunque pueden alcanzar el País Vasco y suroeste de Francia, debido a la acción continuada de los vientos anticiclónicos que ocurren en primavera y verano. Por tanto, aquellas zonas protegidas de los vientos del NE, son lugares donde el afloramiento de aguas frías es más importante. Dentro de la zona de estudio, son la cara oeste de los cabos Machichaco, Cabo de Ajo y Cabo Mayor donde más probable es la ocurrencia de surgencias de aguas frías.

Como es lógico, la climatología de la región condiciona la afluencia estacional del turismo, sin embargo, en lo referente al turismo del surf, el patrón estacional se ve modificado. La ocurrencia conjunta de condiciones favorables de oleaje y vientos, junto con temperaturas agradables, hacen que los máximos estivales se prolonguen hasta principios de Noviembre, comenzando también antes, hacia finales de Abril. El surf

local, a pesar de presentar un descenso en el número de usuarios durante los meses más fríos, mantiene un comportamiento más homogéneo a lo largo de todo el año, habiéndose observado un uso del recurso moderado en Cantabria e intenso en el País Vasco.

### 7.2.3. Las mareas

La marea astronómica en el Golfo de Vizcaya es semidiurna, es decir, tiene un periodo entre 12 y 12.5 horas, por lo que se aprecian dos pleamares y dos bajamares al día. La amplitud de la marea (carrera de marea) presenta variaciones significativas a lo largo de la zona de estudio. Estas variaciones, originadas por la propagación de la misma a lo largo de la plataforma, provocan amplitudes máximas en Santander (carrera máxima de 5 m) que curiosamente decrece a ambos lados (carrera de marea máxima en Bilbao y Gijón de 4.5 m).



Figura 7.4. Vista aérea del estuario de Urdaibai, Vizcaya.

En relación al surf, las mareas juegan un papel determinante, ya que la relación entre la carrera de marea y la altura de ola media surfable es muy grande, del orden de 2:1. Esto provoca que la mayor parte de los *spots* presenten óptimos funcionales durante rangos determinados de nivel del mar. Así, algunas rompientes como el Sardinero o el Brusco en Noja generan mejores olas durante la pleamar, mientras que otras como Mundaka lo hacen durante la bajamar. Por tanto, la marea tienen un efecto limitante, haciendo que

durante las fases vivas, la ventana temporal de condiciones surfeables en un determinado *spot* sea menor que durante las mareas muertas.

Por otro lado, la marea astronómica es el principal motor modelador de los estuarios de la zona. El continuo flujo y reflujo de las mareas en el interior de los estuarios genera corrientes rápidas en las desembocaduras, muy superiores a las corrientes fluviales. Son estas corrientes las que, en sinergia con el oleaje, modelan las barras de marea exteriores de Mundaka o Liencres.



Figura 7.5. Ola rompiendo sobre la barra de arena de la Ría de Liencres. Fuente: [www.surfcantabria.com](http://www.surfcantabria.com).

Otro factor que puede afectar al surf en la zona de estudio es la marea meteorológica. Estas variaciones en el nivel del mar son provocadas por la acción del viento y las diferencias de presión atmosférica. Por lo que ante situaciones de vientos intensos del noroeste y bajas presiones, puede ocurrir que el nivel del mar se encuentre hasta medio metro más elevado de lo previsto.

#### 7.2.4. Los *spots* de surf en la zona de estudio

La costa cantábrica contiene todo tipo de rompientes de excelente calidad, algunas de ellas soportan oleajes de gran tamaño (ej. Meñakoz, Santa Marina o Punta Galea). De todos ellos, es Mundaka, la rompiente más conocida a nivel internacional. En la figura 7.6, se muestra la distribución espacial de las rompientes de surf en la zona, nótese como éstas, en general, se concentran en las cercanías de los principales núcleos de

población, Bilbao y Santander, un 37% de ellas se encuentra en áreas urbanas o semiurbanas.

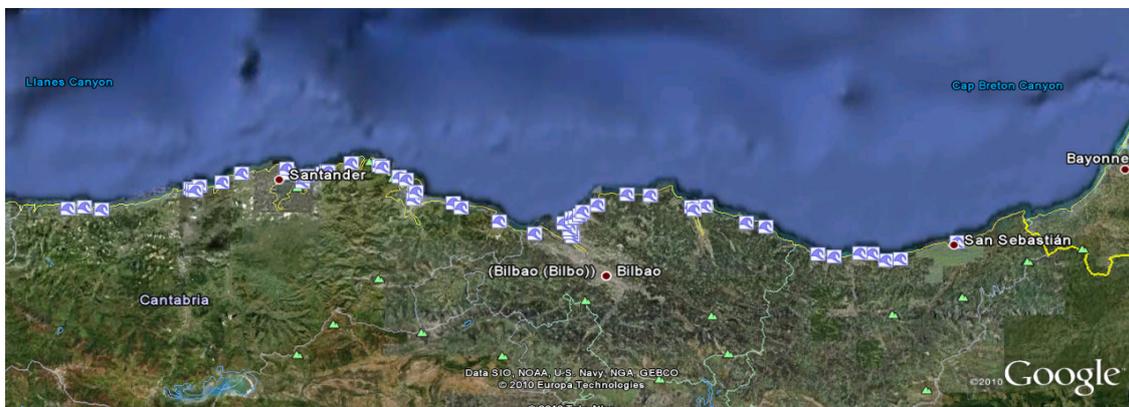


Figura 7.6. Distribución espacial de las rompientes de surf en la zona de estudio.

Cantabria presenta, por sus características geológicas, un mayor número de rompientes de playa que de arrecifes rocosos de calidad. Por este motivo, el surf en esta región, se concentra en aquellas playas que funcionan con tamaño del oleaje pequeño o mediano (0.5-1.5 m). Cantabria presenta la ventaja de poseer rompientes muy protegidas de los temporales invernales, playas como Oyambre, el Sardinero, o Laredo, con orientación NE, son buenos ejemplos de ello. Son también conocidas las rompientes de Santa Marina o la Vaca en las inmediaciones de Santander, olas muy valoradas por la comunidad surfista local. Destacan, por otro lado, las playas de Liencres, que frecuentemente muestra bancos de arena muy favorables para el surf, o la playa del Brusco en Noja, rompiente famosa por la forma tubular de sus olas gracias al gradiente en la altura de ola inducida por el bajo exterior de los Hermanos, a unos 4 m de profundidad.



Figura 7.7. El Brusco, Noja. Fuente: [www.surfcantabria.com](http://www.surfcantabria.com).

La isla de Santa Marina, en el extremo oriental de la bahía de Santander, cuenta con una de las olas más potentes del litoral cántabro, la derecha de Santa Marina (tipo *point-break*). Protegida de los vientos del este y nordeste, la ola pone a prueba a los surfistas más curtidos, y es punto de peregrinación de “tamañeros” (surfistas que buscan olas de más de tres o cuatro metros). Por su potencia y fondo, plagado de rocas, la de Santa Marina es una ola peligrosa, recomendada sólo para surfistas experimentados.



Figura 7.8. La Isla de Santa Marina, Loredó. Fuente: [www.surfcantabria.com](http://www.surfcantabria.com).

El País Vasco también contiene numerosas playas para el surf, aunque estas son menos numerosas. Esta región es más conocida por poseer olas de mayor potencia, algunas de ellas surfeables con alturas de ola superior a los 6 m (Orrua o Meñakoz). Al igual que en Cantabria, existen rompientes protegidas de la severidad del clima marítimo invernal (Plentzia o el Basurero, al norte de Bermeo), sin embargo, no son tan frecuentes. También son famosas la Triangular en Sopelana, por las olas de derechas que genera su arrecife rocoso, o Zarautz *beach-break* de alta calidad con un alto índice de uso. Sin embargo la rompiente más popular es Mundaka, que hasta 2008, acogía la 7ª prueba del circuito *ASP World Tour*. Esta ola, con rotura en voluta intensa, se caracteriza por mostrar un vórtice muy bien formado, de modo que en los días que recibe un oleaje adecuado, el surfista puede permanecer en el tubo más de 10 segundos, recorriendo una distancia aproximada de unos 100 m. La ola comienza a ser surfeable a partir de  $H_s = 0.5$  m, mostrando su mayor potencial a partir de los 2 m, sin embargo, puede ser surfeada con mayor tamaño. El viento ideal para Mundaka es de dirección SW, el cual se produce frecuentemente durante el Otoño.

El impacto negativo con mayor repercusión mediática que el hombre ha producido en el surf en esta zona ocurrió en 2003, cuando los Astilleros de Murueta, para facilitar la salida al mar de sus embarcaciones, dragaron 287.000 m<sup>3</sup> de arena, vertiéndola posteriormente sobre la playa de Laida. Esta actuación modificó el patrón de corrientes de la Ría de Urdaibai, causando la deformación de la barra de Mundaka y por tanto la desaparición de su famosa ola. Otros casos notables, muy similares, son el de la Fortaleza en Santoña o los Peligros en Santander. Rompientes de alta calidad situadas en la margen oeste de sendos estuarios, que, debido a dragados periódicos, no consiguen alcanzar su estado natural.

Para caracterizar el recurso surf en la zona de estudio, se ha realizado un análisis exhaustivo de más de 70 rompientes distribuidas a lo largo de Cantabria y País Vasco. El análisis está basado en la experiencia de la comunidad surfista de la región, información que ha sido completada y contrastada con diferentes guías de surf, entre ellas “*Stormrider Guide Europe; The Continent*”, editorial Lowpressure, “La Guía de surf de España”, (Pellón, 2009), y la guía web [www.wannasurf.com](http://www.wannasurf.com). GoogleEarth se presenta además como una potente herramienta que facilita la clasificación, verificación y medida de la longitud de la sección surfeable de cada *spot*.

Las rompientes pueden ser catalogadas bajo múltiples criterios ya que son diferentes aspectos los que intervienen en el recurso surf. Los aspectos considerados para analizar la parte morfológica y social del recurso se describen a continuación:

- **Calidad de la rompiente:** Se han clasificado los diferentes *spots* en cuatro categorías.
  - **Ordinaria:** Rompiente que genera olas cortas o con rotura variable o impredecible. El *peel angle* es demasiado grande o pequeño. Ej. Playa de Arrigunaga.
  - **Buena:** Rompiente con una o dos secciones con *peel angles* adecuados. Permite la realización de ciertas maniobras. Ej. Playa de Somo.

- **Regional class:** Son aquellas *spots* destacables dentro de cada región. Son rompientes con una o más secciones cómodamente maniobrables. *Peel angle* adecuado durante toda la longitud de la ola con secciones ocasionales de tubo. Ej. El Brusco.
- **World class:** Rompiente consistente, altamente maniobrable o con secciones tubulares muy largas y perfectas. *Peel angle* óptimo durante prácticamente toda la longitud de la ola. Ciertos *spots* que permiten la rotura surfable de olas mayores a los 3 m, son también englobados en esta categoría.

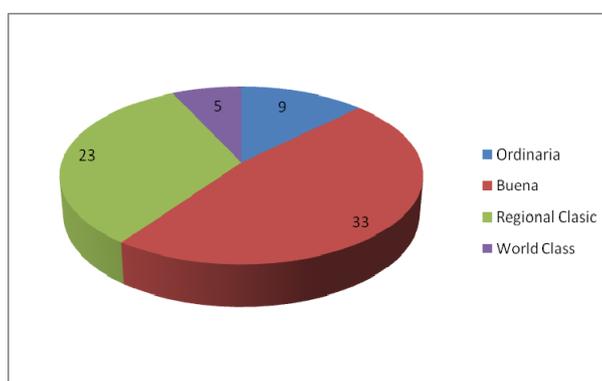


Figura 7.9. Clasificación de los *spots* de surf del Cantábrico Oriental en función de su calidad.

- **Tamaño del oleaje:** Hace referencia al tamaño del *swell* incidente. Se han catalogado las rompientes considerando su rango de funcionamiento aproximado en incrementos de 0.5 m. La figura 7.10 muestra el número de rompientes que pueden funcionar en función la altura de ola significativa.

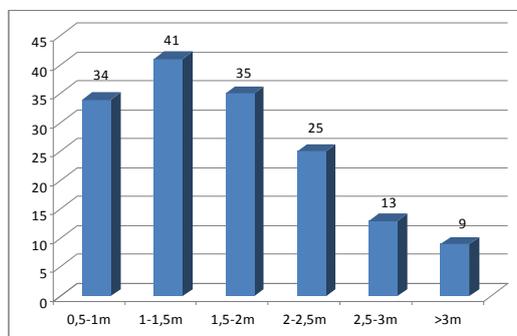


Figura 7.10. Número de rompientes potencialmente operativas dependiendo del tamaño del oleaje al pie de la misma.

- **Tipología de rompiente:** Según se expuso en el Capítulo 1, las rompientes pueden ser clasificadas en función de la tipología del elemento batimétrico que produce la rotura en: *beach-break*, *point-break* o *headland*, *reef-break* y *rivermouth*. También se ha considerado la categoría *man made break*, haciendo referencia a las rompientes generadas por la construcción de obras marítimas. En este sentido, el tipo de roca y la historia geológica de la zona juegan un papel fundamental. En la figura 7.11 se muestra la proporción de cada una de estas tipologías presentes en el área de estudio.

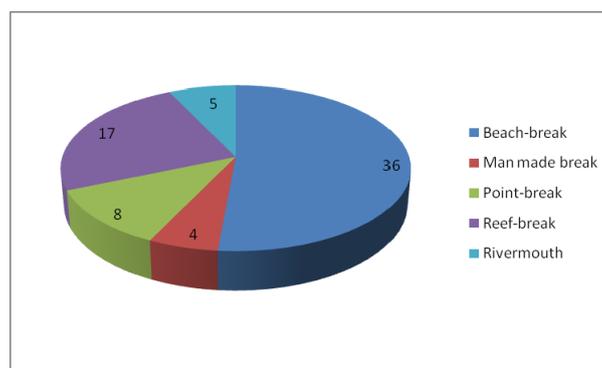


Figura 7.11. Clasificación de los *spots* de surf del Cantábrico Oriental en función del tipo de elemento batimétrico que provoca la rotura.

- **Intensidad de la rotura:** Se han clasificado las rompientes en función de las cinco categorías que se describen a continuación:
  - Suave: Rotura en *spilling* de moderado a intenso. Rotura típica de playas disipativas.
  - Rápida: Rotura en *spilling* intenso o voluta, con *peel angle* demasiado bajo, por lo que la ola rompe longitudinalmente muy rápido, cerrando en la mayoría de las ocasiones. Rotura típica en playas encajadas o reflejantes.
  - Maniobrable: Como la anterior pero con *peel angle* intermedio. La ola permite la realización y encadenamiento de varias maniobras a excepción del tubo. Rompiente típica *point-break* con pendiente suave.

- Hueca: Rotura en voluta intensa, permite la realización de tubos. Típica en playas, fondos rocosos de elevada pendiente y *rivermouths*.
- *Big wave*: Se ha añadido esta categoría para incluir de manera genérica aquellos *spots* que generan la rotura en forma surfeable para tamaños del oleaje superior a los 3 m.

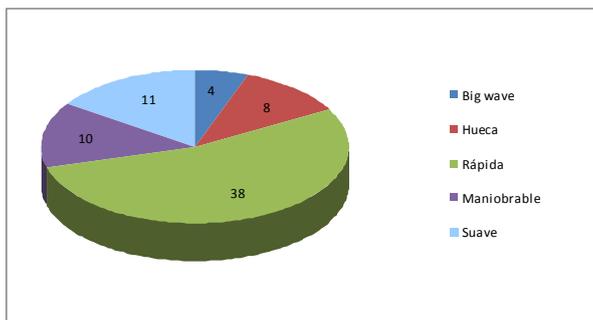


Figura 7.12. Clasificación de los *spots* de surf del Cantábrico Oriental en función de la intensidad de la rotura.

- **Sentido de la rotura:** El sentido de la rotura juega un papel fundamental para muchos surfistas, especialmente para los de nivel intermedio. El surfista, maniobra más cómodamente cuando el desplazamiento se produce de cara a la ola, por lo que conviene caracterizar este factor. Las categorías son, desde el punto de vista del surfista: de derechas, de izquierdas o rotura en ambos sentidos.

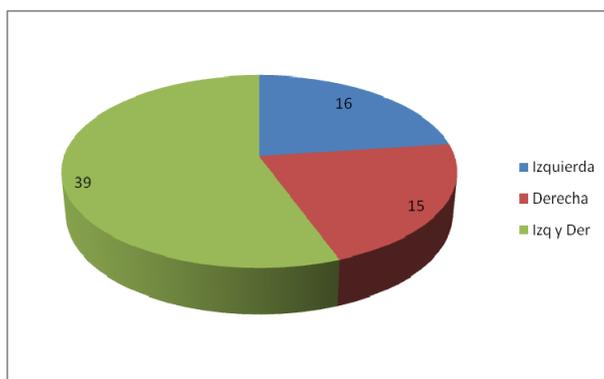


Figura 7.13. Clasificación de los *spots* de surf del Cantábrico Oriental en función del sentido de la rotura.

- **Longitud de la sección:** Se entiende por longitud de la sección, la distancia que un surfista es capaz de recorrer sobre el frente de la ola, sin contar el desplazamiento sobre la espuma de la ola ya rota. Este es un factor muy

importante ya que frecuentemente la calidad se vincula a la distancia máxima surfable, aunque intervienen el resto de factores que se describen. En la figura 7.14 se muestra un histograma donde se puede observar la distribución de las rompientes en función de la longitud de la sección.

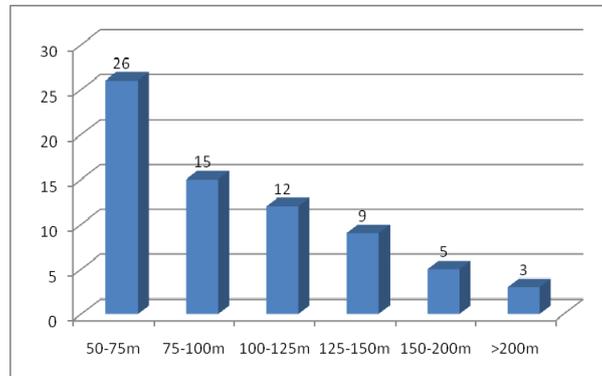


Figura 7.14. Clasificación de los spots de surf del Cantábrico Oriental en función de la longitud de la sección.

- **Nivel de marea:** Como se ha explicado anteriormente, la marea astronómica ejerce un efecto limitante en la disponibilidad del recurso surf en Cantabria y País Vasco, por su carácter macromareal. En la figura 7.15 se muestra el número de rompientes que funcionan en función del nivel de la marea.

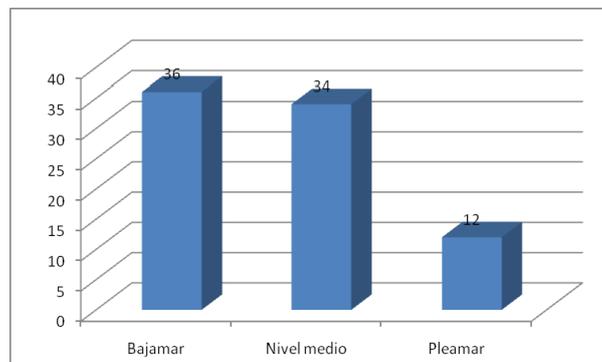


Figura 7.15. Número de rompientes potencialmente funcionales dependiendo del nivel de marea.

- **Nivel de experiencia requerido:** Esta clasificación es realmente interesante desde el punto de vista del turista foráneo, ya que permite la elección del destino en función de su nivel de surf. Se han clasificado las olas en las siguientes categorías: iniciación, surfistas con experiencia y todos los surfistas. En la figura 7.16 se muestra la clasificación obtenida.

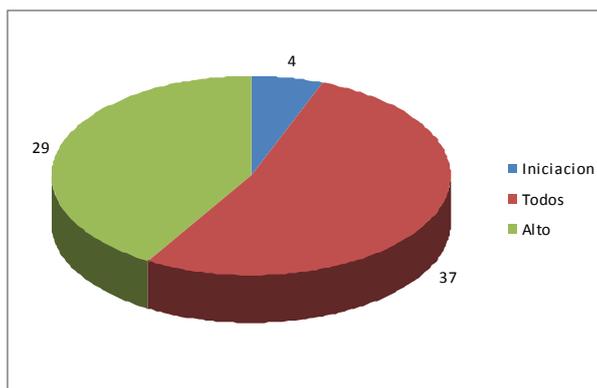


Figura 7.16. Clasificación de los *spots* de surf del Cantábrico Oriental en función del nivel de experiencia requerido.

- Nivel de uso:** Para un surfista experimentado, un nivel de uso intenso de un *spot* puede influir negativamente en la calidad del mismo. Se han considerado cuatro niveles de uso en relación al número de surfistas que suelen acudir a surfear a un *spot* cuando las condiciones son adecuadas. Un uso ligero sería aquel en el que se puede surfear cómodamente (<10 personas por pico de surf), el resto de las categorías son: nivel de uso moderado (10-20 personas), nivel de uso intenso (20-50 personas) y sobre explotado (>50 personas).

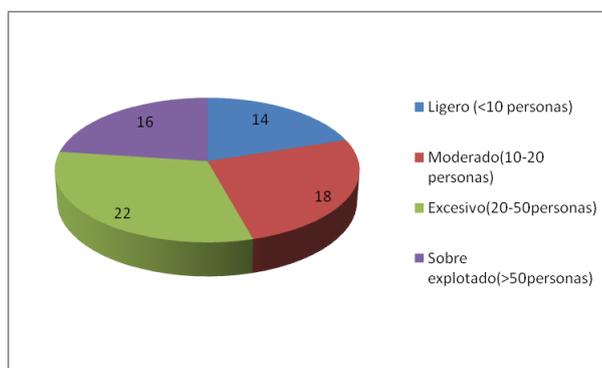


Figura 7.17. Clasificación de los *spots* de surf del Cantábrico Oriental en función de la intensidad de uso.

### 7.2.5. Variabilidad temporal de los fondos para el surf

La alta variabilidad estacional e interanual del oleaje en la zona, modifica continuamente la morfología de las playas, sus barras de arena y la disposición de la berma, y por lo tanto, la forma en la que rompen las olas. Durante el verano, debido a la menor acción del oleaje, las playas acumulan arena en la parte alta del perfil, volviéndolo

más reflejante, con barras longitudinales más abruptas. Ciertos bajos rocosos, emergidos durante el invierno, se ven colmatados por la arena, perdiendo su capacidad de generar olas surfeables. Este mismo fenómeno acontece en las barras arenosas exteriores de los estuarios, adquiriendo su conformación óptima a finales del verano, para producir las mejores olas a principios del otoño, con la llegada de los primeros grandes *swells* de la temporada de surf en el Cantábrico. Así, por término medio, la calidad de las rompientes tipo *bech-break* y *rivermouth*, es máxima a finales del verano y principios del otoño, decrece durante el invierno, y comienza a recuperarse en primavera. Por otro lado, las rompientes tipo arrecife o *pointbreak* mantienen la misma configuración durante todo el año. Este patrón puede cambiar en función de la severidad del clima marítimo, ante años muy lluviosos o ante la intervención humana. Del mismo modo, arrecifes o *point-breaks* con influencia sedimentaria pueden presentar patrones temporales opuestos a los descritos, ya que su efecto en el oleaje suele ser mayor en ausencia de sedimento.

### 7.3. Metodología para el estudio de las condiciones de surf a pie de rompiente

Para realizar un análisis histórico de las condiciones de surf a lo largo de un tramo de costa se hace indispensable disponer de series temporales largas de variables descriptoras del oleaje, con ausencia de huecos y que resuelvan los posibles gradientes espaciales que de forma natural presenta el oleaje. Así, una vez más, los datos procedentes de modelos numéricos se presentan como los más adecuados para realizar estudios de este tipo.

Debido a numerosas simplificaciones (tanto en los procesos como en la resolución espacial y temporal del dominio) inherentes al modelado numérico, los resultados obtenidos han de ser calibrados con el objetivo de aumentar la calidad y fiabilidad de los mismos. Esta calibración ha de basarse siempre en datos instrumentales. De todos ellos, son las boyas y los altímetros, los más utilizados para realizar esta tarea. Por un lado, las boyas miden el oleaje en una posición fija y con una alta resolución temporal (1-3 horas). Los registros obtenidos mediante esta vía son de carácter local y frecuentemente

presentan huecos debido al fallo y/o mantenimiento de las mismas. Por otro lado, los altímetros satelitales miden el oleaje en mar abierto, con una cobertura espacial global, una resolución espacial limitada a la trayectoria de los satélites y una resolución temporal limitada por el tiempo que un satélite tarda en pasar dos veces por el mismo punto ( $\approx 10$  días). Por este motivo, en esta metodología los datos procedentes de altímetros se han empleado en la calibración del reanálisis numérico, mientras que las boyas se han utilizado para la validación de los resultados obtenidos.

Una vez se dispone de datos calibrados de oleaje frente a la zona de estudio, éstos han de ser propagados hacia la costa con objeto de resolver la interacción detallada del oleaje con los elementos batimétricos del fondo y los contornos de tierra. Como se dijo en el Capítulo 4, el reanálisis de partida GOW 1.0 (IH Cantabria), ofrece datos de oleaje de una gran duración (1948-2008) y con resolución horaria, lo que supone alrededor de 525.000 estados de mar. Propagar un número tan ingente de situaciones de oleaje es inviable desde el punto de vista computacional, por tanto, para optimizar el proceso se suelen emplear técnicas o algoritmos matemáticos de selección de un número de situaciones representativas del oleaje y viento en profundidades indefinidas. Para tener en cuenta la variabilidad espacial del oleaje y la posible generación local de oleaje por la acción de vientos cercanos a costa, la clasificación se realiza en base a una serie de nodos de reanálisis. Puesto que se han de considerar un gran número de variables a la vez, las técnicas de selección o clasificación han de ser capaces de sintetizar información de una alta dimensionalidad.

Posteriormente, los casos seleccionados (situaciones representativas de oleaje y viento) se propagan haciendo uso de modelos numéricos que resuelven los principales procesos físicos en la transformación del oleaje, permitiendo conocer con detalle las características de éste en las inmediaciones de la rompiente. En este punto, mediante técnicas de interpolación adecuadas a la alta dimensionalidad de los datos, se reconstruyen las series temporales de las variables de interés para evaluar la calidad de las condiciones de surf.

Así, la metodología para trasladar el oleaje desde los nodos de reanálisis en profundidades indefinidas a pie de rompiente y analizar las condiciones de surf, puede ser resumida en los siguientes pasos (figura 7.18):

- a) Análisis de las bases de datos disponibles y elección de las variables más apropiadas para caracterizar las condiciones de surf.
- b) Definición de mallas para el modelo de propagación, llegando a un compromiso entre el dominio espacial a resolver, la resolución espacial y el coste computacional.
- c) Calibración de los datos de reanálisis en profundidades indefinidas (contornos de la malla de propagación) en base a datos de altimetría satelital.
- d) Clasificación de aquellos estados de mar estadísticamente representativos de la muestra multidimensional de las variables consideradas.
- e) Propagación de los estados de mar seleccionados.
- f) Reconstrucción de la serie temporal en el punto o en los puntos objetivo en base a las técnicas de interpolación multidimensional.
- g) Validación de las series temporales reconstruidas en posiciones coincidentes con registros de boyas.
- h) Análisis histórico de las condiciones de surf, distribución espacial, climatología, variaciones interanuales y tendencias.

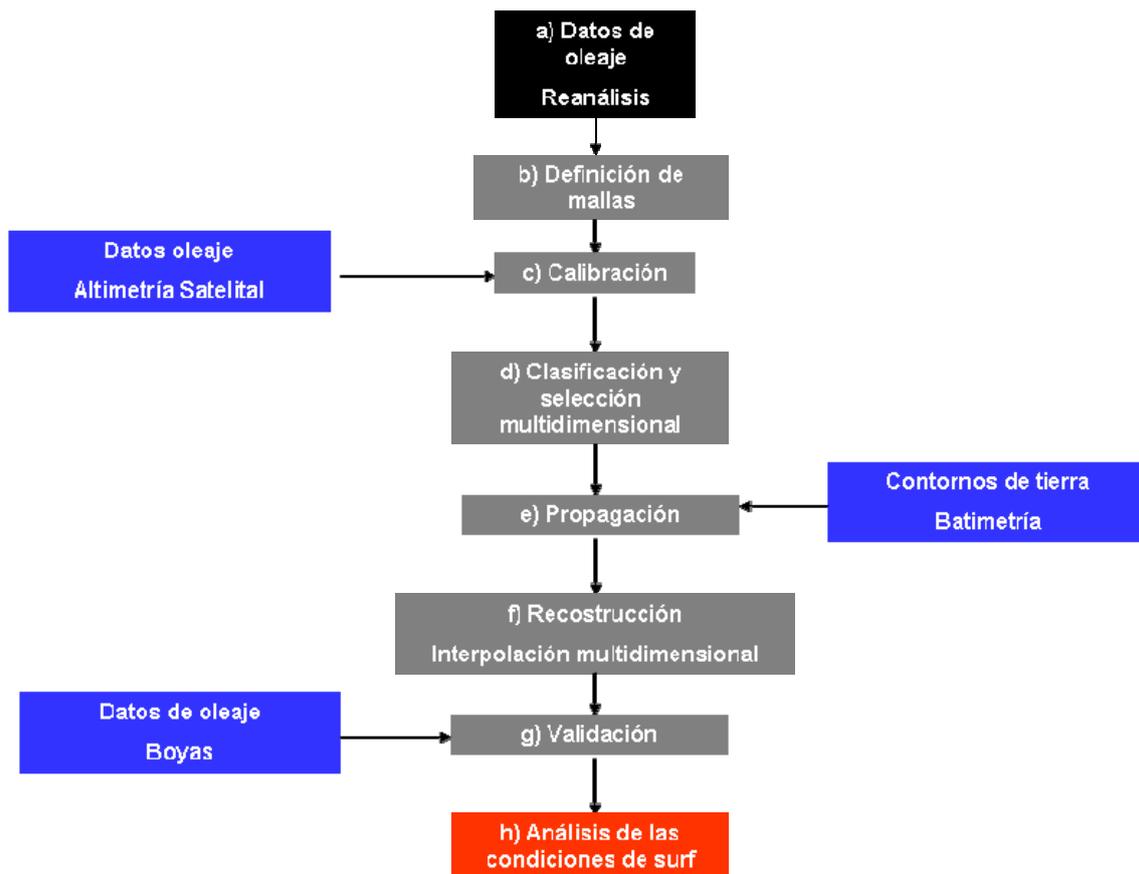


Figura 7.18. Metodología de transferencia del oleaje desde profundidades indefinidas a aguas someras para el análisis de las condiciones de surf.

## 7.4. Bases de datos utilizadas

Para la realización de este estudio se requiere de un gran número de datos descriptores del oleaje y viento, tanto de carácter numérico como instrumental. Al mismo tiempo también se requiere de datos batimétricos fiables de alta resolución con el fin de resolver los procesos físicos en la propagación del oleaje hacia la costa. En este apartado se describen los datos empleados para la caracterización de las condiciones de surf en un tramo de la costa norte española.

### 7.4.1. Batimetrías

El conocimiento detallado de la forma del fondo marino es crucial para analizar las transformaciones del oleaje antes de que éste incida en la rompiente en forma de olas surfeables. A medida que el oleaje se aproxima a la costa el efecto del fondo empieza a

hacerse palpable. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en variaciones de la altura de ola y en la dirección de propagación. Los fenómenos más importantes que sufre el oleaje cuando se acerca a la costa son: la refracción y el asomeramiento, debido a la batimetría y las corrientes; la difracción, como consecuencia de la presencia de cabos o islas y la pérdida de energía debido a la disipación con el fondo o fricción con el viento. Estos procesos hacen que la forma del espectro cambie bruscamente de unas zonas a otras, siendo la dispersión direccional y frecuencial los parámetros fundamentales para definir el grado de “limpieza” de un estado de mar surfable. Así, los contornos y formas del fondo actúan como preconditionantes del oleaje que llega a la costa. Por este motivo es frecuente encontrar condiciones de surf muy diferentes en rompientes que por su proximidad deberían presentar condiciones muy parecidas.

En este estudio se han analizado batimetrías de procedencias diferentes. Para las mallas exteriores se ha empleado la batimetría global GEBCO, *General Bathymetric Chart of the Oceans*, con una resolución espacial de 1 minuto ( $\approx 2$  km) suministrada por el *British Oceanographic Data Centre* (BDOC). Esta batimetría ha sido completada con cartas náuticas de detalle disponibles en la base de datos BACO de IH Cantabria. El ensamblaje de ambas batimetrías se ha llevado a cabo tomando como referencia el nivel 0 correspondiente de cada carta náutica.

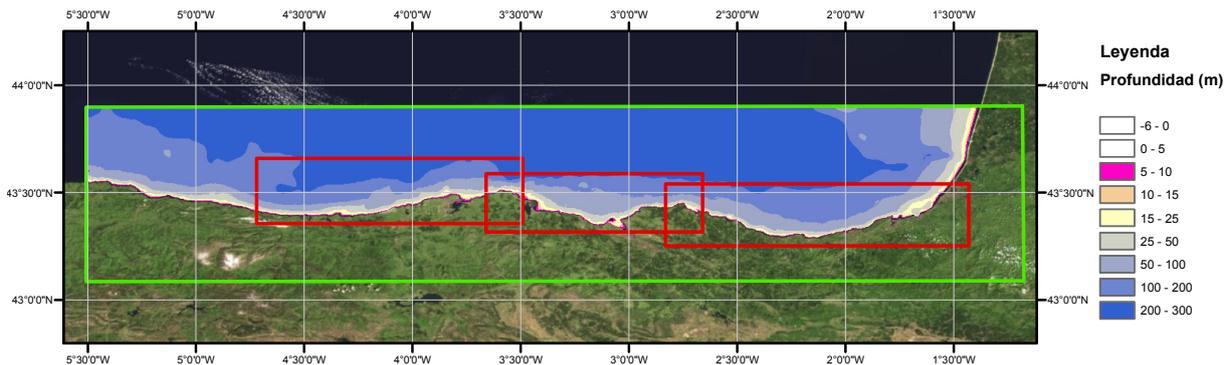


Figura 7.19. Batimetría utilizada

## 7.4.2. Bases de datos instrumentales

Con base en las características inherentes a cada método de medida del oleaje, podemos clasificar los datos instrumentales en dos subgrupos: instrumentos de medida *insitu*

(boyas de oleaje) e instrumentos de medida remotos (altímetros satelitales). Mientras las boyas miden en continuo la superficie libre del mar en un punto (discretizando en periodos de 10 a 30 minutos), los altímetros capturan imágenes de la superficie del mar en un área limitada. A partir de estas imágenes se obtienen parámetros que describen el oleaje. Para la correcta caracterización del clima marítimo en aguas someras es importante considerar la marea astronómica, ya que si esta es de una entidad considerable ( $\geq 1$  m), el efecto en la propagación del oleaje puede ser muy importante. A continuación se describen las boyas de media de oleaje y mareógrafos con los que se ha trabajado en este estudio.

#### 7.4.2.1. Mareógrafos

Para determinar las características de la marea en el área de estudio se dispone de dos mareógrafos (Santander y Bilbao) pertenecientes a la red REDMAR del Organismo Público Puertos del Estado. Esta red proporciona datos del nivel del mar desde 1992 en diferentes estaciones a lo largo del litoral español, normalmente ubicadas en puertos comerciales. Cada puerto define un nivel de referencia o cero del puerto que puede diferir de unas zonas a otras.

A partir del registro de superficie libre del mareógrafo se realiza un análisis armónico a partir del cual se obtienen las componentes armónicas principales, con las que es posible reconstruir la serie temporal del nivel del mar en la zona representada por dicho instrumento, y establecer así los niveles de referencia para propagar el oleaje.

Una vez obtenidas las componentes armónicas más importantes de la marea en una localidad dada, el nivel del mar puede ser recompuesto según la ecuación:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega t - \phi_i) \quad (7.1)$$

donde,  $\eta$  es el nivel del mar,  $a_0$  es el nivel medio respecto al cero del puerto,  $a_i$  es la amplitud de la  $i$ -ésima componente,  $\omega_i$  es la frecuencia angular de la  $i$ -ésima y  $\phi_i$  su amplitud y  $N$  el número de componentes.

#### 7.4.2.2. Boyas de medida de oleaje

Para el análisis de las condiciones de surf, se han utilizado boyas de aguas profundas (REDEXT) y de aguas costeras (REDCOS) del Organismo Público Puertos del Estado (OPPE). Además han sido utilizadas dos boyas de aguas someras, pertenecientes a la Red Vigía, de la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria (ver figura 7.20).

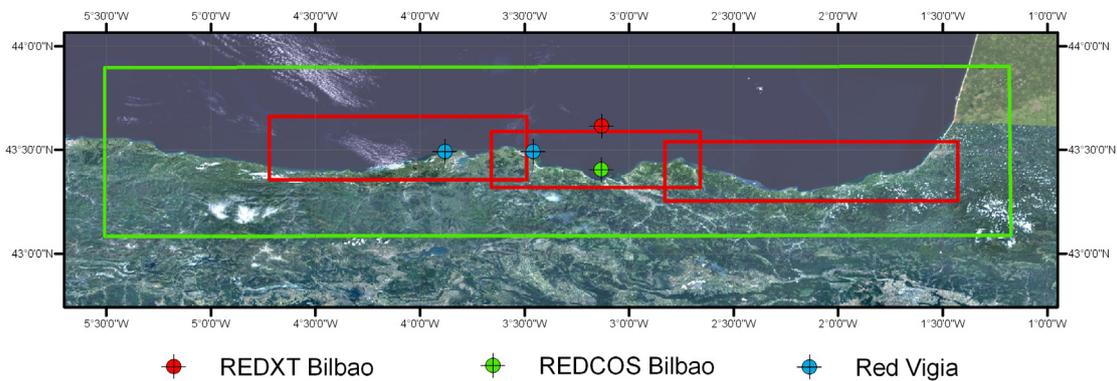


Figura 7.20. Posición de las boyas de oleaje utilizadas en el estudio.

En cuanto a la red exterior, se ha utilizado el registro espectral de la boya de Bilbao con el objetivo de analizar las características espectrales del oleaje en esta zona del litoral español. Las boyas exterior y costera de Bilbao, así como las pertenecientes a la Red Vigía han sido empleadas en distintas fases de la validación de la metodología planteada. En la figura 7.21 se muestra la serie temporal de las variables de oleaje obtenidas a partir del registro espectral de la boya exterior de Bilbao.

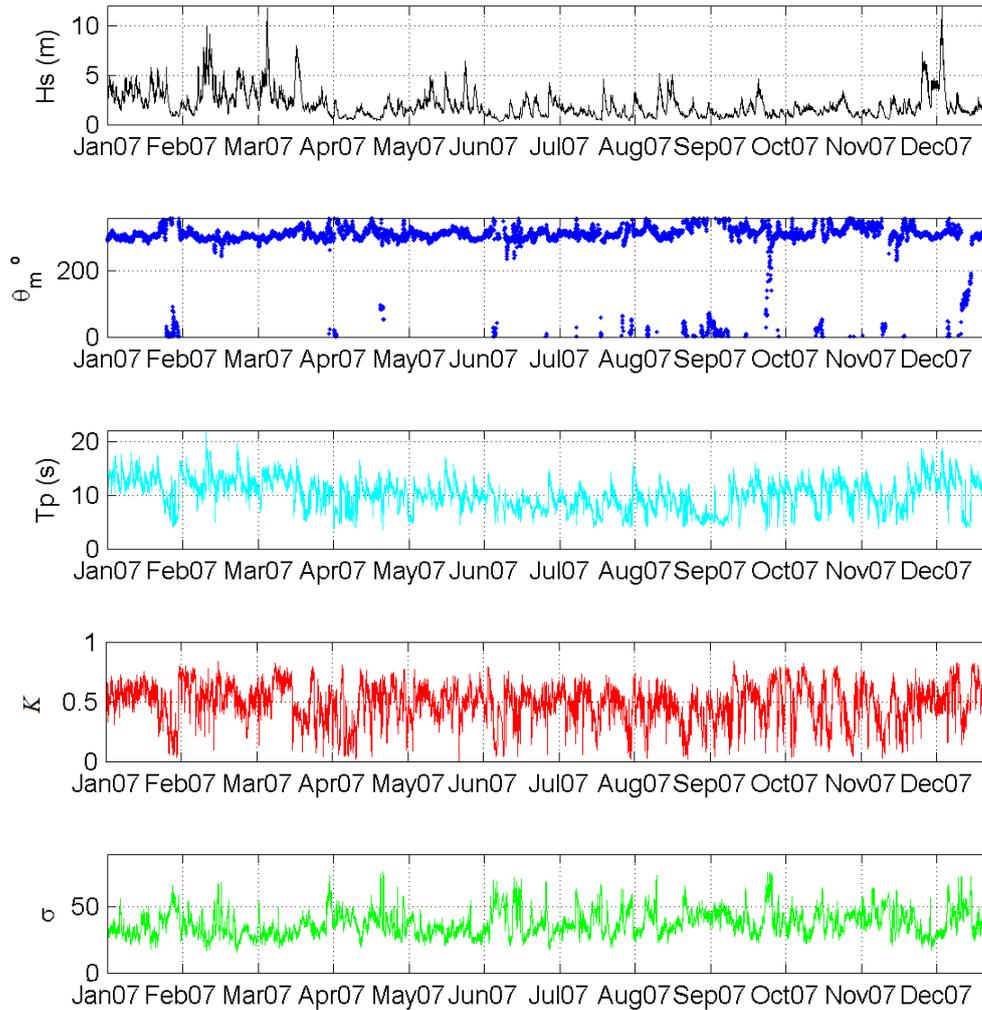


Figura 7.21. Serie temporal (año 2007) de las variables  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$ ,  $\kappa$ ,  $\sigma$  obtenidas a partir del registro espectral de la REDEXT Bilbao.

#### 7.4.2.3. Datos de oleaje de altímetros satelitales

Condicionado por las características espacio-temporales de este tipo de datos instrumentales, el oleaje medido por los satélites es empleado en la fase de calibración del modelo numérico. Por término medio, cada satélite tarda alrededor de unos 10 días en medir en un mismo punto, y además la zona de registro se ve limitada a la trayectoria orbital específica. Por estas razones, se han agregado los datos de 6 misiones satelitales, estas son: TOPEX, TOPEX2, Jason, Envisat y Geosat Follow-On (GFO), entre los años 1992 y 2008.

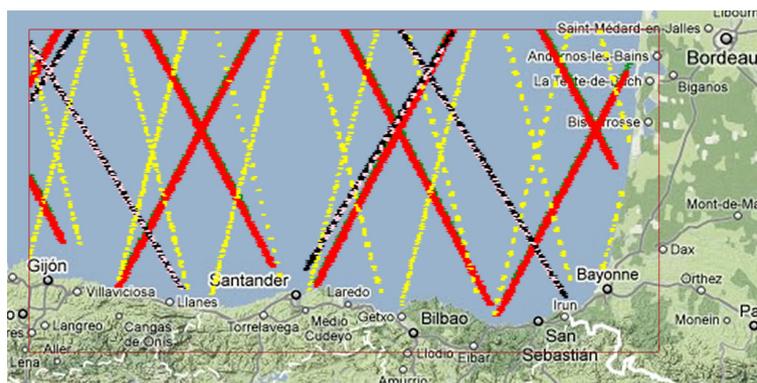


Figura 7.22. Datos de altimetría satelital disponibles en el área de estudio.

### 7.4.3. Bases de datos procedentes del modelado numérico

Los datos de reanálisis a partir de los cuales se obtiene la información necesaria para realizar un estudio de este tipo pueden ser clasificados en dos grupos: reanálisis atmosféricos y de oleaje.

#### 7.4.3.1. Reanálisis atmosférico

A partir del reanálisis atmosférico global NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) se obtienen los vientos que se utilizan como forzamientos para generar los campos de oleaje. Debido a que estos vientos han sido modelados a una resolución de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  (más que suficiente para la correcta generación de oleaje en mar abierto), para conocer con mayor detalle el comportamiento del viento en la zona de estudio, se ha empleado el viento a 10 m de altura procedente del *downscaling* dinámico SeaWind NCEP (IH Cantabria). La base de datos SeaWind utiliza una malla de proyección cónica tipo Lambert, con una resolución espacial de 30 km y temporal horaria. Estos datos han sido empleados en la evaluación del criterio de vientos en cada punto de estudio. Sin embargo, como se verá más adelante, el modelo de propagación ha sido forzado directamente con los vientos NCEP, ya que un aumento en la resolución espacial no mejoraba sustancialmente los resultados. La validación de SeaWind mediante datos de viento de satélite, se muestra en el Capítulo 4.

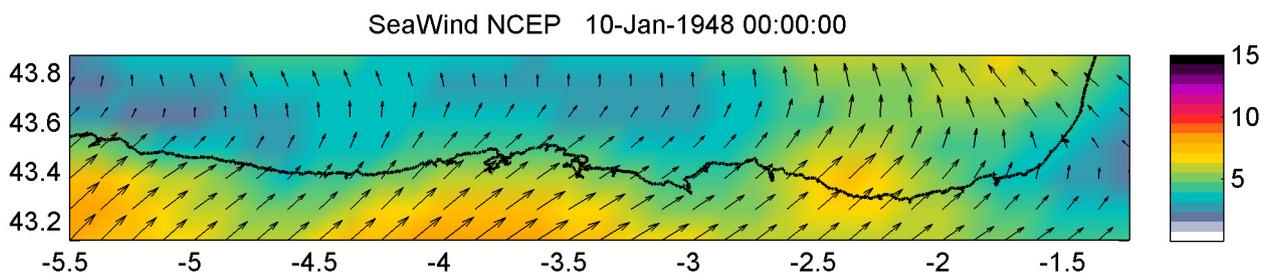


Figura 7.23. Vientos del *downscaling* SeaWind NCEP en el área de estudio.

También se han utilizado los campos de presiones a nivel del mar (SLP) 6-horarios con una resolución espacial de  $5^\circ \times 5^\circ$ , procedentes del reanálisis global NCEP/NCAR. Concretamente los de la zona noreste del Atlántico, entre las coordenadas  $25\text{-}70^\circ \text{ N}$  y  $60\text{-}10^\circ \text{ E}$ . Este área cubre la zona de generación de tormentas extratropicales y de los ocasionales ciclones tropicales susceptibles de enviar oleajes a la zona de estudio, pudiendo ser utilizada como predictor de las condiciones de surf en el Cantábrico Oriental.

#### 7.4.3.2. Reanálisis de oleaje

El oleaje ha sido obtenido a partir del reanálisis GOW 1.0 (*Global Ocean Waves 1.0*) de IH Cantabria. Este reanálisis, con cobertura global, ofrece datos cada hora durante el periodo 1948-2008, utilizando como forzamientos los vientos del *hindcast* NCEP/NCAR. La resolución de esta base de datos es de  $1.5^\circ \times 1^\circ$  en mar abierto, y de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  en las proximidades de la costa.

El modelo utilizado para simular el oleaje ha sido el *Wave Watch III* (WWIII, Tolman 1997, 1999). Este modelo, además de generar en cada nodo de la malla los parámetros descriptores del oleaje comúnmente empleados ( $H_s, T_m, T_p$ , etc.), es capaz de almacenar los espectros horarios en los puntos de interés. Estos espectros, junto al viento, serán los forzamientos en el modelo anidado SWAN de propagación de oleaje. Ambos modelos resuelven la ecuación de balance de energía espectral, por lo que trabajar directamente con el espectro en lugar de con parámetros agregados otorga una mejora cualitativa en el conocimiento del oleaje en las proximidades de la rompiente.

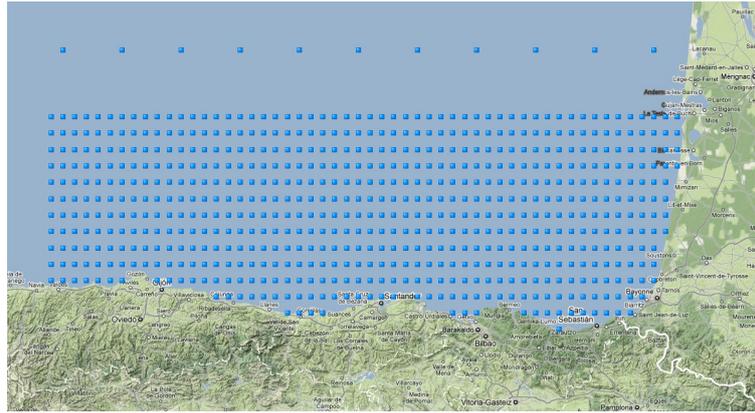


Figura 7.24. Datos de reanálisis de oleaje disponibles en el área de estudio.

## 7.5. Selección de mallas

La propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas someras se realiza mediante el modelo numérico de propagación SWAN (*Simulating WAaves Nearshore*) desarrollado por *Delft University of Technology* (Booij, *et al.*, 1999). Cada una de las situaciones de oleaje a propagar está definida por unas condiciones de contorno, que vienen dadas por los campos de oleaje y viento procedentes de la bases de datos de reanálisis.

Para la ejecución del modelo numérico, son necesarias una serie de mallas de cálculo que permitan la transferencia del oleaje desde la posición de los datos espectrales hasta la costa. Además, a estas mallas se le anidan otra serie de mallas de tamaño inferior pero con mayor resolución espacial para poder ofrecer unos resultados de las condiciones de surf con un mayor detalle.

Condicionado por las dimensiones del área de estudio, así como por la posición donde se dispone de datos calibrados, la malla general seleccionada (G01) tiene unas dimensiones de  $0.8^\circ$  en latitud por  $4.5^\circ$  en longitud con una resolución espacial de  $0.01^\circ$  x  $0.008^\circ$ . A esta malla se le ha anidado unas mallas más cercanas a costa (M01 a M03) con una mayor resolución espacial de  $0.0025^\circ$  x  $0.002^\circ$ . En la figura 7.25 se muestran las mallas seleccionada, la malla G01 se identifica por el color verde y las de detalle por el color rojo.

## 7.6. Calibración del oleaje

Problemas derivados del modelado numérico provocan cierta discordancia entre el oleaje modelado y el real, motivo por el cual se hace necesario corregir o calibrar los datos numéricos con datos instrumentales antes de utilizarlos. Existe una gran variedad de métodos de calibración, en este trabajo se ha empleado la metodología de calibración puntual direccional (Mínguez *et al.*, 2011) ya que soluciona de una manera muy efectiva los principales fallos del modelo.

La calibración se ha llevado a cabo para cada punto del contorno en el cual se introduce el espectro de oleaje para la propagación. En la figura 7.25 se muestra la totalidad de los puntos a los cuales se les ha aplicado la corrección.

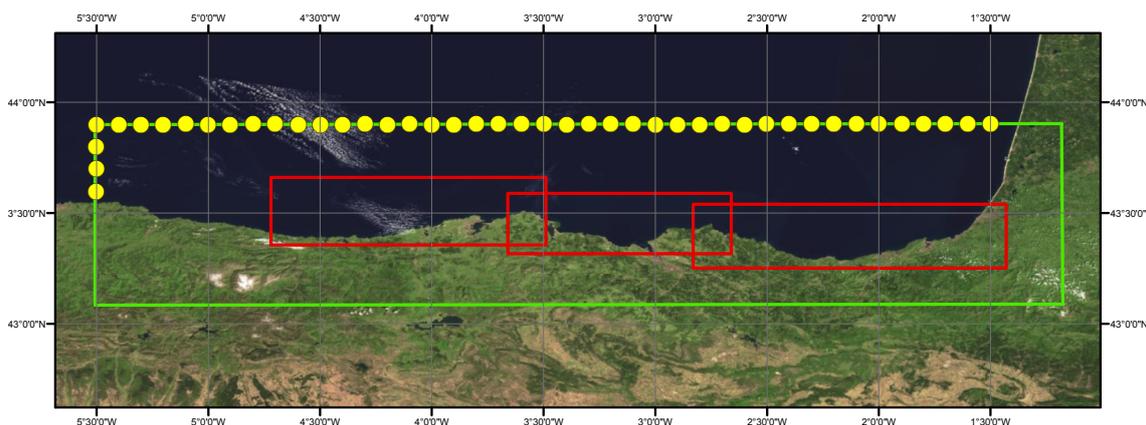


Figura 7.25. Mallas seleccionadas y puntos calibrados en el contorno de la malla G01 (contorno verde). Las mallas de detalle, se muestran en color rojo.

Antes de calibrar el punto, es necesario decidir con qué datos instrumentales se va a llevar a cabo la corrección. Los datos de satélite elegidos para cada punto son los que se encuentran en un área delimitada alrededor de la posición del mismo. Este área se basa en un criterio de rayos lanzados a partir del punto objeto de calibración, de forma que elimina los datos de satélite que puedan estar apantallados por tierra. En la zona de estudio, debido a la baja variabilidad espacial del oleaje en aguas profundas, se ha seleccionado un área de  $1.5^{\circ}$  alrededor del punto para obtener un número suficiente de datos de satélite con los que calibrar cada nodo de reanálisis.

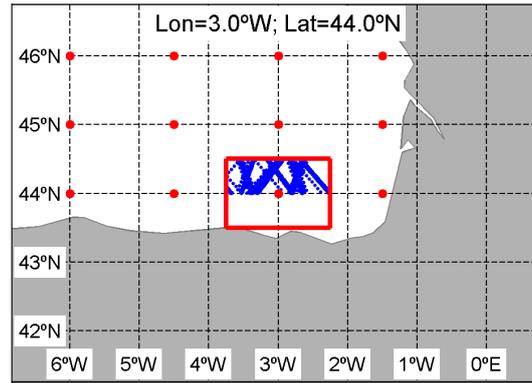


Figura 7.26. Datos de satélite utilizados para la calibración de un punto de la malla general de propagación

Una vez seleccionada la zona de datos de satélite, el siguiente paso consiste en extraer de la base de datos GOW 1.0 los parámetros ( $H_s$ ,  $\theta_m$ ) correspondientes a cada dato de satélite (definido por su posición e instante). De esta manera se obtienen un conjunto de  $N$  datos, definidos como  $\{H_{s,sat}(i), H_{s,GOW}(i), \theta_{m,GOW}(i)\}$ .

A partir de los pares de datos temporales GOW/satélite, se lleva a cabo una calibración direccional de las alturas de ola. Esto es debido a que al discretizar un registro de oleaje de reanálisis según sectores de procedencia del oleaje, y comparar en cada sector el registro instrumental con el registro simulado, se aprecia como el modelo simula más acertadamente unas direcciones que otras. A su vez, dentro de un mismo sector direccional, los errores que comete el modelo dependen en gran medida de la altura de ola,  $H_s$ . Es decir, en ocasiones el modelo simula bien las alturas de ola pequeñas, pertenecientes al régimen medio, cometiendo grandes errores en aquellos oleajes mayores pertenecientes a la rama superior del régimen de oleaje (percentiles elevados).

Una vez obtenidos los pares de datos  $\{H_{s,sat}(i), H_{s,GOW}(i), \theta_{m,GOW}(i)\}$ , se han agrupado según sectores direccionales de  $22.5^\circ$  de amplitud. A continuación, para cada subconjunto de pares de datos se ha procedido a realizar un ajuste cuantil-cuantil en base a 20 percentiles equiespaciados en la escala de Gumbel de máximos. Esta discretización se emplea para tratar de dar el mismo peso a los datos en todo el rango de las alturas de ola, de forma que los regímenes medio-bajo, mucho más frecuentes, no enmascaren los eventos más energéticos. La ecuación seleccionada para el ajuste es la siguiente:

$$H_{s,c} = \begin{cases} a(\theta)d(\theta)^{b(\theta)} H_{s,GOW} & \text{si } H_s \leq d(\theta) \\ a(\theta)H_{s,GOW} & \text{si } H_s > d(\theta) \end{cases} \quad (7.1)$$

donde  $H_{s,c}$  es la altura de ola significativa corregida,  $H_{s,GOW}$  es la altura de ola significativa de reanálisis,  $a(\theta)$  y  $b(\theta)$  son los coeficientes que dependen de la dirección de procedencia del oleaje y  $d(\theta)$  es la altura de ola límite, por debajo de la cual la calibración es lineal. Nótese que la calibración es lineal para el régimen medio bajo, y potencial a partir del umbral definido por el parámetro  $d(\theta)$  pero hay una continuidad en la calibración. Esto da más flexibilidad al modelo para calibrar mejor en todas las ramas del régimen de altura de ola.

La selección de los cuantiles en sectores de  $22.5^\circ$  se hace desplazando éstos grado a grado, de forma que se obtiene una variación suave de los cuantiles a lo largo de la circunferencia. En la figura 7.27 se puede apreciar la representación de los cuantiles seleccionados por direcciones para las alturas de ola GOW (panel izquierdo) y para las alturas de ola satélite (panel derecho) en el punto del Cantábrico.

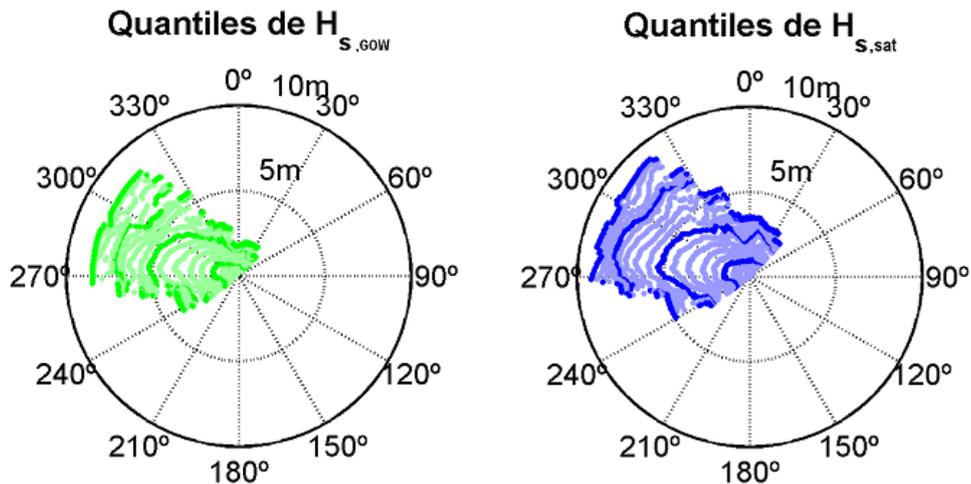


Figura 7.27. Cuantiles de altura de ola a optimizar (GOW y satélite) para la calibración de un punto de la malla general de propagación.

Ambos gráficos aportan información sobre los principales cuantiles de altura de ola a calibrar en base a la dirección de procedencia del oleaje. Así, se puede ver que en el

Cantábrico, el oleaje proviene fundamentalmente del noroeste, aunque los nordestes son también muy importantes.

Las variaciones en los valores que van adoptando los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $d$  a lo largo de la rosa de direcciones posibles, se obtienen suponiendo que se produce una variación suave mediante un *spline*. De esta forma, una vez evaluados los coeficientes y alturas de ola límites del tramo lineal cada  $22.5^\circ$ , los valores correspondientes asociados a cualquier otra orientación se obtienen interpolando mediante una función cúbica. De esta forma se puede expresar cada coeficiente como:

$$\begin{aligned} a(\theta_i) &= a_j + x_j^a(\theta_i - \theta_j) + y_j^a(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^a(\theta_i - \theta_j)^3 \\ b(\theta_i) &= b_j + x_j^b(\theta_i - \theta_j) + y_j^b(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^b(\theta_i - \theta_j)^3 \\ d(\theta_i) &= d_j + x_j^d(\theta_i - \theta_j) + y_j^d(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^d(\theta_i - \theta_j)^3 \end{aligned} \tag{7.2}$$

donde  $\theta_i$  es el ángulo de procedencia del oleaje, y  $\theta_j$  es la dirección en la que se conocen los parámetros  $a_j$ ,  $b_j$  y  $d_j$  del *spline*, y los demás parámetros son los necesarios para que la variación sea suave a lo largo de toda la circunferencia. De este modo conociendo la dirección media de propagación de un estado de mar, resultan conocidos los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $d$  que hay que aplicar a  $H_{s,GOW}$  para obtener  $H_{s,c}$ .

Al llevar a cabo esta metodología en los puntos que se muestran en la figura 7.25, con un total de 31263 pares de datos satélite-GOW, se obtienen los valores de los coeficientes de calibración mostrados en las. figura 7.28.

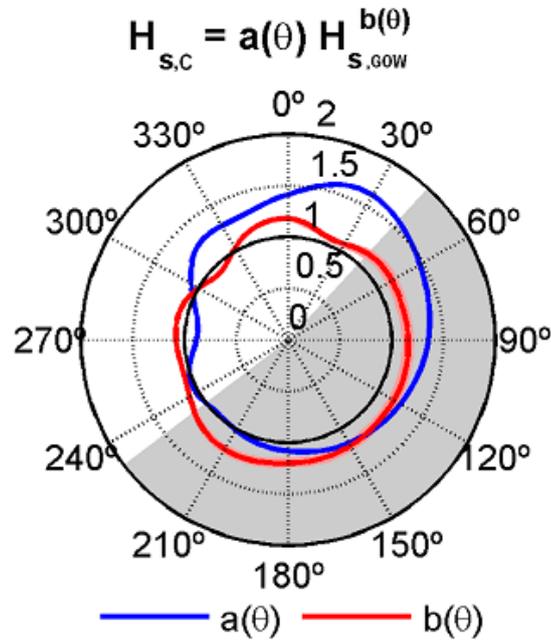


Figura 7.28. Rosa de calibración de  $H_s$  obtenida un punto GOW de la malla general de propagación.

Como puede verse en ambas figuras, los coeficientes  $a$  y  $b$  calculados van adoptando valores comprendidos entre distintos rangos en función de la dirección. Las líneas se corresponden con los *splines* interpolados. La variación resulta ser suave, lo que indica que las desviaciones (o errores) de la base de datos GOW varían en función de la dirección de procedencia del oleaje. Este error está asociado principalmente a errores sistemáticos en la definición del forzamiento de viento (Mínguez *et al.*, 2011).

A continuación se muestran los gráficos cuantil-cuantil de altura de ola significativa,  $H_s$ , de los datos de la serie GOW original y calibrada para ambos puntos (figura 7.29). Como se puede apreciar, las mejoras con la calibración son evidentes ya que los puntos calibrados están mucho más próximos a la bisectriz que los datos brutos de reanálisis. En la figura 7.29 se puede observar como el reanálisis GOW infravalora ligeramente las alturas de ola, acentuándose este comportamiento con el aumento de  $H_s$ . Mediante la calibración esta tendencia se corrige, obteniendo valores próximos a la diagonal, es decir, de acuerdo a la información instrumental.

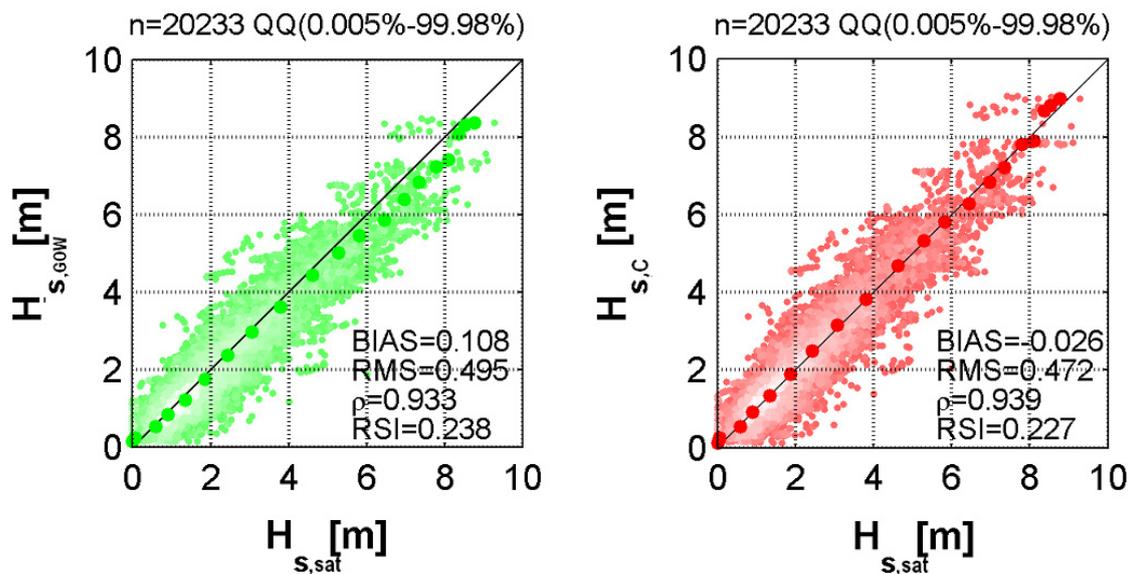


Figura 7.29. Diagramas de dispersión y  $QQ$ plot de las alturas de ola de satélite versus GOW sin calibrar (izquierda) y calibrado (derecha).

La gran ventaja de calibrar direccionalmente el oleaje radica en el hecho de que no todos los estados de mar del reanálisis necesitan la misma corrección, de esta manera se consigue que a lo largo del registro los errores y aciertos sean independientes de la dirección del oleaje.

Por último, en la figura 7.30 se muestra el valor medio del coeficiente de corrección ( $k=H_{s,c}/H_{s,GOW}$ ) por direcciones e intervalos de altura de ola de 0.25m para uno de los puntos seleccionados como *inputs* para el *downscaling* dinámico del oleaje.

En la figura 7.30 se puede ver como los oleajes del WNW a NW, son los más importantes de la zona, no tienen apenas corrección (coeficiente de corrección en torno a 1), lo que demuestra la alta fiabilidad de la base de datos GOW 1.0. El mayor problema se encuentra en los oleajes procedentes del NNW a NE, los cuales son debidos a causas de generación local, o estados de mar tipo *sea* y *windswell*, difíciles de modelar, debido a la proximidad del continente y la consiguiente limitación por *fetch*. Como se puede ver, la variación del coeficiente de corrección por direcciones y alturas de ola es suave, lo que se corresponde con la variación natural del proceso físico.

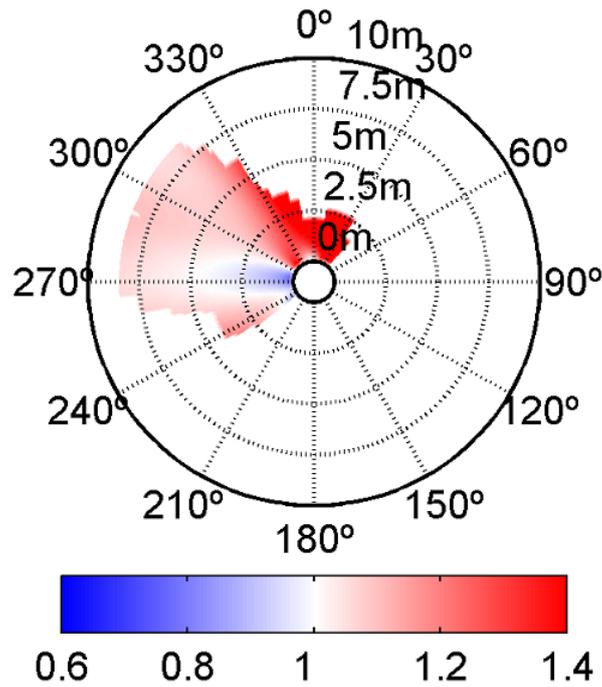


Figura 7.30. Valor medio del coeficiente de corrección ( $H_{s,c}/H_{s,GOW}$ ) por direcciones.

Por último en la figura 7.31 se muestran los 500 últimos estados de mar presentes en la serie temporal de pares de datos. La altura de ola calibrada se muestra junto con las bandas de confianza del cuantil del 95%.

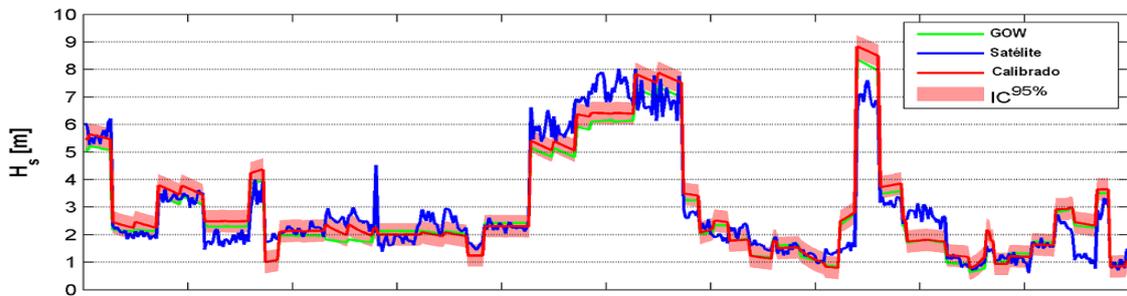


Figura 7.31. Serie temporal de  $H_s(m)$  de los últimos 500 estados de mar disponibles en la serie de pares de datos.

## 7.7. Clasificación y selección de los estados de mar a propagar

Con el objetivo de evaluar con el máximo nivel de detalle las condiciones de surf en las proximidades de los distintos *spots* que encontramos en la zona de estudio, se ha

trabajado con los espectros direccionales de oleaje en una serie de puntos localizados en aguas profundas a lo largo del contorno de la malla general de SWAN utilizada en la propagación. Por tanto, para transferir el oleaje hasta la costa, se parte de unas condiciones de contorno en las que el oleaje queda detalladamente definido por su espectro direccional. La aplicación de un modelo de propagación requiere la definición de una malla de computación que se extiende desde la posición de los datos del oleaje en aguas profundas hasta la costa, en este caso, en los puntos en los que se dispone de los espectros de la base de datos. En este trabajo, se han considerado una malla general, que abarca todo el área de estudio, a la cual se le han anidado tres mallas de detalle que aumentan la resolución cerca de la costa. En la malla general se aplica la metodología de propagación propuesta que conlleva la calibración de los datos en aguas profundas, la selección de una serie de casos representativos, la propagación de estos casos y la reconstrucción de las series temporales de oleaje en los puntos de las mallas de detalle en torno a la batimétrica de 10 m.

### 7.7.1. Algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss)

El algoritmo de máxima disimilitud consiste en la selección de un subconjunto de datos representativo de la muestra de datos de partida. Por tanto, si se dispone de una muestra de datos  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  compuesta por  $N$  vectores  $n$ -dimensionales, el objetivo de este algoritmo consiste en obtener un número  $M$  de vectores  $\{v_1, \dots, v_M\}$  de los datos de partida que expliquen la máxima variabilidad. El algoritmo comienza con la inicialización del subconjunto  $\{v_1\}$  mediante la transferencia de un dato de la base de partida. La selección del resto de elementos se realiza iterativamente, y en cada ciclo se transfiere al subconjunto aquel dato perteneciente a la base de datos de partida con la mayor disimilitud respecto al subconjunto seleccionado.

Este algoritmo fue descrito por Kennard y Stone (1969) y aplicado por Camus et al. (2011), éste admite distintas versiones dependiendo del criterio considerado en la inicialización del subconjunto y en el criterio de selección del resto de datos del subconjunto. En este trabajo el elemento inicial del subconjunto  $\{v_1\}$  es el estado de mar con la mayor altura de ola.

Una vez seleccionado el primer elemento del subconjunto, la selección del resto de elementos se realiza en dos fases. En primer lugar, para cada dato aún perteneciente a la base de datos de partida, se calcula la distancia o disimilitud con todos los elementos del subconjunto y se define una única distancia entre este dato y el subconjunto, según distintos criterios. En segundo lugar, una vez que se dispone de la distancia entre cada dato de la muestra de partida y el subconjunto, se elige aquel dato con el máximo valor de esta distancia.

Por ejemplo, si en el subconjunto ya existen  $R$  ( $R < M$ ) datos seleccionados, primero se calcula la disimilitud entre el dato  $i$  de la muestra de datos  $N-R$  y los  $j$  elementos pertenecientes al subconjunto  $R$ :

$$d_{ij} = \|x_i - v_j\|; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R \quad (7.3)$$

Posteriormente se calcula la disimilitud  $d_{i, \text{subconjunto}}$  entre el dato  $i$  y el subconjunto  $R$ , esta definición admite varios criterios (Willet *et al.*, 1996). Después de diversas pruebas, el subconjunto de casos seleccionados más representativo de los datos de partida se consigue definiendo la distancia  $d_{i, \text{subconjunto}}$  como.

$$d_{i, \text{subconjunto}} = \min \{ \|x_i - v_j\| \}; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R \quad (7.4)$$

En segundo lugar, una vez calculadas las  $N-R$  disimilitudes según el criterio elegido, el dato con la máxima disimilitud es seleccionado para ser incluido en el subconjunto.

Existen diversos métodos para el cálculo de las disimilitud, en la versión que aquí se emplea (Polinsky *et al.*, 1996), el cálculo de la distancia  $d_{i, \text{subconjunto}}$ , definida como el mínimo de las distancias entre el elemento  $i$  y los  $M$  elementos pertenecientes al subconjunto, no supone determinar cada una de las distancias entre los diferentes elementos,  $d_{ij}$ . Por ejemplo, en la selección del elemento  $r$ , la disimilitud  $d_{i, \text{subconjunto}}$  se define como el mínimo de la distancia entre el dato  $i$  de la muestra de datos de partida (compuesta en este ciclo del algoritmo por  $N-(R-1)$  elementos) y el último dato añadido

al subconjunto  $R$ , y la distancia mínima entre el dato  $i$  y los datos del subconjunto  $R-1$  calculada en el paso anterior.

$$d_{i,\text{subconjunto}}^{\min} = \min[d_{i,R}, d_{i,\text{subconjunto}(M-1)}^{\min}] \quad (7.5)$$

### 7.7.2. Selección de los estados de mar a propagar

Las condiciones de surf en una rompiente determinada responden a las características del oleaje y el viento mar adentro. Para caracterizar con rigor el alto número de combinaciones posibles de altura de ola, periodo, velocidad y dirección del viento, los estados o escenarios considerados deben captar y explicar la máxima varianza posible. Por este motivo la selección de los instantes a propagar se realiza en base a cada situación horaria del clima marítimo, definida ésta por el oleaje en el contorno de la malla y el viento en todo su dominio.

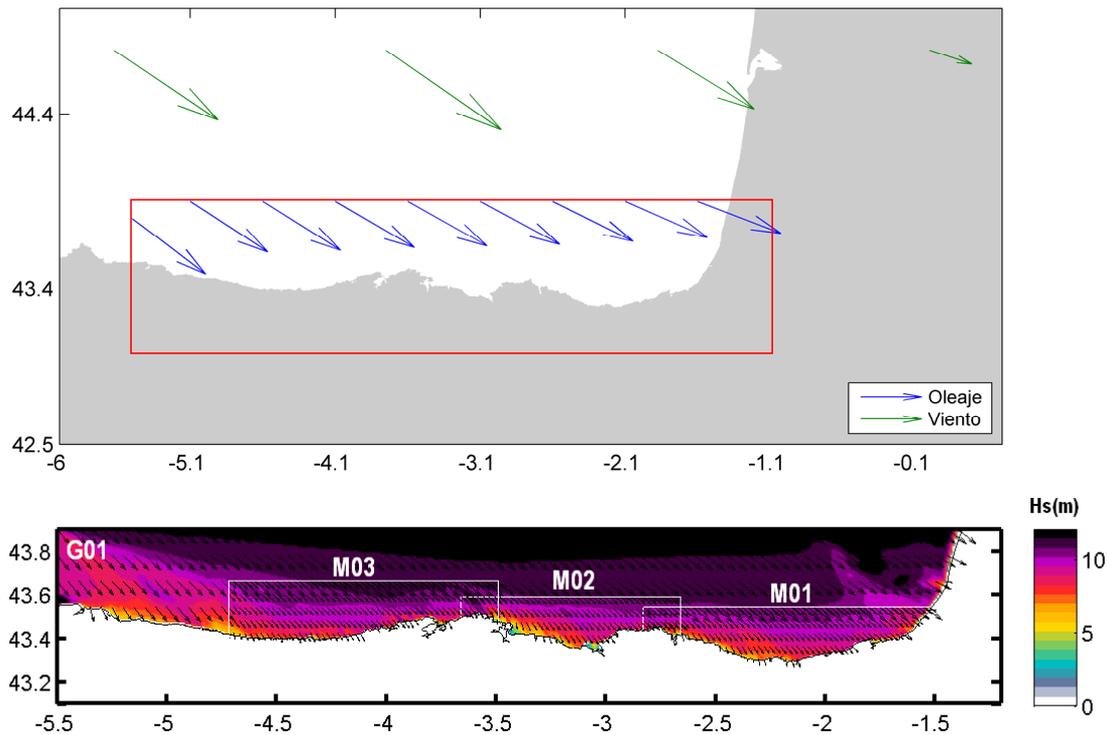


Figura 7.32. Condiciones de oleaje y viento en la malla de propagación G01 y mapa de  $H_s(m)$  de su correspondiente propagación.

En la gráfica superior de la figura 7.32 se muestra una situación horaria del clima marítimo en el área de propagación considerada para la caracterización del oleaje en la

zona de estudio (malla G01). Se puede apreciar como la dirección del oleaje varía a lo largo del contorno superior. En el panel inferior de la figura 7.32 se muestra la propagación de las condiciones del oleaje representadas en el panel superior. En este caso se puede observar también la diferencia en la magnitud del oleaje en el contorno superior de la malla de propagación. Además queda patente la variabilidad espacial que muestra la variable  $H_s$  a medida que el oleaje se aproxima a la costa.

En primer lugar es necesario determinar el número de nodos de reanálisis que se van a considerar en la definición del clima marítimo en profundidades indefinidas. En el caso de la malla G01, se dispone de los espectros direccionales en una serie de puntos del contorno (se han marcado en verde en la figura 7.33). Para la definición de la variabilidad espacial del clima marítimo y la selección de un conjunto de casos representativos en aguas profundas, se han considerado los puntos señalados en la figura 7.33 (Oleaje MaxDiss). Se han utilizado los parámetros espectrales  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  de estos puntos. Por otro lado, para las definir las características del viento simultáneas al oleaje, se han empleado los parámetros zonales y meridionales,  $W_x$  y  $W_y$  de los cuatro puntos indicados (Viento MaxDiss), perteneciente a la malla de vientos NCEP.

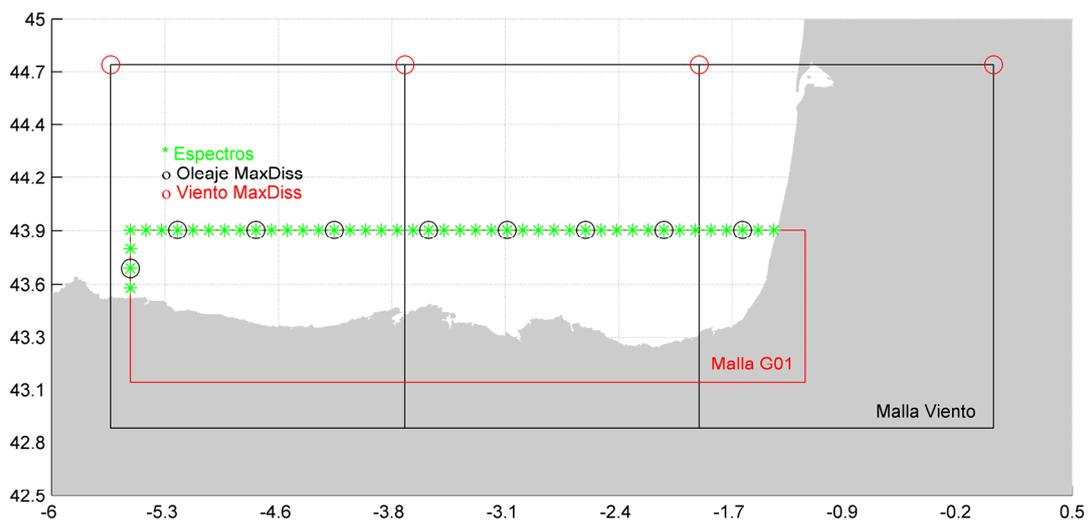


Figura 7.33. Puntos de oleaje y viento utilizados en la selección (MaxDiss) de los casos representativos del clima marítimo de indefinidas en el área de estudio.

Por tanto, en un momento dado, las condiciones de oleaje y viento en mar abierto quedan definidas por:

$$X_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{m,1}, \dots, H_{s,9}, T_{m,9}, \theta_{m,9}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,4}, W_{y,4}\}_i \quad i = 1, \dots, N \quad (7.6)$$

El nivel de marea correspondiente a cada situación de oleaje afecta a la propagación del mismo. El efecto de la marea se considera importante ya que la zona de estudio está sometida a una carrera de marea media de unos 4.5 m, y por tanto, es necesario tener en cuenta el nivel asociado a cada estado de mar. Este fenómeno se incluye en la caracterización del clima marítimo en aguas someras mediante la propagación de los casos seleccionados en una serie de niveles representativos de todas las posibles situaciones (por ejemplo, la bajamar mínima viva equinoccial (BMVE), nivel medio del mar (NMM) y pleamar máxima viva equinoccial (PMVE), y posterior reconstrucción de cada situación del clima marítimo en indefinidas interpolando al nivel correspondiente.

Generalmente, las distintas componentes de los espacios de alta dimensionalidad suelen estar correlacionadas, lo que supone que existe información redundante. La técnica del análisis de las componentes principales permite reducir la dimensionalidad de una muestra de datos mediante la proyección en un nuevo espacio de menor dimensión, y conservando el máximo de la varianza. En el caso del clima marítimo en profundidades indefinidas, la reducción de la dimensionalidad facilita la posterior aplicación de la técnica de selección MaxDiss.

Este método estadístico descompone una determinada variable numérica espacio-temporal  $R(x,t)$  en una combinación lineal de modos o funciones ortogonales numéricas (EOFs). Estos modos espaciales definen la nueva base de proyección y representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen la mayor varianza. Las proyecciones sobre esta nueva base son las componentes principales (PCs). Por tanto, una variable numérica espacio temporal se puede expresar como:

$$R(x,t) = \overline{R(x)} + \sum_{i=1}^n EOF_i(x) \cdot PC_i(t) \quad (7.7)$$

donde  $\overline{R(x)}$  es la media de la variable,  $EOF_i(x)$  son los modos espaciales o vectores de proyección,  $PC_i(t)$  son las componentes temporales y  $n$  es la dimensión espacial de los

datos de partida. La proyección de los datos sobre cada modo temporal explica una determinada varianza de los mismos. Los EOFs están numerados de mayor a menor en función de la cantidad de varianza. Como el objetivo es proyectar los datos en un espacio de menor dimensión, se suele considerar un número  $d$  de EOFs, tal que  $d \ll n$ .

$$R(x,t) \approx \overline{R(x)} + \sum_{i=1}^d EOF_i(x) \cdot PC_i(t) \quad (7.8)$$

La aplicación de esta técnica requiere de la descomposición de las direcciones del oleaje y del viento en sus componentes zonal y meridional ( $x$  e  $y$ ), en primer lugar, en segundo lugar, la estandarización de todas las variables para evitar problemas debido a la diferencia de escalas. De tal manera que los datos quedan definidos de la siguiente forma:

$$X'_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{mx,1}, \theta_{my,1}, \dots, H_{s,9}, T_{m,9}, \theta_{mx,9}, \theta_{my,9}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,4}, W_{y,4}\}_i \quad i = 1, \dots, N$$

Y una vez estandarizados:

$$X^*_i = \{H_1, T_1, \theta_{x,1}, \theta_{y,1}, \dots, H_{11}, T_{11}, \theta_{x,11}, \theta_{y,11}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,4}, W_{y,4}\}_i \quad i = 1, \dots, N \quad (7.9)$$

se aplica la técnica de componentes principales a los datos del clima marítimo estandarizados. La media temporal de cada variable es cero debido a la estandarización, por lo que:

$$X^*(x,t) = \sum_{i=1}^d EOF_{X^*_i}(x) \cdot PC_{X^*_i}(t) \quad (7.10)$$

En la figura 7.34 se muestra una situación horaria del clima marítimo en profundidades indefinidas, esta se compone de un oleaje del NW y un viento asociado de la misma dirección. En las gráficas inferiores de esta figura se muestra la contribución de las 6 primeras EOFs en la definición de la situación temporal considerada. Por ejemplo, el primer modo representa la variación de la altura de ola significativa en la dirección W y de la intensidad del viento en la dirección SW, mientras que el segundo modo

representa la variación de la altura de ola en la dirección NNW y la variación de la intensidad del viento en la dirección NW.

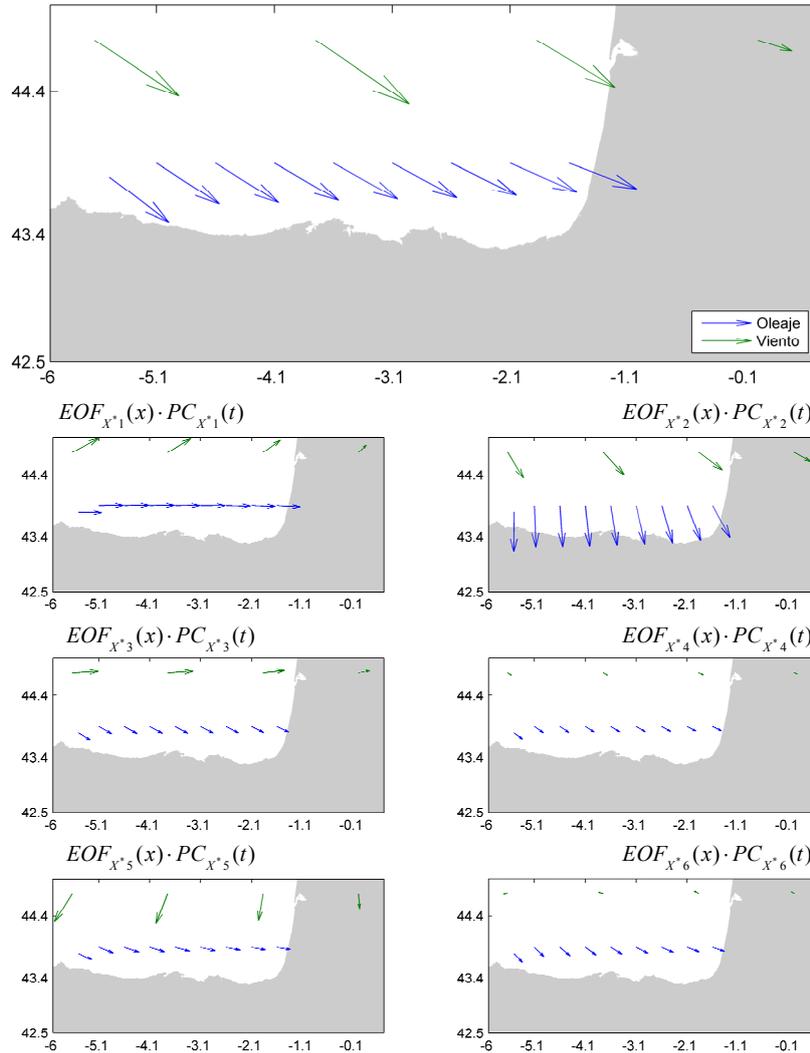


Figura 7.34. Situación de temporal y contribución de los 6 primeros EOFs.

A mayor número de EOFs considerados mayor es la varianza total explicada y mayor la aproximación a los datos espacio-temporales originales. En el panel superior de la figura 7.35 se muestra el valor de la varianza acumulada en función del número de modos espaciales. Se puede observar cómo para un número de EOFs igual a 5 la varianza es superior al 90%, y para un número superior a 25 es prácticamente del 100%. En el panel inferior de la figura se han representado los errores medios de las variables estandarizadas. En la figura 7.36 se muestran los errores medios para las variables originales; por ejemplo, si se considera una varianza igual al 99.0% se cometen unos errores de 0.1 m, 0.2 s, 2.5°, y menores de 1 m/s en la reconstrucción de  $H_s, T_m, \theta_m, W_x, W_y$ , respectivamente.

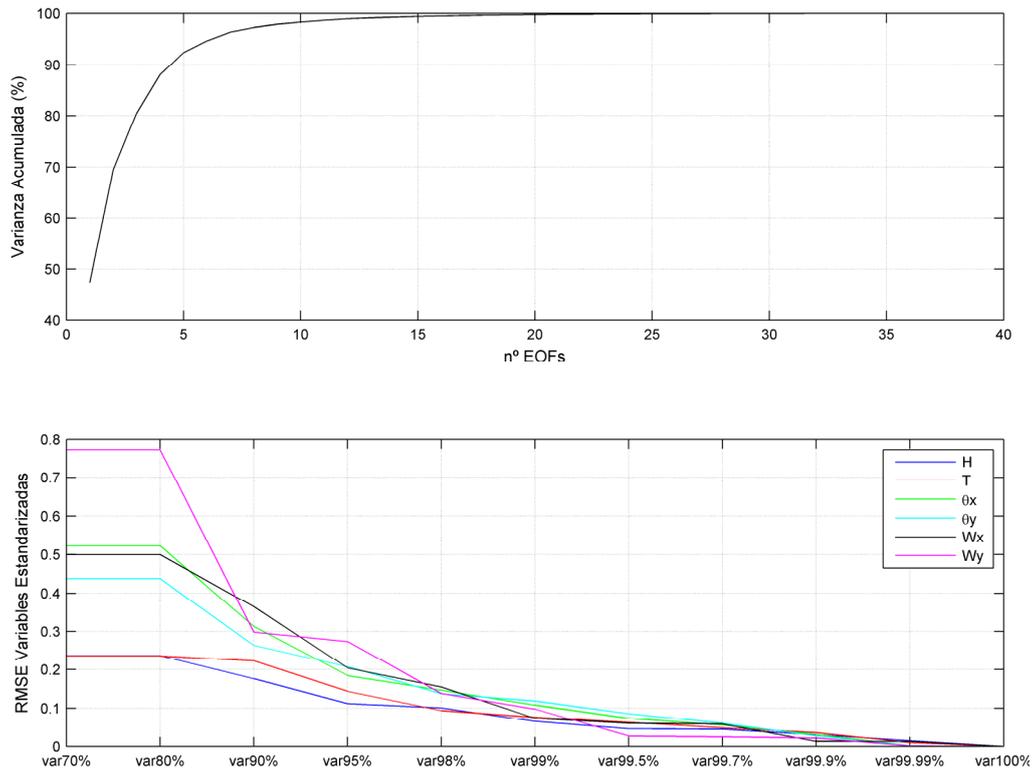


Figura 7.35. Varianza explicada en función del número de EOFs. RMS de las variables estandarizadas en función de la varianza explicada (%).

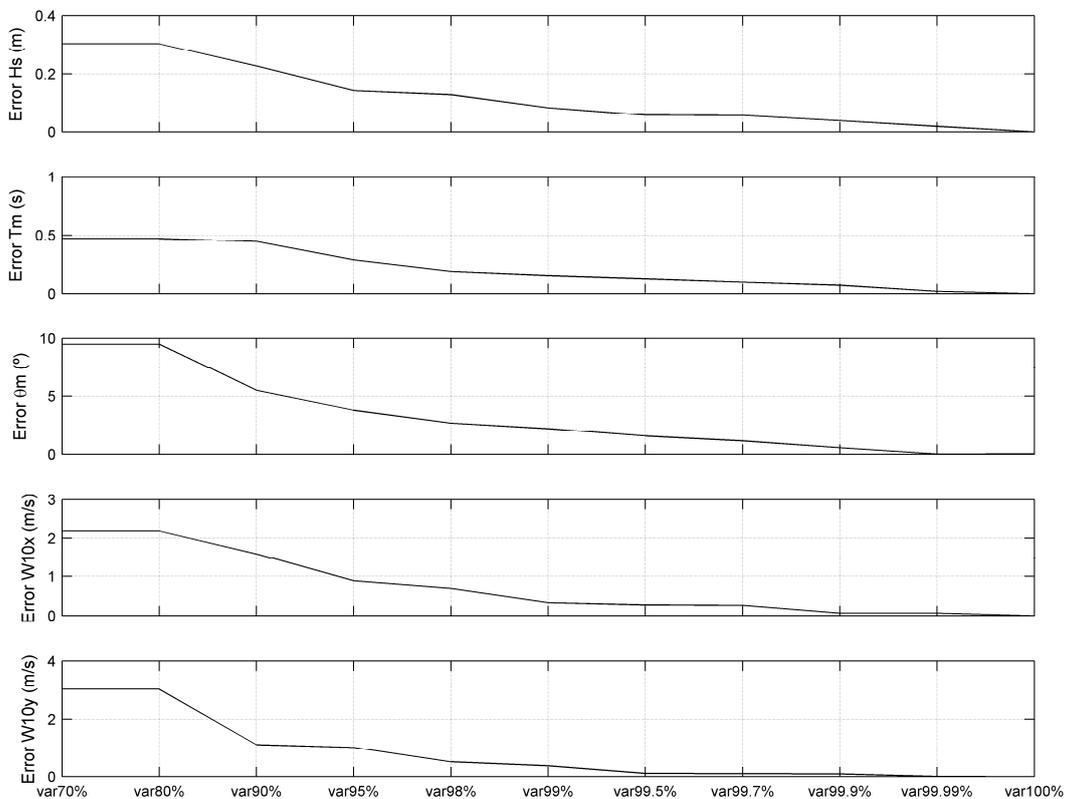


Figura 7.36. RMS de las variables en función de la varianza explicada (%).

El primer caso seleccionado se corresponde con aquel dato que presenta la mayor altura de ola significativa en el contorno del área considerada. El subconjunto seleccionado con el algoritmo MaxDiss en el espacio de proyección de los EOFs no se reconstruye por medio de los  $d$  modos espaciales considerados para volver al espacio original. Los casos seleccionados se buscan en la base de datos de partida, de esta forma se dispone de situaciones reales a propagar.

Siguiendo con el ejemplo de caracterización del clima marítimo en aguas someras en la costa del cantábrico oriental, se aplica el algoritmo de selección MaxDiss a las componentes principales  $PC_{x^i}(t)$  obtenidas a partir de la aplicación de la técnica de componentes principales al clima marítimo en indefinidas. Se ha considerado un número de componentes principales  $d=13$  que explican un 99.0% de la varianza total de los datos originales. El subconjunto formado por  $M=500$  casos en el espacio de proyección de las EOFs se define como:

$$D_j^{EOF} = \{PC_{x^1}^D, \dots, PC_{x^d}^D\}_j \quad j = 1, \dots, M \quad (7.11)$$

que en el espacio original de los datos se define como:

$$D_j = \{H_{s,1}^D, T_{m,1}^D, \theta_{s,1}^D, \dots, H_{s,9}^D, T_{m,9}^D, \theta_{s,9}^D, W_{x,1}^D, W_{y,1}^D, \dots, W_{x,9}^D, W_{y,9}^D\} \quad j = 1, \dots, M \quad (7.12)$$

Dada la elevada dimensión de los datos seleccionados, en la figura 7.37 se muestran la distribución de los casos seleccionados (puntos verdes) sobre los datos de partida (puntos rojos) para los tres parámetros  $\{H_s, T_m, \theta_m\}$  del punto 5 de oleaje y los dos parámetros  $\{W_x, W_y\}$  del punto 2 de viento de la figura 7.34. En realidad cada uno de los casos seleccionados está definido según se muestra en la figura 7.38.

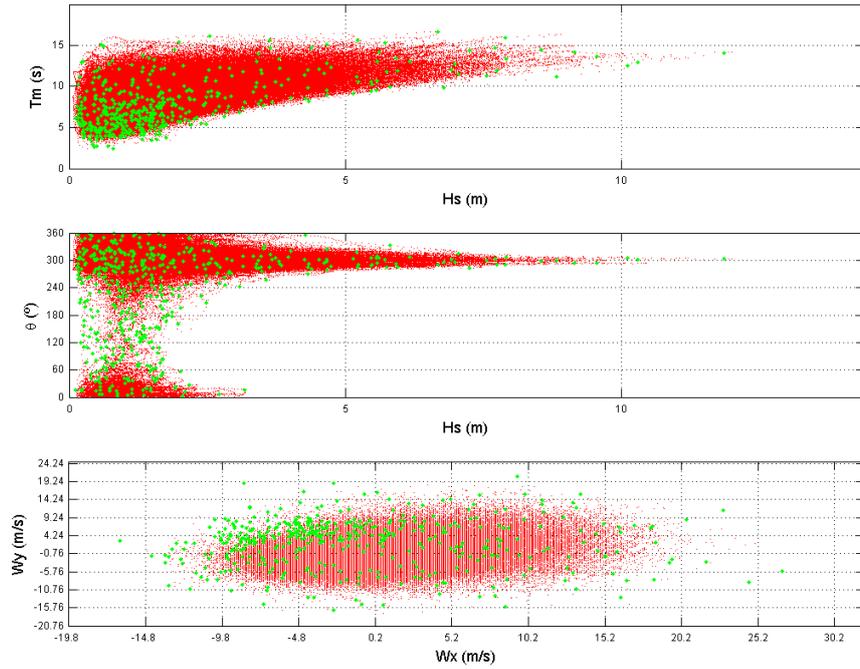


Figura 7.37. Distribución de los casos seleccionados correspondientes a los datos del punto 5 de oleaje y punto 2 de viento de los utilizados en la selección con MaxDiss.

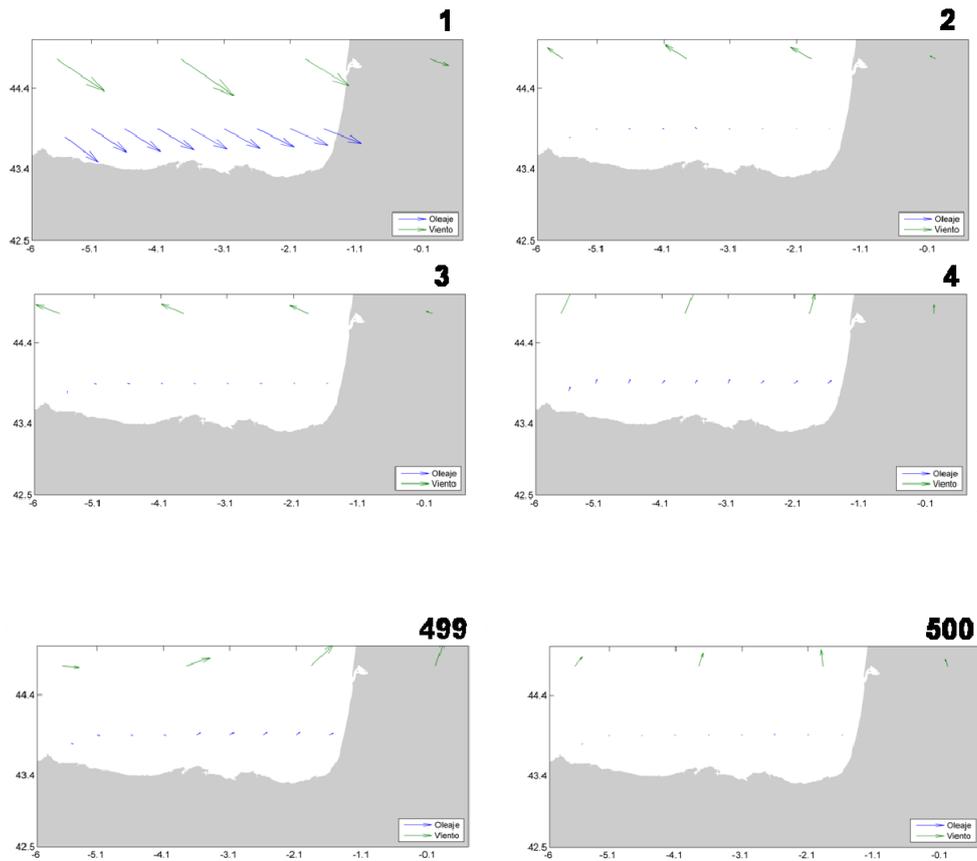


Figura 7.38. Casos seleccionados con el algoritmo MaxDiss en la malla G01.

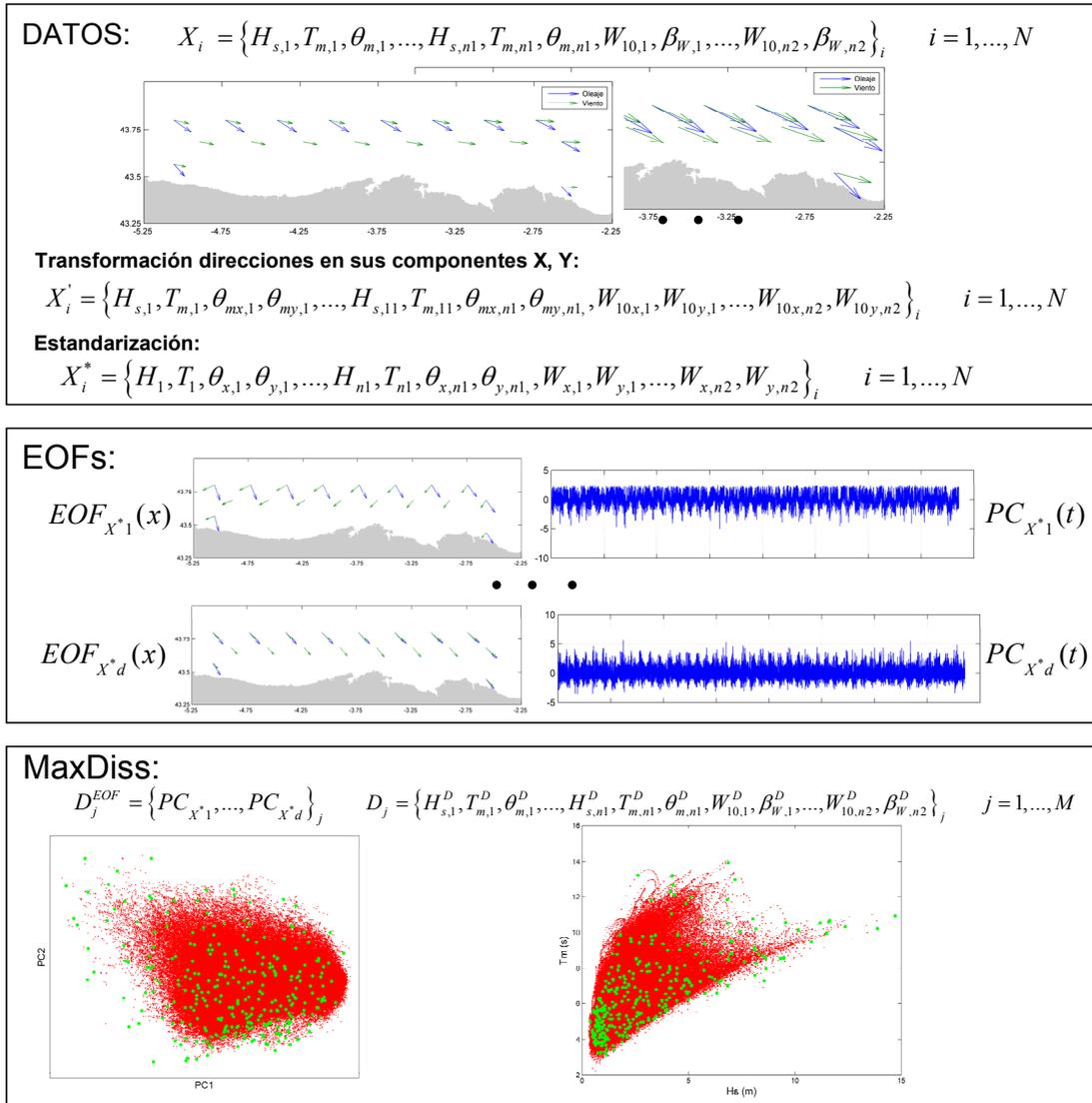


Figura 7.39. Esquema del proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en indefinidas.

En el esquema de la figura 7.39 se resumen los pasos necesarios para la selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en profundidades indefinidas:

- En primer lugar se eligen los  $n1$  puntos de reanálisis que definen las condiciones de contorno del oleaje y los  $n2$  puntos que definen los campos de vientos. Se transforman las variables direccionales en sus componentes  $x$  e  $y$ , y se estandarizan todas las variables.

- En segundo lugar, se aplica la técnica de las EOFs a los datos estandarizados obteniendo los  $d$  primeros modos que expliquen un determinado porcentaje de varianza (ej. 99.0%).
- En tercer lugar se seleccionan los  $M$  casos representativos de las componentes principales de los datos del clima marítimo en el espacio de proyección de las EOFs, y se identifican estos casos seleccionados en el espacio original de los mismos.

## 7.8. Transferencia del oleaje de aguas profundas a aguas someras

A medida que el oleaje se aproxima a la costa el efecto del fondo empieza a hacerse palpable. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el oleaje se transforma. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en variaciones de la altura de ola y en la dirección de propagación.

En aguas más someras, la amplitud de olas aumenta mientras que la longitud de onda se reduce, haciendo que las olas aumenten su peralte. Cuando el oleaje se encuentra en profundidades reducidas ( $h / \lambda < 1/20$ ), éste deja de ser dispersivo, por lo que todas las frecuencias viajan a la misma velocidad. Según la teoría lineal de ondas, el coeficiente de asomeramiento indica que la altura de ola tiende a infinito en aguas muy poco profundas. Sin embargo, dependiendo de la altura y el periodo, la ola romperá a una profundidad determinada, en la cual, la velocidad orbital a la que se mueven las partículas de la capa superficial es mayor que la velocidad a la que viaja la onda. Este fenómeno provoca la desestabilización de la ola y la disipación de gran cantidad de energía debida a fenómenos turbulentos.

En el proceso de propagación, no son solo la altura y la dirección las únicas características que varían. La forma espectral y, por tanto, el grado de organización (limpieza) del estado de mar, se ven altamente influenciados por la refracción. La refracción inducida por la plataforma litoral ejerce un efecto en el oleaje sin el cual las olas rara vez llegarían a la costa en forma de olas surfeables. Es sabido que dependiendo

de la dispersión direccional del espectro, en un estado de mar pueden coexistir olas de diferentes direcciones, a medida que el estado de mar se aproxima a la costa, los cambios en la dirección (ola a ola) producidos por la refracción, hacen que la dispersión direccional decrezca, favoreciendo así la calidad del oleaje para el surf. Del mismo modo, cuando éste incide oblicuamente, y en presencia de grandes cabos, solo las frecuencias más bajas son capaces de girar alrededor del elemento geomorfológico. Por lo que, al abrigo del mismo, el estado de mar presentará menor dispersión frecuencial y direccional que aguas afuera. Por tanto, la refracción es el fenómeno con más importancia en la propagación del oleaje para el surf.

El objetivo de la metodología de propagación consiste en trasladar el oleaje desde aguas profundas hasta la costa y poder conocer así las características del mismo en ciertos puntos de interés. La batimetría de la zona de estudio y el azimut respecto a los oleajes incidentes condiciona los fenómenos más relevantes que sufre el oleaje para cada caso particular. Las características de la zona de estudio y los procesos de transformación del oleaje que se requieran resaltar imponen la elección del modelo de propagación.

Los modelos numéricos de propagación de ondas intentan modelar la transformación que sufre el oleaje en su propagación hacia la costa. Los diferentes tipos de modelos numéricos existentes dependen de las ecuaciones que se utilicen para modelar el problema y del esquema numérico empleado, que implica una serie de limitaciones en los fenómenos que son capaces de simular.

Actualmente, los modelos de propagación del oleaje pueden dividirse en dos grandes grupos: modelos que resuelven la fase, basados en las ecuaciones de conservación de masa y de momento, dependientes del tiempo e integrados en vertical; y los modelos de fase promediada, que se basan en la ecuación de balance de energía espectral. Los modelos que resuelven la fase se limitan a áreas pequeñas, del orden de 0-10 km, ya que requieren de 10-100 pasos de tiempo por periodo del oleaje. Por otro lado, los modelos que promedian la fase se pueden emplear en áreas más extensas porque no necesitan tanta resolución espacial.

En este trabajo, se ha elegido el modelo de propagación SWAN, desarrollado por *Delft University of Technology*, basado en la ecuación de acción de onda que promedia la fase y no reconstruye la superficie del mar en el espacio y el tiempo (Booij, 1999).

Esta base teórica genera uno de los principales atractivos de este modelo, que es la posibilidad de propagar oleaje en todas las direcciones. Además, es posible la aplicación en áreas relativamente extensas, ya que no requiere de un número mínimo de puntos de cálculo por longitud de onda. Por otro lado, las últimas versiones de este modelo (tercera generación) han incorporado fenómenos exclusivos de profundidades someras, como son la rotura del oleaje y las interacciones no lineales (triadas), que han permitido ampliar el rango de aplicación de estos modelos.

El que se trate de un modelo que resuelve la ecuación de balance de energía espectral, presenta para el propósito de este trabajo, ciertas ventajas respecto a los modelos que resuelven la fase:

- Son capaces de trabajar con el espectro real de oleaje, lo que permite calcular la dispersión angular y direccional en cualquier punto del dominio.
- Permite simular la generación de oleaje por viento, que obviamente modificará la forma espectral de un estado de mar dado y por tanto su idoneidad para el surf.

La ecuación que resuelve el modelo de propagación SWAN es la siguiente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$
(7.13)

Se trata de la ecuación de transporte de energía, en el que las variaciones locales de la energía espectral en el tiempo y las variaciones del flujo de energía en el espacio se compensan con las salidas y entradas del sistema. En este caso, el espacio presenta

cuatro dimensiones, dos correspondientes al espacio geográfico  $x$  e  $y$ , las otras al espacio espectral, siendo la frecuencia,  $\sigma$  y la dirección,  $\theta$  sus dos componentes.

Se considera la densidad de acción de onda  $N(\sigma, \theta)$  en vez de la densidad de energía espectral  $S(\sigma, \theta)$  porque en presencia de corrientes esta magnitud ( $N(\sigma, \theta)$ ) es conservativa. Las variables independientes son  $\sigma$  (frecuencia relativa, en el caso de corrientes), y  $\theta$  (dirección de incidencia del oleaje).

En la ecuación (7.13), el primer término en la parte izquierda, representa la variación local de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y el tercer término representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (siendo  $C_x$  y  $C_y$  la velocidad de propagación de la energía del oleaje en la dirección  $x$  e  $y$ , respectivamente). El cuarto término representa el cambio en la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes ( $C_\sigma$  representa la velocidad de propagación en el espacio frecuencial). El quinto término representa la refracción inducida por la profundidad o las corrientes (siendo  $C_\theta$ , la velocidad de propagación en el espacio direccional).

En cuanto al término localizado en la parte derecha de la ecuación, representa las fuentes y sumideros de la energía espectral, contempla la generación de oleaje por viento, la disipación de energía por *whitecapping*, por fricción con el fondo y por rotura del oleaje, y las interacciones no lineales del oleaje (triadas y cuádruples).

Las expresiones de las velocidades de propagación de la densidad de energía en las diferentes dimensiones están tomadas de la teoría lineal, presentado las expresiones siguientes (Rogers *et al.*, 1999):

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (7.14)$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (7.15)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} \quad (7.16)$$

$$C_\theta = \frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (7.17)$$

donde,  $\bar{k} = (k_x, k_y)$  es el número de onda de magnitud  $k$  (relacionado con  $\sigma$  a través de la ecuación de la dispersión de teoría lineal),  $d$  es la profundidad o calado,  $\bar{U} = (U_x, U_y)$  es velocidad de la corriente,  $s$  la coordenada espacial en la dirección de propagación y  $\theta$  es la coordenada espacial en la dirección perpendicular a  $s$ .

En las figura 7.40 se muestra la propagación del caso 95 de la selección MaxDiss correspondiente a la malla M03. En esta figura se han representado los resultados de la altura de ola significativa, dirección media del oleaje, dirección de pico y periodo medio y de pico. Con un círculo azul se ha señalado la concentración causada por el bajo de la Vaca, fenómeno responsable del *hotspot* localizado al noroeste de Santander.

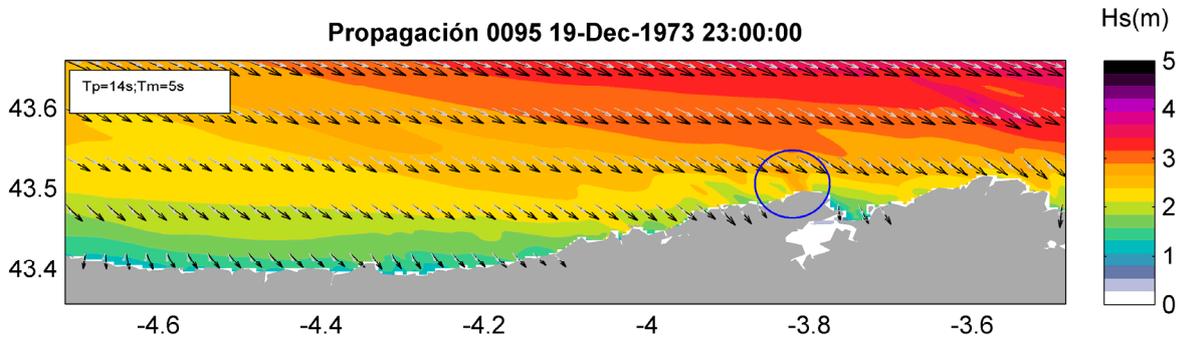


Figura 7.40. Propagación del Caso 95 de la selección MaxDiss de la malla M03 del Cantábrico. Resultados de la altura de ola significativa, dirección media del oleaje (vectores grises), dirección de pico (vectores negros), también se indica el valor de  $T_m$  y  $T_p$ .

El estado de mar de la figura 7.40 ocurrió junto a vientos de componente SSW de aproximadamente 15 m/s. En la figura 7.41 se muestran los resultados de dispersión frecuencial ( $\kappa$ ) y dispersión direccional ( $\sigma$ ), nótese como el patrón espacial inducido por el viento y la batimetría mejora sustancialmente el grado de organización del estado de mar, aumentando el valor de  $\kappa$  y disminuyendo el de  $\sigma$  en las inmediaciones de la línea de rotura.

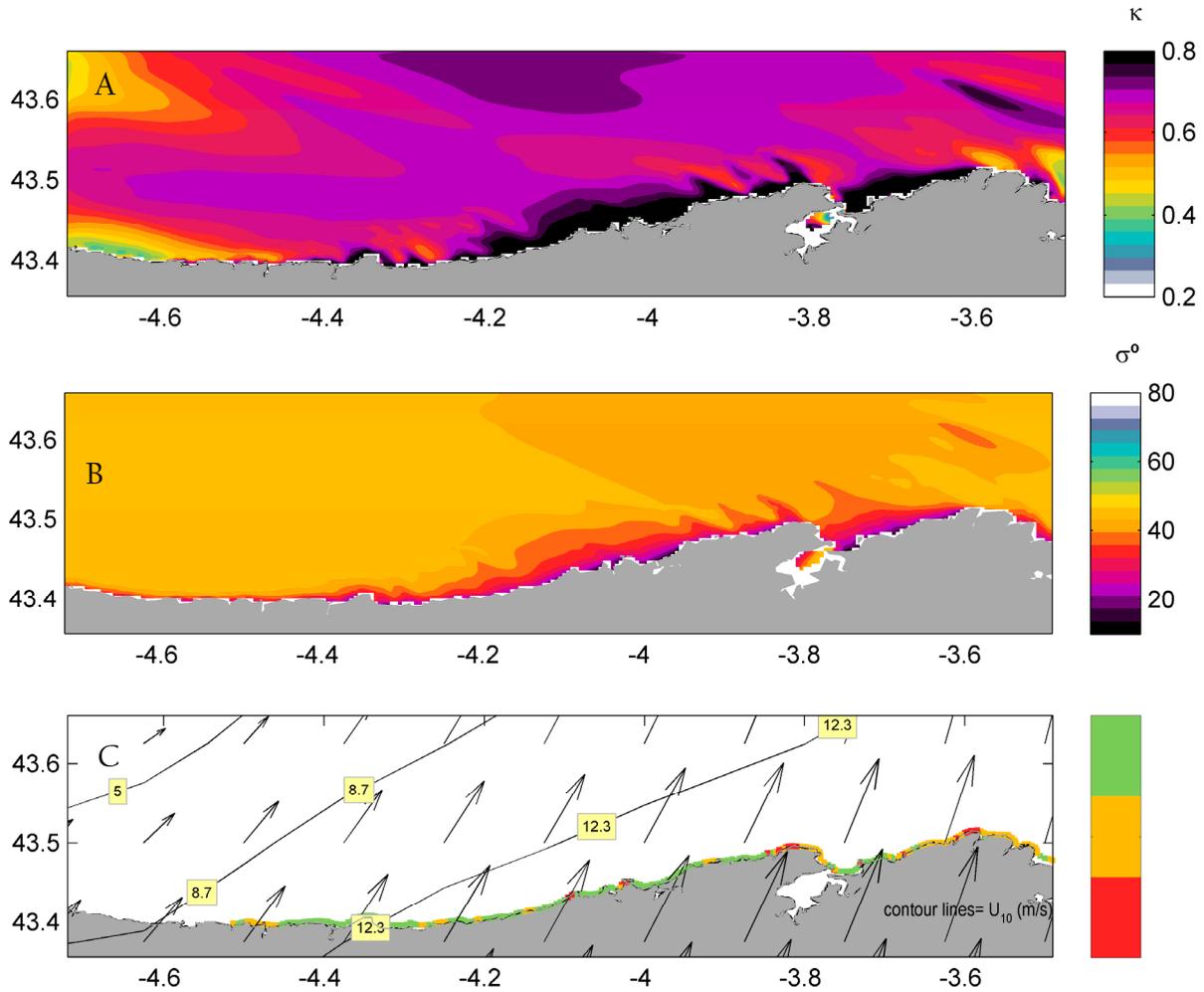


Figura 7.41. Propagación del Caso 95 de la selección MaxDiss de la malla M03 del Cantábrico. Resultados de dispersión frecuencial (A), dispersión direccional (B), viento y RSI (C).

Los criterios regionales y sus pesos relativos para el cálculo de RSI (*Regional Surf Index*) fueron expuestos en el Capítulo 5. En el panel inferior de la figura 7.41, se muestra la calificación obtenida mediante un código de colores: rojo (no surfeable,  $RSI < 5$ ), amarillo (calidad intermedia,  $5 \leq RSI < 7$ ) y verde (calidad alta,  $RSI \geq 7$ ). Puede observarse como los colores verdes solo aparecen en lugares con alturas de ola comprendida entre 1 y 2.5m. Aquellas zonas donde la altura de ola es mayor a 2.5 m, obtienen el color rojo (Cabo de Ajo y Cabo Mayor). El color amarillo es obtenido en aquellos puntos donde la altura de ola es inferior a 1 m, o el  $I_{SQI}$  (*Swell Quality Index*) no es favorable (Playa del Sardinero).

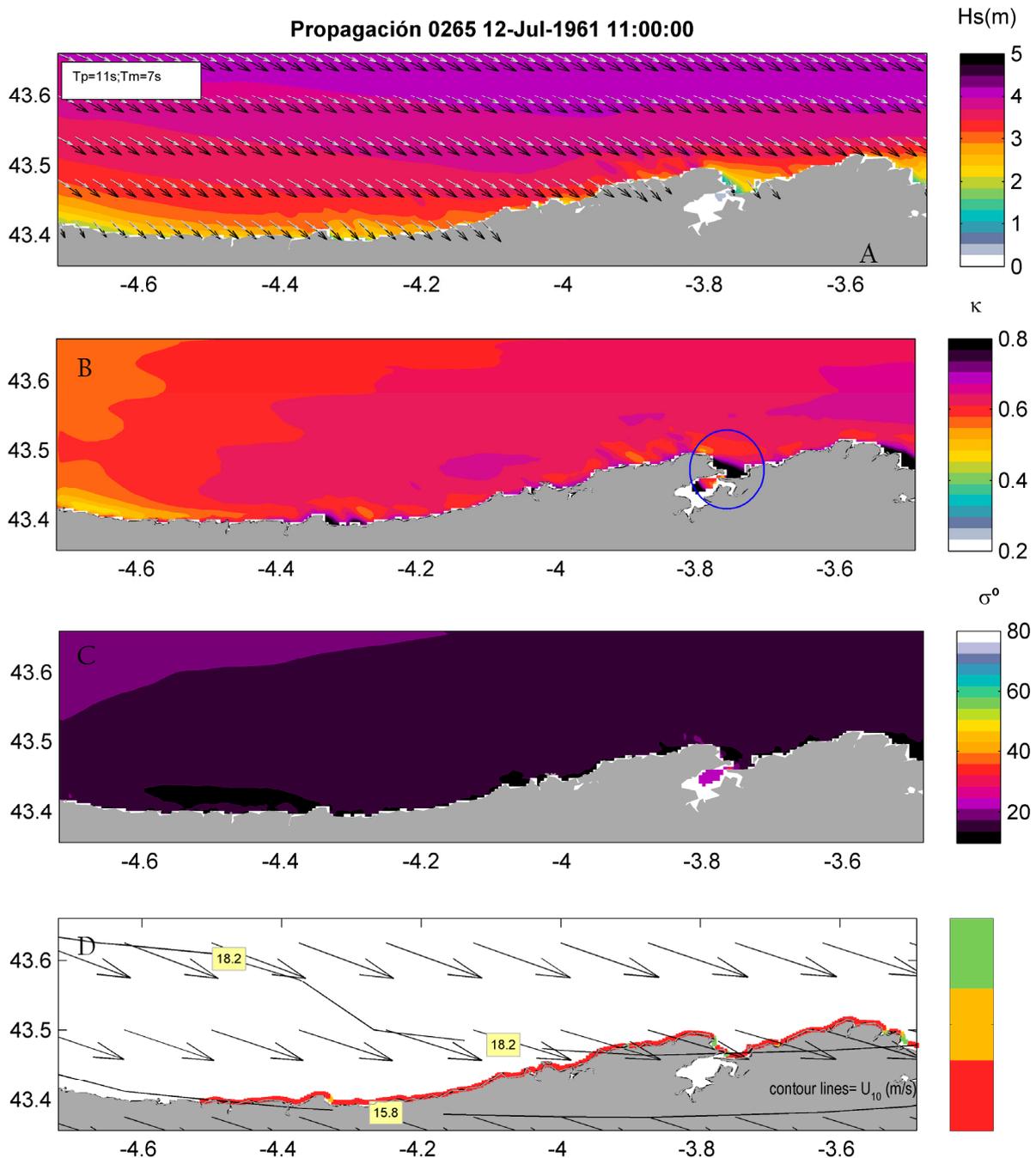


Figura 7.42. Propagación del Caso 265 de la selección MaxDiss de la malla M03 del Cantábrico. Resultados de la altura de ola significativa, dirección media del oleaje (vectores grises), dirección de pico (vectores negros), también se indica el valor de  $T_m$  y  $T_p$  (A), dispersión frecuencial (B), dispersión direccional (C), viento y RSI (D).

En la figura 7.42 se muestra la propagación del caso 265 de la malla M03, en ella puede observarse como este estado de mar, al incidir con menor periodo que el anterior no se ve afectado por la batimetría de la misma forma. En este caso, sólo la ensenada entre

Cabo Mayor y Loreda presenta una altura de ola dentro de los rangos considerados como surfables por los criterios propuestos.

El Caso 265 ocurrió con un viento de componente WNW de una velocidad aproximada de 18 m/s, nótese como en este caso, los mayores valores de  $\kappa$  y los menores de  $\sigma$  aparecen en las zonas abrigadas de estos vientos. Ante esta situación sólo es posible encontrar condiciones surfables en *spots* muy protegidos, como la parte norte del Sardinero y la cara este del Cabo de Ajo (Noja).

### 7.8.1. Características de la librería de casos generada

Los 500 casos seleccionados mediante MaxDiss, representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas, se propagan hasta costa mediante el modelo numérico SWAN. Cada uno de estos casos está definido por las condiciones de contorno del oleaje en la malla general de computación y el campo de vientos simultáneo. La propagación de cada caso nos permite obtener los parámetros espectrales en los nodos de cálculo de la malla de computación correspondiente. En este trabajo se han considerado los parámetros altura de ola significativa,  $H_s$ , periodo medio  $T_m$ , periodo de pico  $T_p$ , dirección media del oleaje  $\theta_m$ , dirección del pico de energía espectral  $\theta_p$ , parámetro de forma espectral  $\kappa$  y dispersión direccional  $\sigma$ .

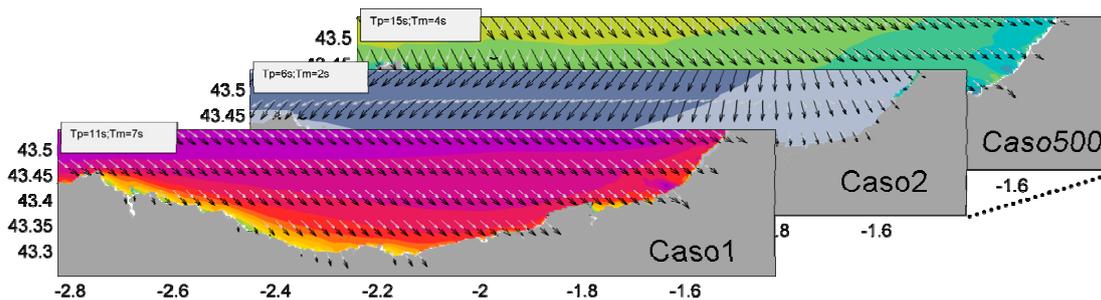


Figura 7.43. Esquema de la librería de casos generada a partir de los 500 casos seleccionados.

El conjunto de las 500 propagaciones realizadas en todas las mallas de cálculo establecidas definen una librería de casos. Esta librería está formada por 500 valores horarios de los parámetros espectrales considerados  $\{H_s, T_m, T_p, \theta_m, \theta_p, \kappa, \sigma\}$  en los nodos de las mallas de computación (mallas G y M). En la figura 7.43 se muestra un esquema de las características que presenta esta librería para la malla M11.

Cada uno de los 500 casos propagados representa a un conjunto de datos de oleaje en aguas profundas, es decir, aquellas situaciones de clima marítimo cuyo oleaje en el contorno de la malla de computación y campo de viento asociado presente unas características similares. La cantidad de condiciones de oleaje en aguas profundas representada por cada caso supone una probabilidad de presentación del mismo. Esta probabilidad asociada permite caracterizar el oleaje espacialmente en las diferentes escalas de tiempo de una manera muy sencilla, incluso con el elevado volumen de información que se maneja.

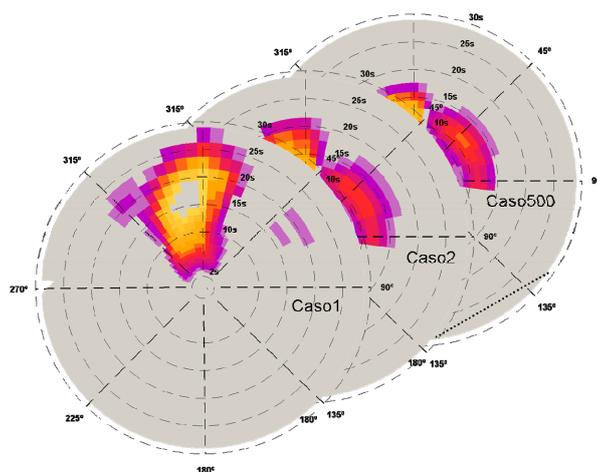


Figura 7.44. Esquema de la librería de espectros generada a partir de los 500 casos seleccionados en la posición de la boya REDEXT Bilbao.

En disponer de la probabilidad de ocurrencia de cada estado de mar seleccionado, permite trabajar con el espectro direccional de oleaje desde una perspectiva estadística (ver figura 7.44). Conocida la probabilidad de que en un determinado mes, estación o año, ocurran un determinado tipo de espectros, permite realizar aproximaciones a la forma espectral media mensual, estacional o anual. Pudiendo de esta forma analizar la variabilidad temporal en la forma espectral a distintas escalas temporales.

## 7.9. Reconstrucción de series temporales horarias de parámetros espectrales

La reconstrucción del clima marítimo en aguas someras se realiza mediante una interpolación a partir de la serie de casos seleccionados y propagados desde profundidades indefinidas. Se ha considerado la técnica de interpolación basada en

funciones de base radial (*radial basis functions*), muy adecuada para datos con una alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente (Franke, 1982). Se dispone de una serie de valores de la función real  $f(x_j)$   $j=1, \dots, M$  en los puntos  $\{x_1, \dots, x_M\}$ . La técnica de interpolación RBF considera que la función de aproximación *RBF* está formada por una combinación lineal de funciones radiales simétricas centradas en los puntos dados (figura 7.45). La función objetivo presenta la siguiente expresión:

$$RBF(x) = p(x) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|x - x_j\|) \quad (7.18)$$

e interpola los valores dados de tal manera que:

$$RBF(x_j) = f_j \quad j = 1, \dots, M \quad (7.19)$$

donde, *RBF* es la función de interpolación,  $p(x)$  es el polinomio lineal en todas las variables involucradas en el problema,  $a_i$  son los coeficientes de ajuste RBF,  $\Phi$  es la función radial básica, donde  $\|\cdot\|$  es la norma euclidiana y  $x_i$  son los centros de la interpolación RBF.

El polinomio  $p(x)$  de la expresión de la función de interpolación RBF se define como una base de monomios  $\{p_0, p_1, \dots, p_d\}$ , formada por una cantidad de monomios de grado uno igual a la dimensionalidad de los datos (en este caso igual al número de componentes principales  $d$  considerado) y un monomio de grado cero, siendo  $b = \{b_0, b_1, \dots, b_d\}$  los coeficientes de estos monomios.

Las funciones de base radial pueden presentar diferentes expresiones. Algunas de estas funciones radiales contienen un parámetro de forma que juega un papel muy importante en la precisión de la técnica. En la metodología de propagación del clima marítimo se han considerado funciones radiales gaussianas que dependen de un parámetro de forma. El valor óptimo de este parámetro se obtiene a partir del algoritmo de propuesto por Rippa (1999).

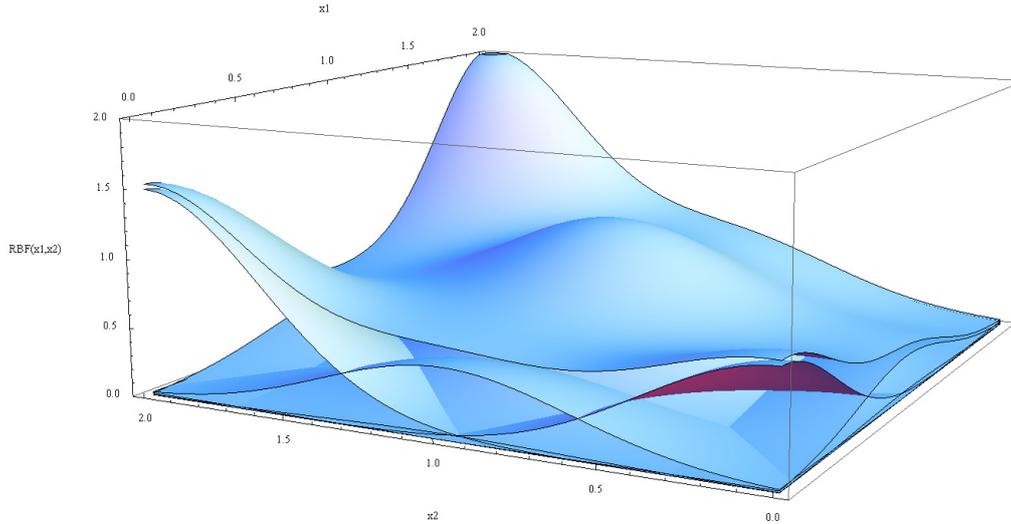


Figura 7.45. Interpolación RBF definida como una combinación de funciones radiales

En la implementación de la técnica de interpolación RBF en la reconstrucción del clima marítimo multidimensional, se dispone de  $M$  puntos  $d$ -dimensionales  $D_j^{EOF} = \{PC_{x^*1}^D, \dots, PC_{x^*d}^D\}; j = 1, \dots, M$ , que se corresponden con los casos del clima marítimo multidimensional en profundidades indefinidas, seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss en el espacio de proyección de las EOFs, donde  $d$  es igual al número de componentes principales consideradas. El valor exacto de la función en esos puntos  $f_j(x)$  es igual a los parámetros espectrales obtenidos como resultado de la propagación en un punto objetivo: la altura de ola significativa propagada  $\{H_{sp,j}^D\}$ , el periodo medio  $\{T_{mp,j}^D\}$ , el periodo de pico  $\{T_{pp,j}^D\}$ , las componentes  $x$  e  $y$  de la dirección media propagada  $\{\theta_{x_{mp,j}^D}, \theta_{y_{mp,j}^D}\}$  y la dirección de pico  $\{\theta_{x_{pp,j}^D}, \theta_{y_{pp,j}^D}\}$  (las direcciones se recomponen a partir de las componentes  $x$  e  $y$ ). Por último se obtienen los parámetros  $\{\kappa_{p,j}^D\}$  y  $\{\sigma_{p,j}^D\}$ .

Por lo tanto, el objetivo de la aplicación de esta técnica de interpolación en la reconstrucción del clima marítimo es el cálculo de una función de interpolación  $RBF_H$  de la altura de ola propagada  $H_{sp}$ , una función de interpolación  $RBF_T$  del periodo medio y de pico propagados  $T_{mp}$  y  $T_{pp}$ , una función de interpolación  $RBF_{\theta_x}$  de la componente  $x$  de las direcciones media y de pico propagadas  $\theta_{x_{mp}}$  y  $\theta_{x_{pp}}$ , y una función de interpolación  $RBF_{\theta_y}$  de la componente  $y$  de las direcciones media y de pico propagadas

$\theta_{y_{mp}}$  y  $\theta_{y_{pp}}$ , así como las funciones  $RBF_{\kappa}$  y  $RBF_{\sigma}$ . Estas funciones RBF permiten inferir los valores de los parámetros propagados en cualquier otro punto del espacio, es decir, cualquier otra situación de clima marítimo en indefinidas proyectada en el espacio de las EOFs:  $X_i^{EOF} = \{PC_{X^*_1}, \dots, PC_{X^*_d}\}_i; i = 1, \dots, N$ .

Para ello, en primer lugar es necesario determinar estas funciones de interpolación. Las componentes principales que definen cada situación del clima marítimo en indefinidas se normalizan mediante una transformación lineal que escala los valores entre 0 y 1, y se definen como  $X_i^{EOF, norm} = \{PC_{X^*_1}^{norm}, \dots, PC_{X^*_d}^{norm}\}_i$ . Cada caso seleccionado en el que se dispone del valor de los parámetros propagados se expresa como  $D_j^{EOF, norm} = \{PC_{X^*_1}^{D, norm}, \dots, PC_{X^*_d}^{D, norm}\}_j$ .

La función de interpolación RBF se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RBF(X^{EOF, norm}) = p(X^{EOF, norm}) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|) \quad (7.20)$$

donde

$$p(X^{EOF, norm}) = b_0 + b_1 PC_{X^*_1}^{norm} + b_2 PC_{X^*_2}^{norm} + \dots + b_d PC_{X^*_d}^{norm} \quad (7.21)$$

y  $\Phi$  representa la función gaussiana con un parámetro de forma,  $c$ :

$$\Phi(\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|) = \exp\left(-\frac{\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|^2}{2c^2}\right) \quad (7.22)$$

El parámetro de forma  $c$  más adecuado se estima mediante el algoritmo de Rippa basado en el método *leave-one-out-cross validation* (LOOCV). Los coeficientes  $b_i = [b_0, b_1, \dots, b_d]^T$  de los polinomios y  $a_j = [a_1, \dots, a_M]^T$  de las funciones radiales se determinan a partir de las condiciones de interpolación:

$$RBF(D_j^{EOF, norm}) = f_j(D_j^{EOF, norm}) = D_{p,j}; \quad j = 1, \dots, M$$

(7.23)

donde el vector de datos  $f_j$  está definido por los parámetros espectrales propagados  $\{H_{sp}\}$ ,  $\{T_{mp}\}$ ,  $\{T_{pp}\}$ ,  $\{\theta x_{mp}\}$ ,  $\{\theta y_{mp}\}$ ,  $\{\theta x_{pp}\}$ ,  $\{\theta y_{pp}\}$ ,  $\{\kappa_p\}$  y  $\{\sigma_p\}$  correspondientes a los estados de mar  $D_j$  seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss.

Por tanto, las funciones RBF de cada uno de los parámetros espectrales propagados en el punto objetivo permiten transferir el clima marítimo multidimensional definido por  $X^{EOF,norm} = \{PC_{x^*1}^{norm}, \dots, PC_{x^*d}^{norm}\}$  desde aguas profundas hasta aguas someras. Estas funciones RBF se definen como:

$$H_{sp,i} = RBF_H \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, H_{sp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.24)$$

$$T_{mp,i} = RBF_{Tm} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, T_{mp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.25)$$

$$T_{pp,i} = RBF_{Tp} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, T_{pp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.26)$$

$$\theta x_{mp,i} = RBF_{\theta m} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, \theta x_{mp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.27)$$

$$\theta y_{mp,i} = RBF_{\theta m} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, \theta y_{mp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.28)$$

$$\theta x_{pp,i} = RBF_{\theta p} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, \theta x_{pp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.29)$$

$$\theta y_{pp,i} = RBF_{\theta p} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, \theta y_{pp,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.30)$$

$$\kappa_{p,i} = RBF_{\kappa} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, \kappa_{p,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.31)$$

$$\sigma_{p,i} = RBF_{\sigma} \left( \left\{ D_j^{EOF,norm}, \sigma_{p,j} (j = 1, \dots, M) \right\}, X_i^{EOF,norm} \right); i = 1, \dots, N \quad (7.32)$$

La función de transferencia general de cada estado de mar en indefinidas proyectado en el espacio de las EOFs,  $X_i^{EOF,norm}; i=1,\dots,N$  se expresa como:

$$X_{p,i} = RBF\left(\left\{D_j^{EOF,norm}, D_{p,j}^*(j=1,\dots,M)\right\}, X_i^{EOF,norm}\right); \quad i=1,\dots,N \quad (7.33)$$

El resultado final es la serie de reanálisis transferida a aguas someras:

$$X_{p,j} = \left\{H_{sp,i}^D, T_{mp,i}^D, T_{pp,i}^D, \theta_{mp,i}^D, \theta_{pp,i}^D, \kappa_{p,i}^D, \sigma_{p,i}^D\right\}; i=1,\dots,N \quad (7.34)$$

En el caso de la existencia de marea astronómica significativa, como es el caso, es necesario propagar los casos seleccionados en  $Q$  diferentes niveles ( $z_q; q=1,\dots,Q$ ):

$D_{p,j}(z_q) = \left\{H_{sp,i}^D, T_{mp,i}^D, T_{pp,i}^D, \theta_{mp,i}^D, \theta_{pp,i}^D, \kappa_{p,i}^D, \sigma_{p,i}^D\right\}; j=1,\dots,M; q=1,\dots,Q$ ; calculando una función RBF para cada parámetro propagado de interés y para cada nivel de propagación. La transferencia de una condición de clima marítimo con variabilidad espacial desde aguas profundas al punto objetivo, se obtiene a partir de las correspondientes funciones RBF para los  $q$  niveles, posteriormente, se realiza una interpolación lineal al nivel correspondiente a la situación climática en indefinidas  $z_i$ . La función de transferencia generalizada para un nivel del mar determinado  $z_i$  se expresa como:

$$X_{p,i}^*(z_i) = INTERP\left[RBF\left(\left\{D_j^{EOF,norm}, D_{p,j}^*(z_q), (j=1,\dots,M)\right\}, X_i^{EOF,norm}, z_i\{q=1,\dots,Q\}\right)\right] \quad i=1,\dots,N \quad (7.35)$$

En la caracterización del clima marítimo en aguas someras, las propagaciones se realizaron en 3 niveles del mar que caracterizan la bajamar máxima viva equinoccial (BMVE), el nivel medio y la pleamar (PMVE):  $z_1=0.0$  m;  $z_2=2.5$  m;  $z_3=5.0$  m.

### 7.9.1. Validación de las series temporales horarias

La transferencia del oleaje hasta la costa se ha validado mediante la reconstrucción de la serie de reanálisis GOW en la posición de las distintas boyas localizadas en la zona de estudio, ver figura 7.20. Las series temporales reconstruidas de los parámetros altura de

ola significativa,  $H_s$ , el periodo de pico  $T_p$ , la dirección media del oleaje  $\theta_m$  se han comparado en las cuatro boyas seleccionadas. Los parámetros  $\kappa$  y  $\sigma$  se han comparado sólo en la boya REDEXT de Bilbao (tipo SeaWatch), ya que es la única de la que se dispone el registro bruto. A partir de este registro, por medio del método FFT (*Fast Fourier Transform*) es posible obtener el espectro, y a partir de él calcular los parámetros espectrales de interés para validar el modelo.

En la figura 7.46 se muestran la serie temporal reconstruida en la posición de la boya exterior de Bilbao (línea roja), y la serie temporal obtenida a partir del registro de superficie libre de dicha boya (línea azul) correspondiente a los meses de Mayo a Abril del año 2008. Se puede observar como la metodología de propagación es capaz de reproducir la estructura de la serie temporal de los distintos parámetros considerados, tanto para estados de mar pertenecientes al régimen medio como extremal.

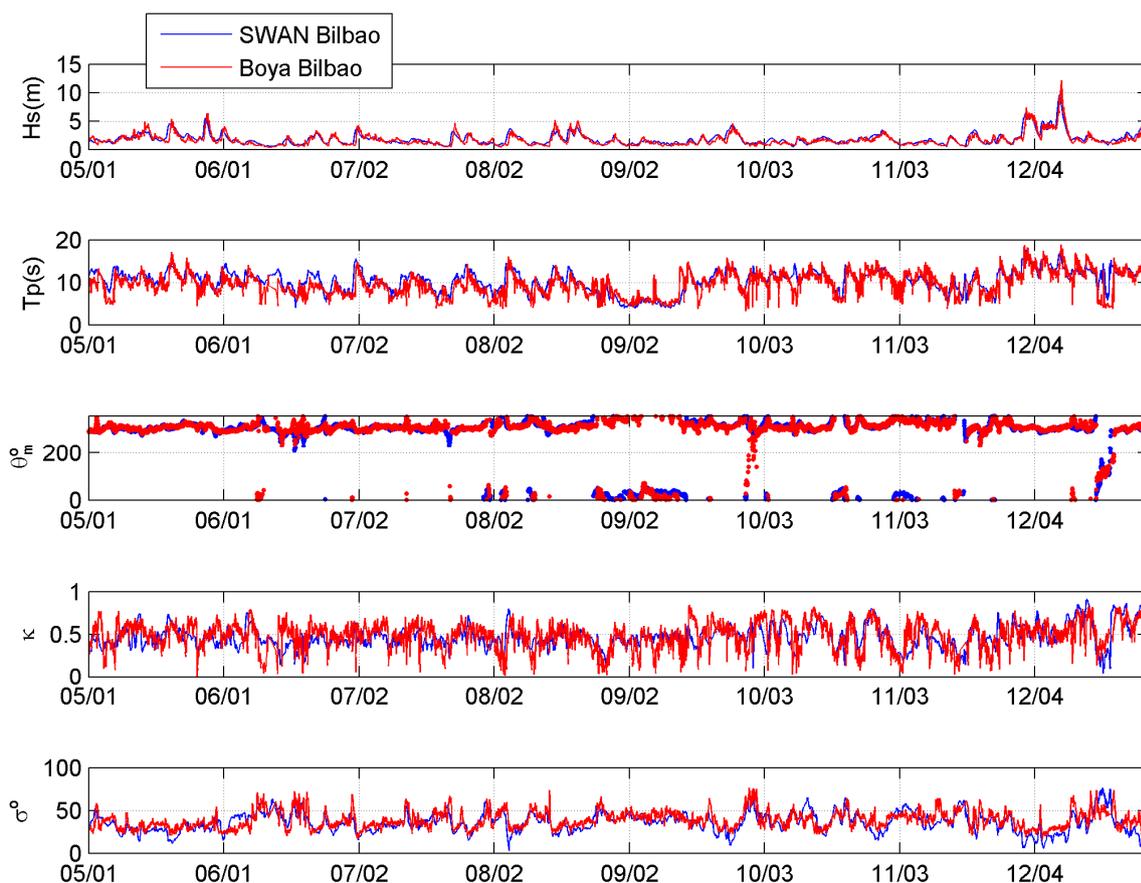


Figura 7.46. Validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $\theta_m$ ,  $\kappa$  y  $\sigma$  en la posición de la boya exterior de Bilbao (OPPE) correspondientes al año 2008. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul).

En el resto de boyas disponibles sólo han podido ser validados aquellas variables suministradas por cada instrumento de medida. La boyas costeras (tipo Watchkeeper, y Datawell) al utilizar un sistema de emisión de la información basado en ondas de radio, suministran en continuo las variables  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$  y  $\theta_p$ , sin embargo, al no disponer de sistemas de almacenamiento, la obtención de los espectros horarios a partir de los cuales calcular los parámetros  $\kappa$  y  $\sigma$  no es posible. Así, para las boyas costeras de la Red Vigía del Gobierno de Cantabria (Virgen del Mar y Santoña) y REDCOS de Puertos del Estado (Costera de Bilbao) se muestra la validación de las series temporales de las variables indicadas en las figuras 7.47, 7.48 y 7.49.

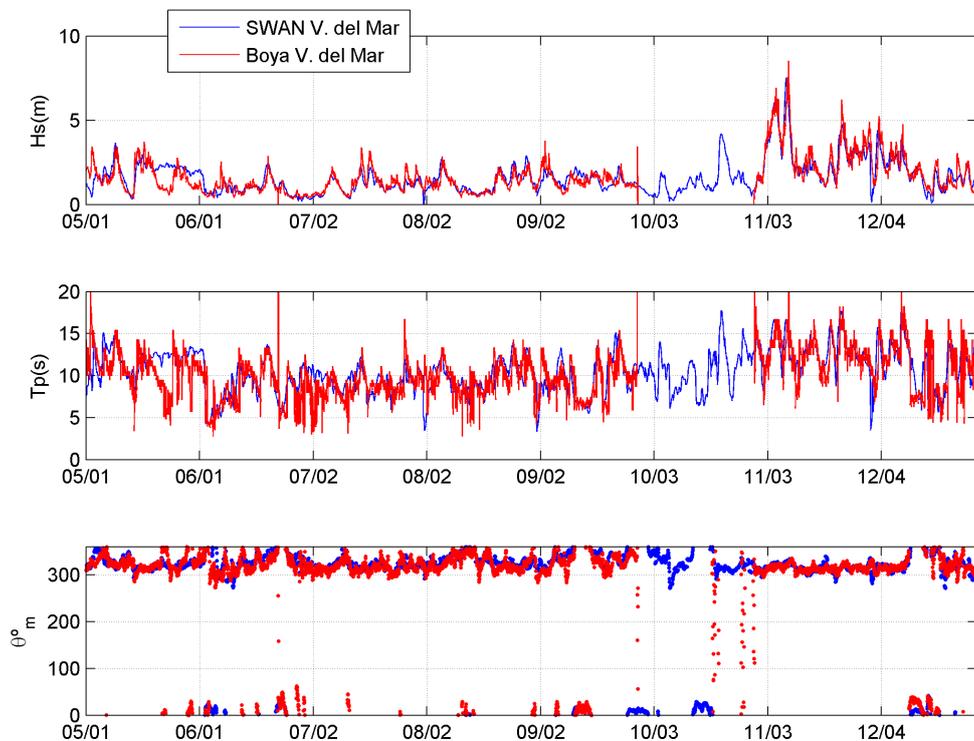


Figura 7.47. Validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  en la posición de la boya costera de Virgen del Mar (Gobierno de Cantabria) correspondientes al año 2009. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul).

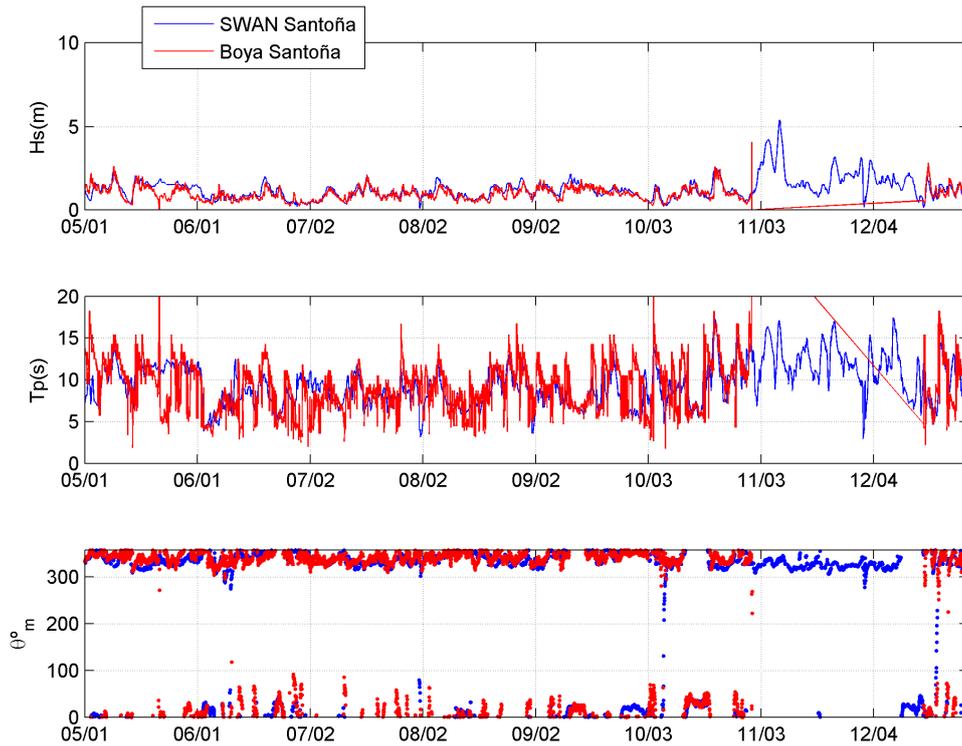


Figura 7.48. Validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  en la posición de la boya costera de Santaña (Gobierno de Cantabria) correspondientes al año 2009. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul).

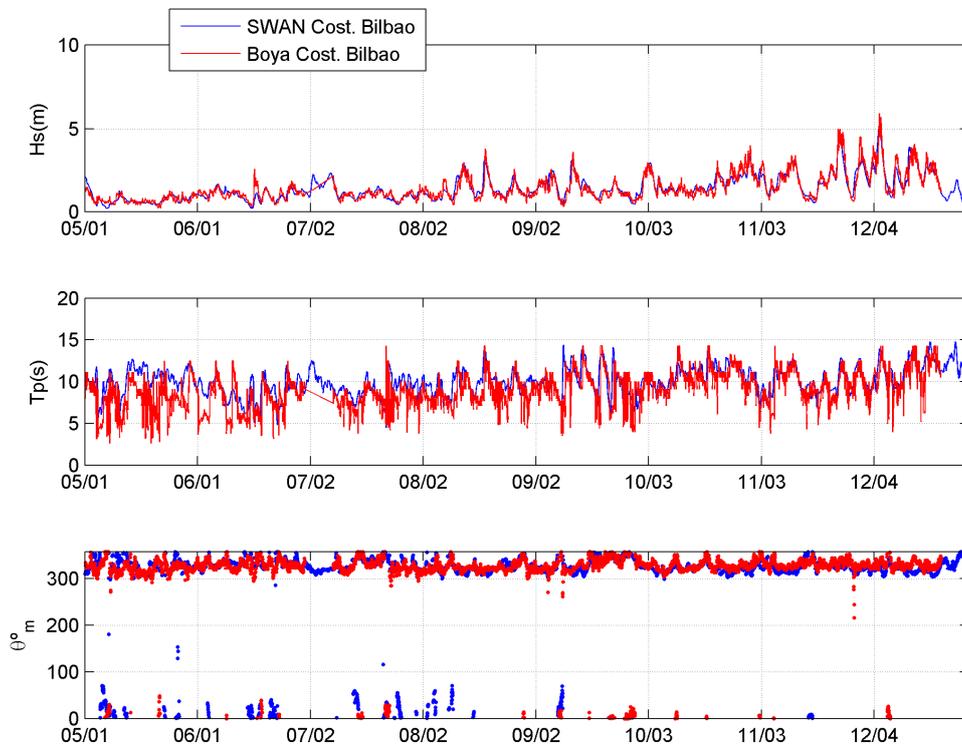


Figura 7.49. Validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  en la posición de la boya costera de Bilbao (OPPE) correspondientes al año 2008. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul).

## 7.10. Análisis de la ocurrencia de condiciones surfeables en el Cantábrico oriental

Gracias a la metodología de transferencia del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa, es posible conocer con un alto nivel de detalle las características del mismo a lo largo de todo el área de estudio. Este profundo conocimiento del oleaje permite estimar de una forma muy rigurosa la disponibilidad de condiciones surfeables en cualquier *spot* conocido. Del mismo modo, permite identificar zonas, donde a pesar de no existir anomalías batimétricas que produzca la rotura de olas surfeables, el oleaje presenta características adecuadas para la realización de obras e infraestructuras de mejora en la rotura del oleaje (arrecifes artificiales para el surf).

El disponer de series largas (60 años) de las diferentes variables relevantes en la generación de olas surfeables a una resolución de 200 m, permite analizar la ocurrencia de diferentes calidades del oleaje (y viento) para la práctica de este deporte. Al mismo tiempo, es posible analizar la variabilidad espacial tanto en la calidad como en la cantidad de condiciones de surf generadas por los contornos de costa y la batimetría, así como la variabilidad temporal inherente a la naturaleza del clima marítimo. Es decir, durante cuánto tiempo es esperable que funcione cada rompiente y la calidad esperable de las condiciones de surf.

Para analizar las condiciones de surf en la parte oriental del Cantábrico se han seleccionado un total 700 puntos que cubren la costa de las comunidades autónomas de Cantabria y País Vasco. Para evaluar el oleaje a una distancia mínima de la zona donde ocurre la rotura, se ha elegido la batimétrica de los 10 m para seleccionar los puntos a analizar. Desde esta profundidad a la profundidad de rotura es posible que el oleaje sufra cambios asociados a la propagación. En un análisis de este tipo se asume que estos cambios son despreciables. En la figura 7.50 se muestra un ejemplo con varios puntos en los que ha sido realizado el análisis histórico de las condiciones de surf junto a su azimut considerado.



Figura 7.50. Ejemplo de los puntos seleccionados para analizar. Los vectores representan la dirección media de cada tramo de costa.

Antes de realizar la estadística de condiciones surfeables en los puntos señalados, se ha realizado un análisis del oleaje y el viento en la posición de la boya exterior de Bilbao, este análisis servirá para justificar e interpretar con más información los resultados obtenidos en los apartados 7.10.2. ,7.10.3. y 7.10.4.

### 7.10.1. Análisis del oleaje en profundidades indefinidas a partir de parámetros espectrales

Un paso previo antes de caracterizar las condiciones de surf a pie de rompiente, es analizar las características del clima marítimo en profundidades indefinidas. De este análisis pueden obtenerse resultados muy útiles para entender la disponibilidad del recurso surf en la zona de estudio.

Trabajar con los espectros horarios, y establecer modos preferenciales o tipologías frecuentes de forma espectral sería lo ideal en este caso. Debido al enorme volumen de información que esto supondría y a que no se dispone de registros espectrales suficientemente largos como para realizar un análisis histórico, se ha optado por trabajar con los parámetros agregados obtenidos mediante simulación numérica, una vez validados estos con los datos instrumentales disponibles (ver apartado 7.9.1. ). Así, este análisis se basa en la serie histórica de oleaje (1948-2008) obtenida mediante la metodología planteada en este capítulo en la posición de la boya exterior de Bilbao. Las escalas temporales de variabilidad que se pretenden analizar son por un lado, el régimen

estacional o medio anual, las variaciones estacionales, interanuales y tendencias en el largo plazo. Debido al objetivo subyacente de esta tesis, el análisis se enfoca en aquellos parámetros que puedan aportar información acerca de la calidad del oleaje y el viento para el surf.

En relación al régimen medio anual, en la figura 7.51 se muestra el valor medio característico de  $\kappa$  y  $\sigma$  en función de  $H_s$  y  $T_p$ .

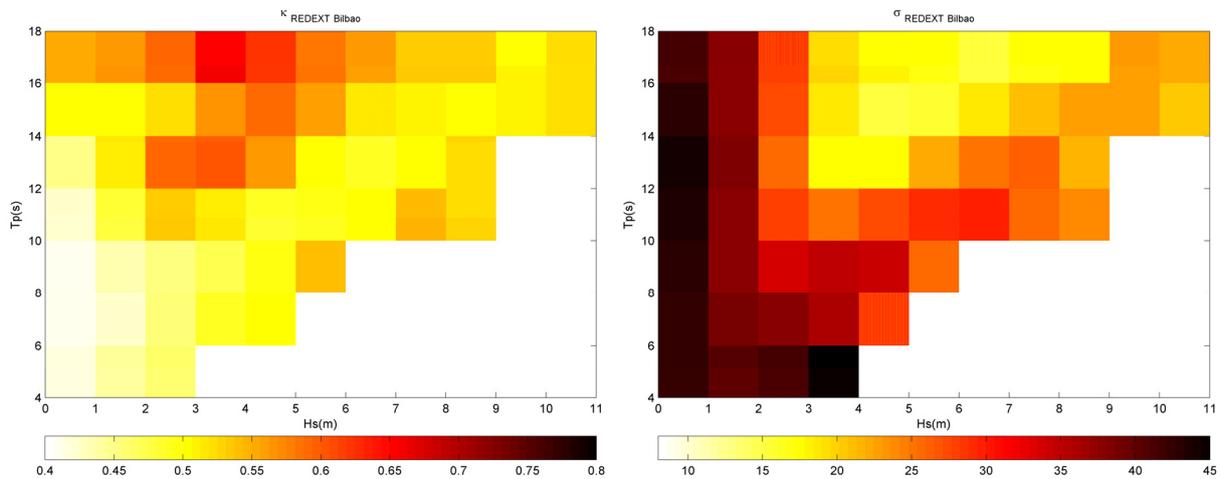


Figura 7.51. Distribución de los valores medios de  $\kappa$  (panel izquierdo) y  $\sigma$  (panel derecho) en función de  $H_s$  y  $T_p$  en la posición de la boya exterior de Bilbao.

Del análisis de esta figura se concluye que, en mar abierto (en la posición de la boya exterior de Bilbao), los oleajes más puros en términos de dispersión frecuencial, son aquellos cuya altura de ola significativa esta comprendida entre los 2 y los 6 m y periodos de pico superiores a los 12 s. El valor medio del parámetro de forma espectral en este tipo de oleajes es aproximadamente de  $\kappa = 0.65$ . En cuanto a la dispersión en direcciones, se tiene una distribución muy parecida, siendo aquellos estados de mar con  $3m < H_s < 7m$  y  $T_p > 12s$  los que inciden con menor dispersión direccional, con valores de  $\sigma \cong 15^\circ$ .

En la figura 7.52 se muestra el valor medio de  $\kappa$  y  $\sigma$  en función de la altura de ola y la dirección de pico. De esta figura se desprende que son los oleajes procedentes de las direcciones W a NW los que mayor grado de pureza presentan en mar abierto, especialmente los de la dirección WNW, con valores de  $\kappa$  en torno a 0.65 y  $\sigma \cong 15^\circ$ .

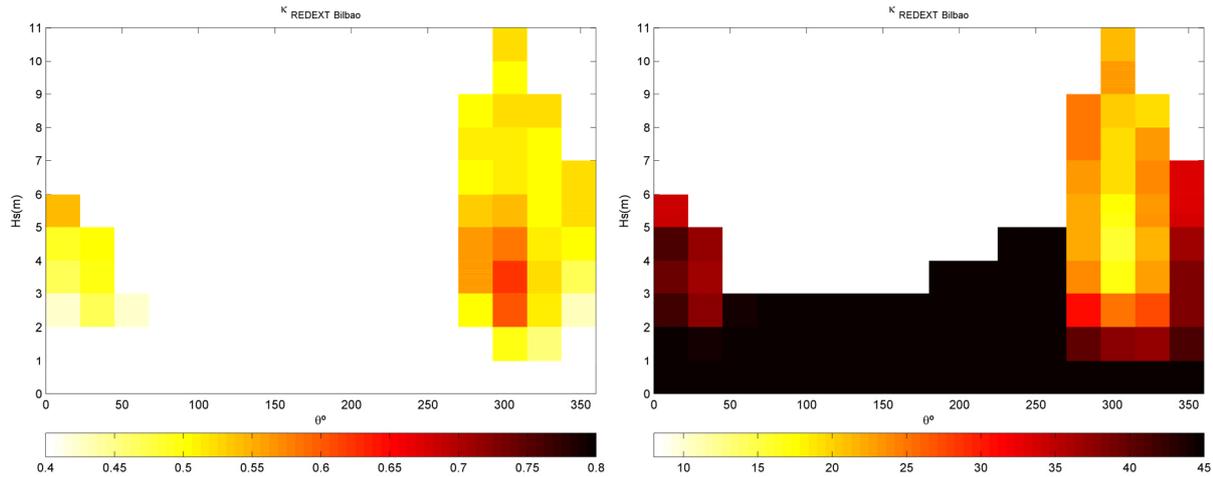


Figura 7.52. Distribución de los valores medios de  $\kappa$  (panel izquierdo) y  $\sigma$  (panel derecho) en función de  $H_s$  y  $\theta_m$  en la posición de la boya exterior de Bilbao.

Las características espectrales del oleaje en profundidades indefinidas condicionan la calidad del surf que ocurre en la costa. Estadísticamente, son los oleajes procedentes del WNW, con alturas de ola entre los 3 y 4 m y periodos superiores a 12 s, los que inciden con mayor grado de organización. Este hecho limita espacialmente la ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad, ya que estados de mar de este tipo suelen ser demasiado energéticos para el surf en playas expuestas a estas direcciones. Por lo tanto, es esperable que sean aquellas zonas ligeramente viradas al ENE las que presenten condiciones de surf de mayor calidad, en términos de forma del espectro.

El hecho de que el resto de los posibles estados de mar no presenten, en mar abierto, características espectrales medias tan adecuadas, no implica la imposibilidad de que se generen condiciones de surf de alta calidad. El factor de forma espectral mide la dispersión frecuencial alrededor del pico de energía, en caso de espectros bimodales, muy frecuentes en la zona de estudio, si existe un pico de energía mucho mayor que el otro (*swell* del NW con *windswell* del NE),  $\kappa$  solo informará de la dispersión frecuencial alrededor del pico más energético (Goda y Kudaka, 2007). Si por el contrario, los dos picos presentan densidades energéticas similares, el parámetro  $\kappa$  informará de la dispersión en frecuencias del espectro total. Ésto no ocurre a la hora de estimar la dispersión direccional, que capta la varianza total en direcciones. Por este motivo, es rara la ocurrencia de estados de mar con  $H_s$  inferior a los 2 m con alto grado de

organización, ya que frecuentemente estos se encuentran afectados por oleajes generados por vientos locales.

### 7.10.1.1. Variabilidad estacional

Una vez se han identificado aquellos oleajes en mar abierto con potencial de generación de condiciones de surf de alta calidad, conviene preguntarse si éstos ocurren con la misma frecuencia dentro de la unidad de tiempo anual. Para ello se han analizado las variaciones estacionales en los principales parámetros utilizados para describir el oleaje. En la figura 7.53 se muestra el análisis estacional basado en gráficos de cajas. En el panel izquierdo se muestra la estacionalidad en la magnitud  $H_s$ . La información que ofrece este tipo de gráficos es la mediana de la distribución empírica (líneas horizontales), los percentiles del 25 y 75% (líneas gruesas verticales), percentiles del 5 y 95% (líneas finas) y los *outliers* (círculos). También se indica la dirección media de propagación del flujo de energía durante el periodo de tiempo analizado ( $\bar{\theta} = 307.6^\circ$ ), mediante el color de cada caja mensual se indica la desviación de la dirección media mensual respecto a la dirección media anual.

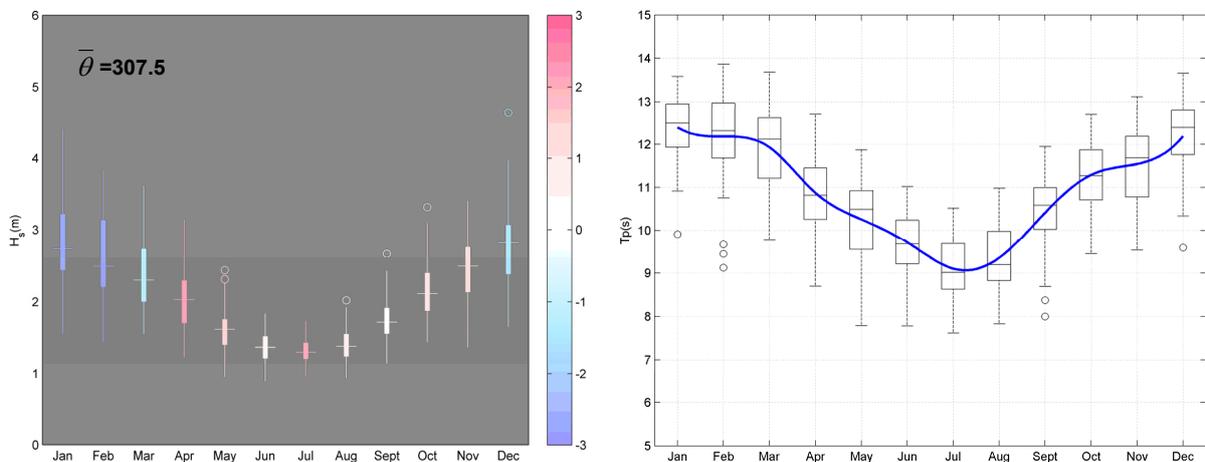


Figura 7.53. Gráficos de cajas que muestran la variabilidad estacional de  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta_m$ . En el panel izquierdo, el color indica la desviación en grados respecto a la dirección media del flujo de energía.

De esta forma se puede observar cómo en alturas de ola, los estados de mar tienden a ser mucho más energéticos durante el invierno, con  $H_s \approx 2.75$  m, que durante el verano  $H_s \approx 1.5$  m. En cuanto a la dirección media del oleaje, puede observarse como los

estados de mar más energéticos provienen, durante el invierno, de direcciones con mayor componente oeste, mientras que durante el verano adquieren mayor componente norte. En relación al periodo de pico, se observa un patrón estacional similar al que muestra  $H_s$ , durante el invierno  $T_p \approx 12.5$  s y durante el verano  $T_p \approx 10$  s.

Al analizar los parámetros que nos indican la forma del espectro direccional (figura 7.54), también se obtiene un patrón estacional en el cual los oleajes más puros ocurren de enero a marzo y de octubre a diciembre, con valores medios de  $\kappa \approx 0.55$  y de  $\sigma \approx 32.5^\circ$ , durante el resto del año, los valores medios de estas variables son,  $\kappa \approx 0.45$  y de  $\sigma \approx 37.5^\circ$ .

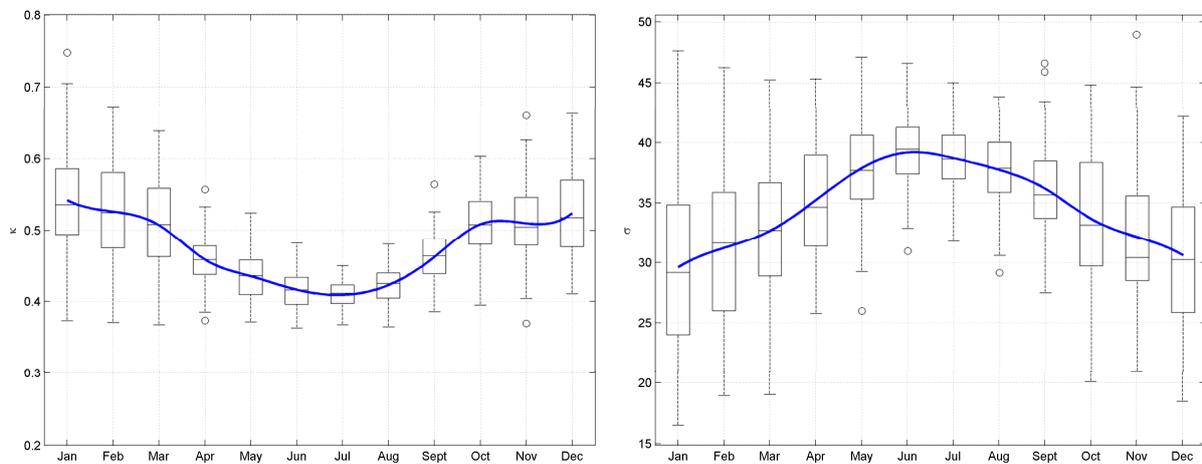


Figura 7.54. Gráficos de cajas que muestran la variabilidad estacional de  $\kappa$  y  $\sigma$ .

El viento local es responsable de la generación de oleajes de corto periodo que pueden modificar la forma espectral, y por tanto la idoneidad del oleaje para el surf. En la figura 7.55 se muestra la estacionalidad en la velocidad del viento y en su dirección, junto a la evolución diaria de los valores medios horarios de las componentes  $x$  e  $y$ , donde es posible caracterizar la variabilidad diaria del viento inducida por las diferencias de temperatura y presión entre mar y tierra (brisas térmicas). Siguiendo el mismo esquema que en la figura 7.53 se muestran, mediante un gráfico de cajas, las variaciones estacionales de esta variable. Los colores indican la desviación de la dirección media mensual respecto a la dirección media anual. Las velocidades medias mensuales más intensas ocurren durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre. Los oleajes incidentes durante estos meses presentan estadios de desarrollo más maduros

que el correspondiente a la velocidad media mensual del viento local. Es por este motivo por lo que los valores de  $\kappa$  y  $\sigma$  muestran estados de mar más puros durante los meses indicados. La dirección del viento durante el invierno adquiere mayor componente W (desviación negativa respecto a la dirección media anual del viento), especialmente durante el mes de octubre, donde la probabilidad de ocurrencia de vientos del sur es máxima (observar el repunte en el valor de  $\kappa$  ocurrido durante octubre). Durante los meses de primavera y verano, el viento adquiere mayor componente N, lo cual indica una mayor ocurrencia de vientos del N-NE. Estos vientos, a pesar de ser menos intensos que durante el invierno, al incidir con dirección *onshore*, generan mar de viento que disminuye el apuntamiento del espectro y aumenta la dispersión direccional del mismo.

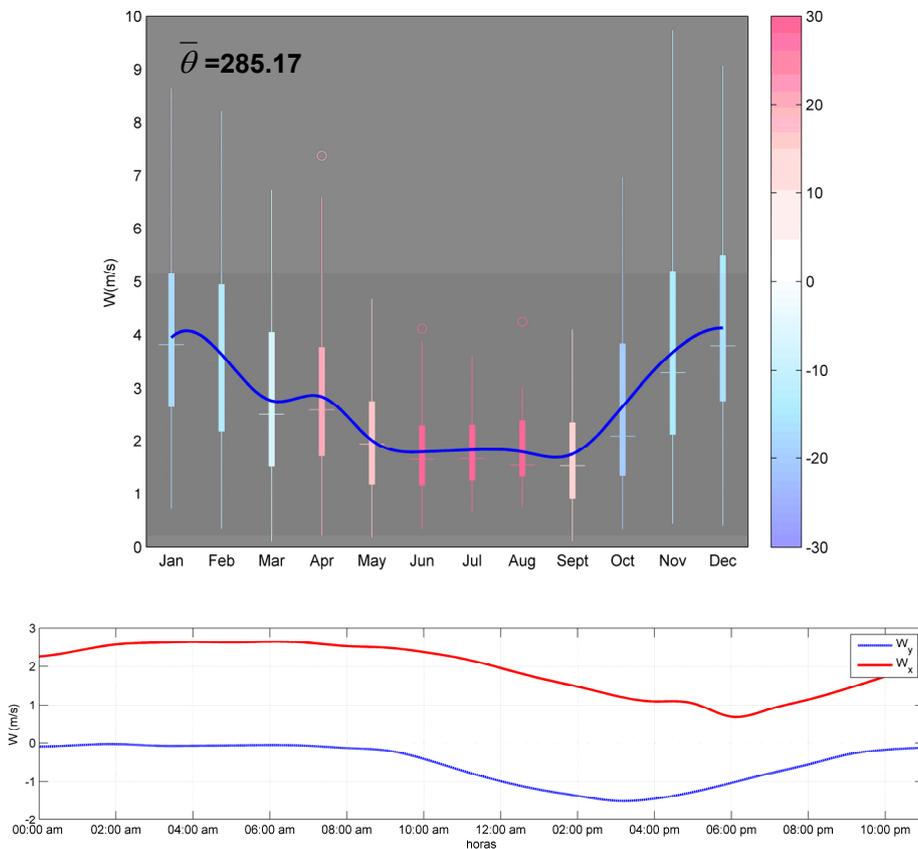


Figura 7.55. Variabilidad estacional (panel superior) y diaria (panel inferior) de la velocidad y dirección del viento.

Ante la situación descrita en profundidades indefinidas, en la costa cabe esperar un patrón espacial y estacional condicionado por el clima marítimo exterior y por el viento. Así, durante los meses de invierno es más probable encontrar buenas condiciones de surf en rompientes viradas el este (la altura de ola exterior media mensual es mayor a las

alturas de ola surfeables según el criterio empleado, el periodo de pico es muy elevado (mayor capacidad de refracción y giro) y los vientos son en su mayoría de componente W). Los oleajes, al incidir con periodos elevados, tienden a generar mejores condiciones en fondos tipo *point-break*, *reef-break* y *rivermouth*. Durante la primavera y verano, el surf es más frecuente en rompientes viradas al oeste (la altura de ola media mensual es adecuada para el surf en rompientes expuestas, vientos del NE). La calidad del oleaje es menor durante esta época, al igual que los periodos, por lo que es esperable que las mejores condiciones de surf ocurran en rompientes tipo *beach-break*. De entre todos los meses, destaca el de octubre por presentar valores intermedios en las variables analizadas junto a direcciones del viento mayoritariamente de componente sur. Esto hace que durante octubre, numerosas rompientes presenten su óptimo funcional, ya que el viento es adecuado para la mayor parte de los *spots* de la zona de estudio, los cuales se encuentran orientados al norte.

Los gráficos de barras permiten observar la varianza de una variable para cada bloque de tiempo en el que se basa el análisis (mensual). De esta forma puede observarse como existen meses, que dependiendo del año, pueden mostrar valores medios muy diferentes. Así, encontramos que puede haber diciembres en los cuales el valor medio de  $H_s$  este en torno al 1.5 m, mientras que otros años el valor medio de  $H_s$  supere los 4 m. Esto mismo ocurre con el resto de variables. Por tanto, cabe esperar una alta variabilidad interanual en las condiciones de surf.

### 7.10.1.2. Variabilidad interanual

En la figura 7.56 se muestran las series temporales de  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\kappa$  y  $\sigma$ , suavizadas por medio de una ventana móvil anual, el color indica la desviación en grados de la dirección media anual del flujo medio de energía. La serie temporal se ha ajustado a una recta con la finalidad de obtener la tendencia de largo plazo. En relación a  $H_s$ , se observa que aquellos periodos de mayor altura, el oleaje suele tomar una dirección con mayor componente oeste, sin embargo también ocurren periodos muy severos en los que el oleaje adquiere mayor componente norte, por lo que resulta difícil establecer una relación clara entre el tamaño del oleaje promediado en el año y la anomalía direccional. Esta relación se muestra de manera mucho más clara en el análisis del periodo de pico,

en este caso, la mayoría de los picos por encima del valor medio aparecen coloreados en azul, esto indica que los oleajes más desarrollados inciden con mayor componente oeste (mayor disponibilidad de *fetch*). Esta misma relación se observa en el parámetro de forma espectral y dispersión direccional. Sin embargo, estas variables, al igual que la altura de ola significativa no muestran una relación tan clara, ya que están más influenciadas por el clima local que el  $T_p$ .

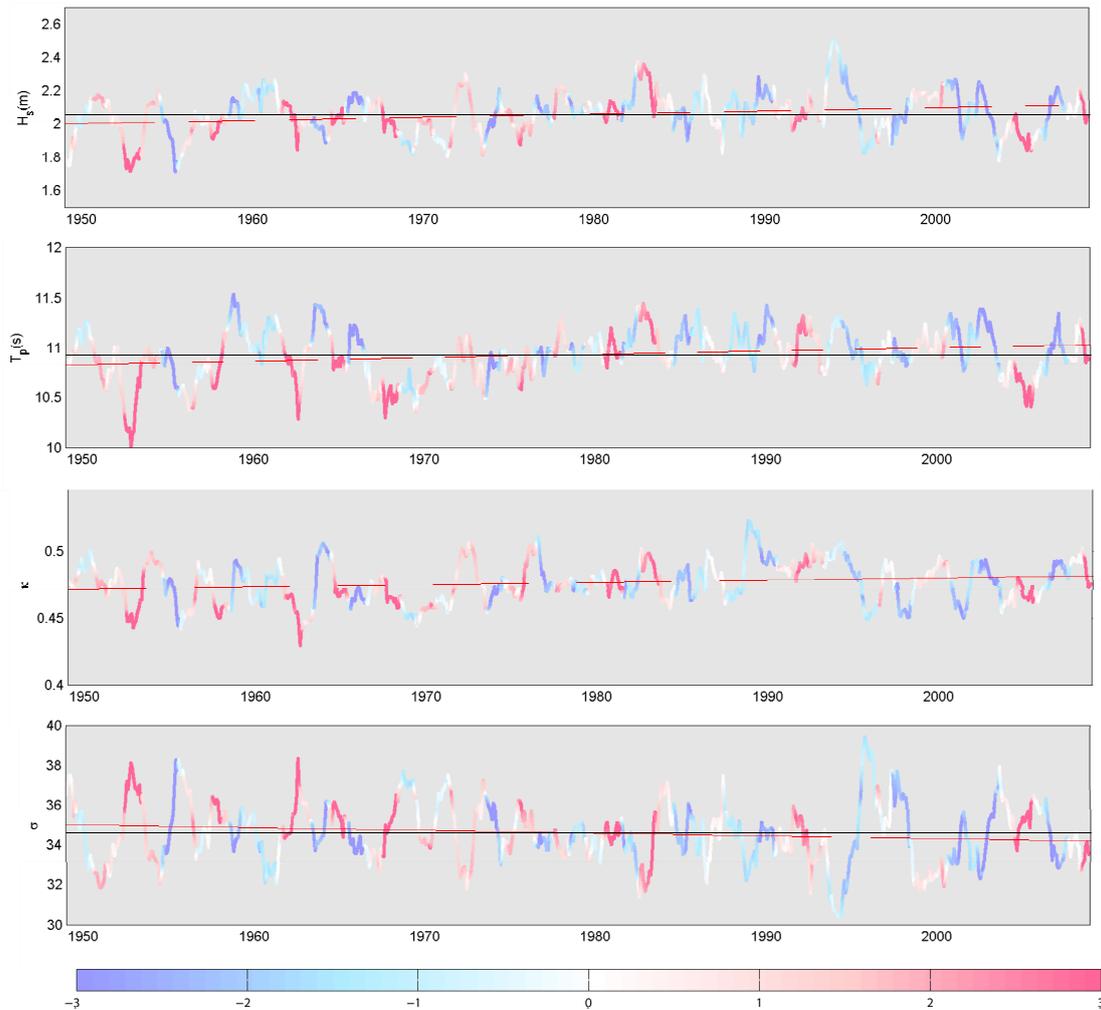


Figura 7.56. Serie temporal con ventana móvil anual de los parámetros  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\kappa$  y  $\sigma$ . El color indica la desviación en grados de la dirección media anual del flujo de energía respecto a la dirección media.

En cuanto al viento, se ha realizado el mismo tipo de análisis de la serie temporal (figura 7.57). La velocidad del viento local no guarda una relación clara con la direccionalidad del mismo, existiendo unos años de aparente calma y otros más severos en los que la desviación respecto a la dirección media parece seguir un patrón interanual diferente al de intensidades.

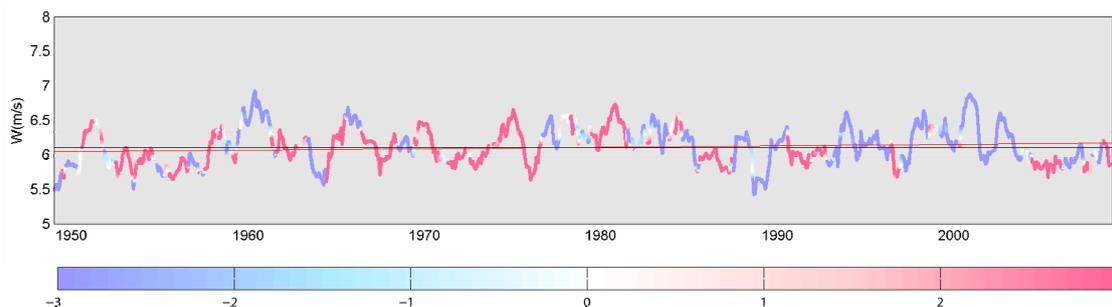


Figura 7.57. Serie temporal con ventana móvil anual de  $W$ . El color indica la desviación de la dirección media anual del viento en grados respecto a la dirección media.

Para analizar la variabilidad interanual de cada una de las variables consideradas se relaciona la señal mensual estandarizada (sin estacionalidad) de los valores medios con diferentes índices climáticos regionales cuya influencia es clara en el Atlántico Norte (AO, NAO, EA, EAWR, SCA y AMO). También se analiza la correlación existente con los seis primeros modos de variabilidad de presión atmosférica obtenidos mediante un análisis de componentes principales. Las anomalías mensuales de  $SLP$  proporcionan información acerca de la capacidad de generación de condiciones de surf en la zona de estudio.

Para procesar y sintetizar la información que proporcionan las anomalías mensuales de presión se ha aplicado un análisis de componentes principales. La finalidad de este tipo de técnicas estadísticas es reducir la redundancia o dimensionalidad de los datos, ya que normalmente, estos guardan relación entre sí. Para ello, el conjunto original de datos ha de transformarse en un nuevo conjunto (componentes principales), de modo que cada elemento de este nuevo conjunto explique cierta variabilidad del conjunto original. Éstos suelen representarse en orden decreciente en función de la variabilidad explicada. Por otro lado, además de obtener patrones espaciales, se obtiene una serie temporal (amplitudes temporales) asociada a cada modo espacial (amplitud espacial). En este trabajo sólo se han considerado aquellos modos que explican más del 4% de la variabilidad (6 primeros modos para el Atlántico Norte). La figura 7.58 muestra los seis primeros modos espaciales (EOFs) de anomalías de presión, la figura 7.59 muestra los seis primeros modos temporales (PCs) asociados a los EOFs de la figura anterior. Los patrones climáticos, por definición, representan modos preferenciales de variabilidad atmosférica, por tanto, cabe esperar cierto grado de correlación entre éstos y los modos obtenidos por el análisis por componentes principales. Así, por ejemplo, el primer modo

temporal esta altamente correlacionado con la AO y la NAO ( $r=0.69$  y  $r=0.65$ ) y el segundo modo con la EA ( $r=0.62$ ). A pesar de esta redundancia, el emplear unos u otros predictores (PCs o índices climáticos) dependerá de la disponibilidad de los mismos. En la tabla 7.1 se muestra la correlación encontrada entre los índices climáticos AO, NAO, EA, EAWR y SCA con los PCs.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
AO	0,69	0,17	0,05	0,02	-0,03	-0,13
NAO	0,65	0,41	-0,01	-0,27	0,05	0,03
EA	-0,04	0,62	-0,02	-0,16	0,19	-0,14
EAWR	-0,06	0,07	0,44	-0,02	0,09	0,04
SCA	-0,13	0,07	0	0,47	0,11	0,31

Tabla 7.1. Correlación lineal obtenida entre diferentes PCs e índices climáticos.

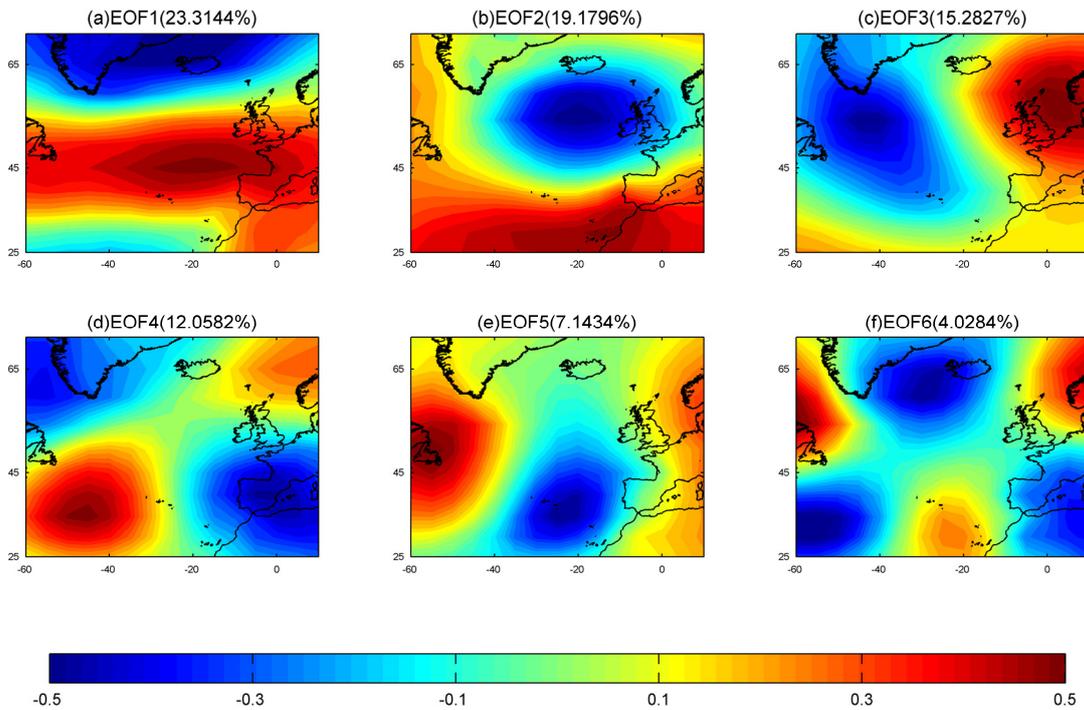


Figura 7.58. Modos espaciales obtenidos a través del análisis de componentes principales de las anomalías mensuales de SLP.

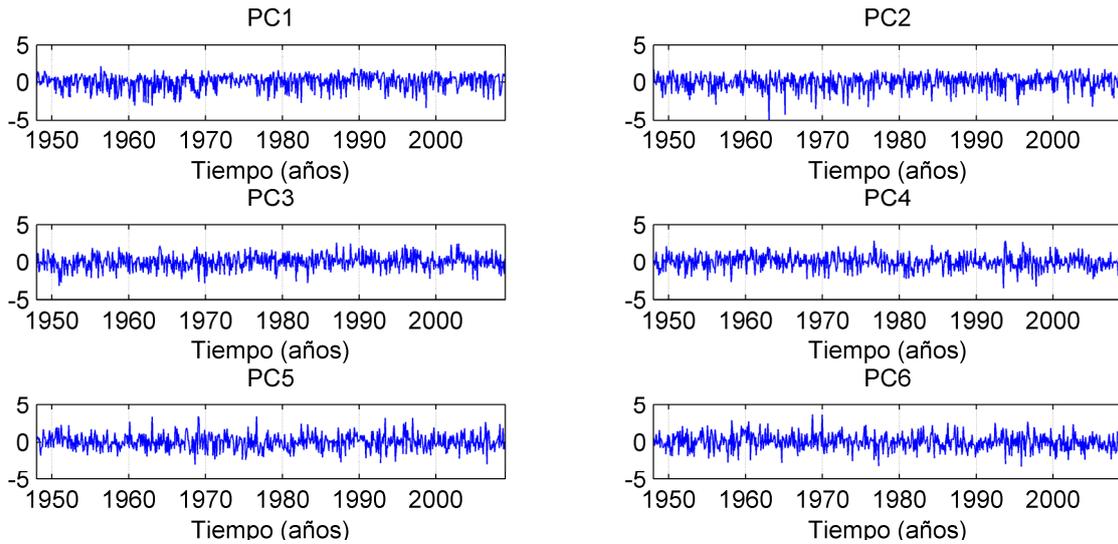


Figura 7.59. Modos temporales obtenidos a través del análisis de componentes principales de las anomalías mensuales de SLP.

El modelo de regresión empleado ajusta, por mínimos cuadrados, la expresión:

$$\Delta_{i,m}(t) = \beta_0 + \beta_{NAO}NAO(t) + \xi \tag{7.36}$$

donde  $\Delta_{i,m}(t)$  es el valor esperado de la variable promediada en el mes o predictando,  $\beta$  es el vector de los parámetros de la regresión, siendo  $\beta_{NAO}$  la contribución relativa del predictor,  $NAO(t)$  o  $PC_i(t)$ , al valor esperado y  $\xi$ , un error aleatorio (ver figura 7.60).

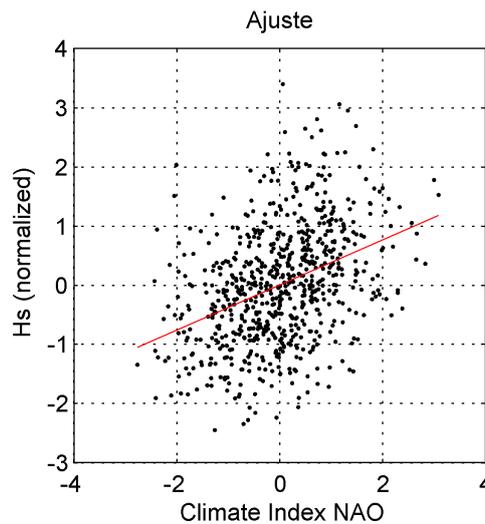


Figura 7.60. Grafico de dispersión de  $H_s$  media mensual estandarizada frente a los valores mensuales del índice NAO.

En la tabla 7.2 se muestran las tendencias lineales ajustadas a la evolución histórica de cada variable y los coeficientes de regresión entre estas y los diferentes patrones climáticos y PCs. Las variables analizadas son,  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $F_x$  (componente x del flujo de energía),  $F_y$  (componente y del flujo de energía),  $\kappa$ ,  $\sigma$ ,  $W_x$  y  $W_y$ . (componente x e y de la velocidad del viento).

	$H_s$	$T_m$	$T_p$	$F_x$	$F_y$	$\kappa$	$\sigma$	$W_x$	$W_y$
$\beta_{PC1}$	0,15	0,38	0,07	0,15	-0,28	0,41	-0,27	-0,24	-0,26
$\beta_{PC2}$	0,59	0,54	0,76	0,63	-0,43	0,50	-0,54	0,46	0,31
$\beta_{PC3}$	-0,41	-0,34	0,07	-0,27	0,41	-0,01	0,44	-0,47	0,31
$\beta_{PC4}$	0,18	0,16	0	0,17	-0,19	0,10	-0,10	0,13	-0,05
$\beta_{PC5}$	-0,15	-0,13	0,06	-0,09	0,16	-0,02	0,20	-0,23	0,52
$\beta_{PC6}$	0,09	0,10	0,07	0,06	-0,07	0,03	-0,10	0,13	-0,22
$\beta_{AO}$	0,23	0,43	0,25	0,26	-0,29	0,51	-0,34	-0,13	-0,03
$\beta_{NAO}$	0,38	0,54	0,46	0,4	-0,39	0,57	-0,48	0,03	-0,02
$\beta_{EA}$	0,35	0,31	0,54	0,38	-0,21	0,31	-0,33	0,25	0,38
$\beta_{EAWR}$	-0,24	-0,18	0,1	-0,16	0,25	0,06	0,23	-0,26	0,29
$\beta_{SCA}$	0,19	0,15	0,11	0,18	-0,16	0,11	-0,14	0,26	0,1
$\beta_{AMO}$	-0,13	-0,15	-0,09	-0,11	0,14	-0,15	0,09	-0,02	0,11
$\beta_{LT}$	0,2cm/año	0,0028 s/año	0,0035 s/año	0,0065 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /año	-0,0038 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /año	1,7 10 <sup>-4</sup> /año	0,014°/año	0,0012 m s <sup>-1</sup> /año	0,0058 m s <sup>-1</sup> /año

Tabla 7.2. Correlación lineal obtenida entre diferentes variables espectrales y PCs e índices climáticos. Tendencias en el largo plazo ( $\beta_{LT}$ ).

Según se presenta en la tabla 7.2, los modos temporales procedentes del análisis de componentes principales muestran una relación con el oleaje mayor que los patrones climáticos, especialmente el PC2, que muestra un valor de  $\beta_{PC2} = 0.59$ . Con valores positivos del PC2, el oleaje proviene de dirección NW, muy desarrollado (periodo y  $\kappa$  alto y  $\sigma$  bajo) y vientos locales del SW (*offshore*). El PC3 también muestra una alta relación con el oleaje en la zona de estudio, en este caso negativa. Es decir, ante un PC3

positivo cabe esperar una disminución en  $H_s$  y  $T_m$ , ya que el oleaje predominante en este caso es el generado por los vientos de componente E y ESE, oleaje en generación de corto periodo y alta dispersión direccional no adecuados para el surf. Llama la atención los modos PC1 y PC5, los cuales, a pesar de mostrar coeficientes de correlación bajos con el oleaje (intensidad), muestran valores altos en relación al viento local y por lo tanto en relación a la forma del espectro. En el PC1, encontramos que la posición de la borrasca (más lejana que en el PC2) debería generar oleajes altamente desarrollados, sin embargo, debido al efecto del viento local, de dirección NE, la forma del espectro se ve perjudicada, por lo que la correlación con  $\kappa$  y  $\sigma$  no es tan alta como en el PC2. El PC5 presenta una correlación máxima para el viento local de componente sur generado por la borrasca localizada sobre las Azores. Esta situación, hace que el Cantábrico Oriental pase a ser zona de generación en lugar de sumidero. Con el PC6 ocurre algo similar, solo que en esta ocasión los vientos dominantes proceden del NW. Este modo se corresponde con una situación atmosférica altamente inestable correspondiente al paso sucesivo de sistemas frontales, dando lugar a condiciones de surf de una calidad intermedia (oleaje pequeño y vientos *onshore*).

En relación a los índices climáticos analizados, tanto la AO, la NAO y la EA ejercen un efecto similar en el oleaje, mostrando correlaciones positivas con los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $F_x$  y negativa con  $F_y$ , indicando que durante fases positivas de estos índices son esperables alturas de ola y periodos elevados procedentes del cuarto cuadrante. La mayor diferencia entre estos patrones radica en los vientos locales, mientras la AO y la NAO favorecen ligeramente la ocurrencia de vientos de componente norte, la EA se relaciona con vientos de componente SW. Así, la EA, al igual que el PC2 representa modos de variabilidad atmosférica favorables para el surf en la costa norte española. La EAWR y el SCA son modos de oscilación muy parecidos a las PC5 y PC6 respectivamente.

El índice AMO, caracteriza una oscilación multidecadal del clima en el Atlántico tropical, quedando definido en función de patrones de temperatura superficial del mar (SST). Este índice se relaciona con periodos de graves sequías en Norte América y con periodos de alta actividad ciclónica en el Atlántico Tropical. Su efecto en el oleaje

promediado mensualmente no es muy claro, mostrando correlaciones negativas con la intensidad del mismo.

Por último, en la tabla 7.2 se muestra la tendencia lineal analizada en la posición de la boya de Bilbao durante el periodo de 1948-2008. Se han encontrado tendencias significativas en la altura de ola significativa media mensual de 0.19 cm/año, de 0.0002 s/año y 0.0003 s/año para  $T_m$  y  $T_p$  respectivamente. En cuanto a la direccionalidad del oleaje se observa una tendencia mayor en la componente  $x$  del transporte de energía, indicando que los oleajes tienden a adquirir direcciones más viradas al W. La tendencia que muestran los parámetros  $\kappa$  y  $\sigma$  indican la incidencia de oleajes más desarrollados y por lo tanto más adecuados para el surf. El viento local muestra una tendencia positiva en ambas componentes ( $x,y$ ), lo que indica que los vientos no han modificado demasiado su dirección, sólo su intensidad, que se ha visto incrementada.

### 7.10.2. Régimen medio anual de condiciones de surf

Para analizar la ocurrencia de condiciones surfeables se han diferenciado tres tipos de calidad en función del valor obtenido de *Regional Surf Index (RSI)*, descrito en el Capítulo 5. Los estados de mar cuya calidad no es apta para el surf obtienen un valor de este índice menor a 5, de 5 a 7 la calidad es intermedia y de 7 a 10 la calidad se considera alta. Debido a que en la escala que se trata en este apartado se tiene información de la forma espectral, es posible identificar estados de mar de calidad excepcional, estos, además de presentar valores de  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $W$  y  $\theta_w$  adecuados, presentan también un valor alto del índice de calidad del *swell* ( $I_{SQI}$ ). El RSI se calcula según:

$$RSI = I_{cs} = \frac{I_{Hs} + I_{Tp}}{2} \times I_w \times I_{SQI} \quad (7.37)$$

En la figura 7.61 se muestra la probabilidad de ocurrencia de condiciones surfeables de una calidad igual o superior a la media. Conviene aclarar que las condiciones de surf de esta calidad incluyen situaciones de oleajes pequeños, vientos ligeramente desfavorables o valores bajos de calidad del *swell*. En este sentido, la probabilidad de ocurrencia de

estas condiciones es prácticamente homogénea a lo largo del tramo de costa analizado, con valores medios anuales que rondan entre el 70 y el 40%.

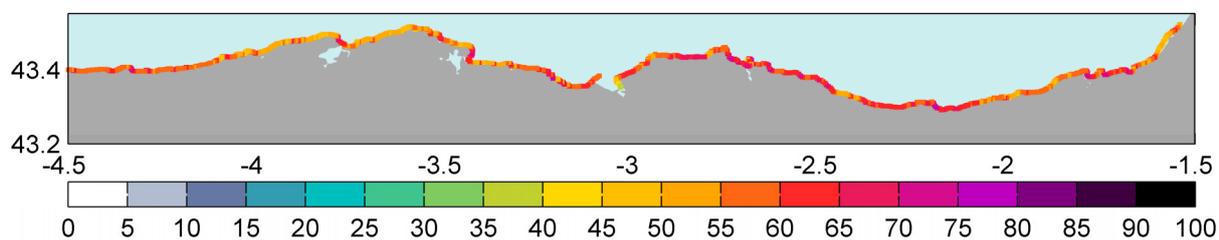


Figura 7.61. Probabilidad de ocurrencia anual de condiciones suefeables.

En la figura 7.62 se muestra la probabilidad de ocurrencia anual condiciones de surf de calidad alta,  $P_{high}[RSI]$ . La ocurrencia de estados de mar de esta calidad es más exigente en cuanto a los rangos favorables de cada una de las variables consideradas. Así, este tipo de condiciones son más frecuentes dentro del año en aquellas rompientes protegidas de los oleajes del NW, especialmente las playas del Sardinero, Laredo y Mundaka, localizadas al este de grandes cabos, con un 50% del tiempo, en definitiva cualquier *spot* que este protegido de los vientos del oeste, dominantes en la región. El resto de rompientes (orientadas al N o NW) muestran valores algo más bajos ( $P_{high}[RSI]$  = 35%), debido al tamaño medio del oleaje, que frecuentemente sobrepasa los límites surfeables en alturas de ola, y al viento de componente W. Por otro lado, aquellas rompientes muy protegidas, con orientación S (Playa de los Peligros o la Fortaleza) presentan valores de  $P_{high}[RSI]$  inferiores al 10%.

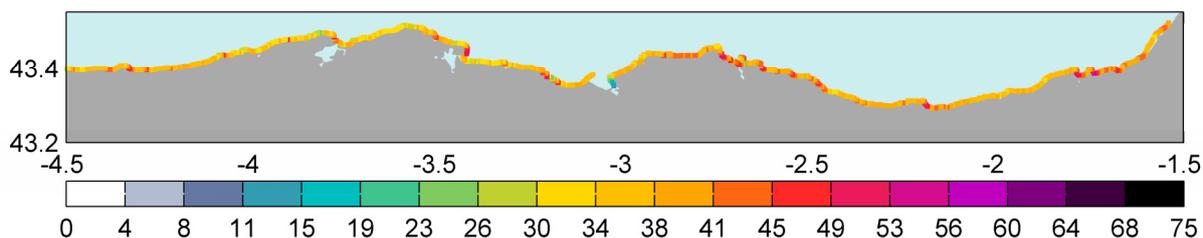


Figura 7.62. Probabilidad de ocurrencia anual de condiciones de surf de calidad alta,  $P_{high}[RSI]$ .

En este apartado, y con el fin de caracterizar con mayor detalle el recurso surf, se representa en la figura 7.63 la probabilidad de ocurrencia de estados de mar de una calidad excepcional,  $P[RSI \geq 9]$ . Como puede observarse, los estados de mar de una calidad excepcional siguen un patrón similar a los de alta calidad, destacando en este caso zonas como la de Bermeo, con una frecuencia de ocurrencia superior al 20%. También llama la atención los altos valores que muestra la parte francesa del tramo

analizado, entre Hendaya y Biarritz. Nótese como en la mayoría las zonas con altos valores de  $P[RSI \geq 9]$  existen rompientes muy frecuentadas con olas de alta calidad, lo cual corrobora la fiabilidad del análisis realizado.

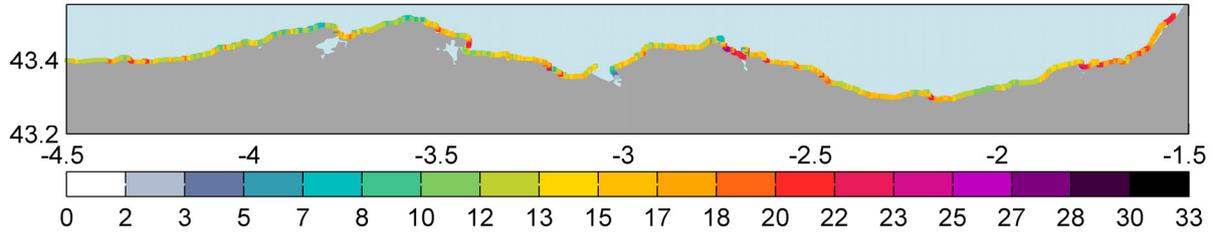


Figura 7.63. Probabilidad de ocurrencia anual de condiciones de surf de calidad alta excepcional.

### 7.10.3. Climatología de las de condiciones de surf de alta calidad, $P_{high}[RSI]$

Los mares de alta calidad son los que mayor interés suscitan y por lo tanto, son estos los que conviene caracterizar con mayor detalle. En este apartado se muestra el análisis estacional de ocurrencia de este tipo de condiciones.

En la figura 7.64 se muestra la probabilidad de ocurrencia estacional de condiciones de surf de calidad alta. Según muestra la distribución estacional, las condiciones de surf son mucho más frecuentes durante el invierno, especialmente en los tramos al abrigo de los noroestes. Los valores máximos ( $P_{high}[RSI] \approx 60-65\%$ ) ocurren en aquellas ensenadas donde el oleaje incide con menor tamaño durante los frecuentes temporales del invierno. Destaca la zona comprendida entre el Cabo de Machichaco y Zarautz, y en menor medida la zona comprendida entre el Cabo de Ajo y el Abra de Bilbao. Las rompientes con orientación NW (Sopelana, Liencres o los Locos) muestran frecuentemente alturas de ola excesivamente grandes durante esta estación, por lo que  $P_{high}[RSI]$  desciende hasta el 20-25%. Es en esta época, cuando los *spots* más virados respecto a la dirección media de la costa, alcanzan valores más altos, por ejemplo, Laredo o el Sardinero, con una media de  $P_{high}[RSI] \approx 40-50\%$  del invierno.

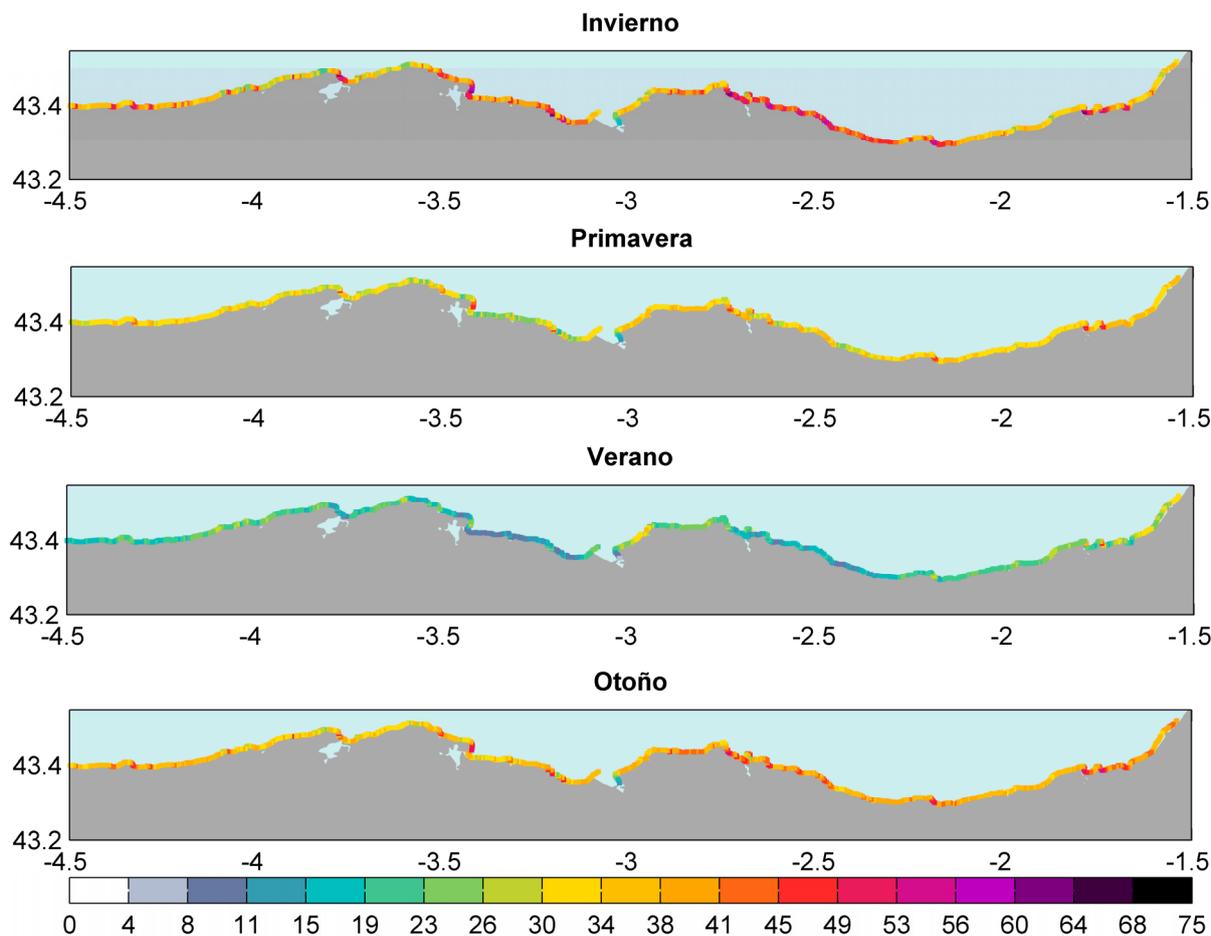


Figura 7.64. Probabilidad de ocurrencia estacional de condiciones de surf de calidad alta,  $P_{high}[RSI]$ .

Durante la primavera, debido a la alta variabilidad en el régimen de oleaje y vientos, la ocurrencia de condiciones para el surf cae a un 35%. Los *spots* orientados al NE, presentan valores algo mayores, especialmente los de la margen oriental, donde los *windswells* generados por los vientos anticiclónicos no alcanzan una entidad suficiente. Entre Santoña y Bilbao se observa una disminución más acusada  $P_{high}[RSI]$ , ya que este tramo de costa es más sensible a los vientos comentados.

Durante el verano, el patrón espacial es similar al de primavera, sin embargo la altura de ola durante esta estación es mucho menor. El valor medio de  $P_{high}[RSI]$  se sitúa en torno al 20-25%, siendo aquellos *spots* orientados al NW los más constantes, especialmente los que se encuentran entre Bilbao y Plentzia, y en la costa francesa ( $P_{high}[RSI] \approx 35\%$ ), por presentar calidades de *swell* superiores. Las playas de la margen occidental presentan probabilidades menores ya que en esta zona el efecto de los vientos del NE es más patente.

El otoño se presenta en el Cantábrico oriental como la estación del año con mayores opciones de surf. La ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad es prácticamente homogénea, ya que en otoño los vientos dominantes son de componente sur y los oleajes de un tamaño moderado. A pesar de ello, el patrón espacial es similar al acontecido en invierno, siendo aquellas rompientes protegidas del W las más constantes ( $P_{high}[RSI] \approx 50\%$ ) en relación al resto ( $P_{high}[RSI] \approx 30-35\%$ ).

Para conocer con mayor nivel de detalle los valores de  $P_{high}[RSI]$  estacionales o mensuales, se han seleccionado una serie de *spots* representativos. Por un lado se muestran en la figura 7.65, por medio de un gráfico de cajas, la climatología  $P_{high}[RSI]$  para playas expuestas o muy expuestas, es decir, con orientación NW. En la figura 7.65 se muestra la probabilidad de ocurrencia mensual de condiciones de surf de alta calidad en Liencres y Sopelana. El patrón estacional que muestran ambos *spots* es muy similar (máximos en otoño, mínimos en verano), con valores algo superiores en Sopelana. Esto es debido a la calidad del *swell*, que crece meridionalmente de oeste a este y a la intensidad y direccionalidad de los vientos (más suaves en la parte oriental). Los valores que muestran este tipo de playas rondan el 20-25% durante el verano, presentando máximos en octubre (40-45%).

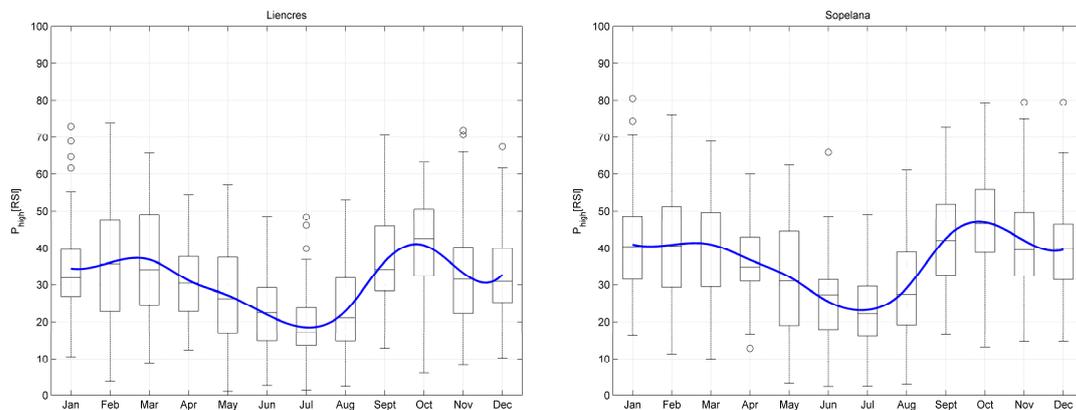


Figura 7.65. Climatología  $P_{high}[RSI]$  en dos rompientes muy expuestas al oleaje dominante. Liencres (izquierda) y, Sopelana (derecha).

En la figura 7.66 se muestra la climatología de  $P_{high}[RSI]$  para dos *spots* con un nivel de exposición intermedio (Zarautz y Mundaka). Ambas rompientes se encuentran orientadas al N, protegidas del NW por el cabo Machichaco y Guetaria respectivamente. Este tipo de rompientes presenta un patrón estacional similar, siendo

más frecuentes las condiciones de surf durante el Invierno (45%), cayendo estas al 10% durante el Verano.

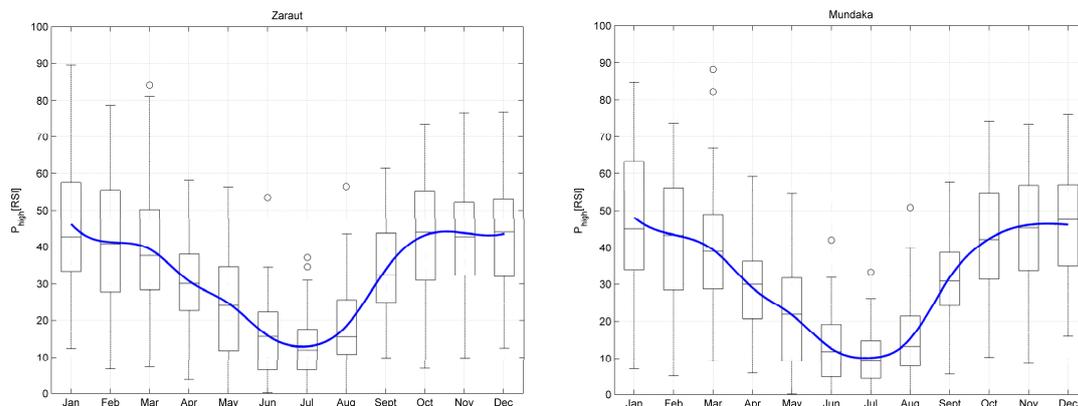


Figura 7.66. Climatología de  $P_{high}[RSI]$  en dos rompientes moderadamente expuestas al oleaje dominante. Zarautz (izquierda) y Mundaka (derecha).

En la figura 7.67 se muestra la climatología de dos *spots* protegidos del NW, el Sardinero y Laredo, con orientación NE, al abrigo de Cabo Mayor y del Monte Buciero respectivamente. Estas rompientes muestran un patrón estacional que presenta máximos durante el Invierno, con  $P_{high}[RSI] \approx 50-55\%$ , y  $P_{high}[RSI] \approx 5-10\%$  en Verano. El grado de afección de los vientos del NE se hace más palpable en la playa del Sardinero durante el mes de Abril, descenso que no es tan acusado en Laredo, por encontrarse más al este.

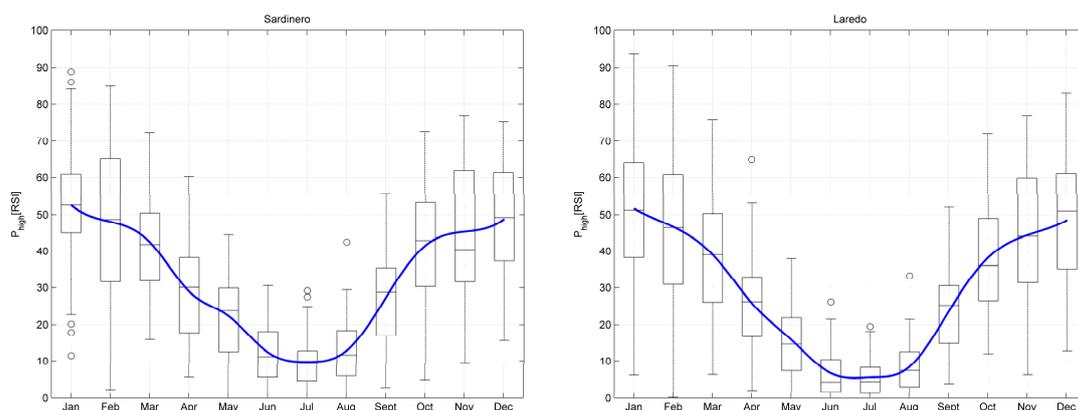


Figura 7.67. Climatología de  $P_{high}[RSI]$  en dos rompientes moderadamente protegidas del oleaje dominante. Sardinero (izquierda) y Laredo (derecha).

Por último, se ha analizado la climatología de dos *spots* con orientación SE. En la figura 7.68 se muestra la probabilidad de ocurrencia mensual en la derecha de la Isla de Santa Marina y Jefrys en Algorta. Éstos, debido a su orientación, muy singular, muestran una

climatología diferente, que presenta máximos de marzo y septiembre, mientras que los mínimos ocurren durante el Verano y el Invierno. Este patrón obedece una vez más a la ocurrencia de vientos de componente este, frecuentes durante los meses señalados.

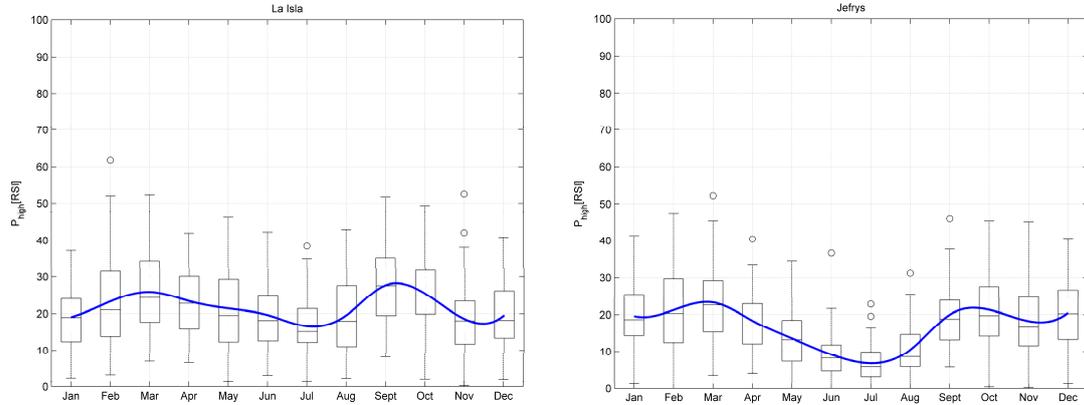


Figura 7.68. Climatología de  $P_{high}[RSI]$  en dos rompientes con orientación SE. La Isla (izquierda), Jefrys (derecha).

#### 7.10.4. Variabilidad interanual en la ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad, $P_{high}[RSI]$

Como se puede observar en los gráficos de cajas del apartado anterior, existe una alta variabilidad estacional en la ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad. Esta variabilidad es relativamente predecible ya que sigue un comportamiento medio a lo largo del año. Sin embargo, las variaciones entre los valores mensuales de años diferentes pueden ser en ocasiones mayores que aquellas inducidas por la estacionalidad. Por ejemplo, en Mundaka se pasa de un 50% del tiempo en invierno a un 10% en verano, sin embargo entre octubres de años diferentes la probabilidad puede variar entre un 10% en un mal año a un 70% en uno de los mejores. Por tanto, la variabilidad interanual es, si cabe, más relevante en la disponibilidad de condiciones surfables que la propia estacionalidad.

Para caracterizar las causas de dicha variabilidad se ha seguido el mismo esquema de trabajo que en el apartado 7.10.1. , donde se analiza la correlación entre diferentes PCs e índices climáticos regionales y las diferentes variables consideradas relevantes para el surf en cada punto. En la figura 7.69 se muestran los mapas de correlación de  $P_{high}[RSI]$

mensual estandarizada con los 6 primeros modos obtenidos del análisis de componentes principales de la presión a nivel del mar en el Atlántico Norte

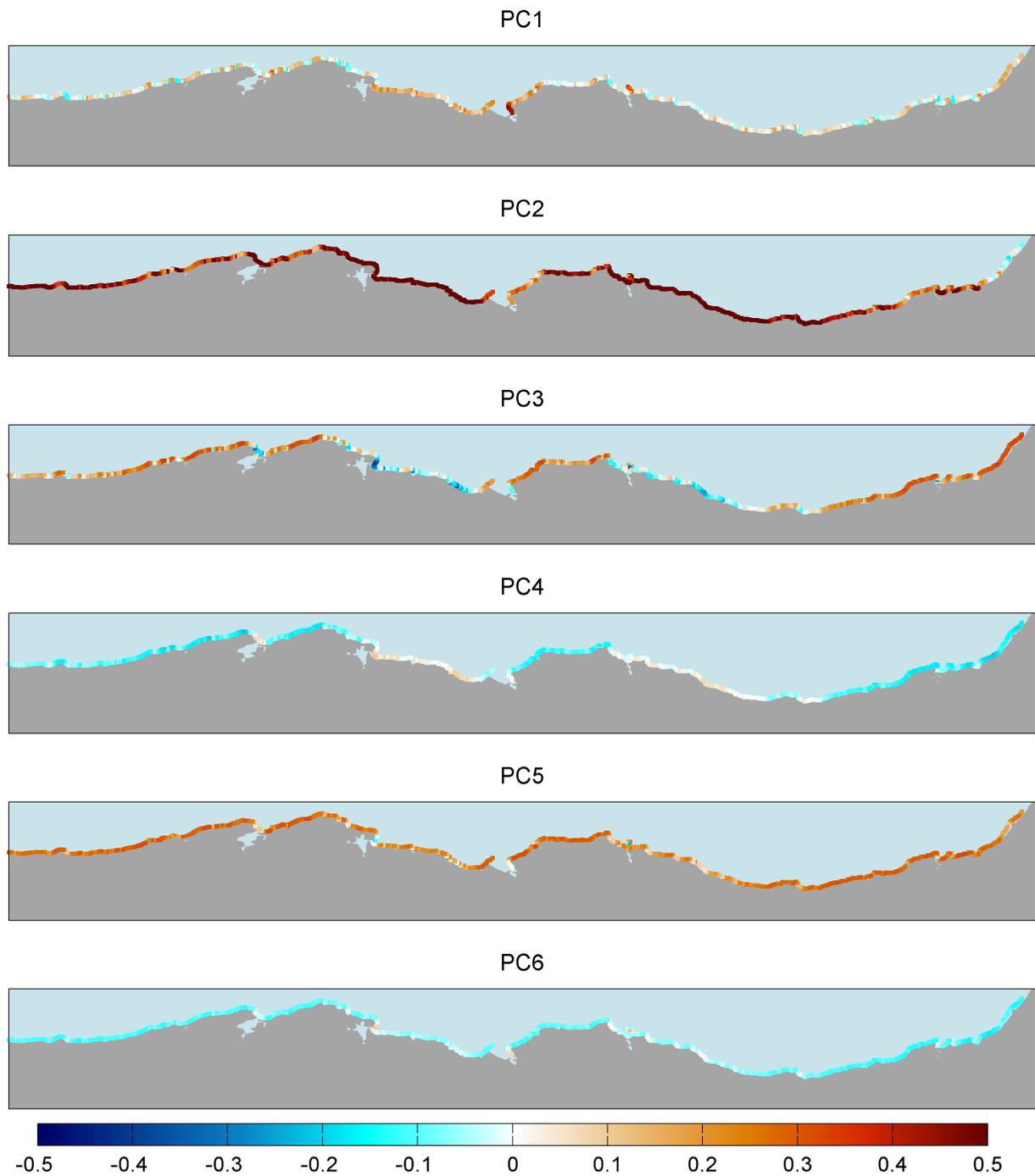


Figura 7.69. Correlación lineal entre  $P_{high}[RSI]$  mensual y los seis PCs de anomalías de SLP.

El PC1, muestra una débil correlación con  $P_{high}[RSI]$ , ya que a pesar de ser este un modo con oleaje asociado apto para el surf, los vientos locales característicos de componente N y NE, afectan negativamente. Esto se hace más evidente en aquellos tramos de costa con orientación NE, puntos en los cuales la correlación alcanza valores negativos. El

PC2 muestra una alta correlación positiva con  $P_{high}[RSI]$  en todos los puntos analizados ( $\beta_{PC2} > 0.5$ ). Esta correlación es menor en aquellos tramos de costa orientados al NW, ya que los vientos del SW pueden ejercer efectos negativos ( $\beta_{PC2} \cong 0.2$ ).

El PC3 se relaciona con oleajes de menor tamaño y vientos de componente este, por este motivo la correlación con la probabilidad de condiciones de surf es positiva en las zonas más expuestas al oleaje y protegidas de los vientos asociados a este modo. El PC4 se caracteriza por una borrasca situada sobre la Península Ibérica. Esta situación genera oleajes de corto periodo, no surfeables, mostrando una correlación negativa ( $\beta_{PC4} \cong -0.15$ ). El PC5, a pesar de mostrar una correlación negativa con la altura de ola, genera vientos de sur en la zona de estudio, por lo que la correlación es positiva en todo el litoral, especialmente en los tramos más expuestos al oleaje. El PC6 se caracteriza por la acción de los vientos de componente norte moderadamente intensos, este hecho perjudica la ocurrencia de condiciones de surf de calidad alta, mostrando una correlación negativa en todo el litoral ( $\beta_{PC5} \cong -0.15$ ).

En la figura 7.70 se muestra la correlación lineal de  $P_{high}[RSI]$  mensual y los 5 índices climáticos de carácter regional con afección clara al oleaje o al viento local en la zona de estudio. Según se mostró en la tabla 7.1, existe una alta correlación entre los diferentes patrones climáticos analizados y los PCs. En cuanto a la correlación espacial, el efecto de los patrones climáticos puede diferir de aquellos causados por los PCs, ya que los primeros pueden ser obtenidos como combinación lineal de los segundos. Así, el efecto de la AO es similar al del PC1, siendo la principal diferencia la dirección e intensidad de los vientos locales. La NAO representaría una situación intermedia entre la AO y la EA, con un aporte positivo más intenso en la disponibilidad de condiciones surfeables en las playas viradas al NE. La EA, por su parte, tiene un efecto muy parecido al del PC2, con una contribución positiva muy alta debida a los vientos locales del SW. Esta contribución es mínima en aquellos tramos con orientación W. El EAWR es muy similar al PC3, con un efecto claro en los vientos locales del NE, por lo que la probabilidad de surf se ve disminuida en los tramos con orientación NE y beneficiada en los tramos con orientación WNW. El PC4 es muy similar a la SCA, con un incremento moderado en la severidad del oleaje e intensidad de los vientos del W. Este patrón aumenta las condiciones de surf en los tramos con orientación NE.

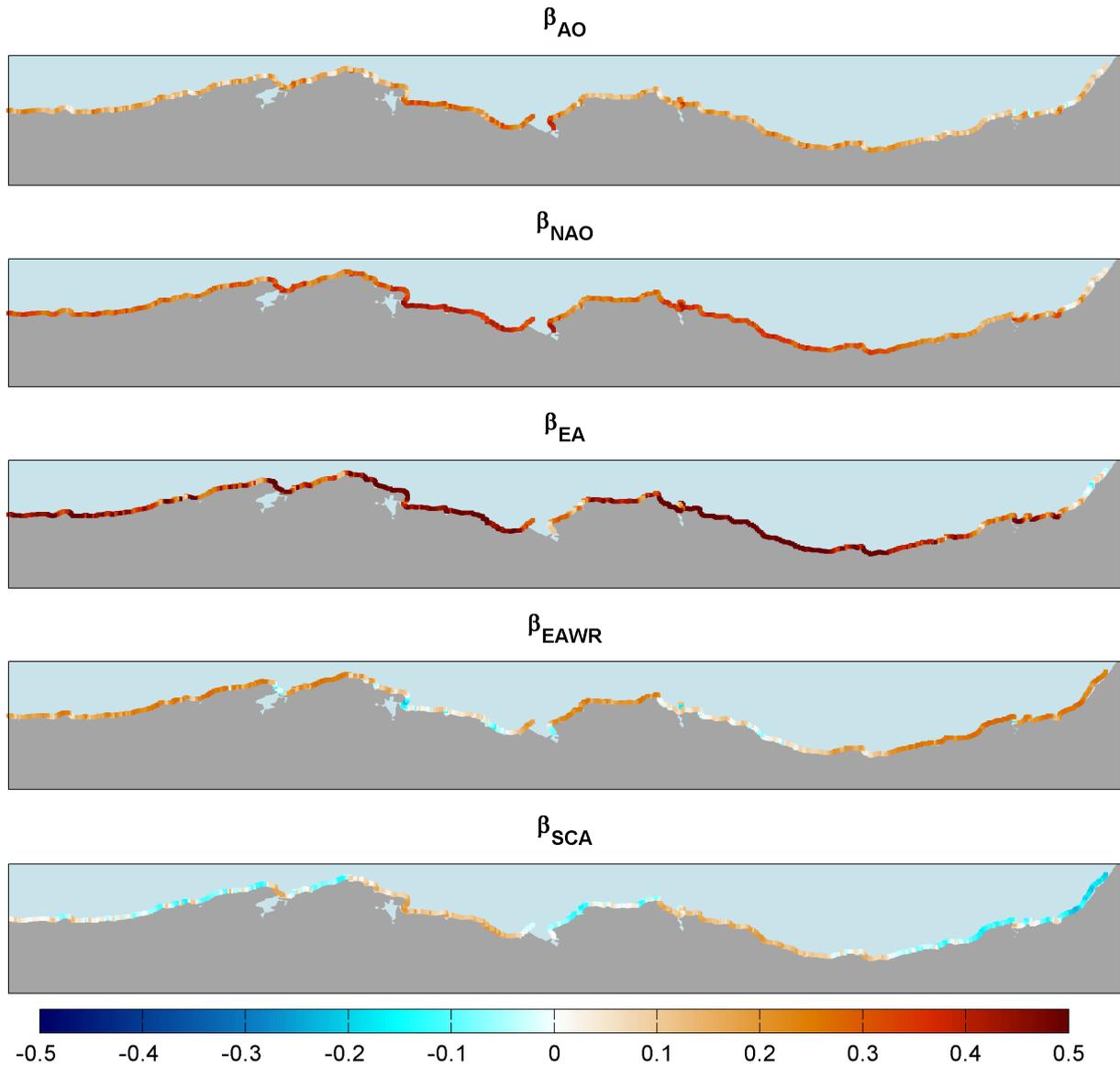


Figura 7.70. Correlación lineal entre  $P_{high}[RSI]$  mensual y diferentes índices climáticos.

### 7.10.5. Análisis de la evolución de las condiciones de surf de alta calidad en el largo plazo, $P_{high}[RSI]$

Para analizar las tendencias en la probabilidad de ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad se ha realizado un ajuste lineal en la serie de  $P_{high}[RSI]$  anual en cada punto. Los resultados en los puntos donde la significancia es mayor al 95% se muestran en la figura 7.71.

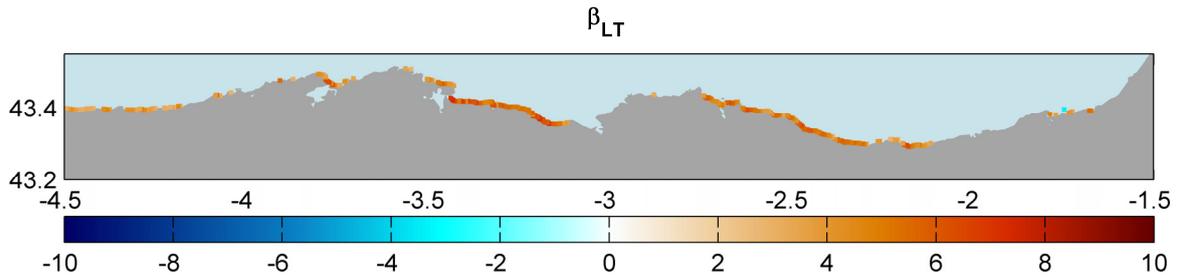


Figura 7.71. Tendencia lineal de  $P_{high}[RSI]$  anual (horas/año).

En la zona de estudio, los datos muestran un incremento de las condiciones de surf generalizado de aproximadamente 4-5 horas/año, lo que se traduce en un incremento de 240-300 horas a lo largo de la serie analizada. Como se puede observar esta tendencia es especialmente significativa en las zonas más protegidas, debido a que el oleaje se presenta más severo en el largo plazo (ver tabla 7.2).

En la figura 7.72 se muestra la serie temporal de  $P_{high}[RSI]$  anual. En esta figura se puede observar como el Brusco presentan una tendencia positiva de 4 horas/año, ya que necesita de oleajes de tamaño moderado para ser funcional.

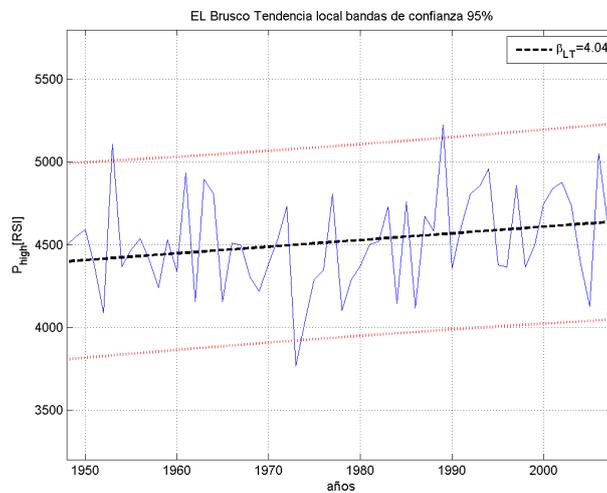


Figura 7.72. Tendencia lineal de  $P_{high}[RSI]$  anual (horas/año) en El Brusco.

Por último, se muestra un análisis estacional de las tendencias. El ajuste ha sido realizado considerando independientemente las condiciones de surf acontecidas en cada estación del año, de modo que la suma de las tendencias estacionales es igual a la tendencia anual. Los resultados se muestran en la figura 7.73. Según indican los resultados del análisis, las mayores tendencias se asocian a las estaciones de invierno y

primavera, periodo en el cual es más probable la ocurrencia de oleajes de tamaño moderado a grande. La tendencia observada en primavera indica que los vientos anticiclónicos del NE han disminuido durante el periodo de tiempo analizado.

La tendencia que muestra la estación estival es positiva,  $\beta_{LT,verano} \approx 1-2$  horas por verano y año, especialmente en las zonas más expuestas, reflejo del incremento en la magnitud media del oleaje. Este hecho es especialmente significativo, ya que es durante el verano, cuando las condiciones meteorológicas son más agradables, siendo ésta la época con mayor potencial turístico en la región.

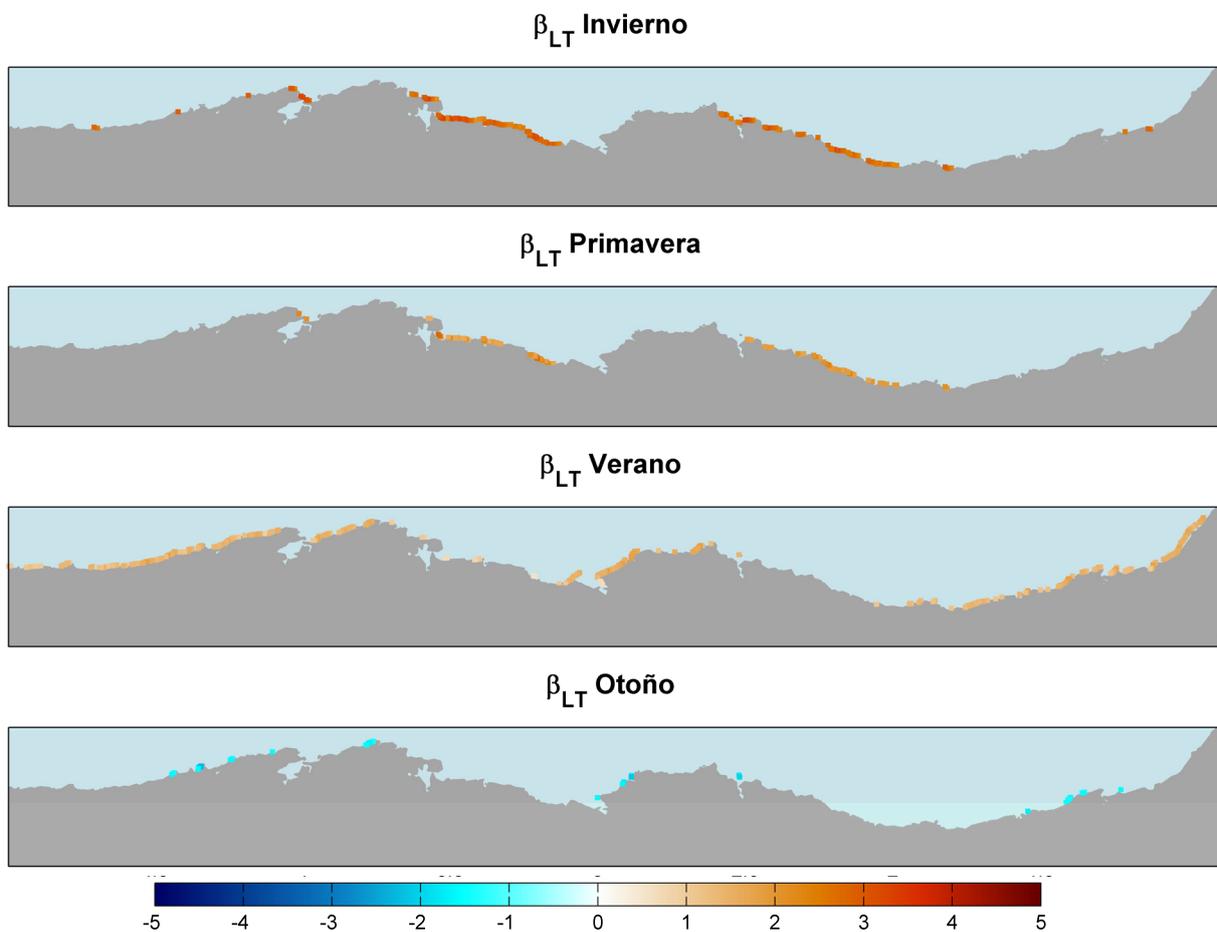


Figura 7.73. Tendencia lineal de  $P_{high}[RSI]$  anual (horas/estación).

El otoño muestra tendencias significativas solo en ciertos puntos con orientación NW. Esto es debido al aumento de la intensidad de los vientos del SW, capaces de generar olas de corto periodo que perjudican la calidad del surf en los puntos señalados. Este hecho genera un descenso de  $P_{high}[RSI]$  de 2 horas/estación.

## 7.11. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado un estudio integral de las condiciones de surf en el Cantábrico oriental. Este análisis abarca la descripción de los principales *spots* presentes en la zona, la metodología de calibración y transferencia del oleaje desde aguas profundas a pie de rompiente, y el análisis estadístico del oleaje y de la ocurrencia de condiciones surfeables de distintas calidades, ocurrencias medias anuales, estacionales, variaciones interanuales y de largo plazo.

Se ha visto como las características de las rompientes en la zona de estudio obedecen al tipo de costa relativamente joven, su origen geológico y el tipo de materiales que la forman. Se han descrito y analizado los aspectos más relevantes para un surfista medio en relación a la tipología de las rompientes presentes, los rangos de alturas de ola y nivel de marea, en los cuales, la funcionalidad de los mismos es máxima, así como la intensidad de la rotura o el nivel de destreza exigido por las mismas. Así mismo, se ha visto como no sólo las dinámicas marinas (oleaje, corrientes etc.) son las responsables de la calidad de las rompientes, si no que el surf también responde a lo que acontece tierra adentro. Aspectos como la orografía, la pluviometría o la actividad antrópica ejercen un efecto determinante en el aporte sedimentario y por lo tanto en las características de los fondos costeros.

Para conocer la tasa de ocurrencia de eventos surfeables, se han utilizado bases de datos numéricas, calibradas previamente con datos instrumentales. Al tratarse de datos de una alta dimensionalidad se les ha realizado un pretratamiento (componentes principales) a partir del cual se han clasificado los escenarios a propagar por medio del algoritmo tipo MaxDiss. Los casos seleccionados han sido propagados gracias al modelo SWAN. Para ello, han sido empleadas una malla general y tres mallas anidadas de mayor detalle. Una vez realizadas las propagaciones, se han reconstruido la series de oleaje mediante técnicas de interpolación tipo RBF, la reconstrucción se ha realizado en puntos separados aproximadamente 200-300 m a lo largo de la batimétrica de 10 m. En estos puntos se han aplicado los criterios de surf regionales (considerando la calidad del *swell*), y calculado la calidad del surf en cada uno de ellos durante los últimos 60 años.

Un paso previo a la caracterización del recurso surf en la zona de estudio es analizar el oleaje en profundidades indefinidas. La información así obtenida sirve para entender y justificar los resultados que se desprenden de la aplicación del índice regional de calidad del surf. En este sentido, se ha realizado un análisis temporal de los parámetros espectrales que cubre las tres escalas de variabilidad temporal planteadas, pudiendo comprobar como, evidentemente, los parámetros agregados varían a lo largo del tiempo. El análisis estadístico de la forma del espectral revela que no solo varían las variables  $H_s$ ,  $T_p$ , etc., sino que varía la distribución media de la energía en el dominio espectral.

Del análisis estadístico de las series temporales, se ha obtenido la probabilidad media de ocurrencia de condiciones de surf de distinta calidad, haciendo especial hincapié en las de calidad alta  $P_{high}$ . Se ha visto cómo estos, debido a los patrones medios de oleaje y viento, adquieren una mayor tasa de ocurrencia en las zonas viradas al ENE. Rompientes como el Sardinero o Laredo alcanzan valores en torno al 40% al igual que Mundaka, que presenta condiciones favorables una media de 110 días surfeables al año. Por otro lado, se ha comprobado cómo existen ciertas zonas que por su configuración geomorfológica presentan una calidad promedio del oleaje superior al resto, en este sentido, destaca la ensenada de Bermeo, la cara este del Monte Buciero, o el tramo francés de costa analizado. Estas zonas, presentan tasas de ocurrencia de estados de mar de calidad muy elevada  $P[RSI \geq 9]$ , hasta un 20% del tiempo.

Respecto al análisis estacional de las condiciones de surf, se ha observado como estas son más frecuentes durante el invierno, con tasas de ocurrencia que oscilan entre el 25% en las zonas más expuestas y el 55% en rompientes protegidas. El patrón espacial durante los meses más fríos responde a la incidencia de oleajes con alto nivel de desarrollo, con altura de ola media superior a los 2 m. Durante la primavera el oleaje decrece en magnitud y empiezan a ser determinantes los vientos anticiclónicos y las brisas térmicas de componente este, por lo que son las zonas con orientación WNW las que mayor disponibilidad de condiciones de surf registran, con una media de un 30% del tiempo surfeable. Durante el verano, el factor más limitante es el oleaje, ya que  $H_s$  rara vez supera el metro y medio, siendo también las brisas térmicas un factor muy importante que condiciona la calidad y disponibilidad del surf. Éste es más frecuente en las zonas más expuestas, con un  $P_{high}[RSI] \approx 30-35\%$ . El otoño se presenta en el

Cantábrico como la mejor estación para la práctica del surf, a pesar de que no se alcanzan las mayores probabilidades de ocurrencia. El surf durante el otoño se ve espacialmente repartido debido a que los oleajes son de un tamaño intermedio y los vientos dominantes son de componente sur.

Con los gráficos de cajas se ha comprobado como es la variabilidad climática interanual la principal reguladora de la disponibilidad de condiciones surfeables. Siendo esta, en términos de probabilidad de ocurrencia, más relevante que las propias variaciones estacionales. El estudio de la variabilidad interanual se ha basado en el análisis de la correlación entre las series mensuales estandarizadas de  $P_{high}[RSI]$  y los seis primeros modos temporales o PCs de anomalías de *SLP*. También se muestra la correlación con diferentes índices climáticos. Desatacan el PC2 y la EA, como los modos temporales que más intensamente influyen en la disponibilidad de condiciones surfeables, siendo estos los mejores predictores de la disponibilidad de condiciones de surf en la zona de estudio.

Por último, para concluir este capítulo se ha analizado la tendencia de  $P_{high}[RSI]$  en la zona de estudio. Los resultados muestran una tendencia positiva de unas 3-4 horas/año, que es más intensa en los *spots* con orientación ENE, lo cual se ajusta con la tendencia observada en el oleaje y viento en aguas profundas. El análisis estacional de las tendencias muestra que estas son positivas durante el invierno, primavera y verano y negativa durante el otoño en las rompientes con orientación NW.

