

DOCUMENTO N° 1  
Anejo n° 4. Propagaciones

---

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>1</b>
1.1	Descripción de los modelos empleados.....	1
1.1.1	Modelo de propagación del oleaje, OLUCA-SP .....	1
1.1.2	Modelo de corrientes de rotura, COPLA-SP .....	3
1.2	Modelo digital del terreno .....	3
1.3	Oleaje de diseño.....	9
1.4	Diseño de las mallas de cálculo.....	12
<b>2</b>	<b>RECONSTRUCCIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA COSTA .....</b>	<b>14</b>
2.1	Selección de puntos objetivo .....	14
2.2	Resultados de las propagaciones .....	16
2.3	Interpolación mediante redes neuronales.....	19
2.4	Análisis direccional del oleaje en la costa.....	23
2.5	Régimen medio en la costa.....	28
2.6	Régimen extremal en la costa .....	34
2.7	Dirección del flujo medio de energía.....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.-	Carta náutica nº 611 del Instituto Hidrográfico de la Marina.....	4
Figura 2.-	Carta náutica nº 510 del Instituto Hidrográfico de la Marina.....	5
Figura 3.-	Batimetría del estudio ecocartográfico.....	6
Figura 4.-	Detalle de la batimetría del estudio ecocartográfico en la zona de proyecto ....	6
Figura 1.-	Topografía de la zona y ortofoto de la playa de Medio Almud (Estudio ecocartográfico) .....	7
Figura 2.-	Modelo del terreno resultante de la información batimétrica.....	8
Figura 3.-	Proceso de “clustering” o agrupación de datos por la técnica K-means.....	9
Figura 4.-	Histograma Hs-Tp de la serie NOAA (1979-2012) con los puntos escogidos para construir los casos a propagar.....	10
Figura 5.-	Grupo de mallas orientado al W (oleajes del WNW y W).....	13
Figura 6.-	Familia de mallas orientada al SW (oleajes de WSW, SW y SSW).....	13
Figura 7.-	Agrupación de mallas orientada al S (oleajes del S y SSE).....	14

Figura 8.-	Nodos de control en el área de estudio a profundidades de -3 m,-5 m, -7 m y -10m.....	15
Figura 9.-	Gráficos de altura de ola y frentes (izquierda) y vectores de oleaje (derecha) para el caso H=1.8m, T=15.9s, nivel=1.52m y dirección WNW.....	16
Figura 10.-	Frentes de onda y batimetría (izquierda) y fase (derecha) el caso H=1.8m, T=15.9s, nivel=1.52 m y dirección WNW.....	16
Figura 11.-	Gráficos de altura de ola y frentes (izquierda) y vectores de oleaje (derecha) para el caso H=2.9m, T=9.8s, nivel=0.67m y dirección SW .....	17
Figura 12.-	Frentes de onda y batimetría (izquierda) y fase (derecha) el caso H=2.9, T=9.8s, nivel=0.67m y dirección SW .....	17
Figura 13.-	Gráficos de altura de ola y frentes (izquierda) y vectores de oleaje (derecha) para el caso H=1.2m, T=12.5s, nivel=2.22 m y dirección S.....	17
Figura 14.-	Frentes de onda y batimetría (izquierda) y fase (derecha) el caso H=1.2m, T=12.5s, nivel=2.22m y dirección S.....	18
Figura 15.-	Ejemplo de red neuronal con una capa oculta .....	19
Figura 16.-	Funciones de transferencia.....	20
Figura 1.-	Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 3 a profundidad de 3m) .....	21
Figura 2.-	Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 8 a profundidad de 5m).....	21
Figura 3.-	Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 13 a profundidad de 7m).....	22
Figura 4.-	Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 18 a profundidad de 10m) .....	22
Figura 5.-	Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P18 (h=10m).....	23
Figura 6.-	Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P13 (h=7m).....	24
Figura 7.-	Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P8 (h=5m) .....	25
Figura 8.-	Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P3 (h=3m) .....	26
Figura 9.-	Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en aguas profundas (Datos de oleaje NOAA 1979-2012).....	27
Figura 10.-	Régimen medio de altura de ola en el nodo P18 (h=10m) .....	28
Figura 11.-	Régimen medio de altura de ola en el nodo P13 (h=7m) .....	29
Figura 12.-	Régimen medio de altura de ola en el nodo P8 (h=5m).....	30
Figura 13.-	Régimen medio de altura de ola en el nodo P3 (h=3m).....	31
Figura 14.-	Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P3 (h=3 m) .....	32
Figura 15.-	Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P8 (h=5 m).....	32
Figura 16.-	Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P13 (h=7 m).....	33

Figura 17.-	Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P18 ( $h=10$ m) .....	33
Figura 18.-	Ajuste del oleaje extremal en el nodo P3 ( $h=3$ m) .....	34
Figura 19.-	Ajuste del oleaje extremal en el nodo P8 ( $h=5$ m) .....	35
Figura 20.-	Ajuste del oleaje extremal en el nodo P13 ( $h=7$ m) .....	35
Figura 21.-	Ajuste del oleaje extremal en el nodo P18 ( $h=10$ m) .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.-	Casos de oleaje propagados para cada dirección y nivel de marea .....	11
Tabla 2.-	Casos de test empleados para comprobación de la interpolación .....	11
Tabla 3.-	Puntos de control en las batimétricas de -3, -5, -7 y -10 m .....	15
Tabla 4.-	Altura de ola $H_{s12}$ en los nodos de control .....	34
Tabla 5.-	Alturas de ola en régimen extremal asociadas a periodos de retorno de diseño en los nodos de control .....	36
Tabla 6.-	Oleaje extremal ( $H_s$ , $T_p$ ) asociado a diferentes periodos de retorno de diseño	36
Tabla 7.-	Direcciones del flujo medio de energía .....	37



## 1 INTRODUCCIÓN

A medida que el oleaje se aproxima hacia la costa sufre una serie de fenómenos que llevan a su transformación, como son: el asomeramiento, resultado del cual aumenta la altura de ola y disminuye la longitud de onda; la refracción, giro del frente de onda dado por la diferencia de celeridades entre distintas profundidades; o la difracción, cesión lateral de energía perpendicularmente a la dirección de propagación entre una zona de incidencia del oleaje y una zona de sombra resguardada de éste.

Cuando la altura alcanzada por la onda coincide aproximadamente con la profundidad, el perfil de la onda deja de ser estable y rompe disipando una gran cantidad de energía, fundamentalmente en forma de turbulencia. Esta rotura, en combinación con los gradientes de altura de ola y la incidencia oblicua del oleaje, producen corrientes costeras que transportan agua y sedimentos y que, de los distintos tipos de corrientes (marea, viento, etc.), son las más importantes en la evolución del entorno costero.

Entre este anejo se acomete el estudio de estas dinámicas y procesos litorales en el litoral objeto de actuación, analizándose los cambios sufridos por el oleaje en su camino hacia la costa a través de su propagación desde aguas profundas hasta la playa de Medio Almud con el modelo OLUCA-SP, y las corrientes formadas en éstas como consecuencia de su rotura, las cuales se simulan con el modelo COPLA-SP, ambos implementados en el "Sistema de Modelado Costero" (SMC) desarrollado por el *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas* (GIOC) de la *Universidad de Cantabria* en colaboración con el *Ministerio de Medio Ambiente*.

También, como parte integrante de este estudio, se efectúa la reconstrucción del clima marítimo en nodos de control de profundidad reducida frente al tramo de costa objeto de actuación mediante interpolación con redes neuronales, obteniendo finalmente el flujo medio de energía y su dirección asociada para la determinación del perfil y forma en planta de equilibrio de la playa.

## 1 METODOLOGÍA

### 1.1 Descripción de los modelos empleados

#### 1.1.1 Modelo de propagación del oleaje, OLUCA-SP

El OLUCA-SP pertenece al grupo de modelos de propagación del oleaje que propagan un espectro de energía asociado a un oleaje irregular aleatorio, es un modelo espectral no dispersivo que resuelve la fase, aplicable sobre batimetrías complejas en dirección a la costa.

Este modelo y el OLUCA-RD (monocromático) están basados en los modelos REF/DIF1 y REF/DIFS desarrollados por el *Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, Newark, Delaware (USA)* (Kirby et al., 1986b y 1994), con base en la formulación no-lineal de la aproximación parabólica de la refracción-difracción, con interacción oleaje-corriente, formulación propuesta por Kirby (1986a), los cuales fueron posteriormente mejorados por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) de la Universidad de Cantabria.

El OLUCA-SP es un modelo parabólico de refracción/difracción débilmente no lineal basado en un desarrollo de Stokes de las ecuaciones que definen el problema de las ondas en el agua y obtenido a partir de las formulaciones de pendiente suave ("*Mild slope equation*", Berkhoff, 1972), aproximación parabólica que se resuelve por medio de una técnica de diferencias finitas para la amplitud de la onda (técnica de Crank-Nicolson), resultando un sistema en matrices tridiagonales.

#### Condiciones iniciales:

- Estado de mar:
  - Espectro de frecuencia TMA (Bouws et al., 1985). Los parámetros que lo definen son:
    - ~  $h$  (m): profundidad del agua
    - ~  $H_s$  (m): altura de ola significativa
    - ~  $f_p$  (Hz): frecuencia de pico =  $1/T_p$
    - ~  $\gamma$ : factor de ensanchamiento del pico ( $\gamma=8\sim10$  oleajes tipo Swell,  $\gamma=2\sim4$  oleajes tipo Sea)
  - Función de dispersión direccional (Borgman, 1984), definida por los siguientes parámetros:
    - ~  $\theta_m$  ( $^\circ$ ): dirección media del oleaje
    - ~  $\sigma_m$ : parámetro que determina el ancho de la dispersión direccional ( $\sigma_m=5$  espectro estrecho y  $\sigma_m=30$  espectro ancho)
- Dominio espacial:

La batimetría del área de estudio debe ser introducida en los nodos de una malla (x,y) rectangular, con incrementos en metros entre nodos de:  $D_x$ ,  $D_y$ .

### 1.1.2 Modelo de corrientes de rotura, COPLA-SP

El modelo COPLA-SP resuelve las ecuaciones de flujo (ecuaciones de Navier-Stokes y de cantidad de movimiento integradas en la profundidad y promediadas en un periodo de tiempo) debido a la rotura del oleaje espectral (SP) en la zona de rompientes, tomando como datos de entrada los datos de salida del campo de oleaje calculado a partir del modelo Oluca-SP.

Para resolver el sistema de ecuaciones bidimensional de movimiento, se emplea un método implícito de dirección alterna usado por Leendertse (1970), que emplea un esquema centrado con dos niveles de tiempo para resolver las ecuaciones linealizadas del movimiento escritas en forma de matriz, resultando una aproximación de segundo orden en espacio y tiempo.

#### Condiciones iniciales:

Los dos parámetros importantes que influyen en el movimiento de las corrientes son: la rugosidad del fondo, expresada por el "número de Chézy",  $c$  ( $m^{1/2}/s$ ) y la viscosidad de remolino "Eddy viscosity",  $\varepsilon$ .

Además, se incluye también como dato de entrada en el modelo, el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ), el cual debe cumplir la relación de estabilidad de Courant.

## 1.2 Modelo digital del terreno

Para la constitución del modelo digital del terreno necesario para llevar a cabo la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa, se superpone mediante el módulo de modelado del terreno del SMC la información topo-batimétrica y cartográfica disponible de la zona de actuación, previo estudio de su compatibilidad y homogeneidad en cotas (sistema de referencia altimétrico) y coordenadas (sistema de referencia planimétrico y proyección).

El sistema de referencia empleado para el desarrollo de las propagaciones es:

- Sistema planimétrico: ETRS89, UTM, huso 28.
- Sistema altimétrico: Cero hidrográfico, equivalente a la máxima bajamar o LAT (*Lowest Astronomical Tide*).

Las batimetrías empleadas para generar el modelo digital del terreno se enumeran a continuación, desde la más general a la más detallada.

- Carta Náutica 611 “De Cabo Colorado a la Bahía de Melenara”. Escala 1:60,000. Marzo 2002. Posiciones geográficas referidas al Datum WGS-84, proyección Mercator. Sondas en metros referidas al Cero Hidrográfico, mínima de las bajamares predecibles para la zona (aproximadamente el LAT, Lowest Astronomical Tide), y altitudes (en metros) referidas al nivel medio del mar. Información empleada para la representación de la región de aguas profundas.

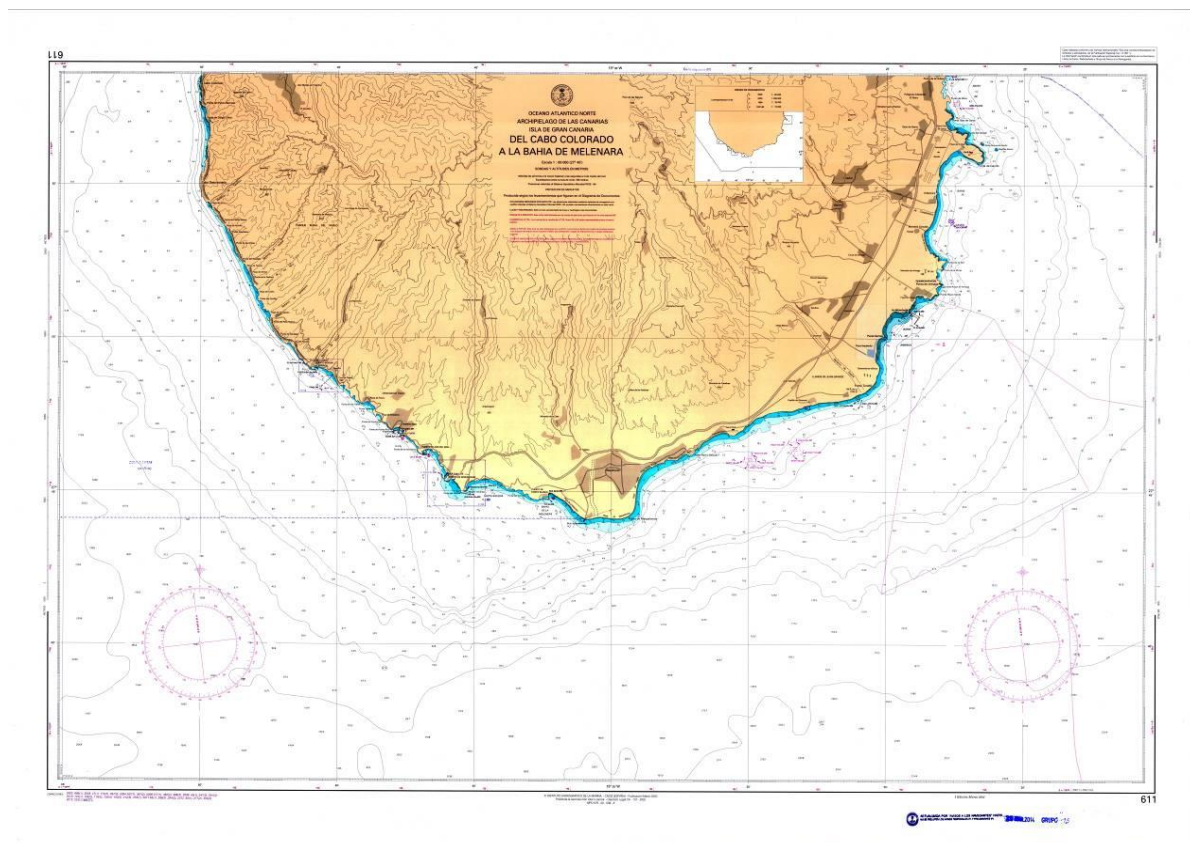


Figura 1.- Carta náutica nº 611 del Instituto Hidrográfico de la Marina.

- Carta Náutica 510 “De Punta de Maspalomas a Cabo Colorado”. Escala 1:50,000. 1955 con correcciones hasta 1973. Proyección de Mercator. Sondas en metros referidas al Cero Hidrográfico, mínima de las bajamares predecibles para la zona (aproximadamente el LAT), y altitudes (en metros) referidas al nivel medio del mar. Información empleada para la zona de aguas profundas.

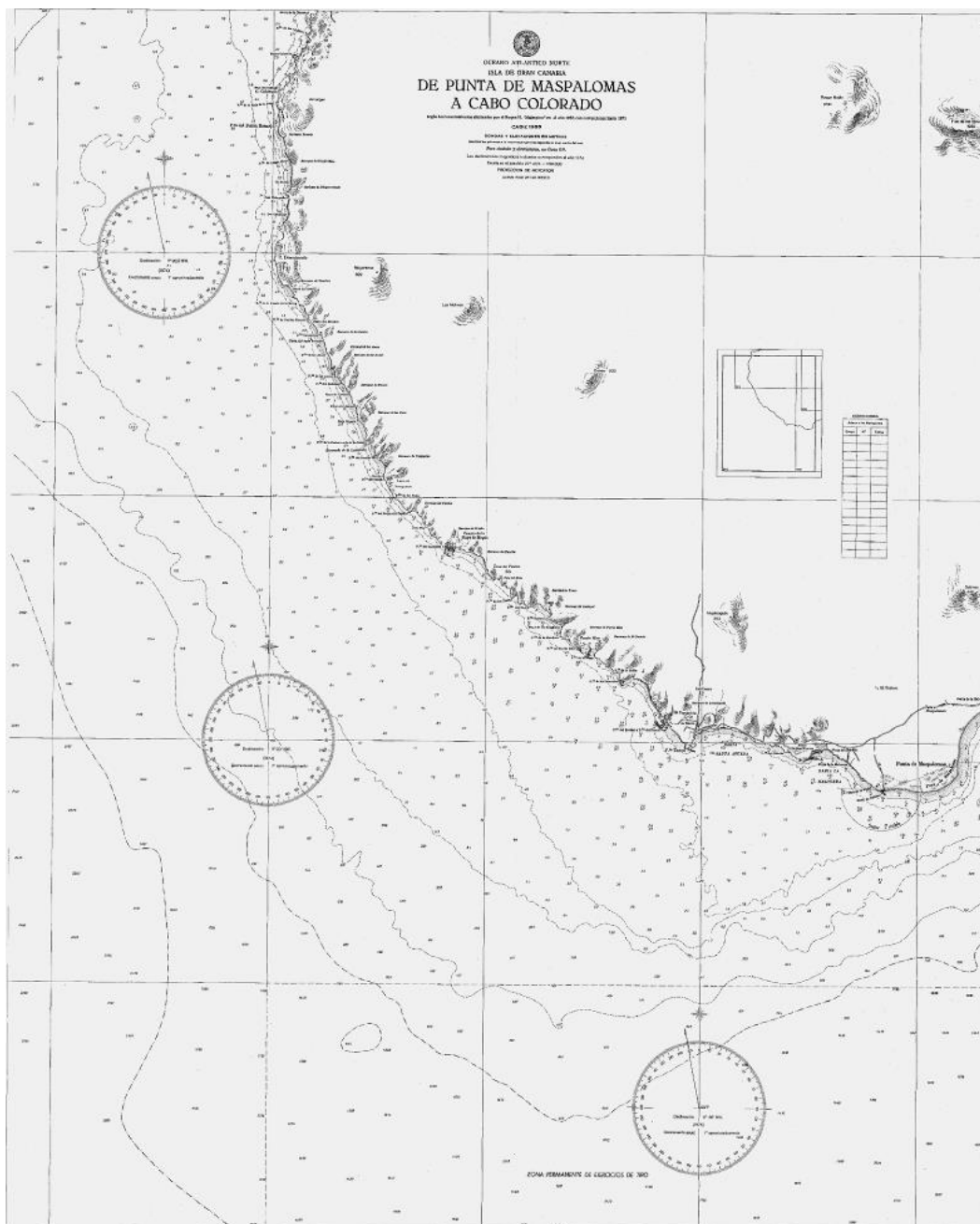


Figura 2.- Carta náutica nº 510 del Instituto Hidrográfico de la Marina.



- Planos de topobatimetría en formato AutoCAD de la zona de actuación obtenidos del “Estudio ecocartográfico de la zona sur del litoral de la isla de Gran Canaria (Las Palmas)”, realizado en Junio 2002 para la Dirección General de Costas por las empresas Intecsa, Tecnoambiente y Geomytsa. Proyección UTM, zona 29N, elipsoide ED50. Cotas referidas al Cero del Estudio, el cual se localiza a 4,295 m por debajo del clavo NGU-340 materializado en la caseta del mareógrafo del Puerto de La Luz y de Las Palmas. Batimetría desde la cota -50 m hasta la línea de costa, complementada con la topografía de la zona. Escala 1/50.000.

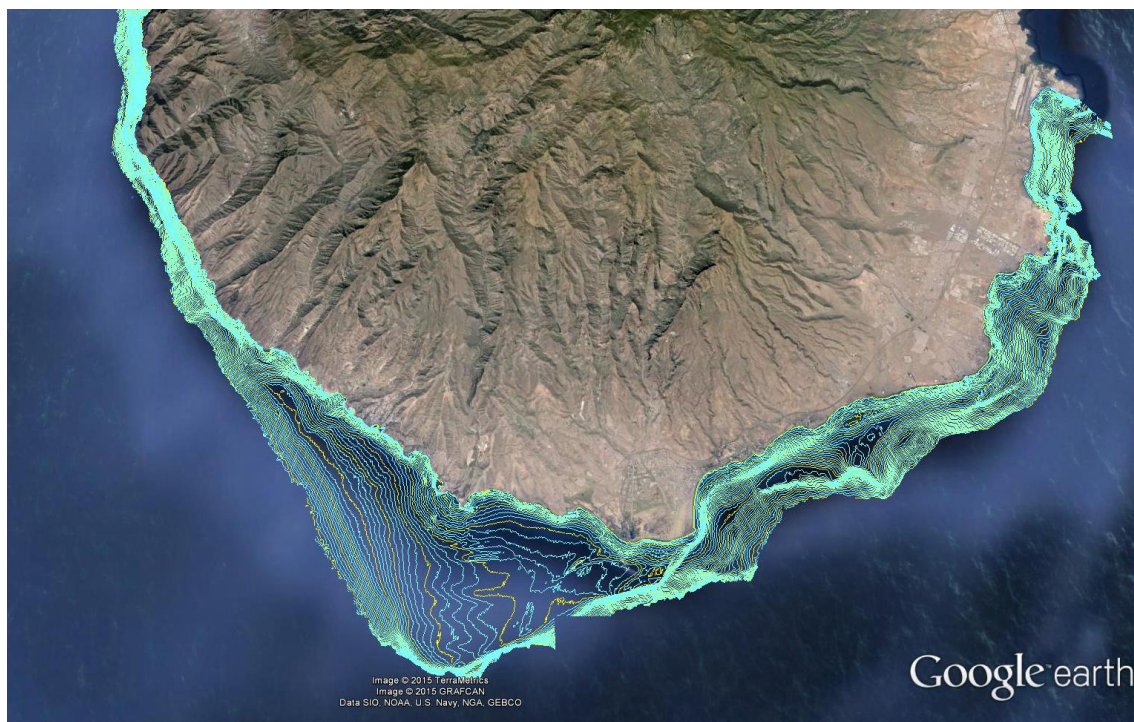


Figura 3.- Batimetría del estudio ecocartográfico

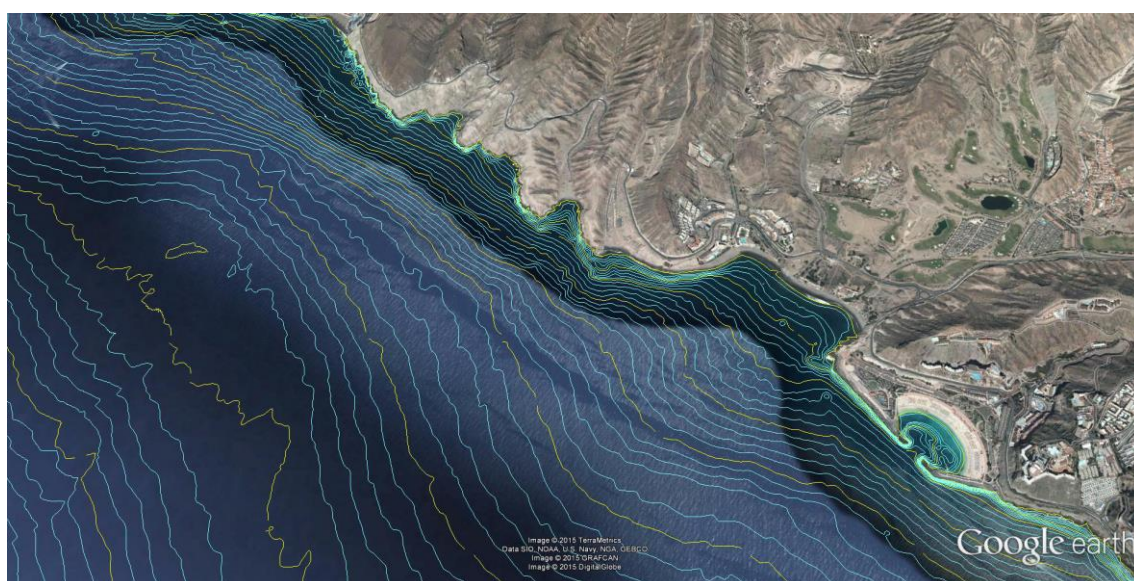


Figura 4.- Detalle de la batimetría del estudio ecocartográfico en la zona de proyecto

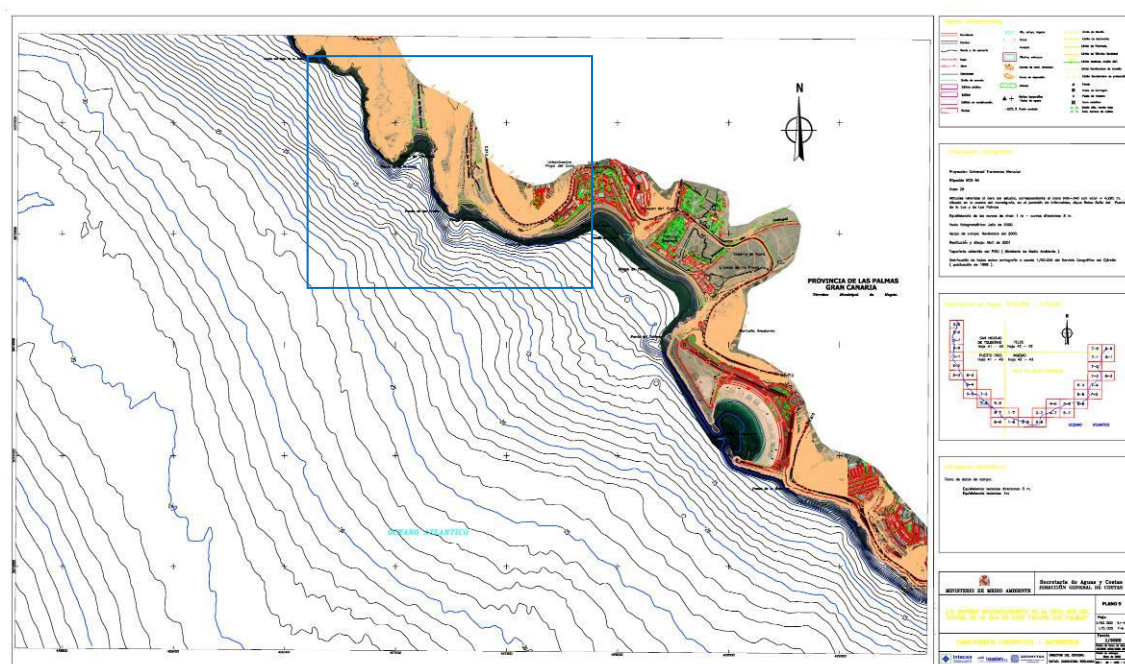
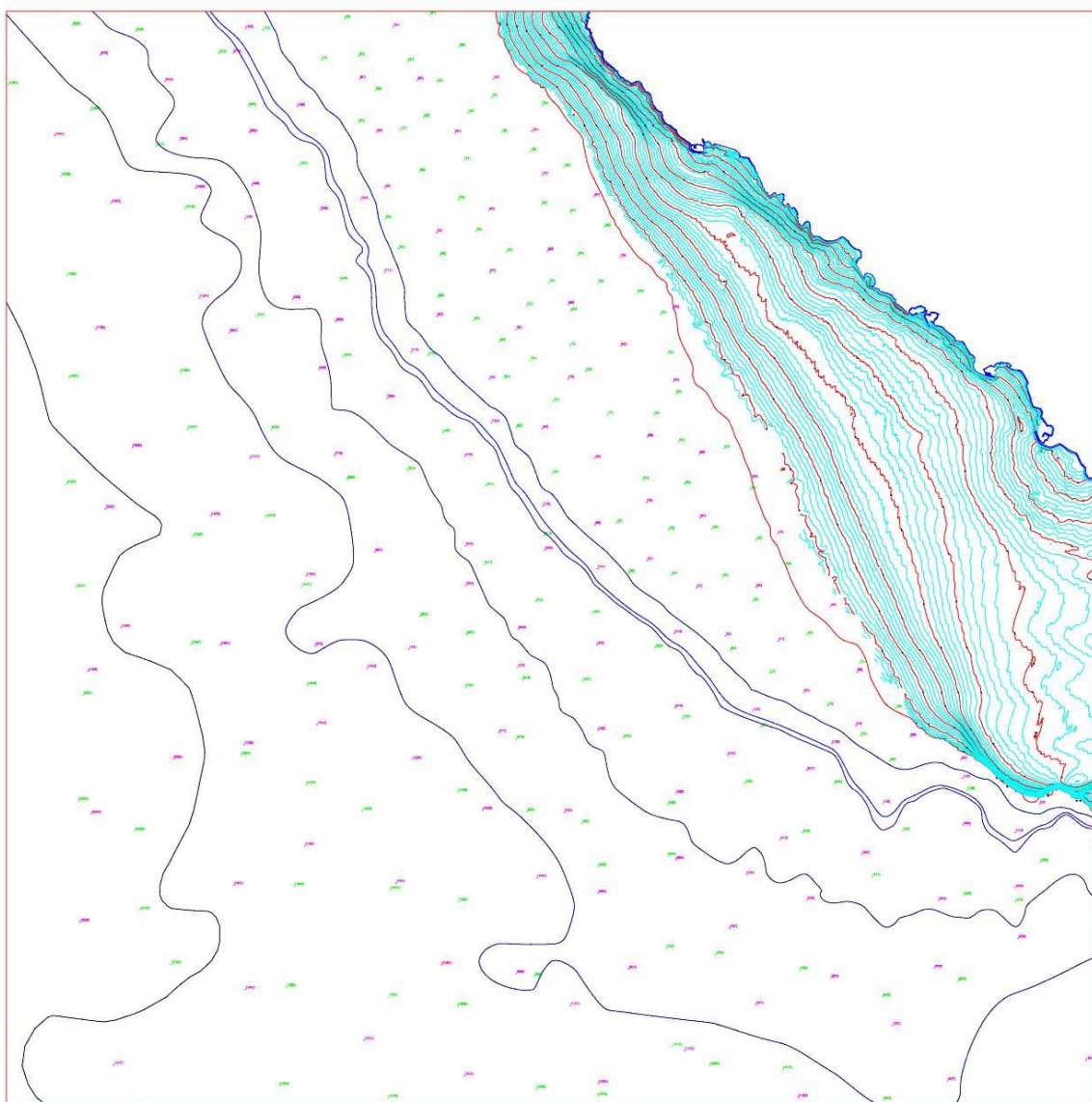


Figura 5.- Topografía de la zona y ortofoto de la playa de Medio Almud (Estudio ecocartográfico)

- Información cartográfica del visor Grafcan 2012 empleado para actualizar la topografía local. Mapa topográfico escala 1/5.000 elaborado a partir de vuelos fotogramétricos a escala 1/80.000. Proyección UTM, huso 28, elipsoide ED50. Curvas de nivel cada 5 m y directoras cada 10, con altimetría referida al nivel medio del mar.



El modelo digital empleado a partir de la información batimétrica indicada se muestra en la siguiente imagen:



*Figura 6.- Modelo del terreno resultante de la información batimétrica*



### 1.3 Oleaje de diseño

La propagación del oleaje se lleva a cabo orientada a la posterior aplicación de la metodología de la interpolación mediante redes neuronales para la reconstrucción del clima en la costa a partir de los parámetros de altura de ola ( $H_s$ ), periodo ( $T_p$ ), dirección y nivel del mar. Esta técnica se basa en el empleo de los coeficientes de asomeramiento y refracción resultantes de la propagación del total de casos a escoger de forma que resulten representativos de la serie NOAA en aguas profundas, para, mediante interpolación, obtener esta serie propagada en puntos objetivo de profundidad reducida frente la playa de Medio Almud objeto de estudio.

Para la selección del conjunto de datos representativos del clima marítimo de la zona se aplica el algoritmo *K-means*, creado por MacQueen en 1967, que tiene como objetivo la partición de un conjunto de  $n$  observaciones en  $k$  grupos o clústeres en el que cada observación pertenece al grupo más cercano a la media.

El nombre de *K-means* viene porque representa cada uno de los clusters por la media (o media ponderada) de sus puntos, es decir, por su centroide. Cada clúster, por tanto, es caracterizado por su centro o centroide (ver Figura 7.-) que se encuentra en el centro o el medio de los elementos que componen el clúster.

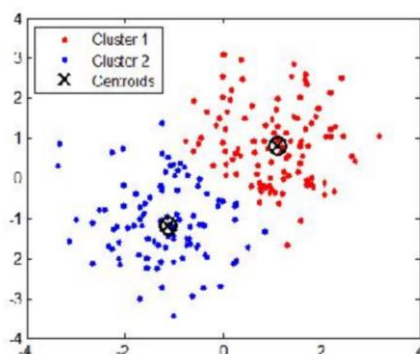


Figura 7.- Proceso de "clustering" o agrupación de datos por la técnica *K-means*.

El algoritmo *K-means* utiliza una técnica de refinamiento iterativo que se realiza en 4 etapas:

- Etapa 1: Elegir aleatoriamente  $K$  objetos que forman así los  $K$  clusters iniciales. Para cada clúster  $k$ , el valor inicial del centro es  $= x_i$ , con los  $x_i$  únicos objetos de  $D_n$  pertenecientes al clúster.
- Etapa 2: Reasigna los objetos del clúster. Para cada objeto  $x$ , el prototipo que se le asigna es el que es más próximo al objeto, según una medida de distancia, (medida euclidiana cuadrática).
- Etapa 3: Una vez que todos los objetos son colocados, recalcular los centros de  $K$  clúster (los baricentros).

- Etapa 4: Repetir las etapas 2 y 3 por un procedimiento iterativo que converge cuando las asignaciones ya no cambian.

En el gráfico siguiente se representa en un histograma conjunto altura de ola significativa - periodo de pico de la serie numérica del NOAA en el punto 27.5°N 16.0°O y sobre éste, se han marcado los puntos de intersección Hs-Tp elegidos mediante la técnica K-means (círculos en rojo). Para completar los estados de mar característicos del oleaje, de forma adicional se han seleccionado 6 casos de oleaje localizados en la periferia del diagrama de dispersión, que recogen los casos más extremos (círculos en azul).

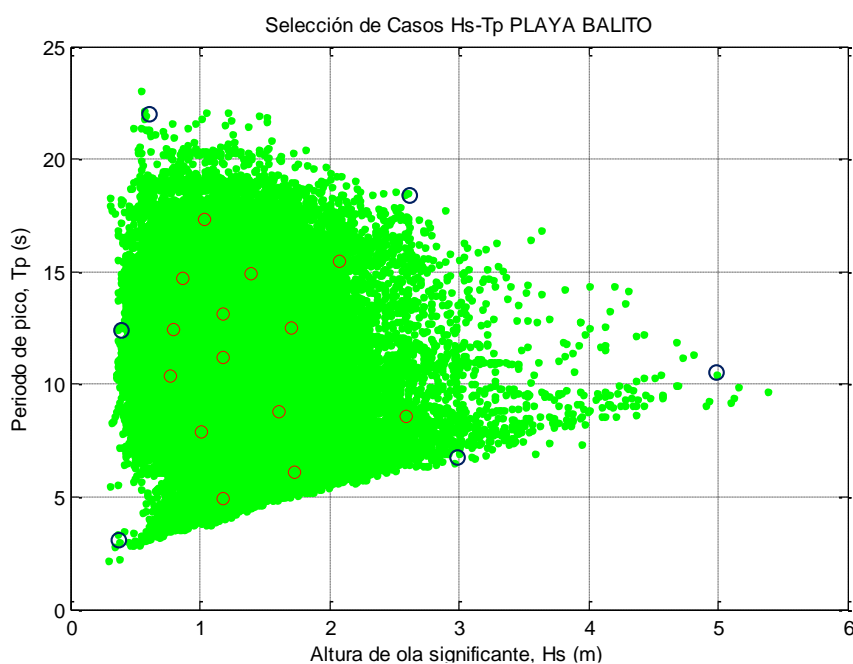


Figura 8.- Histograma Hs-Tp de la serie NOAA (1979-2012) con los puntos escogidos para construir los casos a propagar

En la Tabla 1.- se incluyen los estados de mar característicos del oleaje en la zona de estudio:

CASO	Hs (m)	Tp (s)
1	0.4	12.5
2	0.5	3.0
3	0.6	21.9
4	0.8	13.2
5	0.8	11.1
6	0.9	8.6
7	1.0	17.2
8	1.1	14.8
9	1.1	4.8
10	1.2	12.5
11	1.3	7.7
12	1.5	10.0
13	1.6	5.7
14	1.6	13.3
15	1.8	15.9
16	2.0	7.1
17	2.9	9.8
18	2.9	17.8
19	3.1	6.7
20	5.0	10.5

Tabla 1.- Casos de oleaje propagados para cada dirección y nivel de marea

CASO	Hs (m)	Tp (m)	NM (m)	Dirección (N=0, E=90)
21	1	4	1.00	168.8
22	2	6	1.25	196.9
23	3	8	1.5	219.4
24	4	9	1.75	253.1
25	5	10	2.00	275.6
26	1	6.5	2.25	247.5
27	2	8.5	2.5	264.4
28	3	10.5	2.75	191.2

Tabla 2.- Casos de test empleados para comprobación de la interpolación

Cada uno de estos 20 estados de mar escogidos se propaga en 3 niveles del mar diferentes, teniendo en cuenta el efecto del cambio climático en la elevación del nivel del mar, se han considerado los siguientes niveles del mar:

- Nivel medio mínimo de bajamar en el estado actual (Año 2015) (BMVE=0.67 m).
- Nivel correspondiente a la media del nivel actual y el que considera el efecto del cambio climático (2015-2040) (NMM=1.52 m).
- Nivel medio máximo de pleamar (PMVE=2.22 m) en el escenario de cambio climático (Año 2040).

Los 60 casos resultantes se propagan para cada una de las 7 direcciones del oleaje susceptibles de incidir en la costa objeto de estudio (SSE, S, SSW, SW, WSW, W y WNW), resultando así un total de 420 casos propagados, cuya representatividad permite la posterior reconstrucción del clima marítimo en la zona de actuación mediante la interpolación con redes neuronales. Además, se han propagado 8 casos de test para poder evaluar la interpolación mediante casos no empleados en el ajuste del modelo neuronal.

## 1.4 Diseño de las mallas de cálculo

Las características de los oleajes a propagar y la configuración de la costa del área litoral estudiada, lleva al diseño de 3 familias de mallas encadenadas, cada una de ellas destinada a la propagación de un grupo direccional de oleajes, cuya procedencia define su orientación:

- Grupo de mallas orientado al W: propagación de oleajes procedentes del WNW, W.
- Familia de mallas orientada al SW: propagación de casos del WSW, SW y SSW.
- Agrupación de mallas orientadas al S: propagación de direcciones S y SSE.

Cada uno de estos grupos está compuesto a su vez por 3 mallas encadenadas desde aguas profundas. Los encadenamientos de mallas permiten diferentes pasos de malla ( $\Delta x = \Delta y$ ) en función del periodo a propagar, de modo que las mallas exteriores tienen un paso de malla de 100 m, las intermedias de 50 m y las de detalle 25 m.

Las mallas se ubican de modo que el contorno desde el cual se inicia la propagación se encuentre en aguas profundas en la medida de lo posible. Puesto que la profundidad considerada como límite de aguas profundas depende del periodo, para periodos intermedios es posible partir de la malla intermedia (periodos de 6 y 8 s) y para periodos pequeños, es posible empezar la propagación directamente desde la malla de detalle (periodos de 4 s).

En las siguientes figuras se presentan las 3 familias de mallas diseñadas según direccionalidad de los oleajes a propagar.

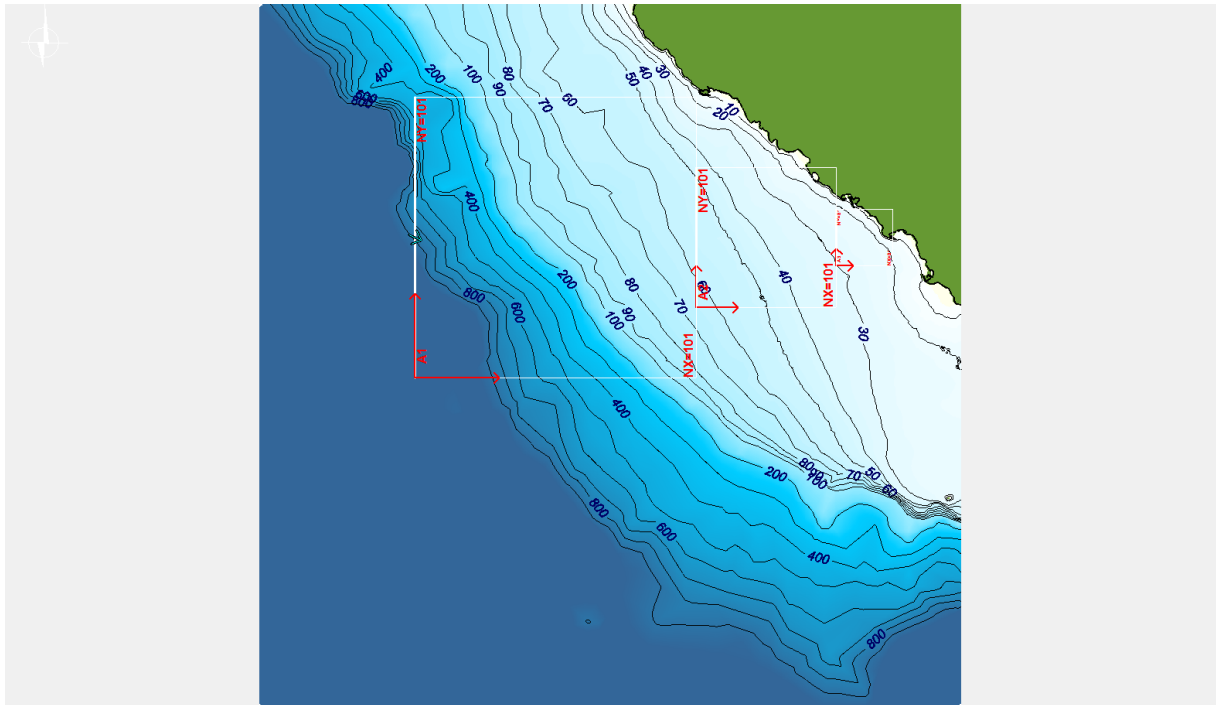


Figura 9.- Grupo de mallas orientado al W (oleajes del WNW y W)

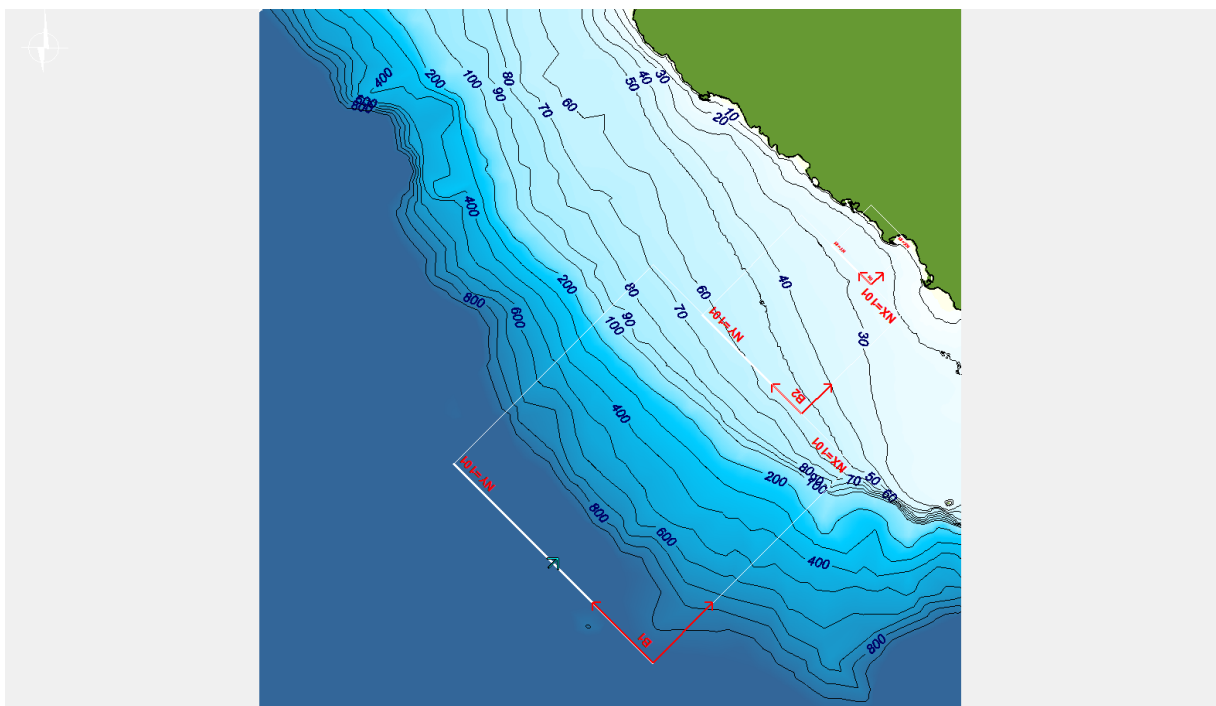


Figura 10.-Familia de mallas orientada al SW (oleajes de WSW, SW y SSW)

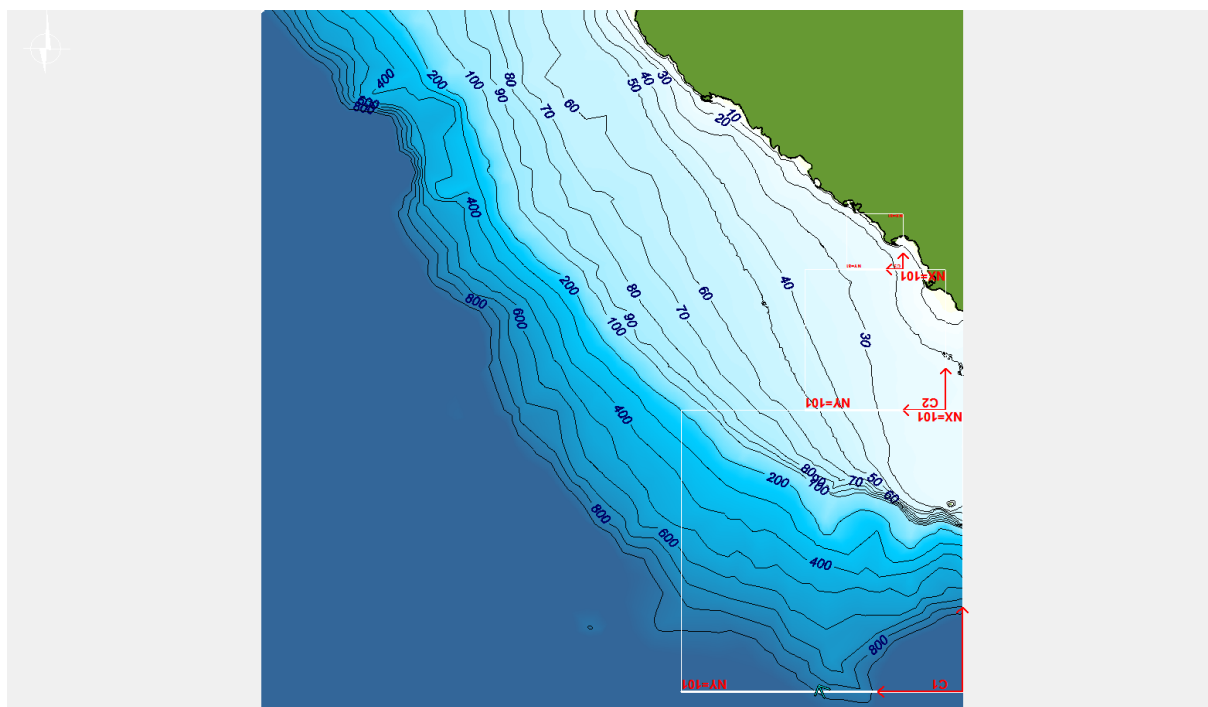


Figura 11.- Agrupación de mallas orientada al S (oleajes del S y SSE)

## 2 RECONSTRUCCIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO EN LA COSTA

### 2.1 Selección de puntos objetivo

Para el análisis del oleaje en la propia zona de estudio se escogen un total de 20 nodos de control en profundidades reducidas (-3 m, -5 m, -7 m y -10 m) emplazados en el área de interés frente a la costa analizada, donde se obtienen los resultados de los oleajes propagados y se lleva a cabo la interpolación de la serie de oleaje NOAA para los datos de 1979 a 2012.

En la Tabla 3.- se presentan los puntos de control escogidos para la reconstrucción del clima marítimo y posterior cálculo de la dirección del flujo medio de energía del oleaje y de la profundidad de cierre del perfil de playa ( $h^*$ ), cuya posición en planta respecto a la costa en estudio puede observarse en la imagen de la Figura 12.-.

Nodo	X <sub>UTM</sub>	Y <sub>UTM</sub>	Prof. (m)
P1	430848.02	3072353.13	-3
P2	430896.71	3072353.97	-3
P3	430924.75	3072320.28	-3
P4	430915.173	3072279.97	-3
P5	430900.49	3072231.67	-3
P6	430825.747	3072343.71	-5

Nodo	X <sub>UTM</sub>	Y <sub>UTM</sub>	Prof. (m)
P7	430863.42	3072328.41	-5
P8	430906.23	3072330.72	-5
P9	430901.045	3072287.04	-5
P10	430889.29	3072252.54	-5
P11	430798.83	3072361.68	-7
P12	430835.08	3072306.21	-7
P13	430874.11	3072300.5	-7
P14	430872.95	3072262.44	-7
P15	430871.52	3072211.56	-7
P16	430761.634	3072356.58	-10
P17	430788.004	3072317.04	-10
P18	430810.19	3072267.82	-10
P19	430824.55	3072230.83	-10
P20	430834.63	3072187.72	-10

Tabla 3.- Puntos de control en las batimétricas de -3, -5, -7 y -10 m

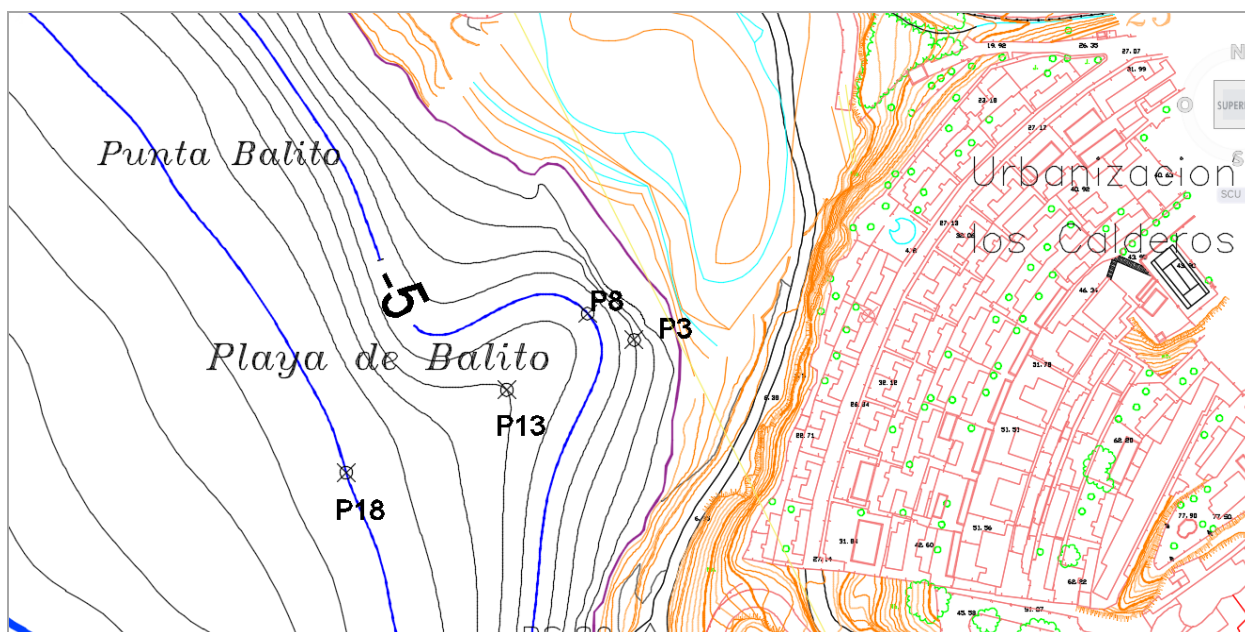


Figura 12.- Nodos de control en el área de estudio a profundidades de -3 m, -5 m, -7 m y -10m



## 2.2 Resultados de las propagaciones

Una vez seleccionados los nodos de control, se obtienen los valores de altura de ola y dirección para los 428 casos en cada uno de los nodos de control.

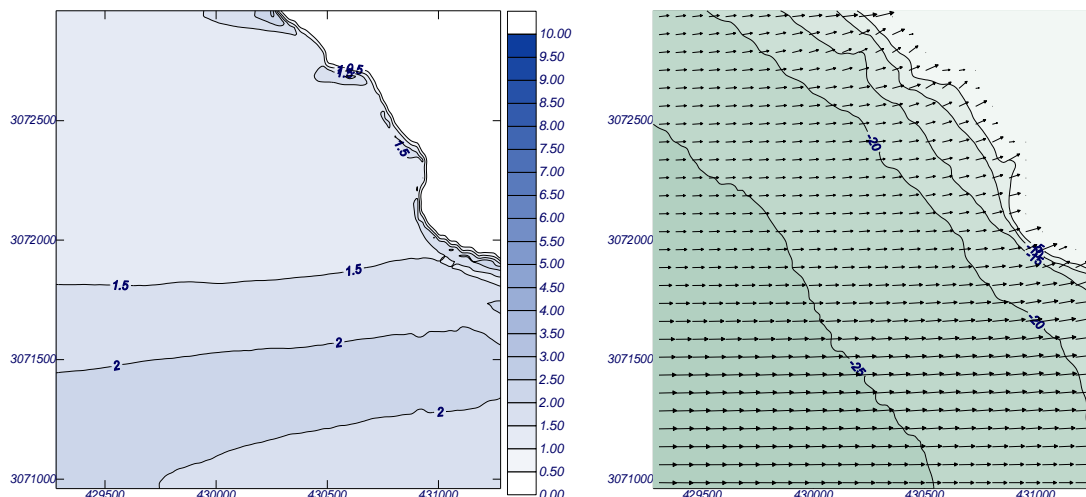


Figura 13.- Gráficos de altura de ola y frentes (izquierda) y vectores de oleaje (derecha) para el caso  $H=1.8m$ ,  $T=15.9s$ , nivel=1.52m y dirección WNW

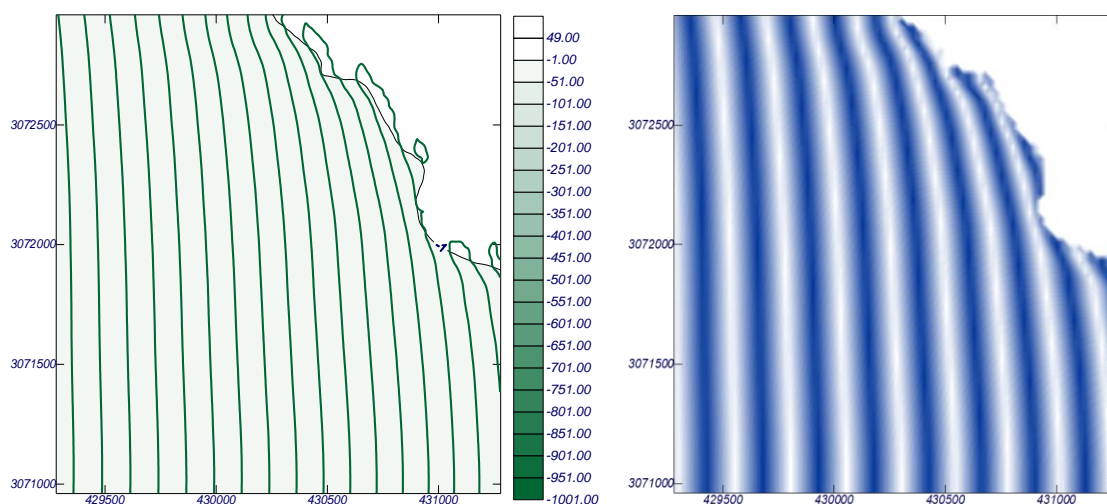


Figura 14.- Frentes de onda y batimetría (izquierda) y fase (derecha) el caso  $H=1.8m$ ,  $T=15.9s$ , nivel=1.52 m y dirección WNW



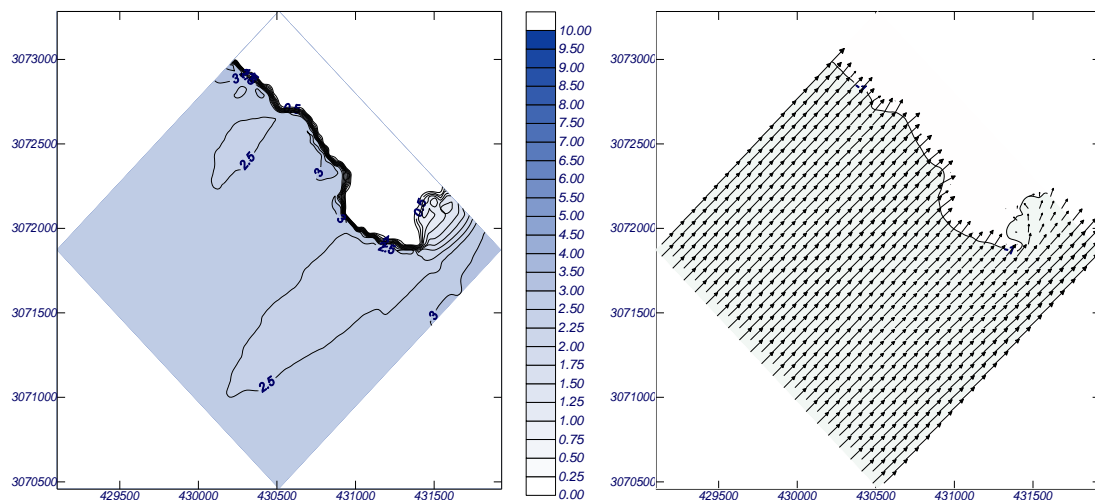


Figura 15.- Gráficos de altura de ola y frentes (izquierda) y vectores de oleaje (derecha) para el caso  
 $H=2.9\text{m}$ ,  $T=9.8\text{s}$ , nivel=0.67m y dirección SW

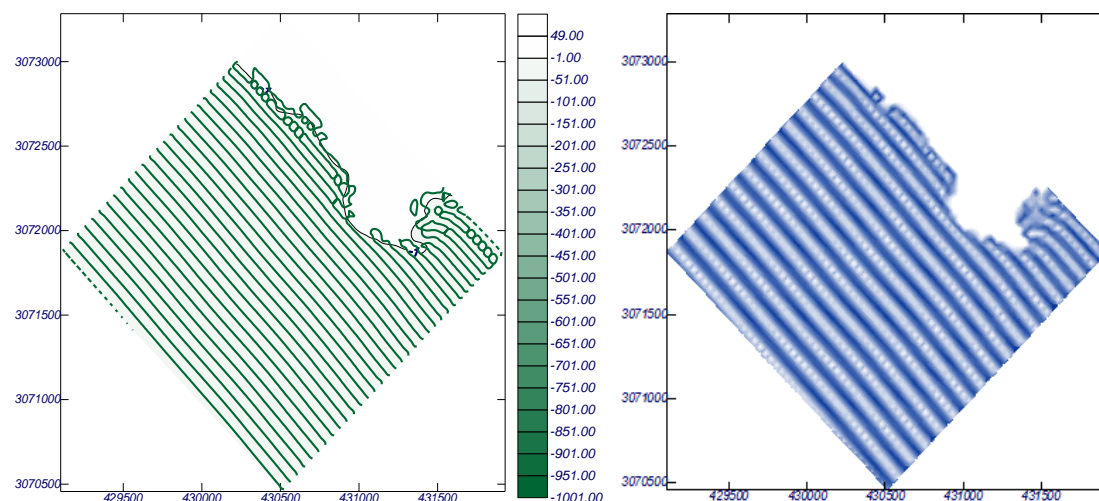


Figura 16.- Frentes de onda y batimetría (izquierda) y fase (derecha) el caso  
 $H=2.9$ ,  $T=9.8\text{s}$ , nivel=0.67m y dirección SW

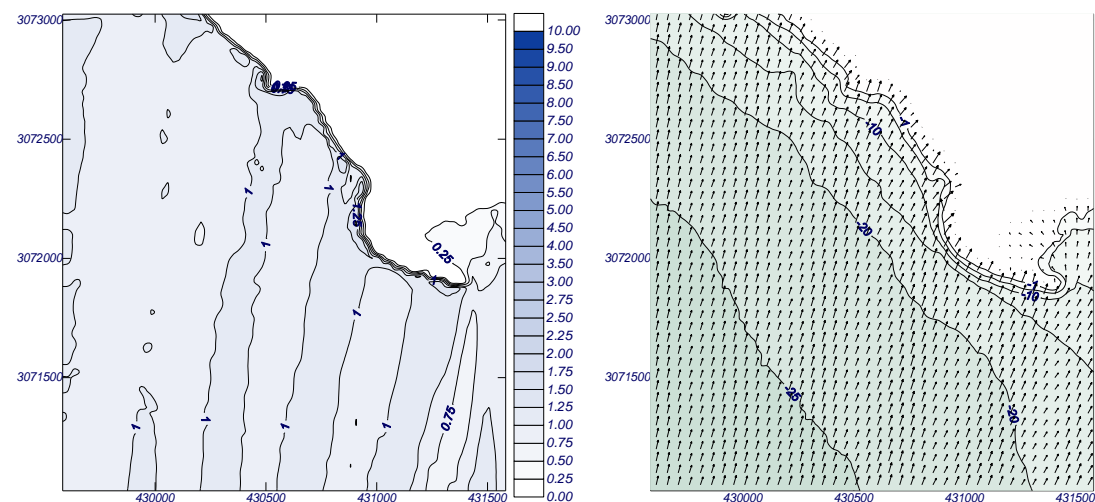


Figura 17.- Gráficos de altura de ola y frentes (izquierda) y vectores de oleaje (derecha) para el caso  
 $H=1.2\text{m}$ ,  $T=12.5\text{s}$ , nivel=2.22 m y dirección S

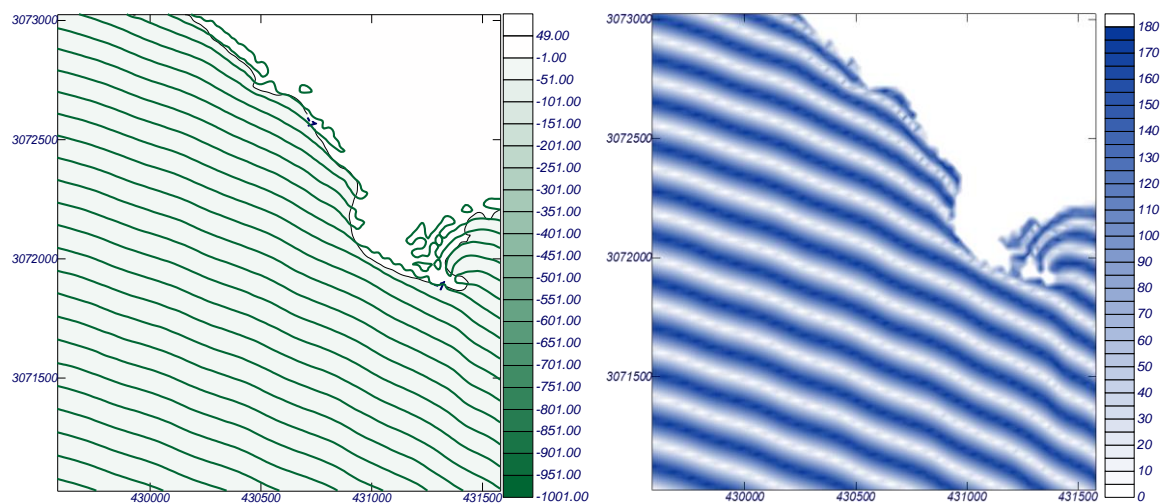


Figura 18.-Frentes de onda y batimetría (izquierda) y fase (derecha) el caso  
 $H=1.2m$ ,  $T=12.5s$ , nivel=2.22m y dirección S

## 2.3 Interpolación mediante redes neuronales

Las redes neuronales artificiales son un conjunto de técnicas perteneciente al campo de la inteligencia artificial. Su estructura consiste en una red formada por nodos (o neuronas) y conexiones, razón por la cual se asemejan al cerebro de los seres humanos, del cual procede su nombre.

Las redes neuronales son de aplicación en diversidad de problemas de reconocimiento de patrones y de aproximación de funciones, debido a su flexibilidad y facilidad de uso.

Una red neuronal es capaz de detectar relaciones complejas y no lineales entre variables, a partir de unidades sencillas como las neuronas, al disponer muchas de estas unidades en paralelo. Las variables se dividen en variables de entrada y de salida, relacionadas por algún tipo de correlación o dependencia (no necesariamente causa-efecto). También es posible que la salida sea la clasificación de las variables de entrada en diferentes grupos.

Las neuronas se pueden disponer en diferentes capas. Las redes neuronales más sencillas constan de una capa de entrada, una capa de neuronas o capa oculta, y una capa de salida (Figura 19.-).

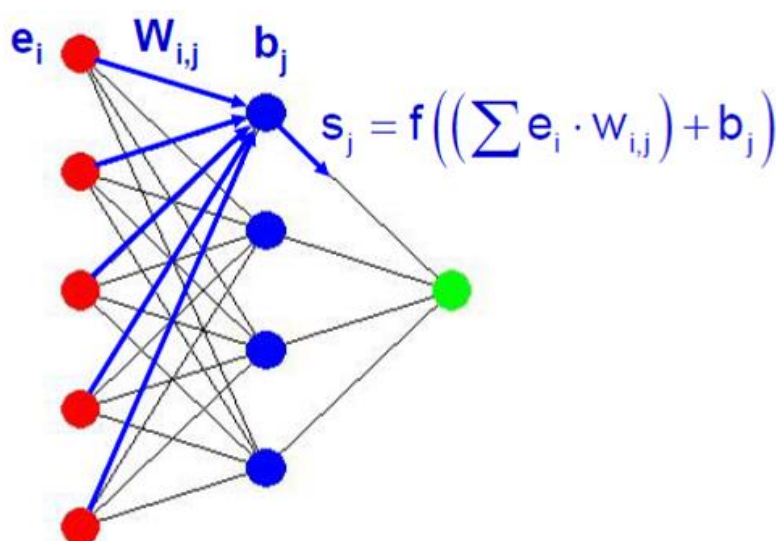


Figura 19.- Ejemplo de red neuronal con una capa oculta

El funcionamiento de una neurona consiste en la transformación de los valores de las entradas a través de las conexiones, en una salida. La salida se obtiene a partir de una función de propagación, una función de activación, y una función de transferencia.

- La función de propagación más común consiste en el sumatorio de todas las entradas multiplicadas por los pesos de las conexiones, más un valor de sesgo o "bias".
- La función de activación, en caso de que exista, activa o desactiva la salida de esta neurona.

- La función de transferencia se aplica al resultado de la función de propagación y normalmente consiste en una función de salida acotada como la sigmoidea (logsig)  $[0,1]$ , o la tangente hiperbólica (tansig)  $[-1,1]$ . Otras funciones de transferencia pueden ser una función lineal (purelin)  $[-\infty, +\infty]$ , base radial (radbas)  $[0,1]$  o una función de discriminación (hardlim)  $[0,1]$ .

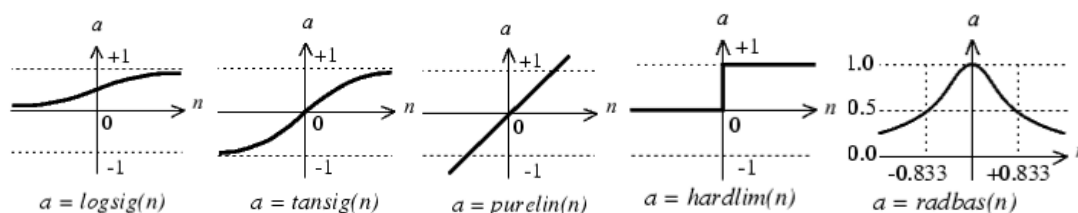


Figura 20.- Funciones de transferencia

Los criterios más importantes para clasificar las redes neuronales son:

- Según el tipo de conexiones:
  - Redes de propagación hacia delante (feed-forward), donde las conexiones van en un solo sentido desde la capa de entrada hacia la capa de salida
  - Redes recurrentes, donde las conexiones pueden realizar ciclos.
- Según el tipo de aprendizaje
  - Aprendizaje supervisado. Los datos (o entradas) tienen una respuesta conocida (o salida), con la cual se ajusta o entrena la red neuronal.
  - Aprendizaje no supervisado o autoorganizado. Los datos son solamente entradas. Son redes empleadas fundamentalmente para clasificación y reconocimiento de patrones.

En el caso de la interpolación de valores de oleaje propagados, se aplican las redes neuronales de propagación hacia adelante, con aprendizaje supervisado, empleándolas en la aproximación o interpolación de funciones.

El entrenamiento o ajuste de la red se realiza a partir de los datos de los 420 casos de propagación mediante algoritmos de optimización de tipo gradiente, y se comprueba la bondad del ajuste mediante los casos de test. En las siguientes figuras se muestra la validación cruzada de los casos de entrenamiento y test.

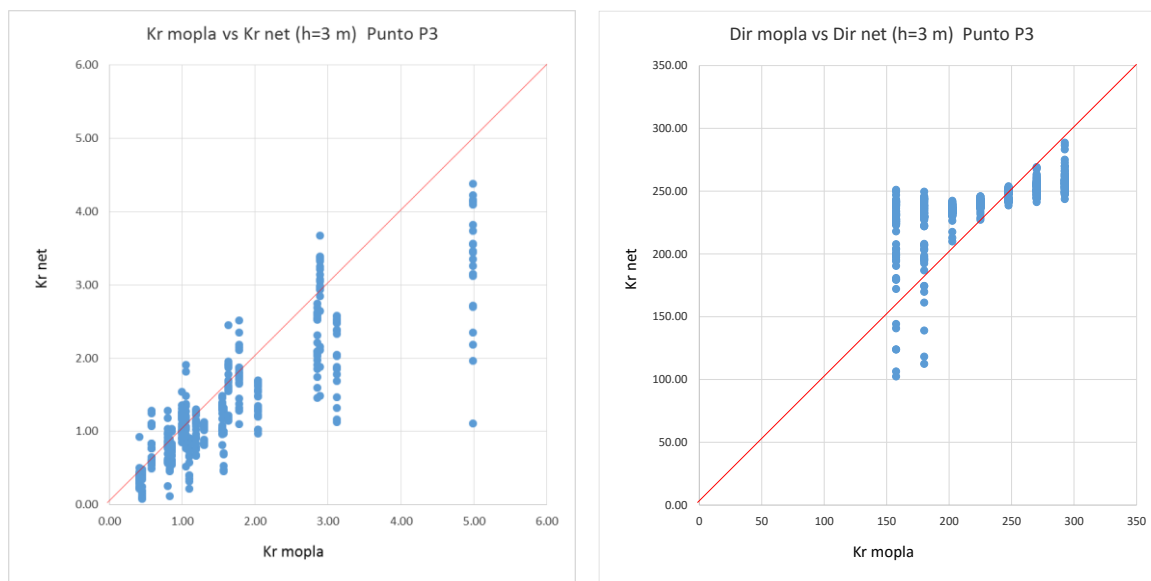


Figura 1.- Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 3 a profundidad de 3m)

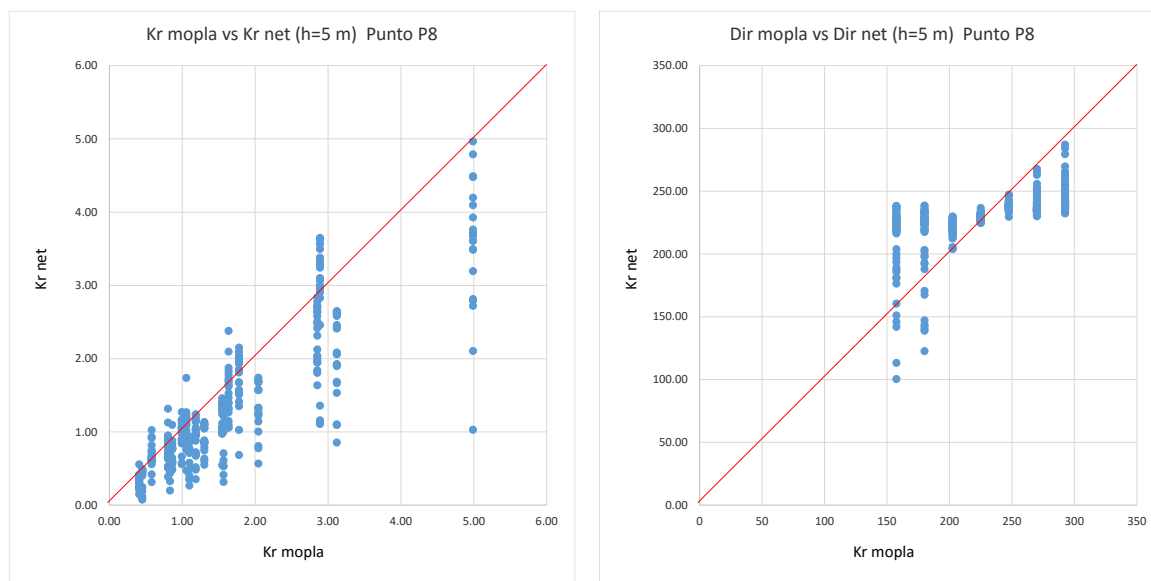
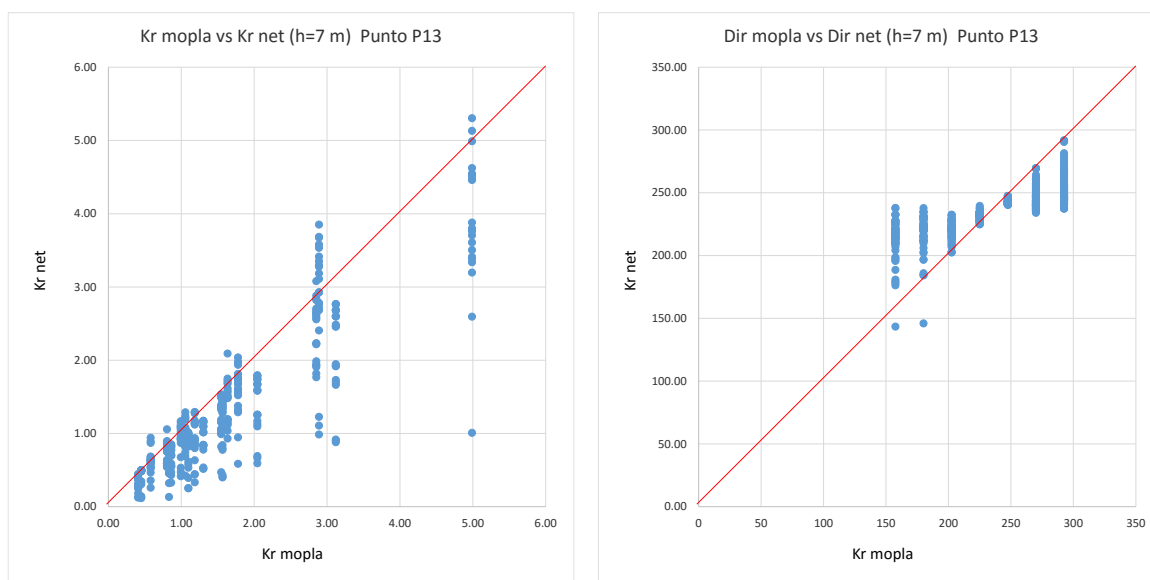
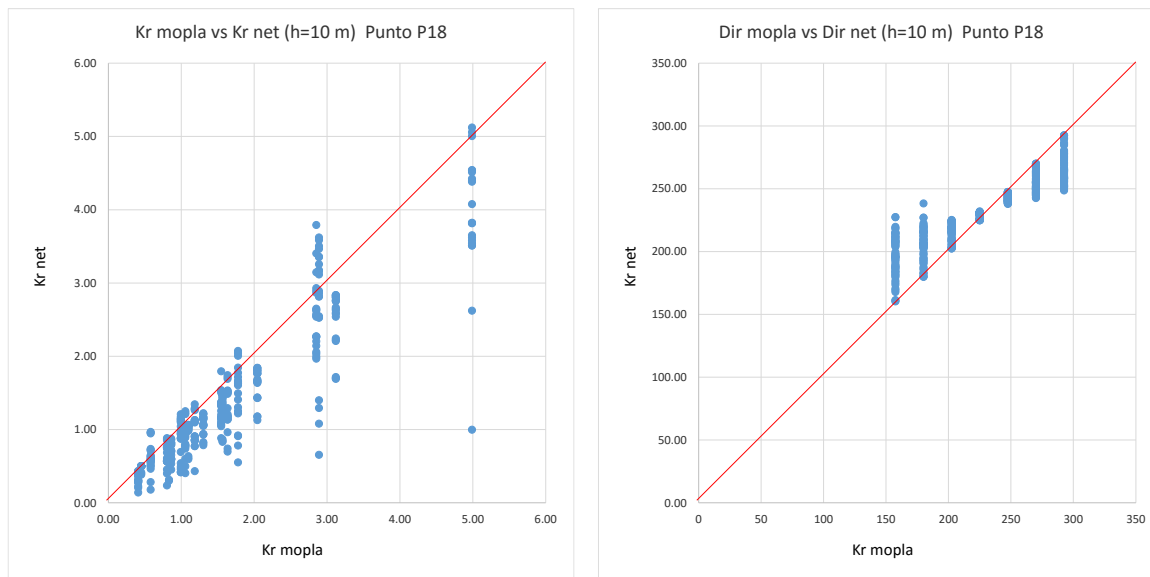


Figura 2.- Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 8 a profundidad de 5m)



*Figura 3.- Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 13 a profundidad de 7m)*

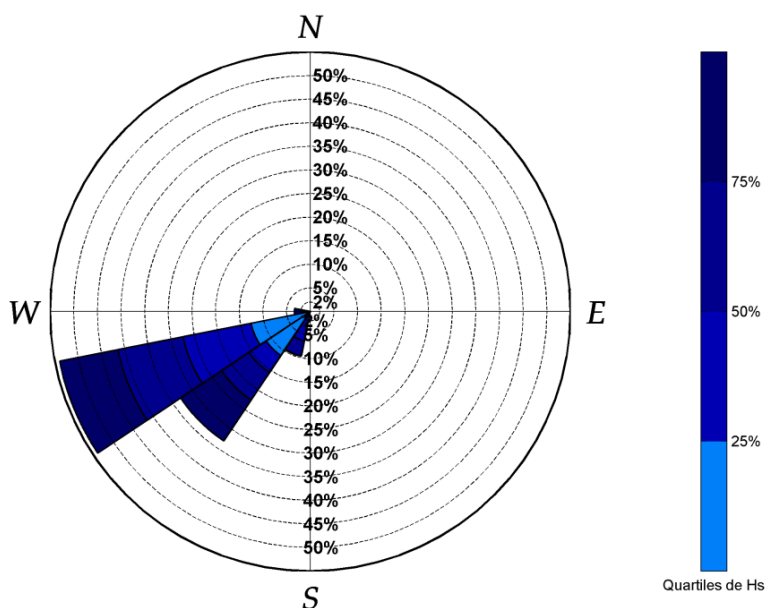


*Figura 4.- Validación cruzada de los datos de entrenamiento y test para las variables de altura de ola y dirección (Punto 18 a profundidad de 10m)*

Con las cuatro redes entrenadas es posible simular cualquier caso de oleaje, periodo, nivel y dirección de la serie NOAA, de modo que se obtiene una serie de oleaje en los nodos de control seleccionados.

## 2.4 Análisis direccional del oleaje en la costa

La representación de las rosas de oleaje de los nodos objetivo seleccionados (ver Figura 6.-), permite analizar la modificación direccional sufrida por los oleajes desde aguas profundas hasta la costa como consecuencia de su propagación. Se observa como los oleajes incidentes que alcanzan la costa, se agrupan fundamentalmente en torno a las direcciones SW y SSW.



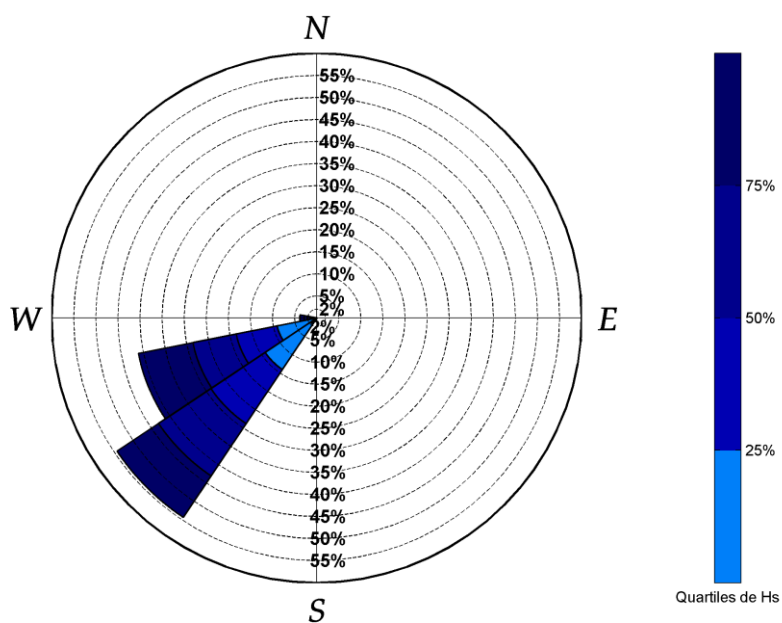
**TABLA ESTADÍSTICOS BÁSICOS**

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>90%</sub>	Hs <sub>99%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0001	0.3868	0.4152	0.4152	0.4152
SSE	0.0000	0.4402	0.4459	0.4459	0.4459
S	0.0004	0.3155	0.5005	0.5100	0.5100
SSW	0.0965	0.8216	0.9790	1.1055	1.2826
SW	0.3292	0.9200	1.5129	2.0390	2.4231
WSW	0.5397	0.8640	1.4362	2.6089	3.6553
W	0.0335	1.2157	2.2298	2.7256	2.9835
WNW	0.0006	2.4714	2.6775	2.6879	2.6879
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 5.- Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P18 (h=10m)





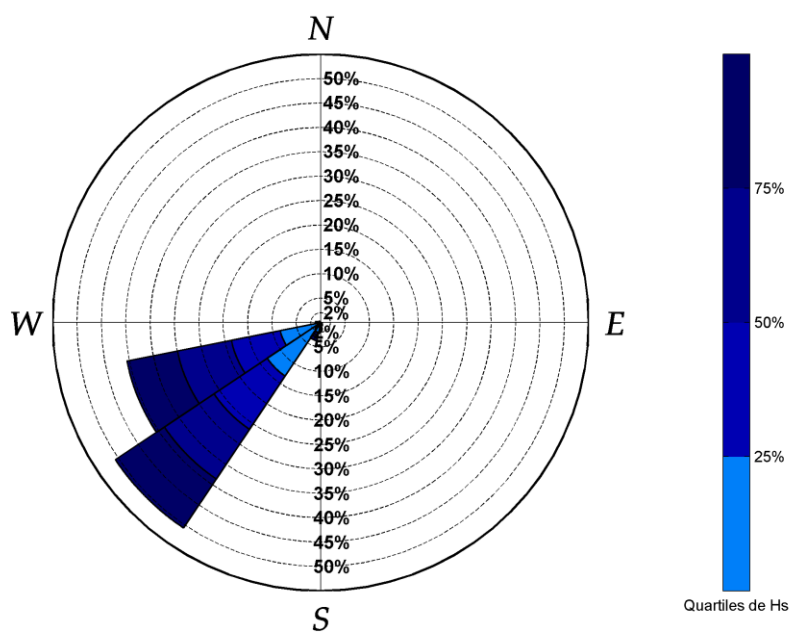
#### TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>90%</sub>	Hs <sub>99%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.3383	0.3409	0.3409	0.3409
SSW	0.0065	0.6111	0.8399	1.2300	1.5447
SW	0.5430	0.8385	1.2607	1.7800	2.3690
WSW	0.4111	0.9015	1.5219	2.6805	4.1023
W	0.0379	0.7961	1.3973	2.8216	4.2053
WNW	0.0013	1.3034	2.3363	3.6513	3.6542
NW	0.0002	2.7430	4.1379	4.1909	4.1909
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 6.- Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P13 (h=7m)



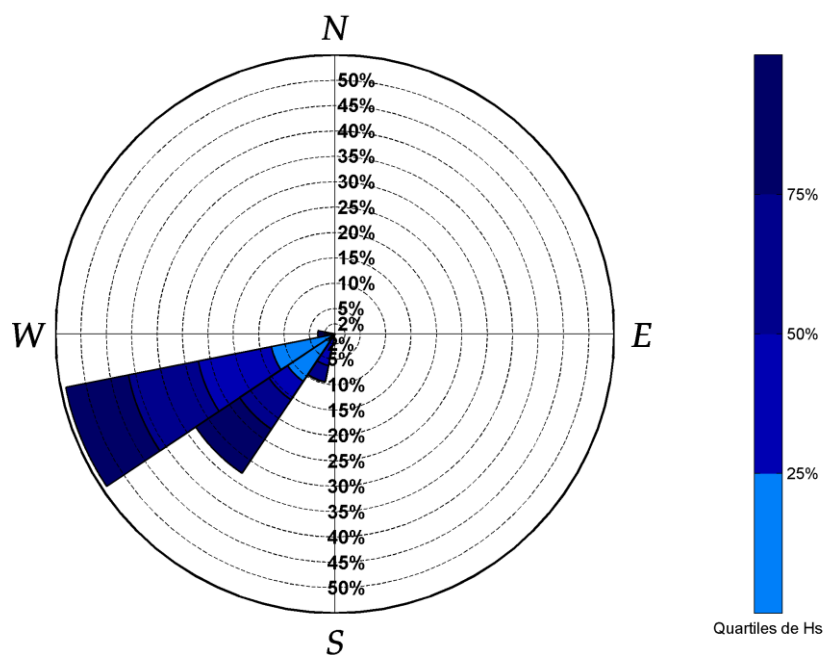


#### TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>90%</sub>	Hs <sub>99%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.1204	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.2207	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0519	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0031	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0008	0.6495	0.8839	1.0852	1.0965
SSW	0.0031	0.7512	1.1017	1.9893	2.2438
SW	0.2326	0.9157	1.4172	2.0396	3.3538
WSW	0.1715	0.9496	1.6195	2.8468	4.1703
W	0.0057	0.8069	1.4241	2.0287	2.4782
WNW	0.0001	0.8178	0.8488	0.8556	0.8556
NW	0.0730	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0932	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 7.- Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P8 (h=5m)



#### TABLA ESTADISTICOS BASICOS

Variable medida: Hs

direcciones(°)	prob.direccion	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>90%</sub>	Hs <sub>99%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0001	0.3868	0.4152	0.4152	0.4152
SSE	0.0000	0.4402	0.4459	0.4459	0.4459
S	0.0004	0.3155	0.5005	0.5100	0.5100
SSW	0.0965	0.8216	0.9790	1.1055	1.2826
SW	0.3292	0.9200	1.5129	2.0390	2.4231
WSW	0.5397	0.8640	1.4362	2.6089	3.6553
W	0.0335	1.2157	2.2298	2.7256	2.9835
WNW	0.0006	2.4714	2.6775	2.6879	2.6879
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 8.- Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en el nodo de control P3 (h=3m)

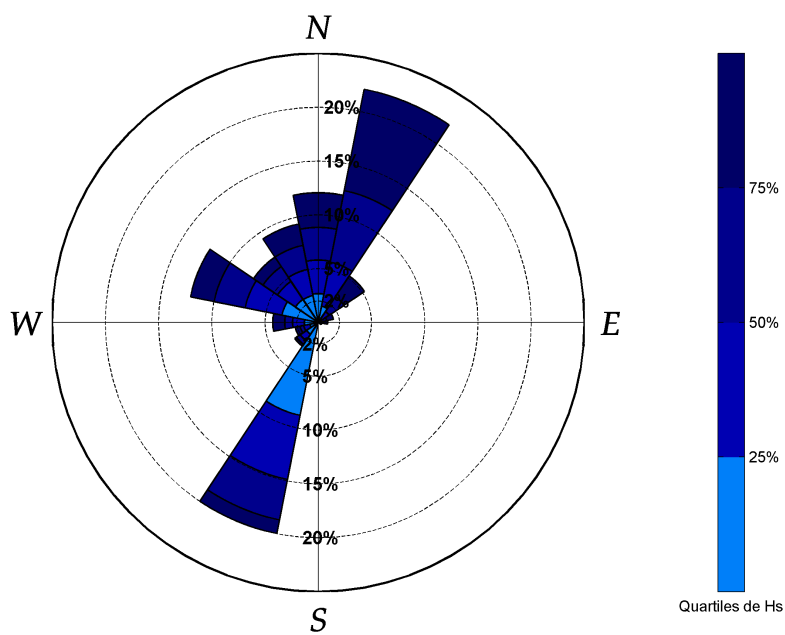


Figura 9.- Rosa de oleaje y tabla de probabilidades de Hs en aguas profundas (Datos de oleaje NOAA 1979-2012)

## 2.5 Régimen medio en la costa

Para la caracterización del régimen medio del oleaje en las proximidades de la zona de proyecto, los valores de altura de ola significativa ( $H_s$ ) de la serie de oleaje NOAA propagada a los nodos posicionados en costa han sido ajustados a la función de distribución de mejor ajuste. Los resultados obtenidos en los tres nodos escogidos como representativos, en las batimétricas de 5 m, 7 m y 10 m, se presentan en las gráficas expuestas a continuación:

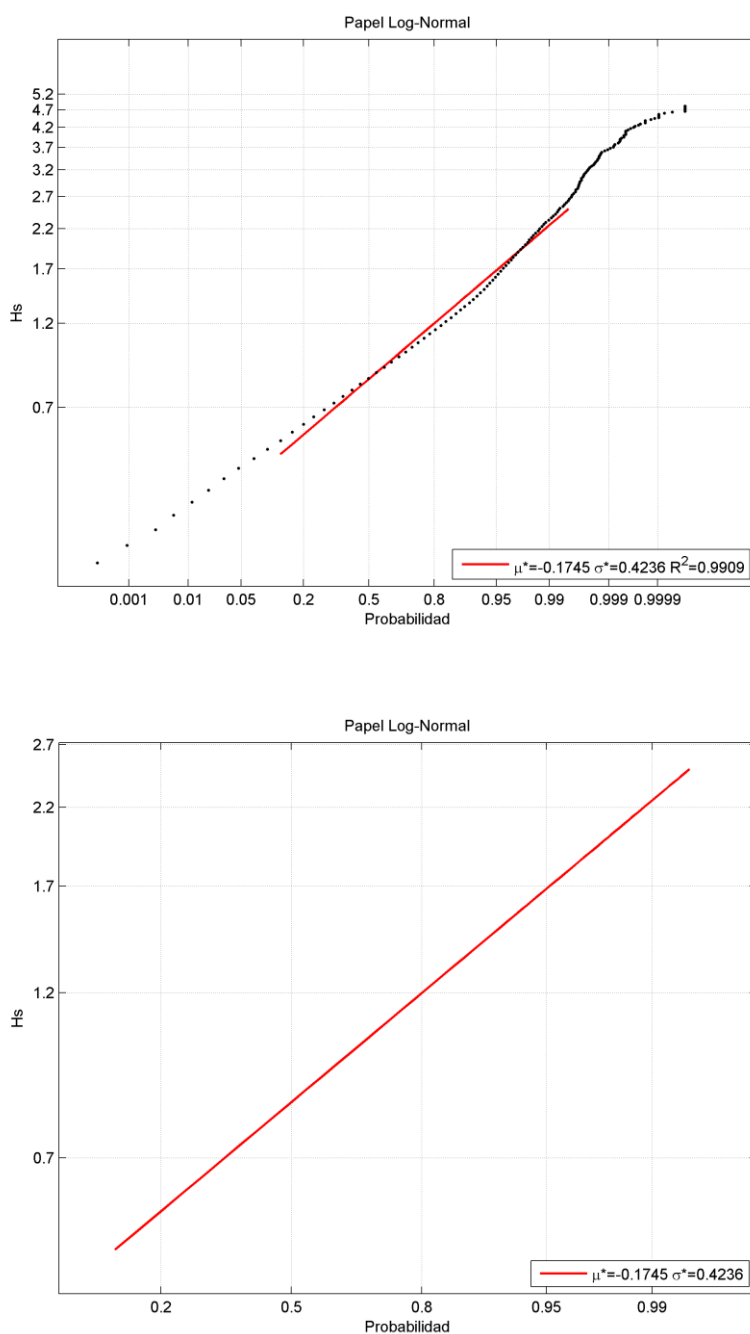


Figura 10.- Régimen medio de altura de ola en el nodo P18 ( $h=10m$ )

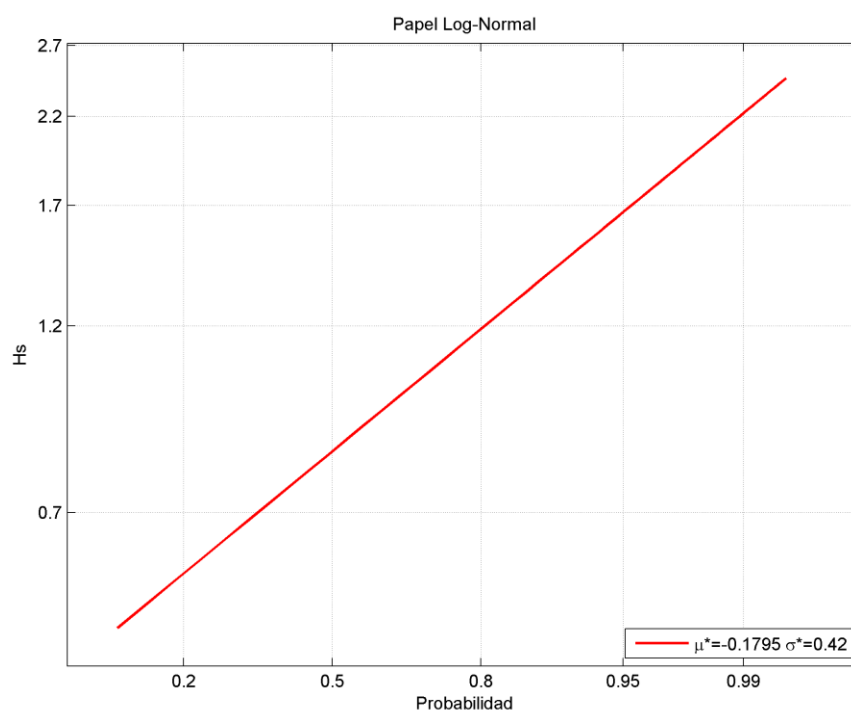
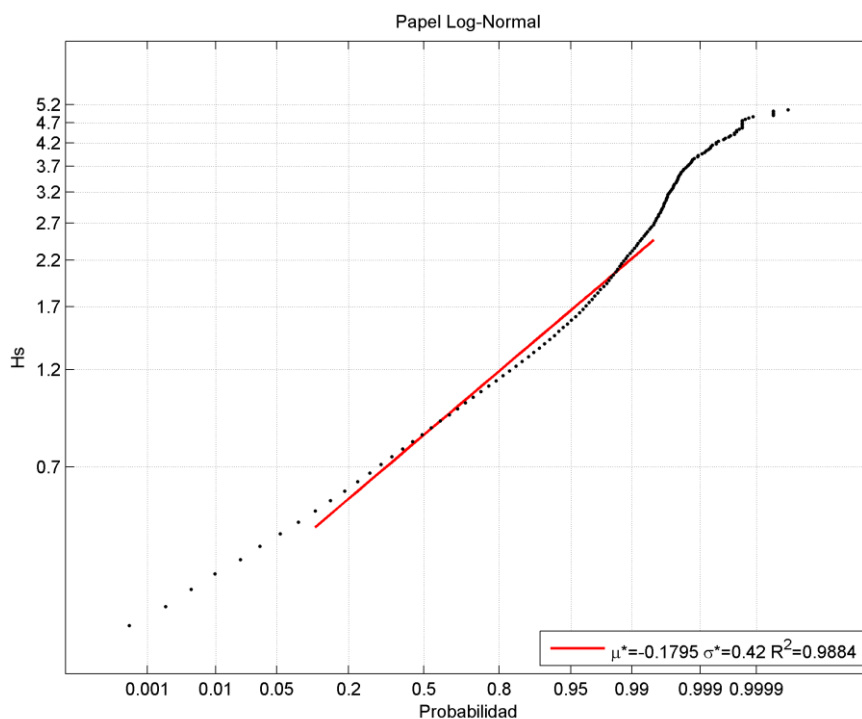


Figura 11.- Régimen medio de altura de ola en el nodo P13 ( $h=7m$ )

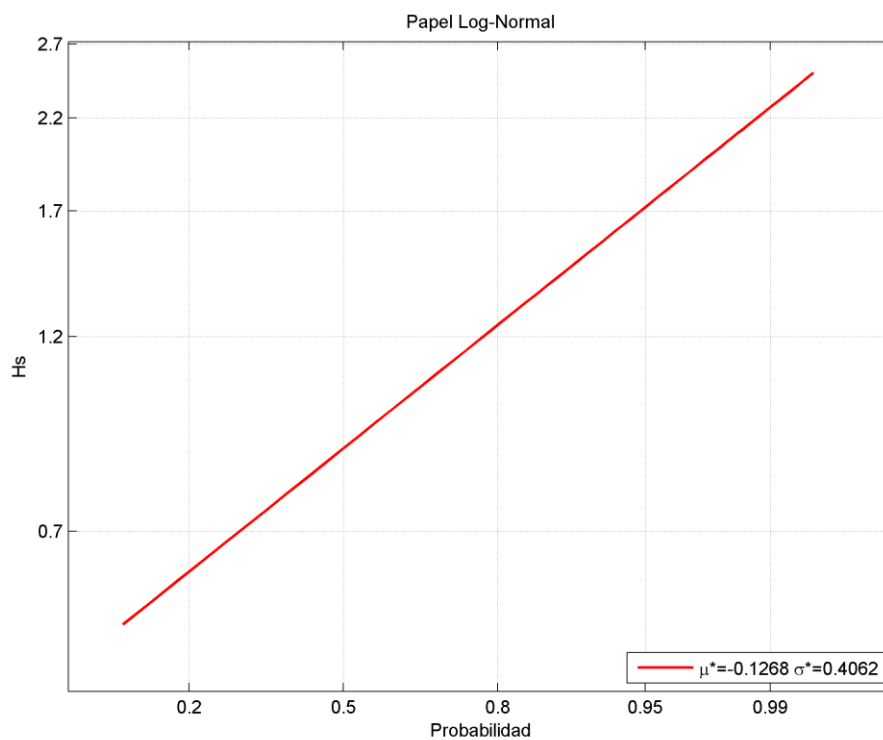
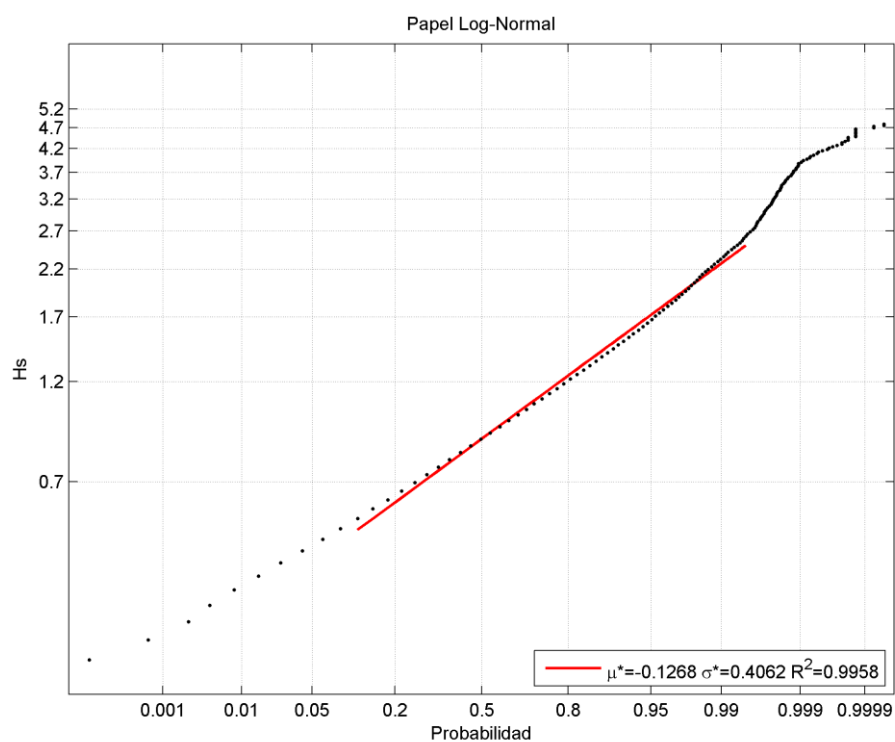


Figura 12.- Régimen medio de altura de ola en el nodo P8 ( $h=5m$ )

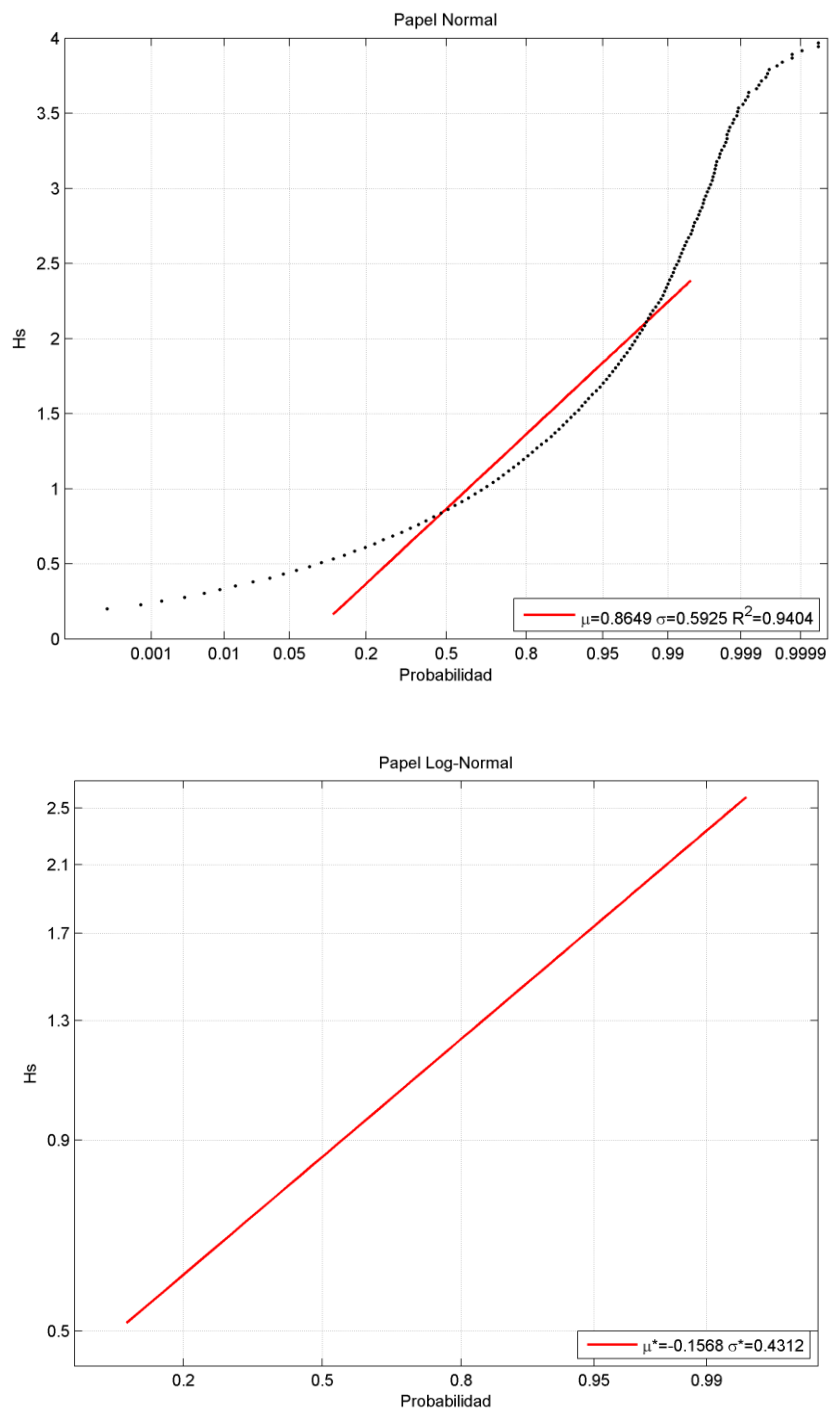


Figura 13.- Régimen medio de altura de ola en el nodo P3 ( $h=3m$ )

La relación altura de ola significativa ( $H_s$ )-Periodo de pico ( $T_p$ ) del oleaje en los nodos ha sido calculada mediante el ajuste de una función potencial a la combinación de estos parámetros. Las variables del ajuste permiten calcular el periodo de pico asociado a las alturas de ola de diseño.

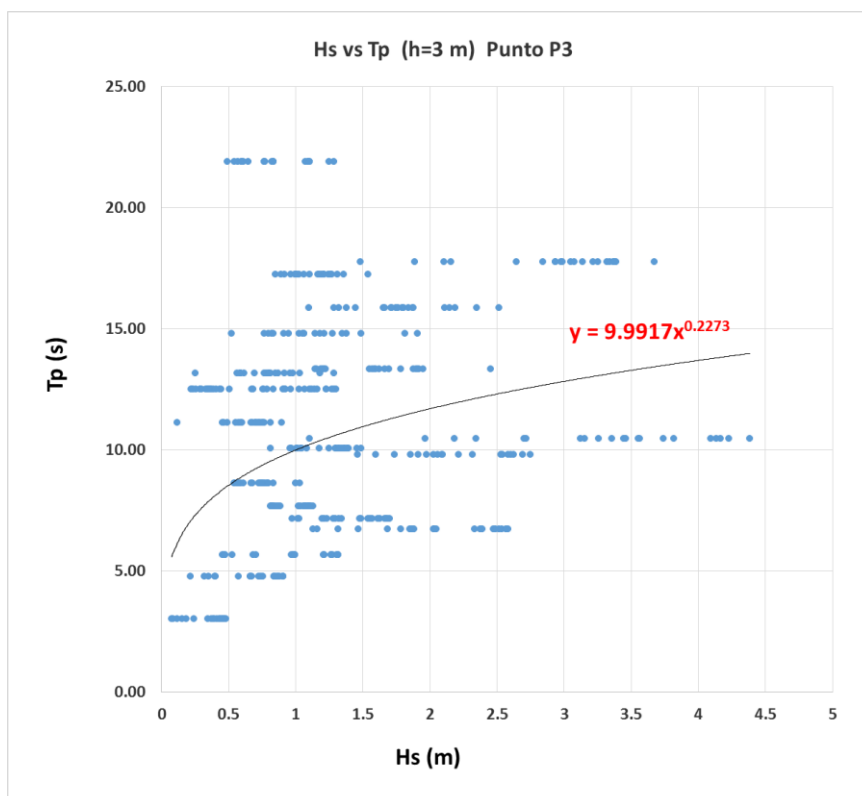


Figura 14.- Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P3 (h=3 m)

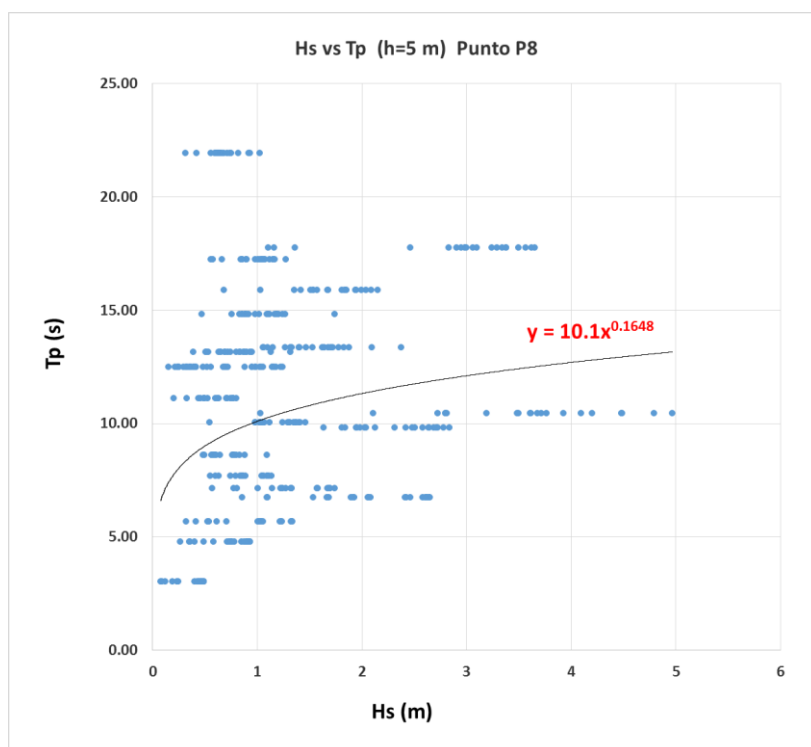


Figura 15.- Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P8 (h=5 m)



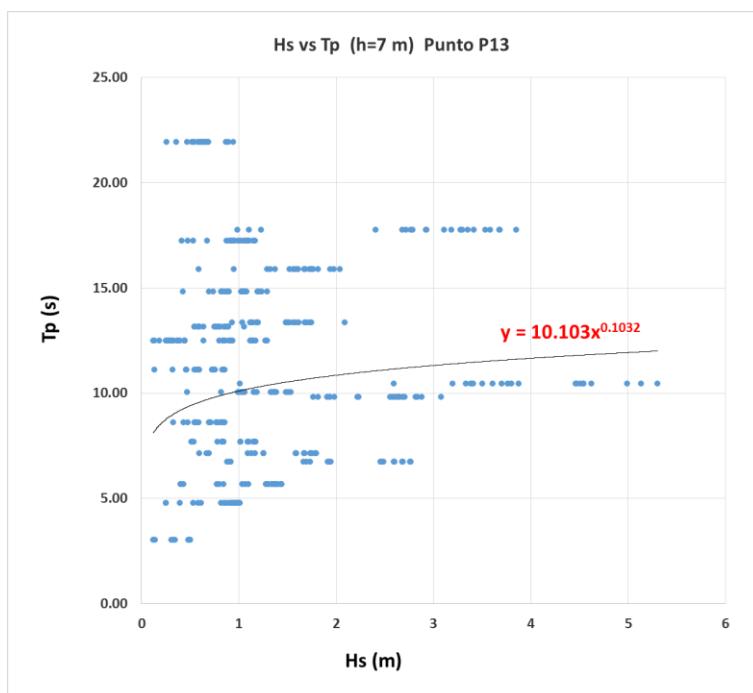


Figura 16.- Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P13 (h=7 m)

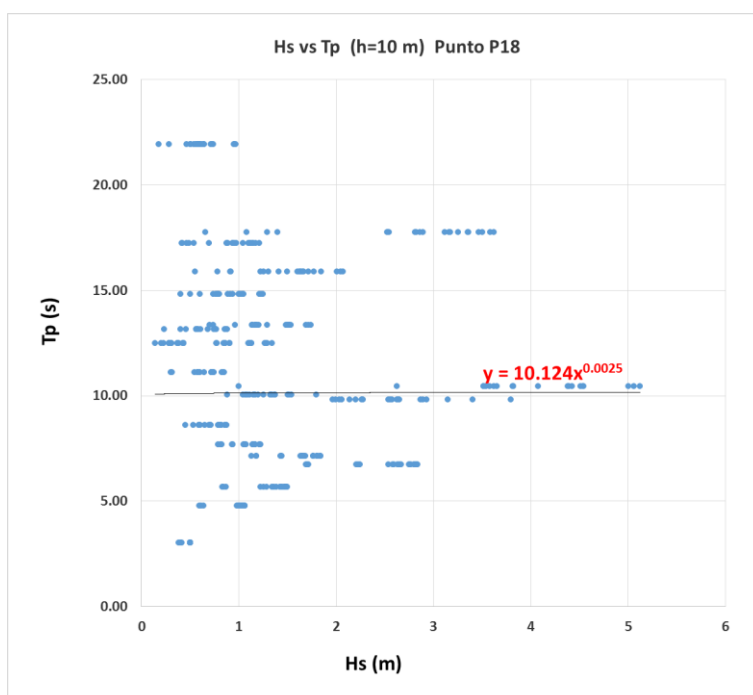


Figura 17.- Relación entre altura de ola y periodo de pico en el nodo P18 (h=10 m)

Los valores de  $(H_{s,12}, T_{p12})$  obtenidos del régimen medio reconstruido en los nodos de control, se muestran en la siguiente tabla:

Nodo	$H_{s,12}$ (m)	$T_{p,12}$ (s)
P18 (h=10m)	3.14	18.94
P13 (h=7m)	3.15	19.65
P8 (h=5m)	3.54	19.79
P3 (h=3m)	3.00	20.30

Tabla 4.- Altura de ola  $H_{s12}$  en los nodos de control

## 2.6 Régimen extremal en la costa

El ajuste de los valores máximos anuales de altura de ola del oleaje propagado a la costa se ha efectuado mediante la función de distribución biparamétrica Gumbel de máximos. El periodo de pico asociado a dichas alturas de ola se obtiene a partir de la relación  $H_s$ - $T_p$  existente para los datos NOAA en cada nodo.

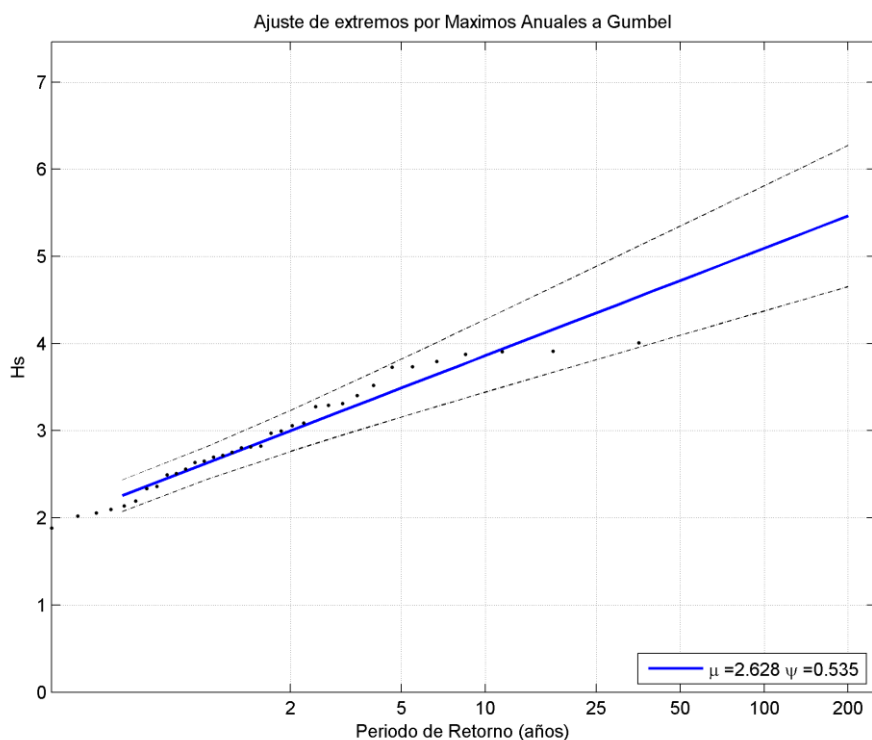


Figura 18.- Ajuste del oleaje extremal en el nodo P3 (h=3 m)

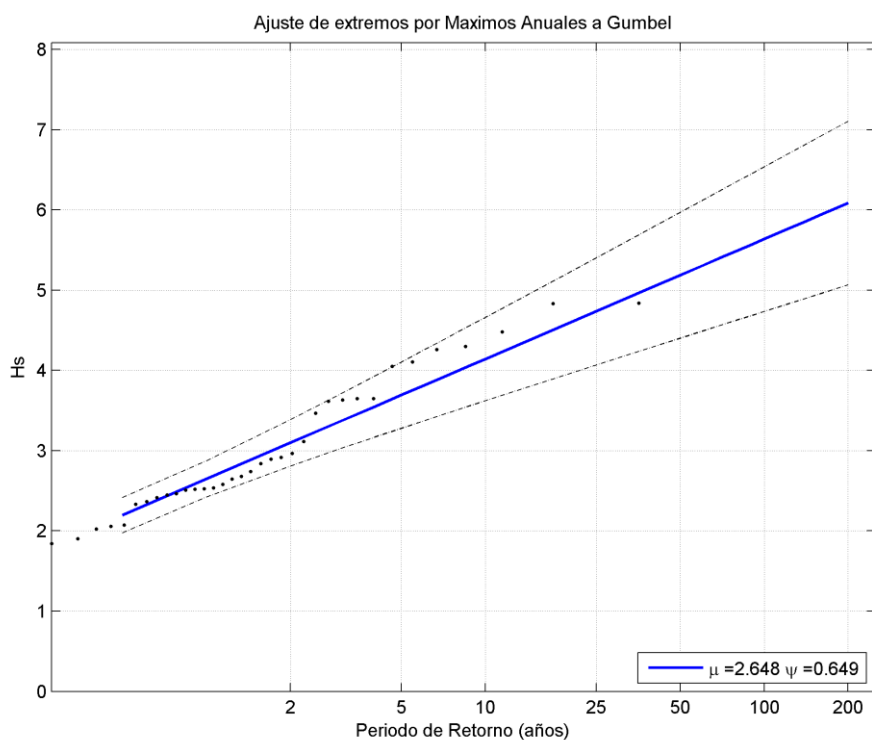


Figura 19.- Ajuste del oleaje extremal en el nodo P8 ( $h=5$  m)

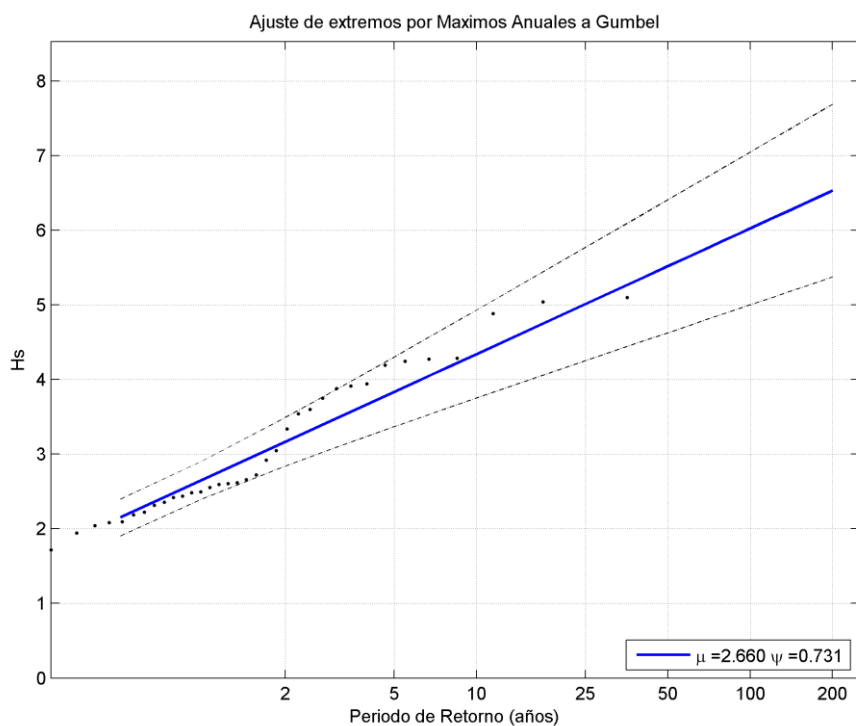


Figura 20.- Ajuste del oleaje extremal en el nodo P13 ( $h=7$  m)

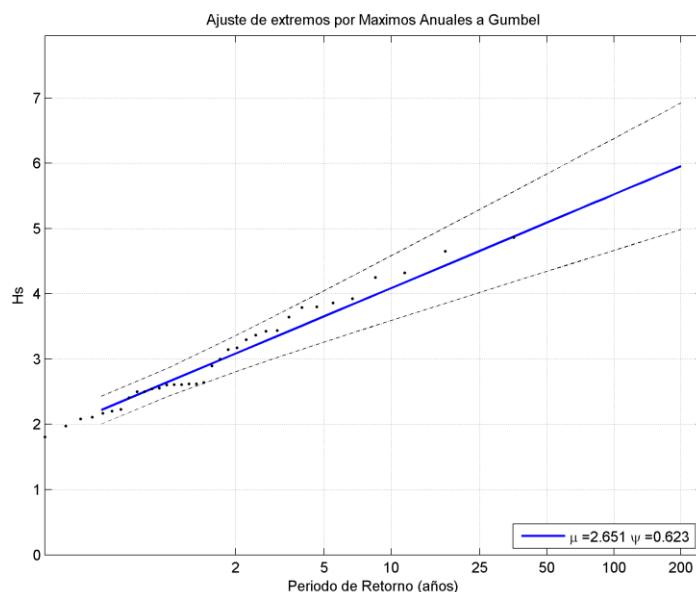


Figura 21.- Ajuste del oleaje extremal en el nodo P18 ( $h=10$  m)

A partir de los parámetros obtenidos de las funciones de distribución Gumbel de máximos, se calculan las alturas de ola en régimen extremal correspondientes a los distintos periodos de retorno de diseño asociados a las probabilidades de fallo y vida útil. Los resultados del oleaje de cálculo (sectores WNW-SSE) se muestran en la siguiente tabla:

Nodo	Localización (x)	Escala ( $\psi$ )	$H_s$ (m) $T_R=68$ años	$H_s$ (m) $T_R=143$ años	$H_s$ (m) $T_R=238$ años
P18 ( $h=10$ m)	2.651	0.623	5.27	5.74	6.06
P13 ( $h=7$ m)	2.660	0.731	5.74	6.28	6.66
P8 ( $h=5$ m)	2.648	0.649	5.38	5.87	6.20
P3 ( $h=3$ m)	2.628	0.535	4.88	5.28	6.06

Tabla 5.- Alturas de ola en régimen extremal asociadas a periodos de retorno de diseño en los nodos de control

La determinación de los periodos de pico asociados a los niveles de altura de ola de temporal se realiza mediante la relación  $H_s-T_p$  existente para los datos NOAA en cada nodo (Figura 14.- a Figura 16.-), dando como resultado:

Nodo	$T_R=68$ años		$T_R=143$ años		$T_R=238$ años	
	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
P18 ( $h=10$ m)	5.27	10.17	5.74	10.17	6.06	10.16
P13 ( $h=7$ m)	5.74	12.29	6.28	12.21	6.66	12.10
P8 ( $h=5$ m)	5.38	13.64	5.87	13.52	6.20	13.33
P3 ( $h=3$ m)	4.88	15.05	5.28	14.59	6.06	14.33

Tabla 6.- Oleaje extremal ( $H_s$ ,  $T_p$ ) asociado a diferentes periodos de retorno de diseño

## 2.7 Dirección del flujo medio de energía

El flujo de energía medio se puede calcular a partir de las siguientes expresiones:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot C_g \quad (1)$$

$$\vec{E} = \rho g \frac{H^2}{8} \quad (2)$$

A partir de la serie NOAA propagada hasta los nodos de control en aguas de profundidades reducidas, se emplea cada registro de altura de ola, periodo, dirección nivel de marea (a partir de la cual se obtiene la profundidad en el nodo de control) para calcular  $C_g$ ,  $\vec{E}$  y  $\vec{F}$ . Sumando todos los registros de la serie, y calculando la dirección del vector  $F$  resultante, se obtiene la dirección del flujo medio de energía en cada nodo de control (Tabla 7.-):

Nodo	Dirección de $\vec{F}$ (N=0°, E=90°)
P1 (h=3m)	234.5
P2 (h=3m)	230.6
P3 (h=3m)	241.5
P4 (h=3m)	246.8
P5 (h=3m)	244.3
P6 (h=5m)	237.5
P7 (h=5m)	235.7
P8 (h=5m)	230.8
P9 (h=5m)	242.2
P10 (h=5m)	242.6
P11 (h=7m)	236.5
P12 (h=7m)	238.1
P13 (h=7m)	238.5
P14 (h=7m)	237.7
P15 (h=7m)	242.6
P16 (h=10m)	236.0
P17 (h=10m)	237.2
P18 (h=10m)	238.0
P19 (h=10m)	239.8
P20 (h=10m)	237.9

Tabla 7.- Direcciones del flujo medio de energía