



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía
CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA



Universidad de Granada

Unión Europea



Fondo Europeo
de Desarrollo Regional

G-GI3002/IDII

Dragados en el sistema portuario andaluz: método para la gestión y toma de decisiones

Universidad de Granada, Universidad de
Córdoba



TAREA 3:

Caracterización conjunta de agentes y simulación



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía
CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA



Universidad de Granada

Unión Europea



Fondo Europeo
de Desarrollo Regional

14-02-2014



1.	ANTECEDENTES	6
2.	ANÁLISIS PRELIMINAR	7
2.1.	DATOS EMPLEADOS	7
	Puntos WANA.....	8
	Puntos REDMAR	11
2.2.	VARIABILIDAD DE LOS AGENTES CLIMÁTICOS	12
3.	ANÁLISIS UNIVARIADO CLIMA.....	14
3.1.	ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE	14
	Régimen de persistencia	14
	Distribución marginal estacionaria.....	15
	Distribución marginal no estacionaria	16
3.2.	PERÍODO DE PICO ESPECTRAL.....	18
	Distribución marginal estacionaria.....	18
	Distribución marginal no estacionaria	18
3.3.	VELOCIDAD DEL VIENTO.....	20
	Régimen de persistencia	20
	Distribución marginal estacionaria.....	20
	Distribución marginal no estacionaria	21
3.4.	NIVEL DEL MAR.....	23
	Marea astronómica	23
	Marea Meteorológica.....	26
4.	DEPENDENCIA TEMPORAL MULTIVARIADA DE LOS AGENTES CLIMÁTICOS: MODELO VAR 33	
5.	SIMULACIÓN DEL CLIMA	34
5.1.	ANÁLISIS DE DISTRIBUCIONES UNIVARIADAS	35
5.2.	ANÁLISIS DE DISTRIBUCIONES BIVARIADAS	39
6.	REFERENCIAS	41



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Plano de situación	7
Figura 2: Proporción de datos útiles por año	8
Figura 3: Histograma normalizado para las variables H_{m0} (panel a), T_p (panel b) y V_v (panel c) ...	9
Figura 4: Rosa del oleaje (panel a) y del viento (panel b)	10
Figura 5: Nivel del Marea para las estaciones las estaciones REDMAR 3327 (panel a) y 3329 (panel b). Los espacios en blanco representan un vacío en la serie temporal	11
Figura 6: Box-plot de los datos separados por mes (panel a) y por años (panel b), para cada una de las variables aleatorias: altura de ola significativa H_{m0} , período de pico espectral T_p , dirección media de procedencia del oleaje θ_M , velocidad del viento V_v y dirección media de procedencia del viento θ_v	12
Figura 7: Media, desviación estándar y autocorrelación de desfase 1 (ACF), para la altura de ola significativa (panel a), el período de pico espectral (panel b) y la velocidad de viento (panel c) 13	13
Figura 8: Régimen de persistencia según número de ocurrencias (panel a) y normalizado (panel b) para la altura de ola significativa	15
Figura 9: Distribuciones estacionarias ajustadas a la altura de ola significativa H_{m0}	16
Figura 10: Cuantiles empíricos y modelados para probabilidad de no excedencia del 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 99%, 99.9%, correspondientes a la variable H_{m0}	17
Figura 11: PDF y CDF marginal anual empírica y modelada con LNGPD-NE, correspondientes a la variable H_{m0}	17
Figura 12: Distribuciones estacionarias ajustadas al período de pico espectral T_p	18
Figura 13: Cuantiles empíricos y modelados para probabilidad de no excedencia del 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 99%, 99.9%, correspondientes a la variable T_p	19
Figura 14: PDF y CDF marginal anual empírica y modelada con LN2MIX-NE, correspondientes a la variable T_p	19
Figura 15: Régimen de persistencia según número de ocurrencias (panel a) y normalizado (panel b) para la altura de ola significativa	20
Figura 16: Distribuciones estacionarias ajustadas a la velocidad de viento V_v	21
Figura 17: Cuantiles empíricos y modelados para probabilidad de no excedencia del 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 99%, 99.9%, correspondientes a la variable V_v	22
Figura 18: PDF y CDF marginal anual empírica y modelada con WBGPD-NE, correspondientes a la variable V_v	22
Figura 19: Relación de amplitudes r (panel a), diferencia entre fases $\Delta\theta$ (panel b) y nivel del mar (cm, panel c) para el mareógrafo 3327	25
Figura 20: Relación de amplitudes r (panel a), diferencia entre fases $\Delta\theta$ (panel b) y nivel del mar (cm, panel c) para el mareógrafo 3329	25
Figura 21: Densidad espectral (panel a) y logaritmo de la densidad espectral (panel b) frente a la frecuencia (horas^{-1}) para el residuo meteorológico en el mareógrafo 3327	26
Figura 22: Densidad espectral (panel a) y logaritmo de la densidad espectral (panel b) frente a la frecuencia (horas^{-1}) para el residuo meteorológico en el mareógrafo 3329	26
Figura 23: Distribución ajustada al régimen medio de la marea meteorológica para el mareógrafo 3327	27



Figura 24: Distribución ajustada al régimen medio de la marea meteorológica para el mareógrafo 3329..... 28

Figura 25: Régimen extremal de máximos para el mareógrafo 3327 (panel a) y 3329 (panel b) 29

Figura 26: Distribución ajustada al régimen extremal de máximos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3327..... 30

Figura 27: Distribución ajustada al régimen extremal de máximos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3329..... 30

Figura 28: Régimen extremal de mínimos para el mareógrafo 3327 (panel a) y 3329 (panel b) 31

Figura 29: Distribución ajustada al régimen extremal de mínimos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3327..... 32

Figura 30: Distribución ajustada al régimen extremal de mínimos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3329..... 32

Figura 31: PDF y CDF de los datos de altura de ola significativa para la señal original y simulada (panel a); PDF (panel b) y CDF en papel log normal (panel c), calculadas para cada año, de los datos originales (negro), y de los simulados (gris)..... 35

Figura 32: PDF y CDF de los datos de período de pico espectral para la señal original y simulada (panel a); PDF (panel b) y CDF en papel log normal (panel c), calculadas para cada año, de los datos originales (negro), y de los simulados (gris)..... 36

Figura 33: PDF y CDF de los datos de velocidad de viento para la señal original y simulada (panel a); PDF (panel b) y CDF en papel log normal (panel c), calculadas para cada año, de los datos originales (negro), y de los simulados (gris)..... 37

Figura 34: Simulaciones de altura de ola H_{m0} mediante el método VAR 38

Figura 35: Distribución bivariada empírica $H_{m0}-T_p$ de los datos originales (panel a) y de los simulados (panel b)..... 39

Figura 36: Distribución bivariada empírica $H_{m0}-V_v$ de los datos originales (panel a) y de los simulados (panel b)..... 40

Figura 37: Distribución bivariada empírica T_p-V_v de los datos originales (panel a) y de los simulados (panel b)..... 40



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Frecuencia (horas^{-1}) y Amplitud (cm) con sus respectivos errores para los armónicos más significativos en el mareógrafo 3327.....	23
Tabla 2: Frecuencia (horas^{-1}) y Amplitud (cm) con sus respectivos errores para los armónicos más significativos en el mareógrafo 3329.....	24



1. ANTECEDENTES

El 15 de noviembre de 2013 comenzaron los trabajos del Convenio G-GI3002/IDII titulado Dragados en el sistema portuario andaluz: método para la gestión y toma de decisiones. En el marco del citado convenio, en este informe *“Caracterización conjunta de agentes y simulación”* se recogen los resultados de la Tarea 3, así como parte de los correspondientes a la Tarea 2. Este informe ha sido realizado por Miguel Ángel Reyes Merlo y Rafael Bergillos Meca, bajo la dirección de los doctores Manuel Díez Minguito y el IP del Proyecto Miguel Ortega Sánchez.

2. ANÁLISIS PRELIMINAR

2.1. DATOS EMPLEADOS

En este trabajo se han empleado los siguientes datos:

- Oleaje direccional proveniente de retroanálisis, correspondiente al punto WANA 1052048 para el período 1996-2012
- Nivel del Mar de las estaciones REDMAR 3327 y 3329, para los períodos 2005-2008 y 2008-2013, respectivamente

El emplazamiento de los puntos y estaciones se muestra en la Figura 1 :



Figura 1: Plano de situación del punto WANA 1052048 y las estaciones de medida REDMAR 3327 y 3329.

Puntos WANA

De entre toda la información que incluyen los puntos WANA, se ha trabajado con las siguientes variables, cuyo período de muestreo es de 3 horas:

- H_{m0} : Altura significativa espectral (m)
- T_p : Período de pico espectral (s)
- Dir: Dirección media de procedencia del oleaje ($0^\circ=N, 90^\circ=E$)
- V_v : Velocidad media del viento
- DirV: Dirección media de procedencia del viento ($0^\circ=N, 90^\circ=E$)

En primer lugar se ha analizado la proporción de datos disponible para cada año de registro. Como valor apto se ha escogido el umbral del 80%. De la Figura 2 se desprende que los años 1995 y 2013 no cumplen esta condición, por lo que no se han considerado para el resto del informe.

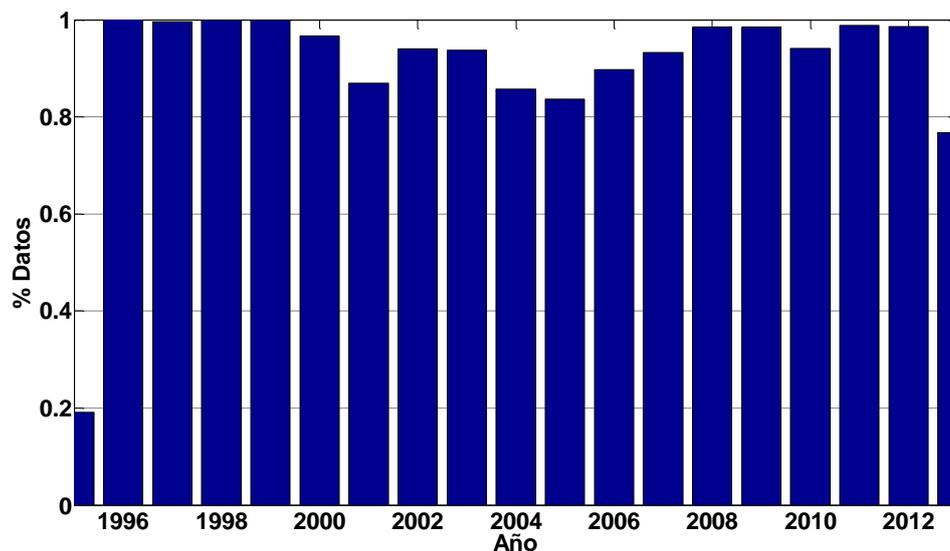


Figura 2: Proporción de datos útiles por año

En la Figura 3 se ha representado un histograma de las variables H_{m0} , T_p y V_v . Para la altura de ola significativa, los valores más frecuentes están comprendidos entre 0,5 y 1 m; para el período de pico en torno a 4 y 6 segundos y para la velocidad de viento sobre los 4 y 5 m/s.

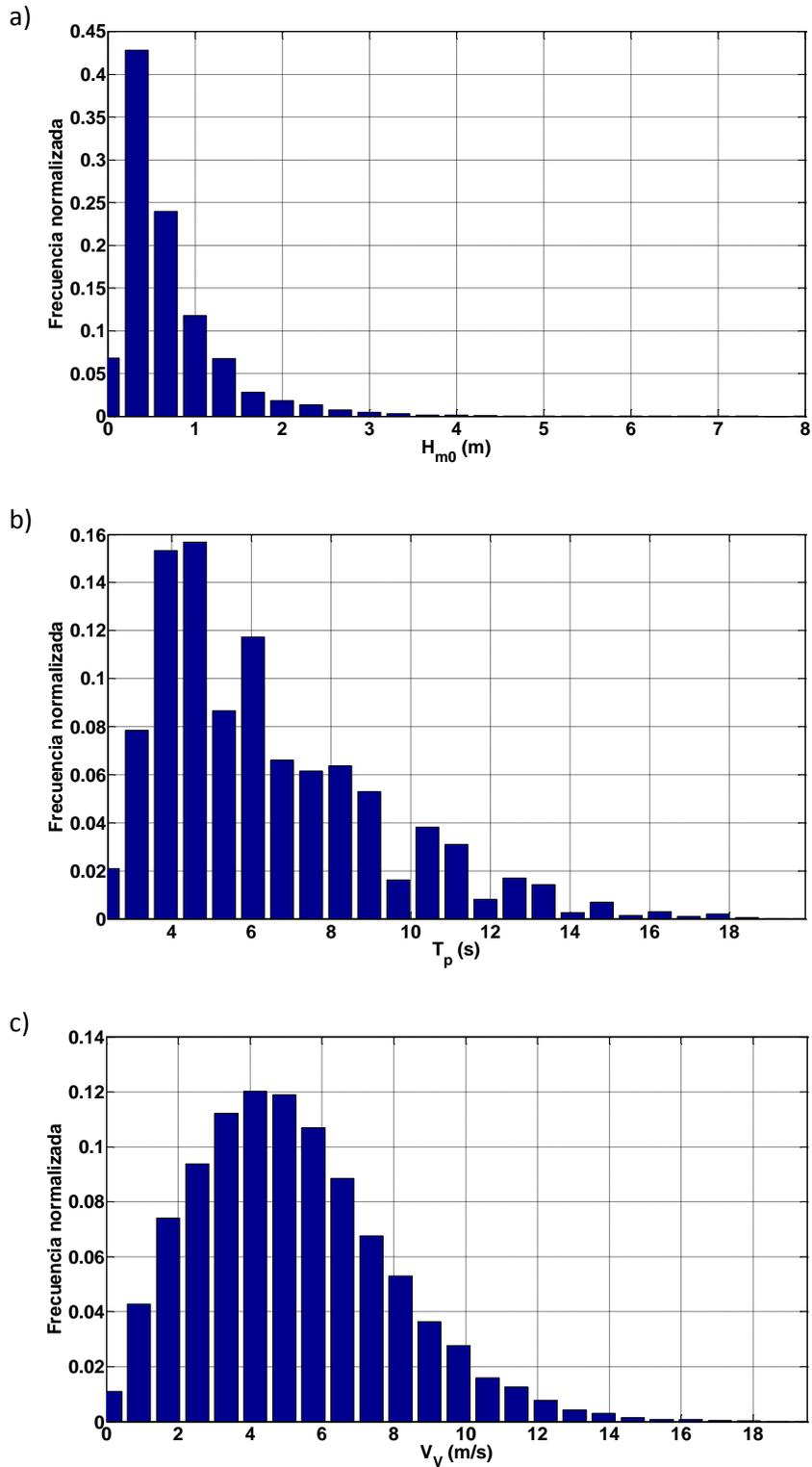


Figura 3: Histograma normalizado para las variables H_{m0} (panel a), T_p (panel b) y V_v (panel c)

Rosa del Viento y del Oleaje

Para el punto WANA de estudio, las rosas del oleaje y del viento son las mostradas en la Figura 4:

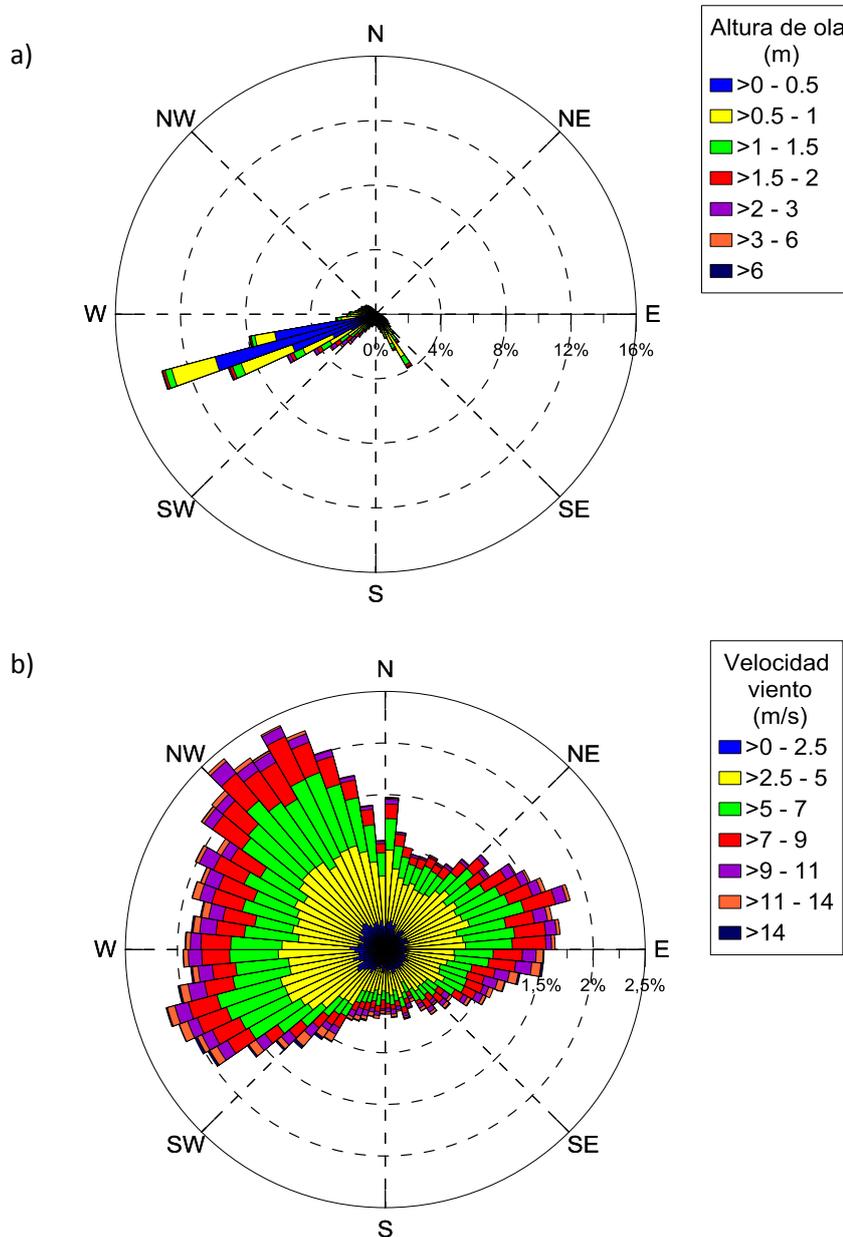


Figura 4: Rosa del oleaje (panel a) y del viento (panel b)

Para el caso del oleaje, tanto la dirección de procedencia más intensa como la más frecuente coinciden, aproximadamente, con la Oeste sudoeste.

Para el caso del viento, el reinante es aproximadamente de procedencia Noroeste. El viento dominante es, aproximadamente, de procedencia Oeste sudoeste.

Puntos REDMAR

Un mareógrafo registra los niveles momentáneos que experimenta la superficie del mar, considerando ésta como una lámina de agua cuando está exenta de oleaje, o sea, de movimientos de corto periodo. Por eso, de aquí en adelante, se considera equivalente el Nivel de Marea al Nivel del Mar. De entre toda la información que incluyen los puntos REDMAR, en este documento se trabaja con las siguientes variables, provenientes de un filtrado digital que elimina cualquier componente de energía con periodo inferior a la hora:

- NivH: Nivel del Mar (cm)
- MarH: Marea astronómica (cm)
- ResH: Residuo o Marea meteorológica horaria; $ResH = NivH - MarH$ (cm)

Para los distintos aparatos, se tienen los niveles de la Figura 5:

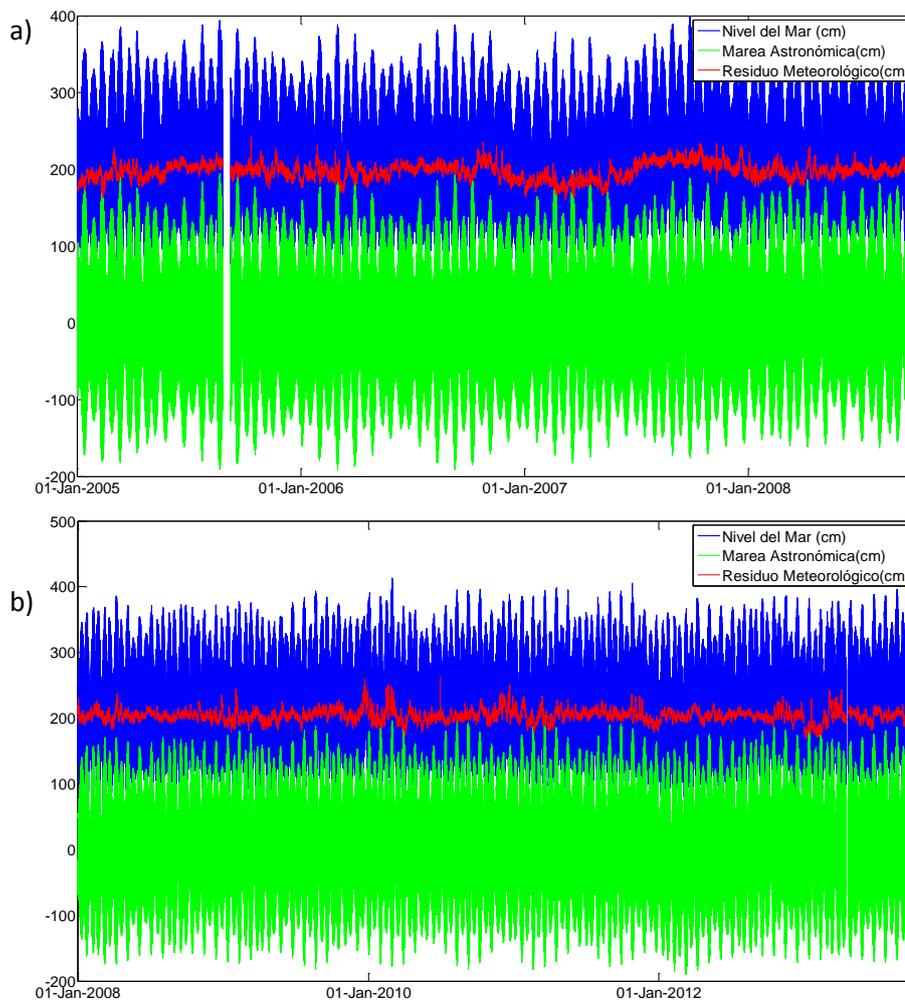


Figura 5: Nivel del Marea para las estaciones las estaciones REDMAR 3327 (panel a) y 3329 (panel b). Los espacios en blanco representan un vacío en la serie temporal

2.2. VARIABILIDAD DE LOS AGENTES CLIMÁTICOS

En la realización de estas tareas se ha tenido especialmente en cuenta la variabilidad que exhiben los agentes climáticos. Las primeras aproximaciones para estudiar estas variaciones vienen representadas en las Figura 6 y Figura 7, para los datos del punto WANA.

En la Figura 6 se muestran los gráficos de cajas mensuales (panel a) y anuales (panel b), respectivamente. Éstos proporcionan la siguiente información:

- Mediana (o cuantil de 50%, Q2), señalada con una línea horizontal roja
- Cuantiles de probabilidad empírica 25% y 75% (Q1 y Q3), señalados con una caja azul
- Límites correspondientes a $Q1-1,5 \cdot (Q3-Q1)$ y $Q2+1,5 \cdot (Q3-Q1)$, señalados con líneas verticales negras (en caso de que los datos siguiesen una distribución normal estos límites comprenderían aproximadamente al 99,3% de los datos)

La amplitud de la caja azul (diferencia entre Q3 y Q1) da una medida de la variabilidad de los datos.

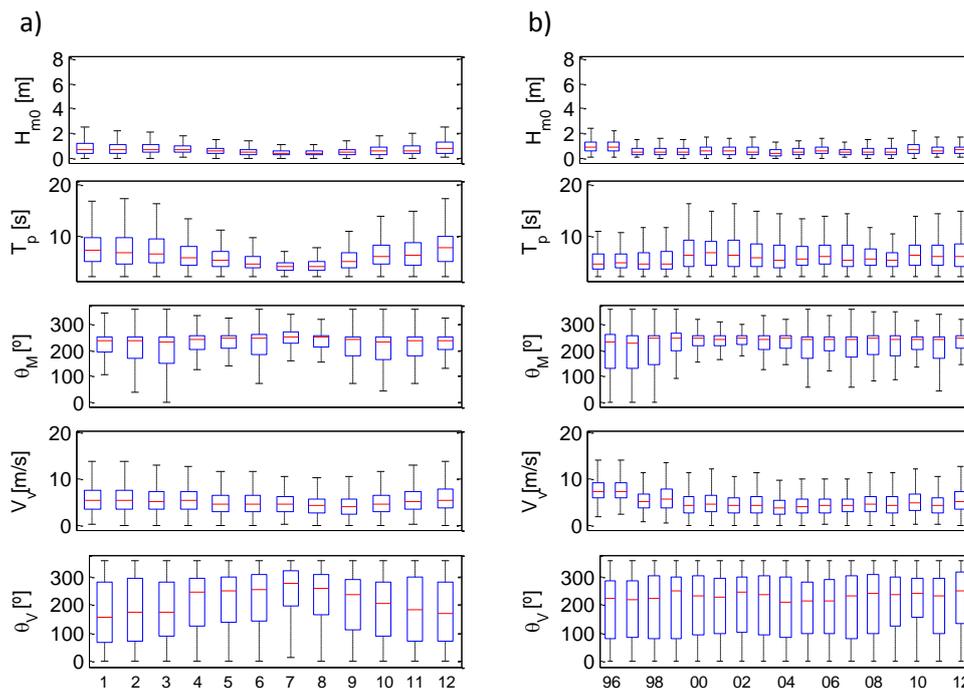


Figura 6: Box-plot de los datos separados por mes (panel a) y por años (panel b), para cada una de las variables aleatorias: altura de ola significativa H_{m0} , período de pico espectral T_p , dirección media de procedencia del oleaje θ_M , velocidad del viento V_v y dirección media de procedencia del viento θ_v

Se identifica una variación estacional (Figura 6, panel a) de ciclo anual en los la altura de ola significativa, período pico espectral y velocidad y dirección de viento, tanto en mediana como en dispersión. La dirección media del oleaje también presenta variación estacional, aunque no tan clara como en las variables anteriores.

También se observa que los datos presentan variabilidad interanual (Figura 6, panel b) tanto en media como en dispersión, siendo especialmente notoria en el registro de altura de ola significativa y período de pico espectral.

Se concluye que todas las variables presentan variabilidad estacional e interanual. Dado que la duración del registro no es lo suficientemente amplia como para hacer un análisis adecuado de la variabilidad interanual, en este trabajo sólo se considera la variabilidad estacional.

En la Figura 7 se representan la media, la desviación estándar y la autocorrelación de desfase 1 de las variables altura de ola significativa, período de pico espectral y velocidad media de viento, calculadas para cada instante de medida del año y promediadas con una media móvil de 10 semanas. Las variables direccionales (dirección media del oleaje y dirección de viento) no se incluyen debido a que su media y desviación estándar no pueden calcularse de igual manera que en las variables lineales.

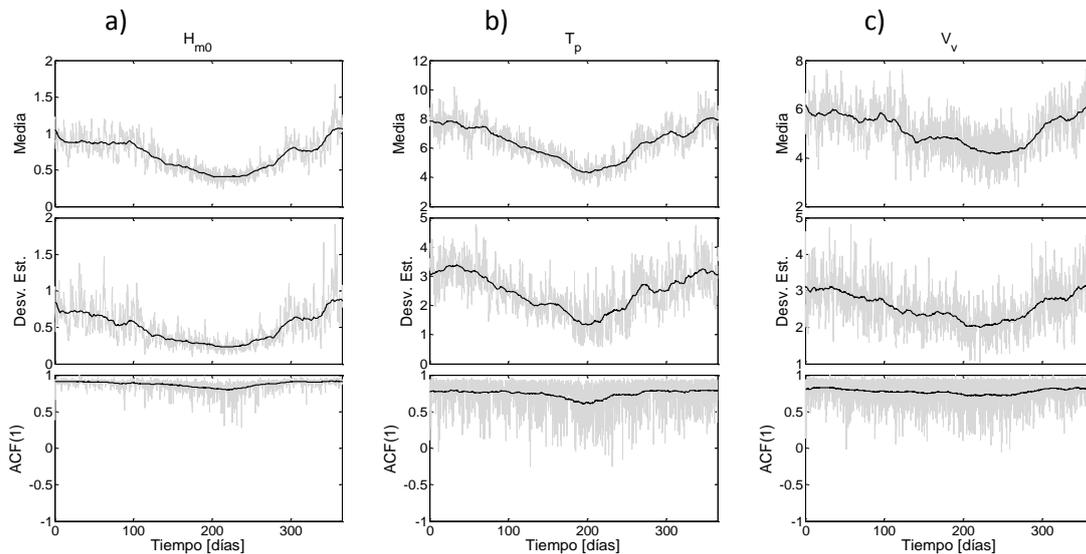


Figura 7: Media, desviación estándar y autocorrelación de desfase 1 (ACF), para la altura de ola significativa (panel a), el período de pico espectral (panel b) y la velocidad de viento (panel c)

En la Figura 7 se observa una marcada variación estacional tanto en la media como en la variación estándar para las tres variables. En cambio, la autocorrelación de desfase 1 no presenta una variabilidad tan clara.



3. ANÁLISIS UNIVARIADO DEL CLIMA

El análisis univariado del clima se refiere al estudio de las variables climáticas de manera independiente, sin tener en cuenta su interacción con las demás.

Para las variables del punto WANA H_{m0} , T_p y V_v^1 el tratamiento será muy similar: cálculo del régimen de persistencia (excepto para T_p) y ajuste de los datos tanto a una distribución estacionaria como no estacionaria (según se tenga o no en cuenta la variabilidad estacional).

En este apartado se incluye, además, el estudio del nivel del mar. Para ambos puntos REDMAR la señal se descompone en una componente de marea astronómica y otra meteorológica. Para la marea astronómica se calculan las amplitudes y fases de los distintos armónicos de marea, lo que se empleará para hacer una breve descripción del comportamiento dicha onda. Para la marea meteorológica se obtiene el espectro de densidad energía, así como el régimen medio y extremal.

3.1. ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

En este apartado se estudian el régimen de persistencia y las distribuciones marginal estacionaria y no estacionaria de la altura de ola significativa.

Régimen de persistencia

Se obtiene el régimen de persistencia tanto en número de ocurrencias como de frecuencia normalizada para los valores de H_{m0} correspondientes a los cuantiles 0.1, 0.5, 0.9 y 0.99 que se relacionan, respectivamente, con una altura de ola de 0.2, 0.6, 1.4 y 2.9 m.

¹ En este apartado no se trabaja con las variables direccionales. Una aproximación al uso de dichas variables puede hacerse asumiendo que son variables lineales (ver (3)), aunque también podría analizarse el uso de distribuciones de variables direccionales, (e.g. wrapped normal distribution, ver (6))

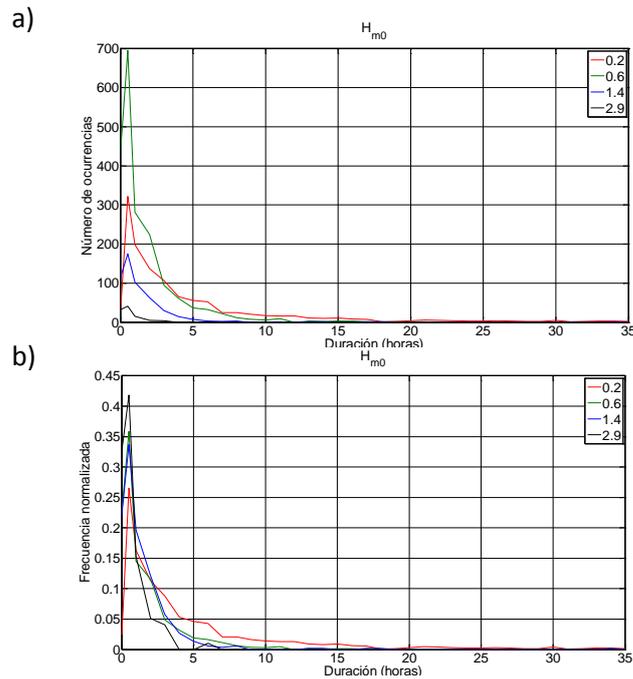


Figura 8: Régimen de persistencia según número de ocurrencias (panel a) y normalizado (panel b) para la altura de ola significativa

Se observa cómo disminuye la frecuencia normalizada drásticamente en torno a las 3-5 horas para el cuantil 0.99, resultado que se tendrá en cuenta para el régimen extremo de la marea meteorológica.

Distribución marginal estacionaria

De entre las distribuciones Log-Normal, Weibull y Gamma, la distribución Log-Normal (LN) es la que presenta mejor ajuste.

A continuación, se emplea la distribución mixta estacionaria (LNGPD, ver (1)) para mejorar el ajuste.

El ajuste obtenido (PDF y CDF) con la LN y LNGPD se representa en la Figura 9. Se puede observar que LNGPD proporciona un mejor ajuste de los datos que la LN.

El umbral superior obtenido con LNGPD es de 2.1 m, el cual podría usarse para estimar el régimen de picos sobre el umbral (POT).

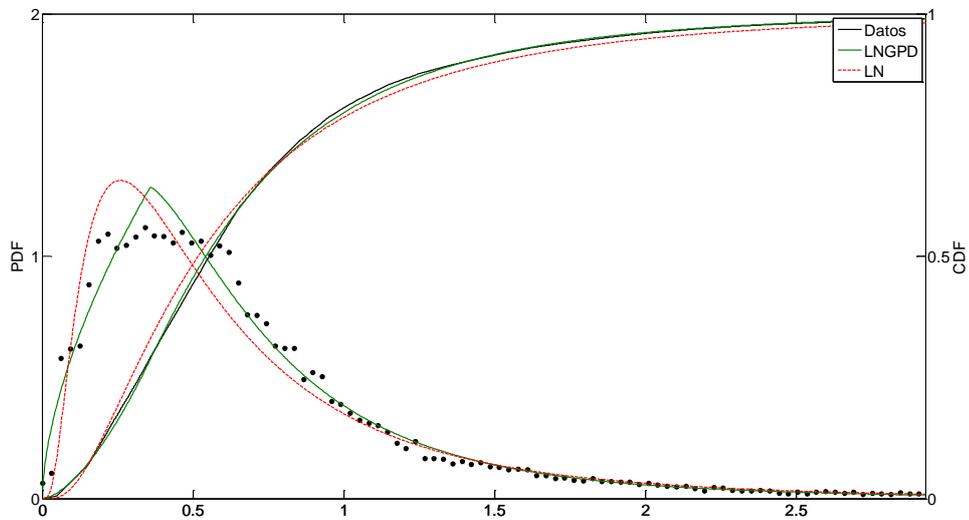


Figura 9: Distribuciones estacionarias ajustadas a la altura de ola significativa H_{m0}

Distribución marginal no estacionaria

De la Figura 7 se observa que tanto la media como la desviación estándar de los datos de altura de ola significativa presentan variaciones estacionales. Para realizar un mejor ajuste de los datos se emplea la versión no estacionaria de la LNGPD, denominada LNGPD-NE (2).

Los parámetros del modelo se aproximan mediante series de Fourier de hasta cuarto orden. El mejor ajuste, medido a través del Bayesian Information Criterion (BIC, consultar (2)) es el [4 2 1], correspondiente a una aproximación de cuarto orden en la media, de segundo orden en la desviación estándar y de primer orden en el parámetro de forma de la GPD superior.

En la Figura 10 se representan los cuantiles empíricos y modelados (LNGPD-NE) para distintos valores de probabilidad de no excedencia. Se observa cómo el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad.

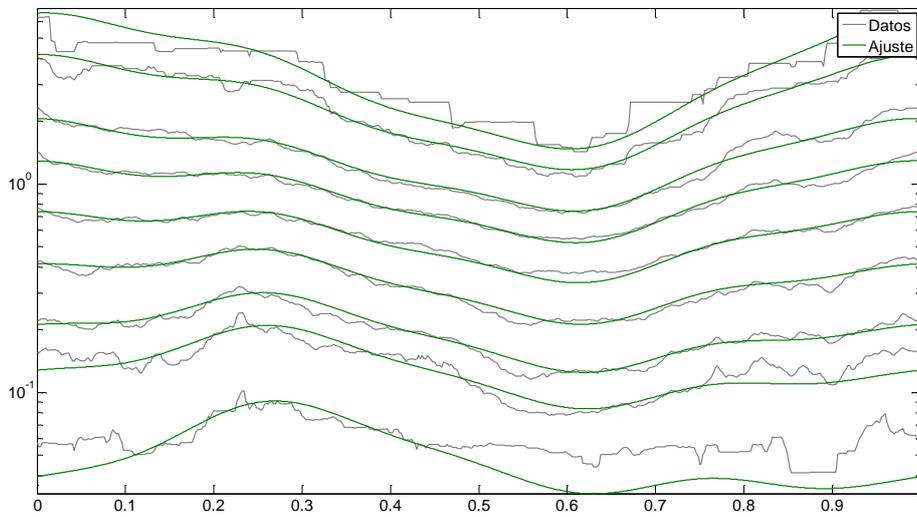


Figura 10: Cuantiles empíricos y modelados para probabilidad de no excedencia del 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 99%, 99.9%, correspondientes a la variable H_{m0}

En la Figura 11 se representan las PDF y CDF anuales, tanto empíricas como modeladas. Se observa que el ajuste de LNGPD-NE a los datos medidos es muy bueno

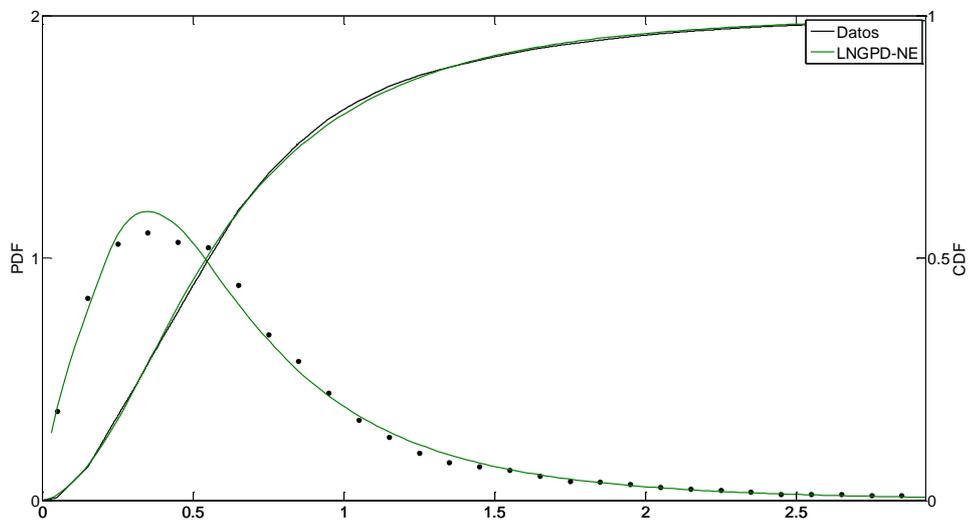


Figura 11: PDF y CDF marginal anual empírica y modelada con LNGPD-NE, correspondientes a la variable H_{m0}

3.2. PERÍODO DE PICO ESPECTRAL

En este apartado se estudian las distribuciones marginal estacionaria y no estacionaria del período de pico espectral.

Distribución marginal estacionaria

De entre las distribuciones Log-Normal, Weibull y Gamma, la distribución Log-Normal (LN) es la que presenta mejor ajuste.

A continuación, se emplea la distribución mixta estacionaria formada por dos LN (LN2MIX, ver (3)) para mejorar el ajuste.

El ajuste obtenido (PDF y CDF) con la LN y LN2MIX se representa en la Figura 12. Se puede observar que LN2MIX proporciona un mejor ajuste de los datos que la LN, si bien ninguna es capaz de captar adecuadamente el comportamiento de los períodos pico entre 10 y 13 segundos.

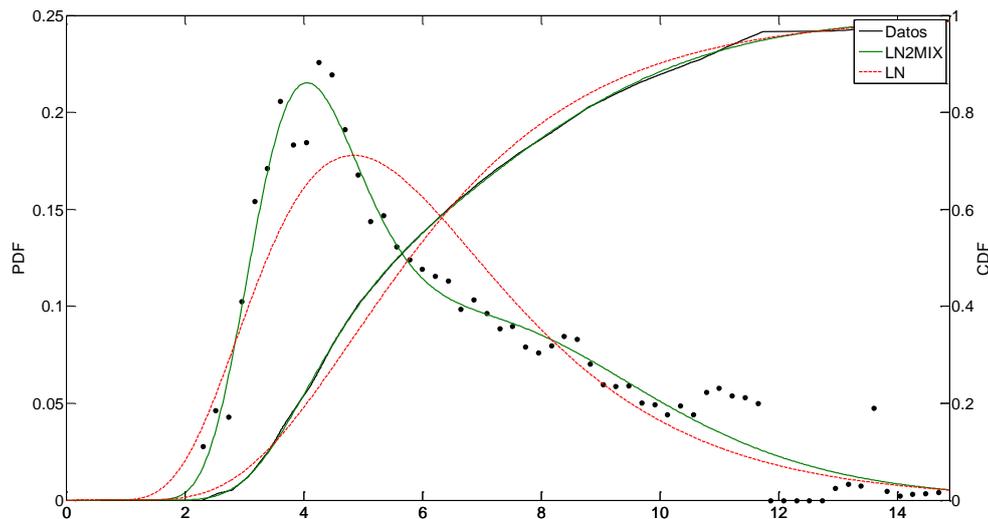


Figura 12: Distribuciones estacionarias ajustadas al período de pico espectral T_p

Distribución marginal no estacionaria

De la Figura 7 se observa que tanto la media como la desviación estándar de los datos de período pico presentan variaciones estacionales. Para realizar un mejor ajuste de los datos se emplea la versión no estacionaria de la LN2MIX, denominada LN2MIX-NE (3).

Los parámetros del modelo se aproximan mediante series de Fourier de hasta cuarto orden. El mejor ajuste, medido a través del BIC, es el [4 2 3], correspondiente a una aproximación de

cuarto orden en el parámetro de proporción de la distribución mixta, de segundo orden en el parámetro de posición y de tercer orden en el parámetro de escala de las dos log-normal.

En la Figura 13 se representan los cuantiles empíricos y modelados (LN2MIX-NE) para distintos valores de probabilidad de no excedencia. Se observa cómo el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad.

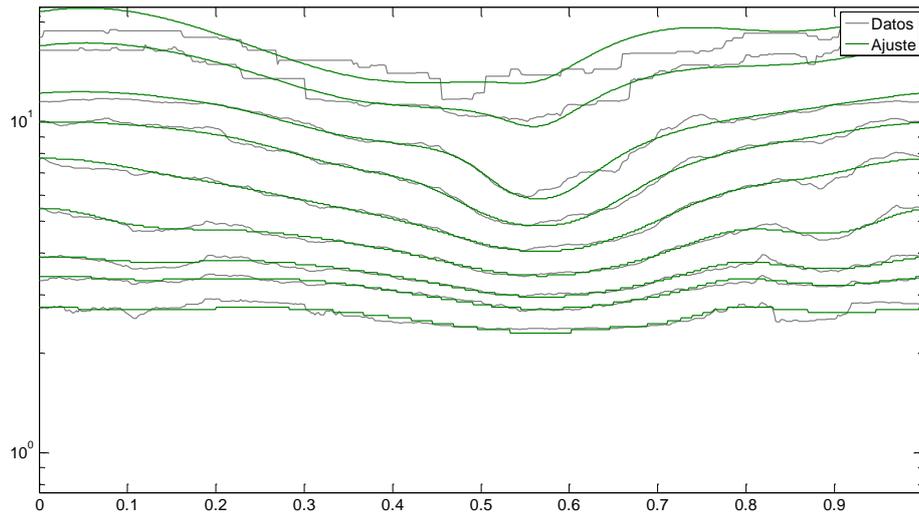


Figura 13: Cuantiles empíricos y modelados para probabilidad de no excedencia del 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 99%, 99.9%, correspondientes a la variable T_p

En la Figura 14 se representan las PDF y CDF anuales, tanto empíricas como modeladas. Se observa que el ajuste de LN2MIX-NE a los datos medidos es muy bueno, aunque no capta el comportamiento de los períodos pico entre 10 y 13 segundos.

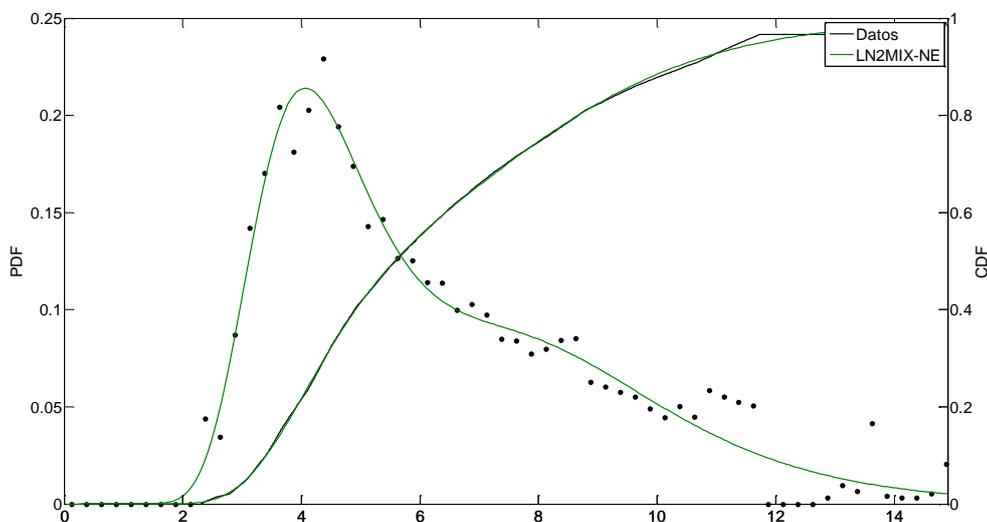


Figura 14: PDF y CDF marginal anual empírica y modelada con LN2MIX-NE, correspondientes a la variable T_p

3.3. VELOCIDAD DEL VIENTO

En este apartado se estudian el régimen de persistencia y las distribuciones marginal estacionaria y no estacionaria de la velocidad del viento.

Régimen de persistencia

Se obtiene el régimen de persistencia tanto en número de ocurrencias (Figura 15, panel a) como de frecuencia normalizada (Figura 15, panel b) para los valores de V_v correspondientes a los cuantiles 0.1, 0.5, 0.9 y 0.99 que se relacionan, respectivamente, con una velocidad de viento de 1.9, 4.8, 8.8 y 12.8 m/s.

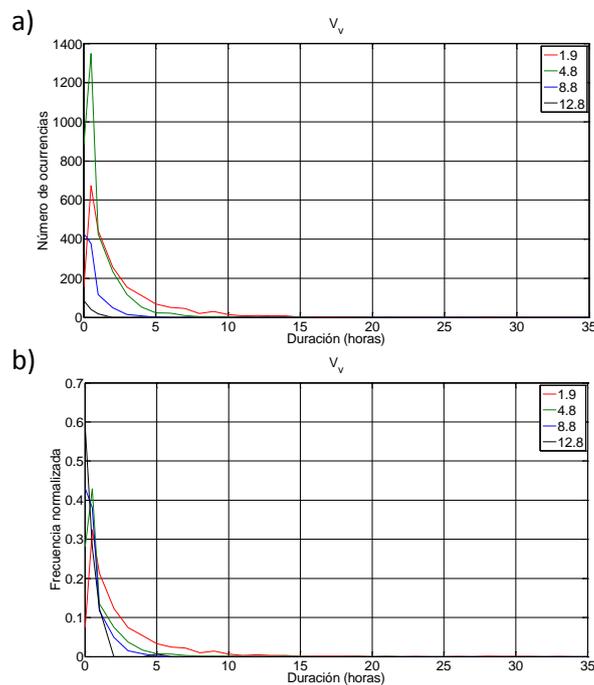


Figura 15: Régimen de persistencia según número de ocurrencias (panel a) y normalizado (panel b) para la altura de ola significativa

Se observa cómo disminuye la frecuencia normalizada drásticamente en torno a la hora para los cuantiles superiores (0.9 y 0.99).

Distribución marginal estacionaria

De entre las distribuciones Log-Normal, Weibull y Gamma, la distribución Weibull (WB) es la que presenta mejor ajuste.

A continuación, se emplea la distribución mixta estacionaria (WBGPD, ver (3)), para mejorar el ajuste.

El ajuste obtenido (PDF y CDF) con la WB y WBGPD se representa en la Figura 16 . Se puede observar que WBGPD proporciona un mejor ajuste de los datos que la WB.

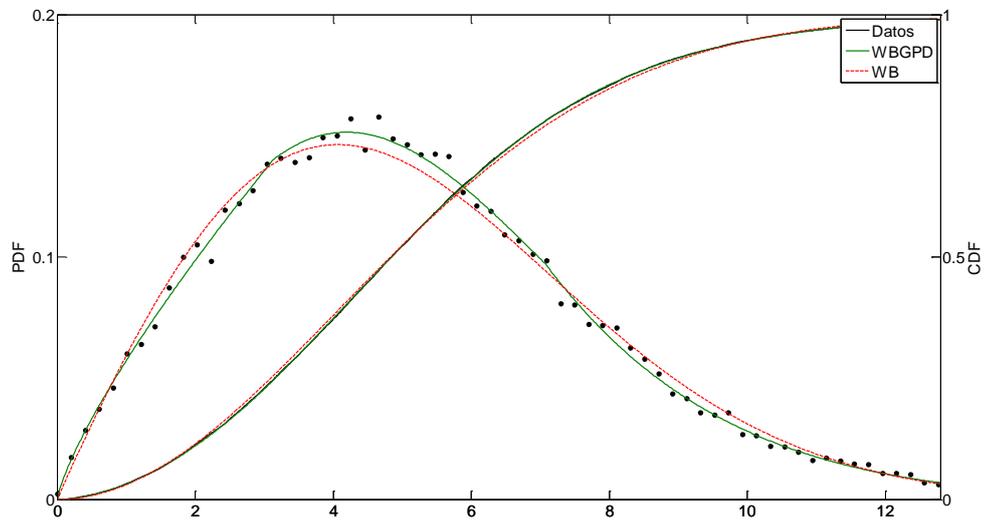


Figura 16: Distribuciones estacionarias ajustadas a la velocidad de viento V_v

Distribución marginal no estacionaria

De la Figura 7 se observa que tanto la media como la desviación estándar de los datos de altura de velocidad de viento presentan variaciones estacionales. Para realizar un mejor ajuste de los datos se emplea la versión no estacionaria de la WBGPD, denominada WBGPD-NE (3).

Los parámetros del modelo se aproximan mediante series de Fourier de hasta cuarto orden. El mejor ajuste, medido a través del BIC, es el [4 1 1], correspondiente a una aproximación de cuarto orden en parámetro de escala de WB, de primer orden en el parámetro de forma de WB y de primer orden en el parámetro de forma de la GPD superior.

En la Figura 17 se representan los cuantiles empíricos y modelados (WBGPD-NE) para distintos valores de probabilidad de no excedencia. Se observa cómo el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad.

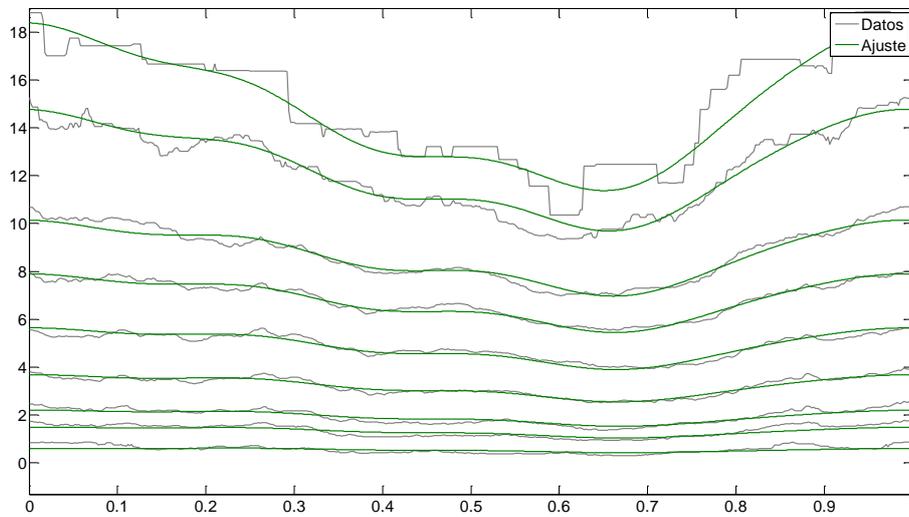


Figura 17: Cuantiles empíricos y modelados para probabilidad de no excedencia del 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 99%, 99.9%, correspondientes a la variable V_v

En la Figura 18 se representan las PDF y CDF anuales, tanto empíricas como modeladas. Se observa que el ajuste de WBGPD-NE a los datos medidos es muy bueno.

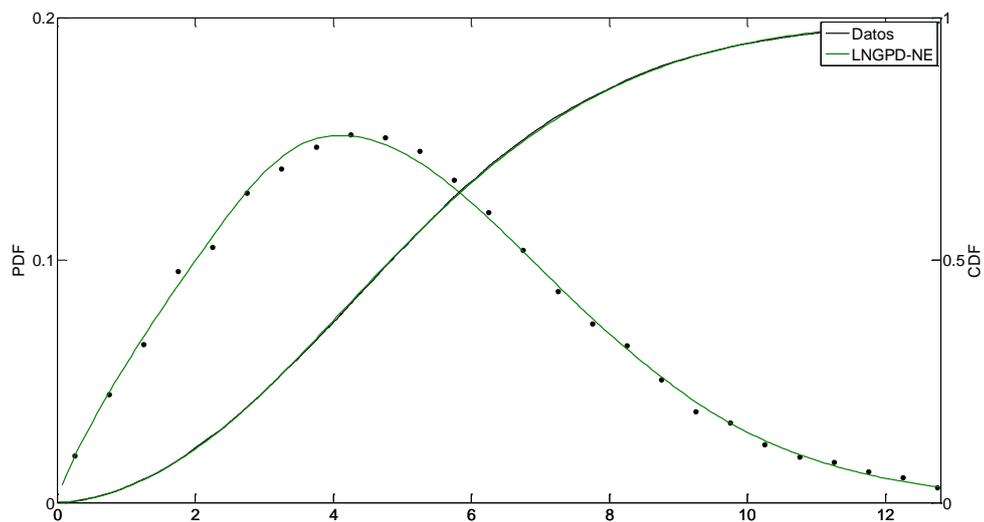


Figura 18: PDF y CDF marginal anual empírica y modelada con WBGPD-NE, correspondientes a la variable V_v

3.4. NIVEL DEL MAR

El nivel del mar, medido por un mareógrafo REDMAR en un instante determinado, está compuesto por la suma de la marea astronómica y de la marea meteorológica. Ambas componentes se estudian de manera independiente².

Marea astronómica

En esta apartado se obtienen los armónicos de marea más significativos y se cuantifica la asimetría de la onda de marea.

Tabla armónicos de Marea

Se obtiene analizando la señal de acuerdo con el análisis armónico propuesto por (4):

Armónico	Frecuencia (horas ⁻¹)	Amplitud (cm)	Error amplitud (cm)	Fase (º)	Error fase (º)
M2	0,0805	105,64	0,25	60,26	0,14
S2	0,0833	38,12	0,23	87,68	0,42
N2	0,0790	22,41	0,27	45,23	0,66
K2	0,0836	10,44	0,20	84,37	1,15
SA	0,0001	7,44	1,80	239,06	13,37
K1	0,0418	6,21	0,12	49,24	0,98
O1	0,0387	5,85	0,11	312,39	1,20
NU2	0,0792	4,06	0,26	46,71	3,78
M4	0,1610	4,06	0,16	187,30	2,00
MU2	0,0777	3,72	0,24	34,90	4,05
L2	0,0820	3,35	0,31	47,20	6,10
2N2	0,0775	2,98	0,24	36,84	5,01
MS4	0,1638	2,58	0,14	252,69	3,22
T2	0,0832	2,20	0,25	80,79	6,10
P1	0,0416	2,12	0,15	44,60	3,10
MM	0,0015	1,41	1,74	322,54	73,85
MSF	0,0028	0,37	1,19	63,19	174,51

Tabla 1: Frecuencia (horas⁻¹) y Amplitud (cm) con sus respectivos errores para los armónicos más significativos en el mareógrafo 3327

² Si bien es posible que pueda existir cierta interacción entre ambas. Este hecho se puede manifestar, por ejemplo, en la existencia de valores picos del residuo meteorológico a frecuencias mareales, que se observa tras realizar el análisis espectral.

Armónico	Frecuencia (horas ⁻¹)	Amplitud (cm)	Error amplitud (cm)	Fase (º)	Error fase (º)
M2	0,0805	104,02	0,15	57,48	0,08
S2	0,0833	37,52	0,13	83,38	0,24
N2	0,0790	22,25	0,16	41,07	0,37
K2	0,0836	10,44	0,15	83,44	0,86
K1	0,0418	6,30	0,10	47,98	0,95
O1	0,0387	5,77	0,10	309,27	1,00
SA	0,0001	4,15	1,75	255,97	26,96
MU2	0,0777	4,05	0,15	17,66	2,41
NU2	0,0792	3,96	0,16	44,17	2,41
L2	0,0820	3,33	0,19	61,19	3,65
2N2	0,0775	3,13	0,15	21,61	2,73
M4	0,1610	2,95	0,04	168,18	0,89
SSA	0,0002	2,69	1,67	51,48	38,58
T2	0,0832	2,20	0,15	78,77	4,15
P1	0,0416	2,12	0,13	39,42	2,74
MM	0,0015	0,99	1,51	281,71	101,11
MSF	0,0028	0,59	1,48	196,61	150,23

Tabla 2: Frecuencia (horas⁻¹) y Amplitud (cm) con sus respectivos errores para los armónicos más significativos en el mareógrafo 3329

Para ambos aparatos, la constituyente armónica más significativa es la semidiurna M2, con un período de 12,42 horas.

Asimetría de la onda de marea

Para cuantificar la asimetría de la onda de marea (5) se consideran la constituyente armónica más energética, la M2, y el sobre armónico de mayor amplitud, la M4, cuya relación de amplitudes, $r = \eta_{M4}/\eta_{M2}$, se muestra en la Figura 19 y en la Figura 20.

También se calcula la diferencia entre fases $\Delta\theta = 2\theta_{M2} - \theta_{M4}$, con valores superiores a 180º en ambos casos, lo que indica el dominio de la vaciante. Además, cuanto mayor es la relación entre amplitudes r , mayor es la distorsión de la onda y mayor es el dominio de la fase vaciante (o llenante, dependiendo de $\Delta\theta$).

Para calcular r y $\Delta\theta$, en primer lugar, se han empleado los datos de la Tabla 1 y Tabla 2 (línea azul en paneles a y b de la Figura 19 y Figura 20). A continuación, se han obtenido los mismos valores de forma no estacionaria, para una ventana temporal de 14.76 días (periodo sucesivo entre dos mareas vivas (muertas); línea roja en paneles a y b de dichas figuras).

Aunque la diferencia entre fases sea levemente superior en el mareógrafo 3329 a la del 3327, este último presenta un comportamiento más variable (mayor oscilación en los valores del coeficiente r).

Estos resultados, en conjunción con el de otros mareógrafos que se podrían desplegar en los cauces fluviales del entorno, pueden aportar valiosa información acerca de la hidrodinámica de la zona.

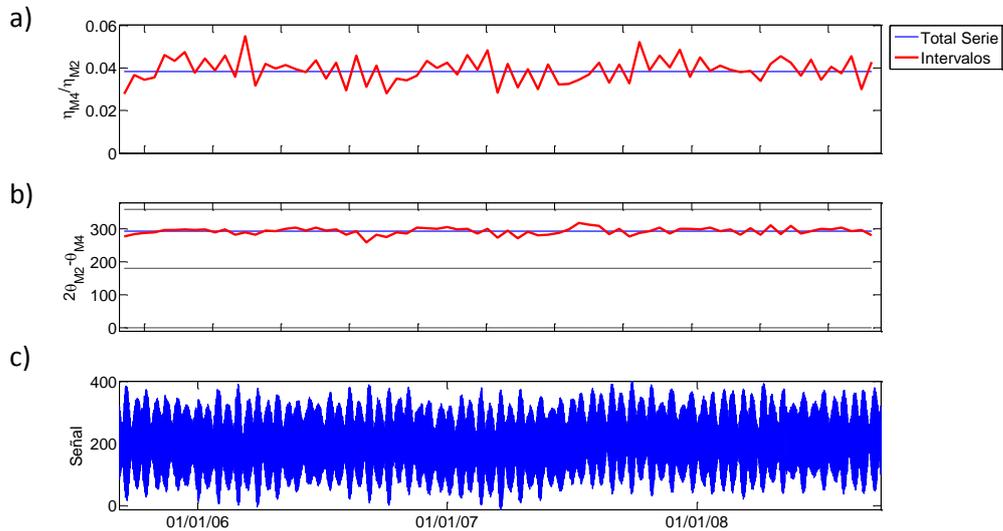


Figura 19: Relación de amplitudes r (panel a), diferencia entre fases $\Delta\theta$ (panel b) y nivel del mar (cm, panel c) para el mareógrafo 3327

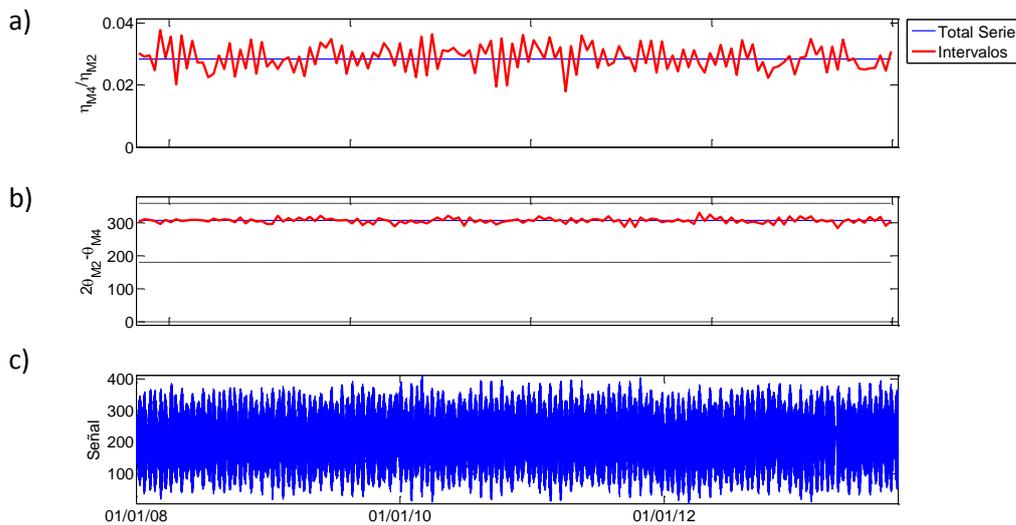


Figura 20: Relación de amplitudes r (panel a), diferencia entre fases $\Delta\theta$ (panel b) y nivel del mar (cm, panel c) para el mareógrafo 3329

Marea Meteorológica

En este apartado se obtienen los espectros de densidad de energía del residuo, además de calcular el régimen medio y régimen extremal de mínimos y de máximos. Se trabaja, en todo momento, con los residuos aportados por los puntos REDMAR.

Espectro de densidad de energía

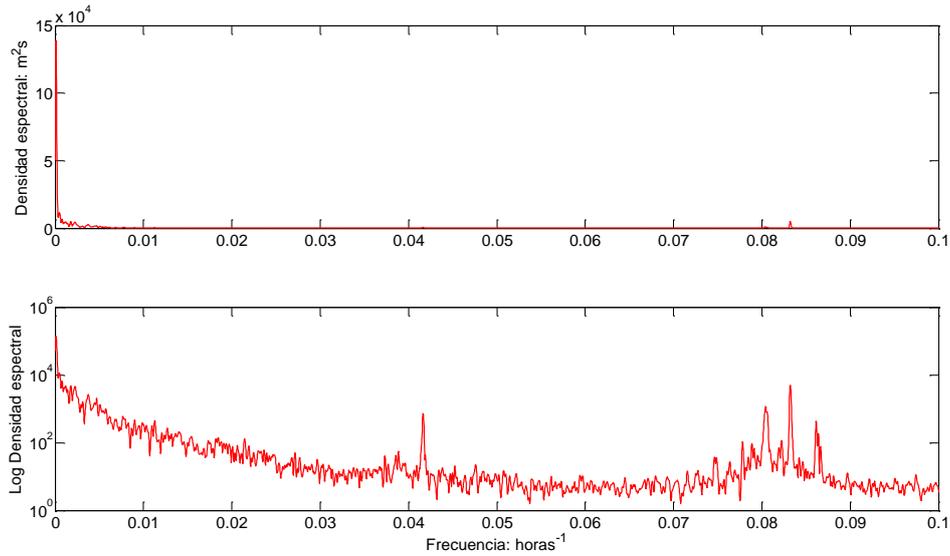


Figura 21: Densidad espectral (panel a) y logaritmo de la densidad espectral (panel b) frente a la frecuencia (horas^{-1}) para el residuo meteorológico en el mareógrafo 3327

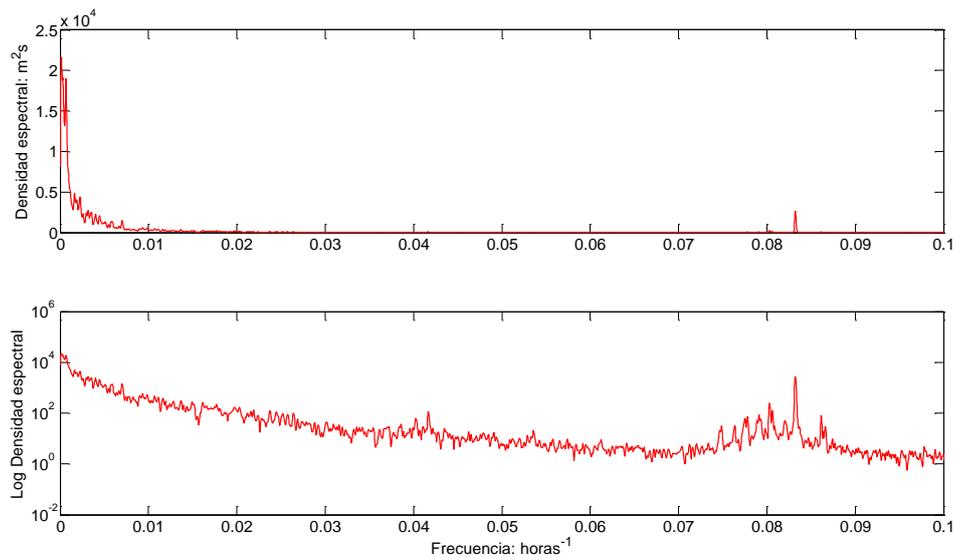


Figura 22: Densidad espectral (panel a) y logaritmo de la densidad espectral (panel b) frente a la frecuencia (horas^{-1}) para el residuo meteorológico en el mareógrafo 3329

Se calcula el espectro de densidad de energía de la señal debidamente suavizado. Los valores de densidad espectral y del logaritmo de la densidad espectral frente a la frecuencia se representan en la Figura 21 y en la Figura 22.

Del análisis espectral se detectan picos en varias bandas frecuenciales, correspondientes a los siguientes períodos:

- Mareógrafo 3327: a 1 día y a frecuencia submareal (~ 12.42 h)
- Mareógrafo 3329: a frecuencia submareal (~ 12.42 h)

El que se encuentren picos a frecuencia mareal puede estar asociado a la interacción entre la marea astronómica y al paso de borrascas.

Régimen Medio

La función de distribución empleada para el ajuste del régimen medio es una distribución normal, cuya media y desviación para el mareógrafo 3327 son $[-4.3e-2, 10.5]$ (Figura 23), mientras que para el mareógrafo 3329 son $[-0.38, 9.25]$ (Figura 24).

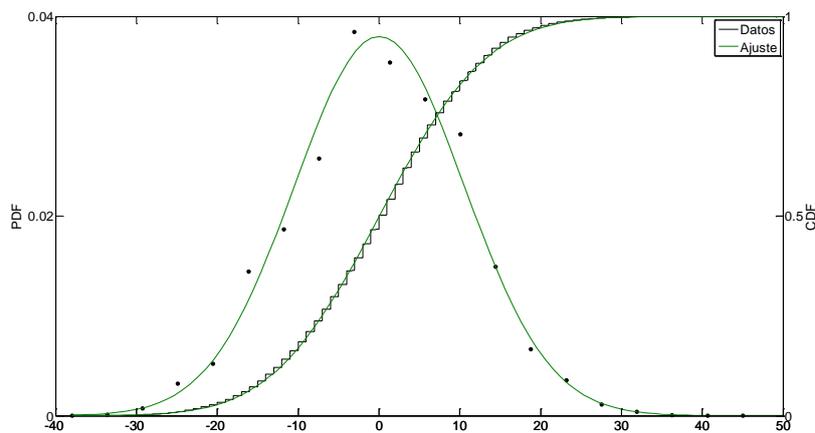


Figura 23: Distribución ajustada al régimen medio de la marea meteorológica para el mareógrafo 3327

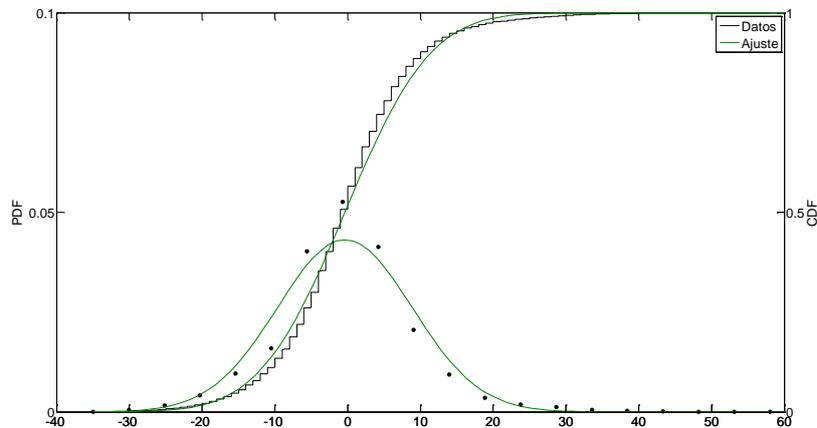


Figura 24: Distribución ajustada al régimen medio de la marea meteorológica para el mareógrafo 3329

Régimen Extremal

Debido a que no se dispone de los suficientes años para realizar un análisis de régimen extremal de máximos o mínimos anuales (3 y 5 años de registro en los mareógrafos 3327 y 3329, respectivamente), se hace un análisis de régimen extremal de picos sobre umbral (POT). Ya que no se trata de un análisis POT al uso (no se está aplicado a la altura de ola significativa, sino al residuo meteorológico), se tendrán en cuenta los siguientes aspectos, consecuencia de un análisis detallado de la serie temporal de residuos:

- Valor umbral correspondiente al percentil 99 para máximos y 1.5 para mínimos
- Duración mínima del temporal de 3 horas (Para el caso de máximos, relacionado con el régimen de persistencia de la altura de ola)
- Independencia entre temporales: cuando han transcurrido mínimo 2 días

Régimen Extremal de Máximos

Los resultados del POT son los mostrados en la Figura 25:

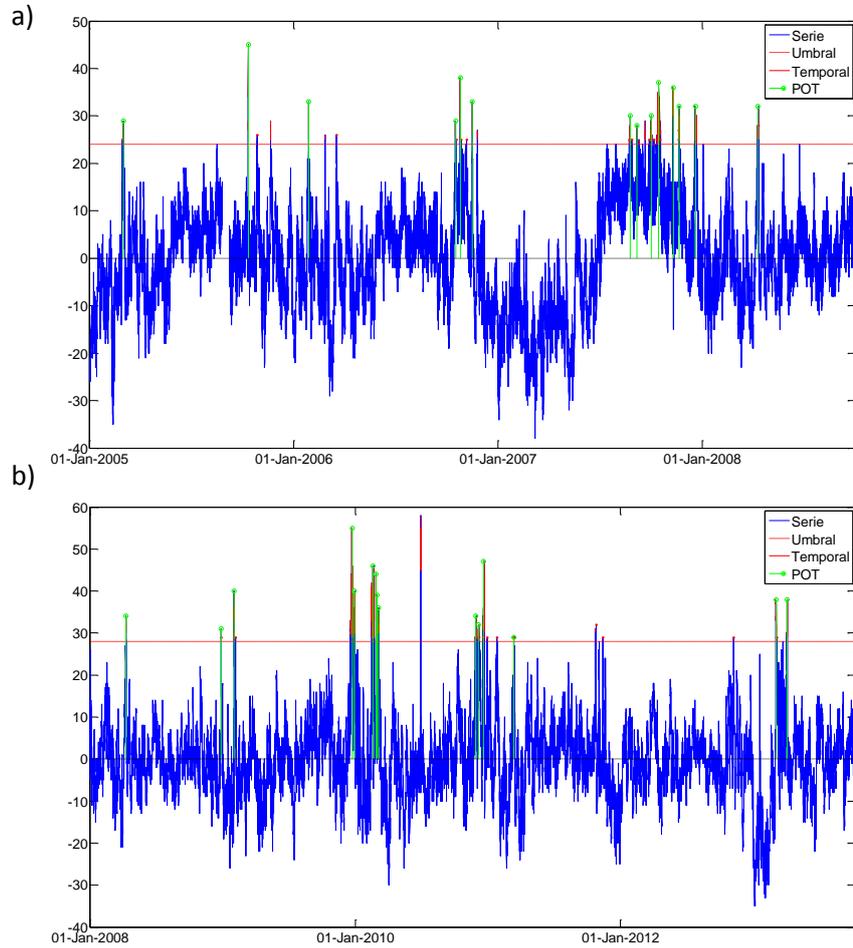


Figura 25: Régimen extremal de máximos para el mareógrafo 3327 (panel a) y 3329 (panel b)

De cada temporal se coge el valor máximo y se ajustan dichos valores a las distribuciones Gamma, Normal, Lognormal, Weibull y GEV, escogiendo la que presente mejor ajuste.

Ambos mareógrafos se ajustan a una distribución GEV, cuyos parámetros de forma, escala y localización en el mareógrafo 3327 son $[0.25, 2.67, 30.85]$ (Figura 26), mientras que para el mareógrafo 3329 son $[-0.02, 5.41, 35.83]$ (Figura 27).

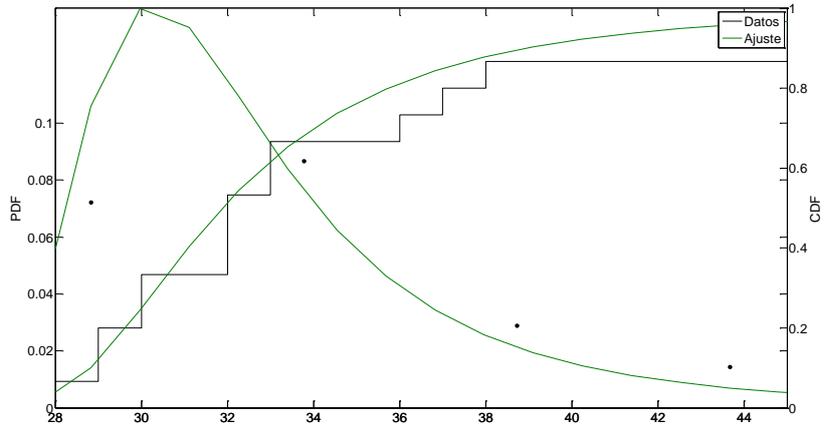


Figura 26: Distribución ajustada al régimen extremal de máximos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3327

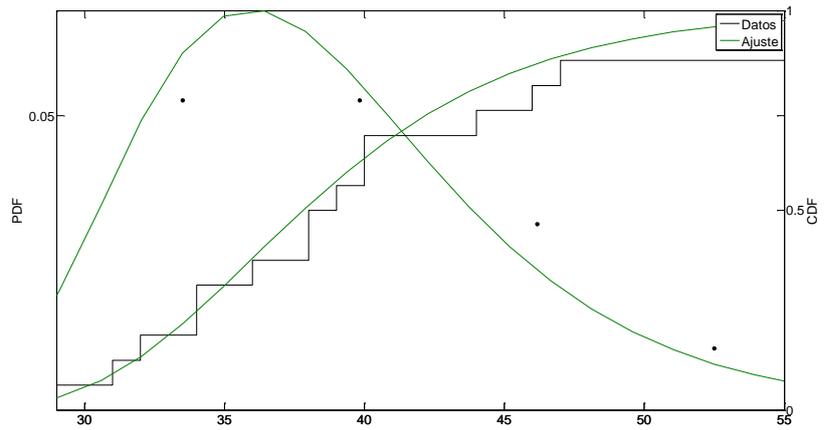


Figura 27: Distribución ajustada al régimen extremal de máximos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3329

Régimen Extremal de Mínimos

Los resultados del POT son los mostrados en la Figura 28:

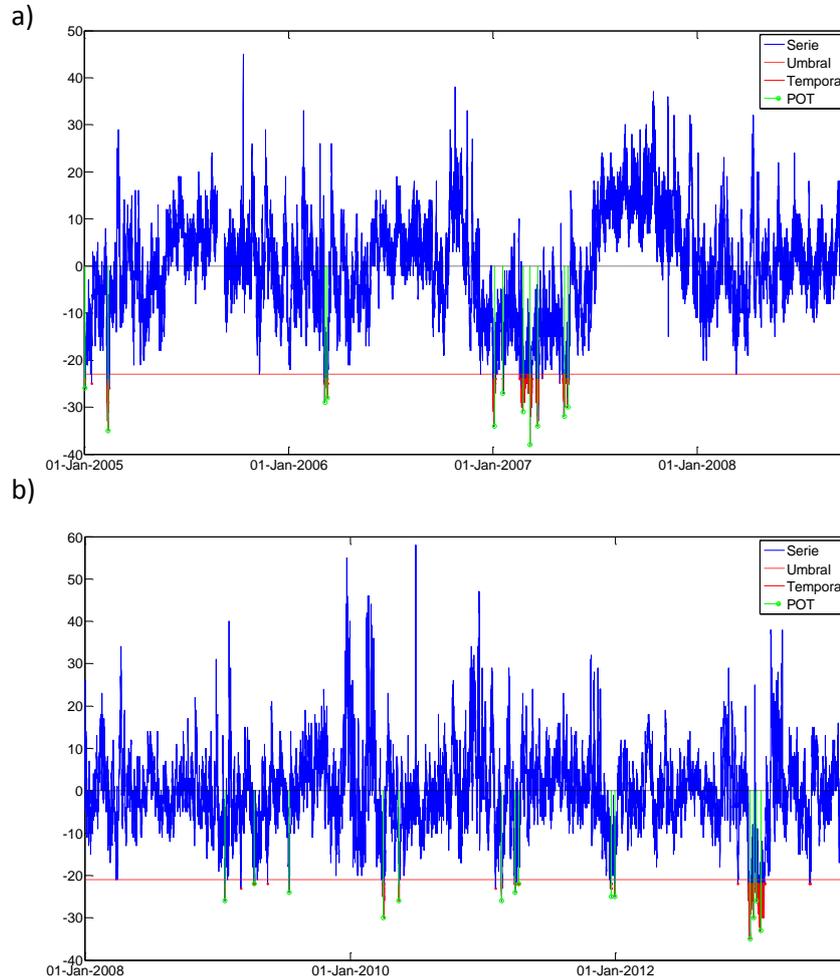


Figura 28: Régimen extremal de mínimos para el mareógrafo 3327 (panel a) y 3329 (panel b)

De cada evento de calma se coge el valor mínimo y se ajustan dichos valores a las distribuciones Gamma, Normal, Lognormal, Weibull y GEV, escogiendo la que presente mejor ajuste.

Para el mareógrafo 3327 el mejor ajuste es una distribución Weibull con parámetros de escala y forma [32.89, 9.42] (Figura 29), mientras que para el mareógrafo 3329 la distribución con mejor ajuste es una GEV con parámetros de forma, escala y localización [0.11, 2.67, 24.86] (Figura 30)

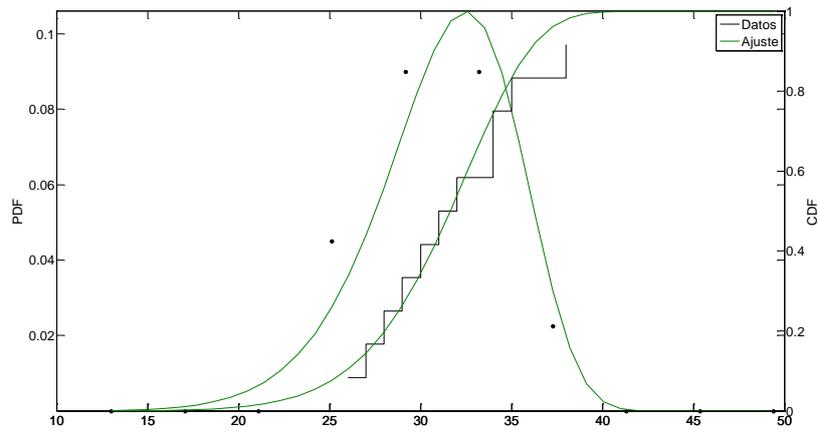


Figura 29: Distribución ajustada al régimen extremal de mínimos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3327

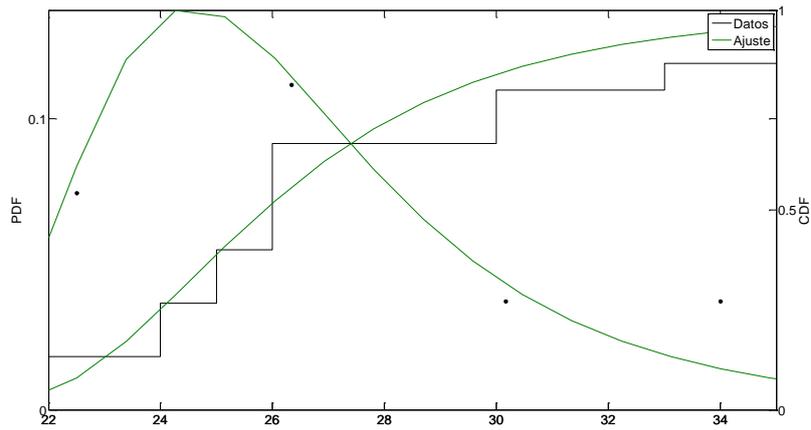


Figura 30: Distribución ajustada al régimen extremal de mínimos de la marea meteorológica para el mareógrafo 3329



4. DEPENDENCIA TEMPORAL MULTIVARIADA DE LOS AGENTES CLIMÁTICOS: MODELO VAR

Si bien se puede realizar un análisis de la dependencia temporal univariado para los principales agentes (H_{m0} , T_p y V_v) mediante el empleo de cópulas (2), el presente informe va a centrarse en un análisis multivariado.

El motivo es que las relaciones obtenidas en este análisis serán las utilizadas para hacer la simulación del clima.

Para llevar a cabo este análisis multivariado se emplean modelos autorregresivos vectoriales (VAR), que estudian la dependencia temporal entre las distintas variables, a saber: H_{m0} , T_p , V_v , Dir y DirV.

Para el ajuste del modelo VAR (ver (3)) se evalúan modelos desde el orden 1 hasta el 10, calculando el BIC para cada uno de los mismo. Se selecciona el de menor BIC, que es el correspondiente al orden 9. Esto significa que para el cálculo de las variables en el instante t se utiliza el valor de las variables desde el instante $t-1$ hasta el instante $t-9$.



5. SIMULACIÓN DEL CLIMA

De acuerdo con el apartado anterior, se simulan nuevas series multivariadas de 25 años. Éstas se comparan con las de los datos originales, contrastando así el comportamiento del registro actual con el simulado. Los resultados se visualizan a través de la Figura 31 (altura de ola significativa), la Figura 32 (período pico espectral) y la Figura 33 (velocidad del viento). En éstas se representan la PDF y CDF de todo el conjunto de datos y las PDF y CDF de cada año, tanto de los datos originales como de los datos simulados.

5.1. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIONES UNIVARIADAS

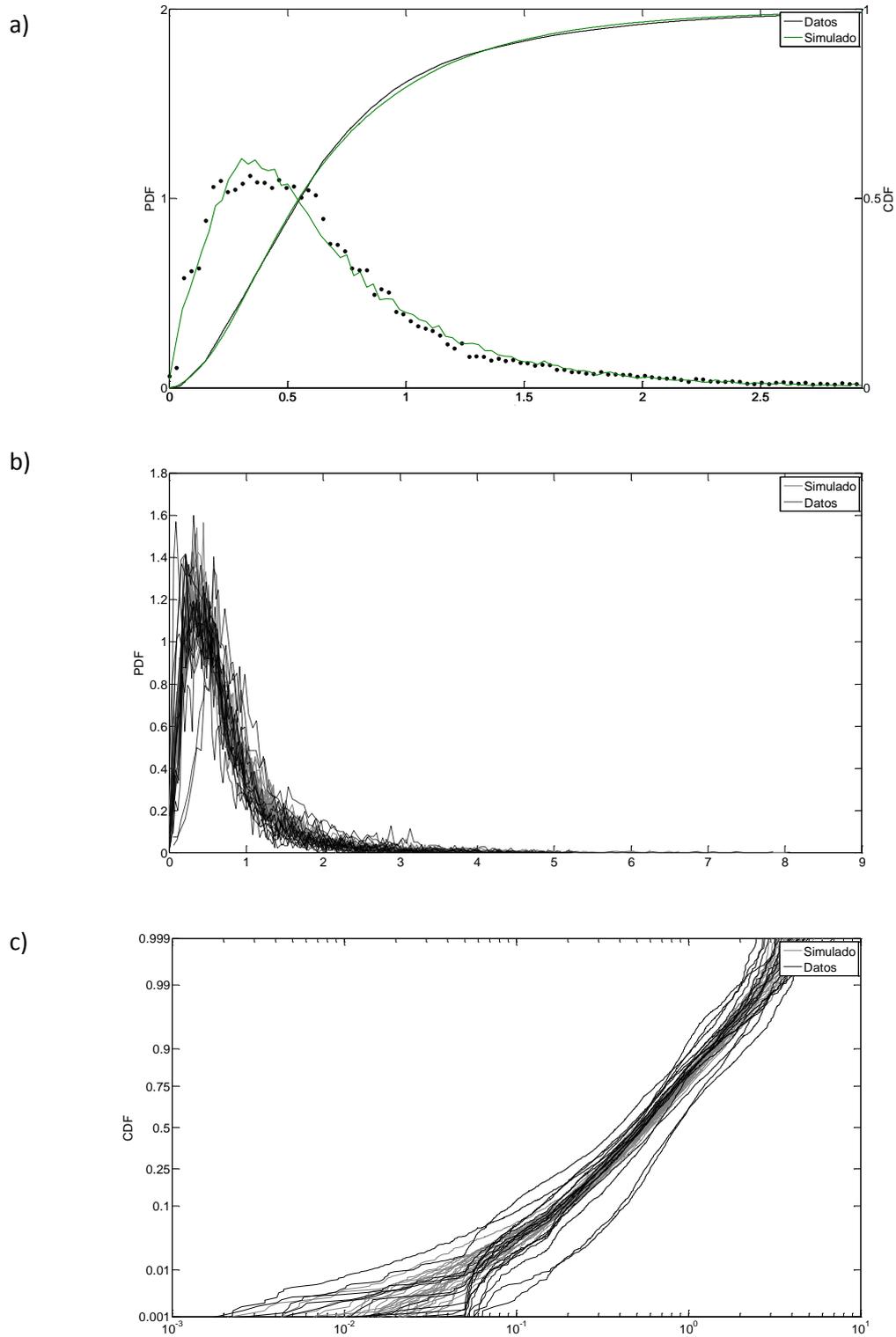


Figura 31: PDF y CDF de los datos de altura de ola significativa para la señal original y simulada (panel a); PDF (panel b) y CDF en papel log normal (panel c), calculadas para cada año, de los datos originales (negro), y de los simulados (gris)

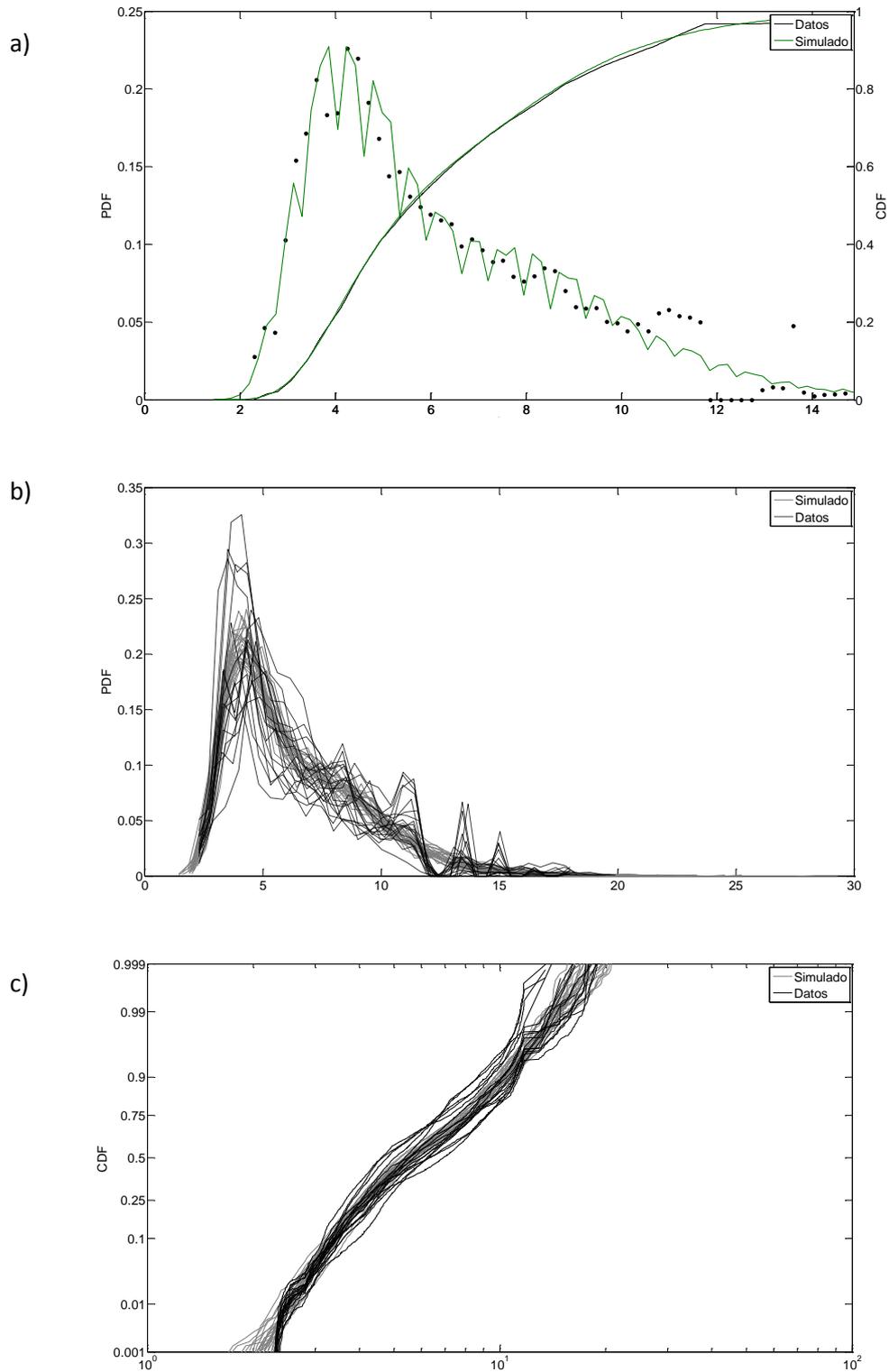


Figura 32: PDF y CDF de los datos de período de pico espectral para la señal original y simulada (panel a); PDF (panel b) y CDF en papel log normal (panel c), calculadas para cada año, de los datos originales (negro), y de los simulados (gris)

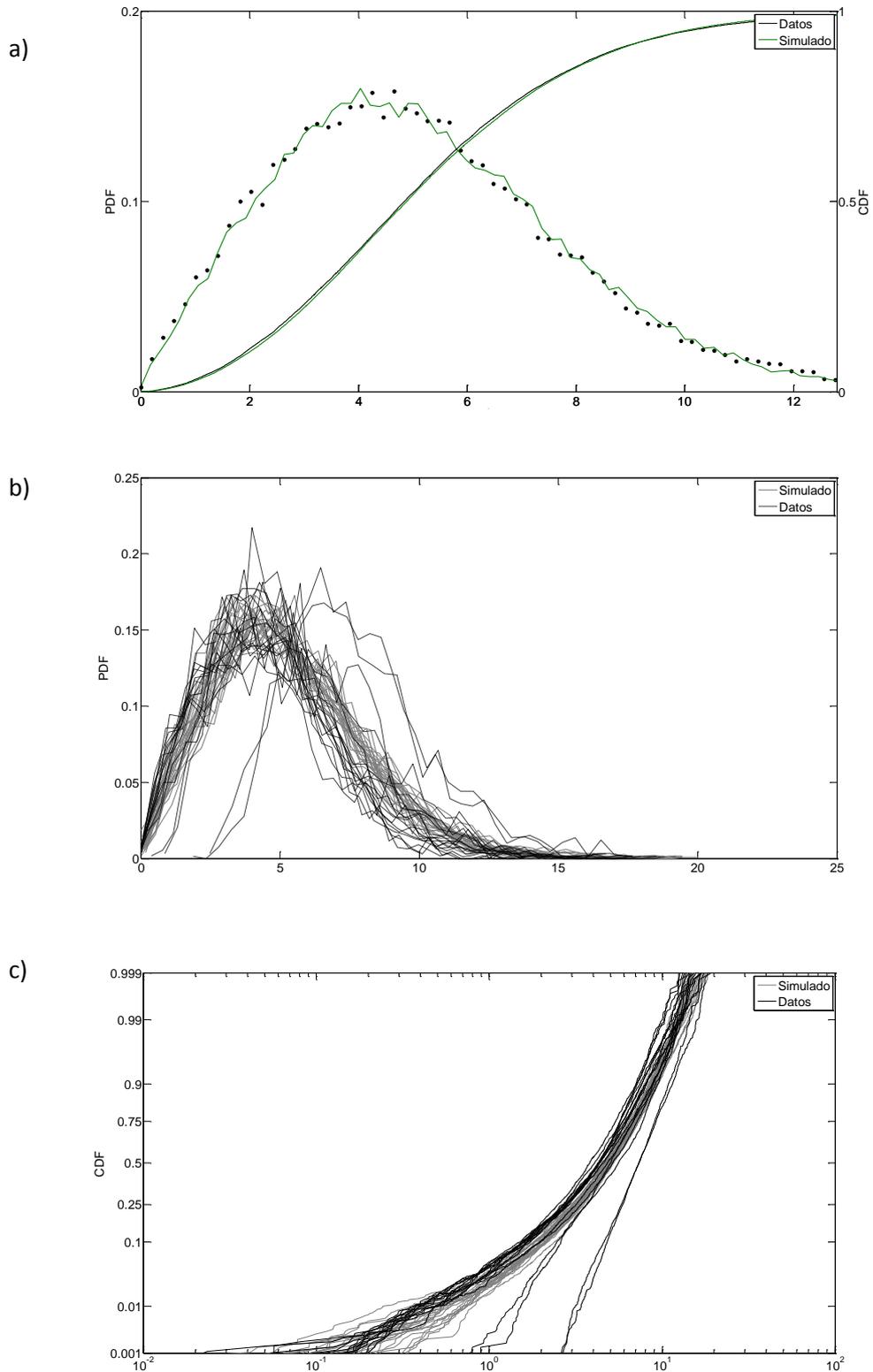


Figura 33: PDF y CDF de los datos de velocidad de viento para la señal original y simulada (panel a); PDF (panel b) y CDF en papel log normal (panel c), calculadas para cada año, de los datos originales (negro), y de los simulados (gris)

Se observa que la serie simulada presenta una variabilidad interanual similar a la que presentan los datos originales, excepto en algunos años (especialmente para la altura de ola de los datos originales) cuya distribución es cualitativamente diferente a la de los demás.

El potencial de este método es que nos permite realizar tantas simulaciones como queramos de los principales agentes climáticos, incluyendo la interacción existente entre los mismos. Este hecho se ilustra en la Figura 34, en donde se recogen tres simulaciones de altura de ola significativa para una ventana temporal de 25 años cada una, empleando para ello el método VAR.

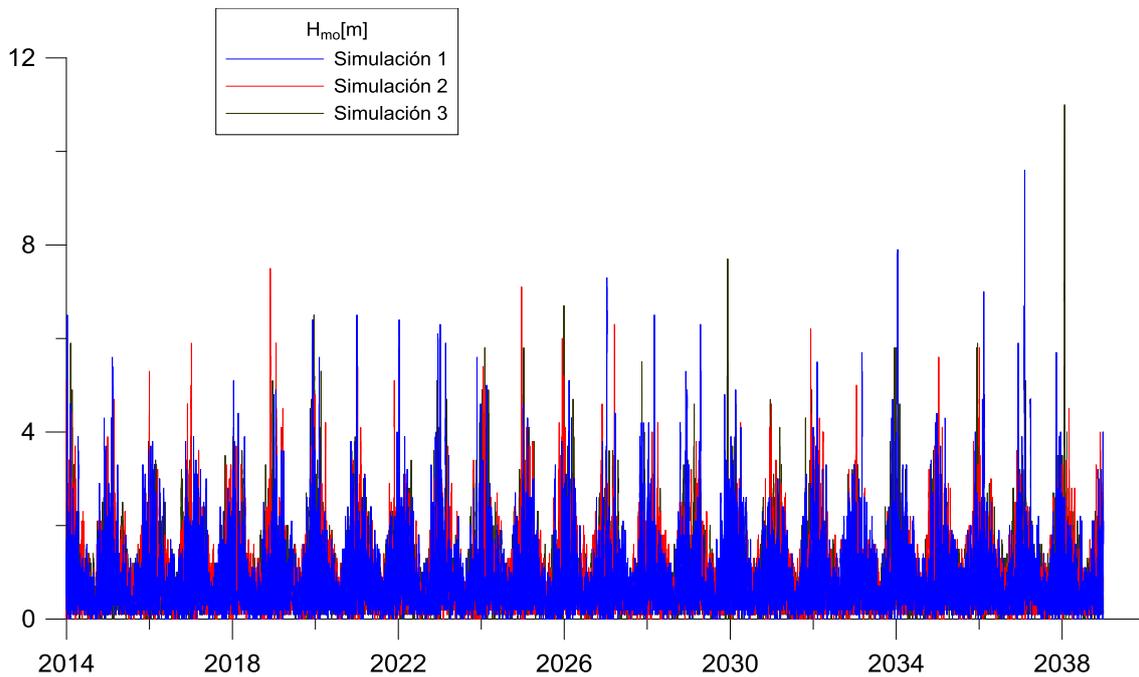


Figura 34: Simulaciones de altura de ola H_{m0} mediante el método VAR

5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIONES BIVARIADAS

Se comparan las distribuciones bivariadas, tanto empíricas como simuladas, de H_{m0} - T_p (Figura 35), H_{m0} - V_v (Figura 36) y T_p - V_v (Figura 37). Se observa que, aunque la serie simulada recoge la tendencia global, no reproduce todas las características de las distribuciones bivariadas empíricas. De entre éstas cabe mencionar que las distribuciones con T_p presentan cierta bimodalidad que, si bien el método VAR no lo reproduce, sí es capaz de modelarlo y simularlo adecuadamente.

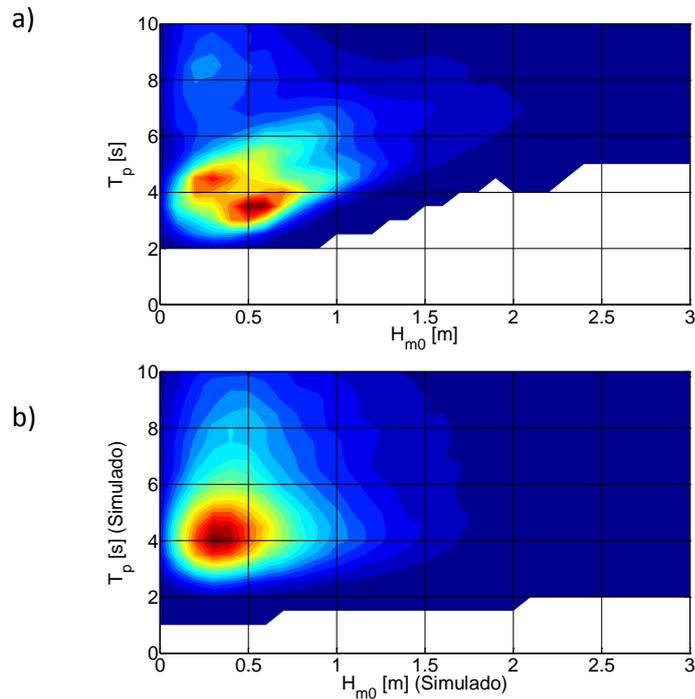


Figura 35: Distribución bivariada empírica H_{m0} - T_p de los datos originales (panel a) y de los simulados (panel b)

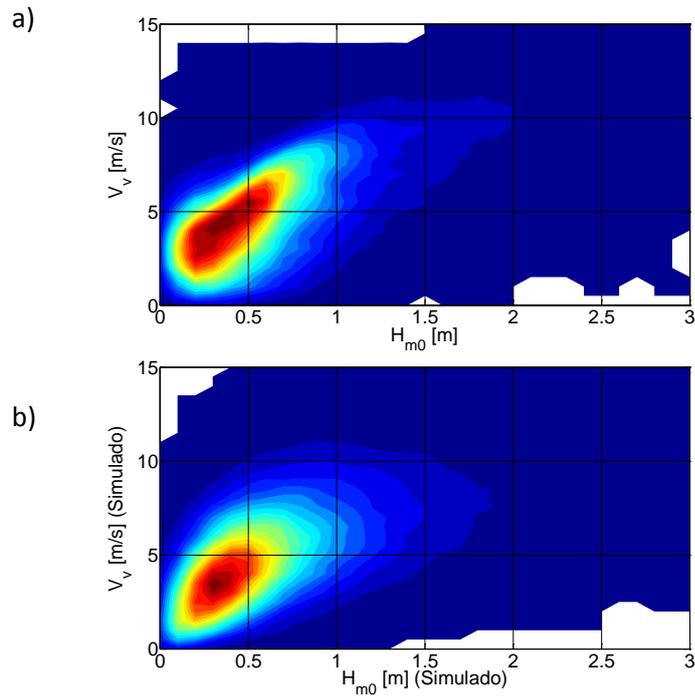


Figura 36: Distribución bivariada empírica H_{m0} - V_v de los datos originales (panel a) y de los simulados (panel b)

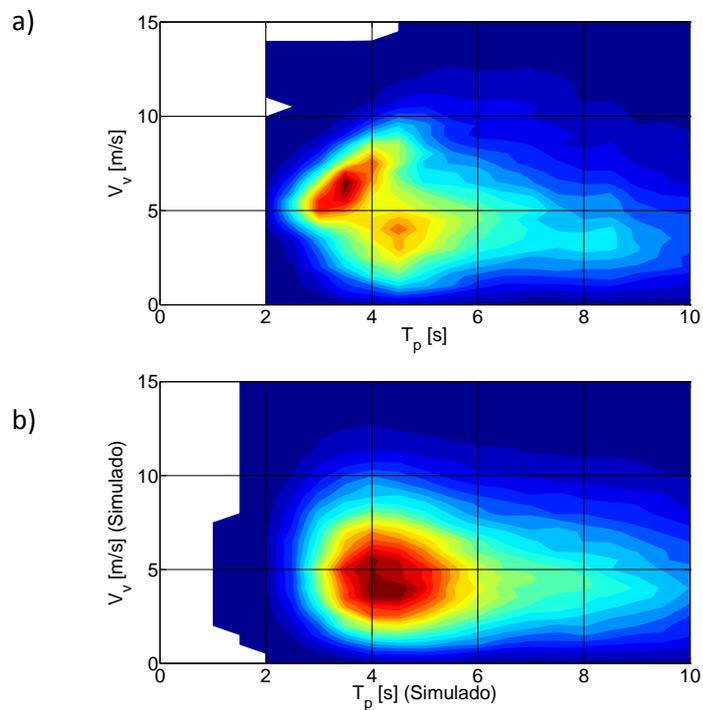


Figura 37: Distribución bivariada empírica T_p - V_v de los datos originales (panel a) y de los simulados (panel b)

Hay que prestar especial atención a la relación H_{m0}/T_p (relacionado con el peralte) ya que el modelo no lo recoge dado que no incluye ningún limitante de tipo físico.



6. REFERENCIAS

1. *Unified distribution models for met-ocean variables: Application to series of significant wave height.* **Solari, Sebastián and Losada, Miguel Ángel.** Elsevier, 2012, Coastal Engineering, Vol. 68, pp. 67-77.
2. *Non-stationary wave height climate modeling and simulation.* **Solari, Sebastián and Losada, Miguel Ángel.** C9, 2011, Journal of Geophysical Research, Vol. 16.
3. *On the use of Vector Autoregressive (VAR) and Regime Switching VAR models for the simulation of sea and wind state parameters.* **Solari, Sebastián and Losada, Miguel Ángel.** 2011, Marine Technology and Engineering.
4. *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE.* **Pawlowicz, Rich, Beardsley, Bob and Lentz, Steve.** Elsevier, 2002, Computers & Geosciences, Vol. 28, pp. 929-937.
5. **Dyer, Keith.** *Estuaries: a physical introduction.* John Wiley, 1997.
6. **Fisher, Nicholas I.** *Statistical analysis of circular data.* Cambridge University Press, 1995.