

Anàlisis de eventos compuestos en la costa de Catalunya

Treball realitzat per:

José Costa Torres

Dirigit per:

Jose Antonio Jiménez

Maribel Ortego

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 27 de gener de 2022

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

ABSTRACT

The relevance of compound events is that they can significantly increase the intensity and/or the spatial and temporal extent of the impact (and damage) due to the synergistic and/or cumulative action of different hazards that may be intensified in the future due to global warming. This cumulative effect may overwhelm the emergency response capacity of services as they have to cope with an "unusual" high damage situation, respond to a large number of emergency situations across the region at the same time and/or have to maintain the level of response over a relatively long period of time. From the risk management perspective, it is therefore important to characterise these events. This paper analyses the variation in the probability of occurrence of composite rainstorm-wave events along the Catalan coast (northwest Mediterranean), assesses the main focus of occurrence of composite events and their possible magnitude, and studies the dependency between the component hazards.

RESUMEN

La relevancia de los eventos compuestos radica en que pueden aumentar significativamente la intensidad y/o la extensión espacial y temporal del impacto (y de los daños) debido a la acción sinérgica y/o acumulativa de diferentes amenazas que pueden resultar intensificadas en un futuro debido al calentamiento global. Este efecto acumulativo puede desbordar la capacidad de respuesta de los servicios a las emergencias, ya que éstos tienen que hacer frente a una situación "inusual" de gran daño, responder a un gran número de situaciones de emergencia en toda la región al mismo tiempo y/o tienen que mantener el nivel de respuesta durante un período relativamente largo. Por ello, desde la perspectiva de la gestión de riesgos, es importante caracterizar estos eventos. En este trabajo se analiza la variación de la probabilidad de ocurrencia de eventos compuestos de tormentas de lluvia y oleaje a lo largo de la costa catalana (noroeste del Mediterráneo), se evalúan los principales focos de ocurrencia de eventos compuestos y su posible magnitud, y se estudia la dependencia entre las amenazas que lo componen.

RESUM

La rellevància dels esdeveniments composts radica en el fet que poden augmentar significativament la intensitat i/o l'extensió espacial i temporal de l'impacte (i dels danys) a causa de l'acció sinèrgica i/o acumulativa de diferents amenaces que poden resultar intensificades en un futur degut a l'escalfament global. Aquest efecte acumulatiu pot desbordar la capacitat de resposta dels serveis a les emergències, ja que aquests han de fer front a una situació "inusual" de gran mal, respondre a un gran nombre de situacions d'emergència en tota la regió al mateix temps i/o han de mantenir el nivell de resposta durant un període relativament llarg. Per això, des de la perspectiva de la gestió de riscos, és important caracteritzar aquests esdeveniments. En aquest treball s'analitza la variació de la probabilitat d'ocurrència d'esdeveniments composts de tempestes de pluja i onatge al llarg de la costa catalana (nord-oest del Mediterrani), s'avaluen els principals focus d'ocurrència d'esdeveniments composts i la seva possible magnitud, i s'estudia la dependència entre les amenaces que ho componen.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer, principalmente, a los profesores Jose Antonio Jiménez y Maribel Ortego por su dedicación y aportación para el desarrollo de este trabajo. También agradecer a Marc Sanuy su implicación en todo momento.

A todos los profesores de la Escola de Camins de Barcelona y del Instituto Superior Técnico de Lisboa por dedicar su tiempo y esfuerzo en transmitirme sus conocimientos y ayudarme a crecer como estudiante y sobre todo, como persona.

Agradecer a mis padres, a mi hermano y a mis abuelos haber estado siempre presentes y ser mi apoyo incondicional. Agradecimiento especial a mis compañeros y amigos por haber hecho más enriquecedor y ameno este camino.

Índice

Índice de figuras.....	7
Índice de tablas	8
1. Introducción	9
2. Área de estudio	11
3. Datos	12
4. Metodología	14
4.1 Modelización marginal	17
4.2 Análisis de dependencia.....	21
5. Análisis de resultados	23
5.2 Análisis de resultados marginales.....	25
5.3 Análisis de resultados conjuntos	27
6. Discusión.....	30
7. Resumen y conclusiones	33
Referencias.....	35

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio y principales sistemas fluviales costeros (Sanuy M., Jiménez J.A., Llasat M.C., 2021).	11
Figura 2. Localización de los 14 puntos SIMAR.	12
Figura 3. Definición de tormenta de oleaje con umbral de Hs 2 m. (Mendoza, T.E. y Jiménez, J.A., 2008).	13
Figura 4. Ilustración representativa de evento compuesto con $\tau = 0$	15
Figura 5. Ilustración representativa de evento compuesto con τ negativa.	16
Figura 6. Ilustración representativa de evento compuesto con $\tau = 72$ horas.	16
Figura 7. Gráficos de diagnóstico de selección de umbrales para el ajuste de la distribución GPD para la altura de ola significativa.	18
Figure 8. Gráficos de diagnóstico de selección de umbrales para el ajuste de la distribución GPD para la precipitación.	18
Figura 9. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa.	20
Figura 10. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de la precipitación.	20
Figure 11. Diferencias en los focos de dependencia entre la cópula de Gumbel (izquierda) y la cópula de Frank (derecha).	22
Figura 12. Representación gráfica general de la metodología.	22
Figura 13. Media de eventos compuestos por año en las diferentes áreas de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.	24
Figure 14. Distribución de los eventos compuestos a lo largo del año	25
Figura 15. Probabilidad de exceso de una determinada Hs en las diferentes cuencas de estudio Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.	26
Figura 16. Probabilidad de exceso de una determinada P24h en las diferentes cuencas de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.	26
Figure 17. Probabilidad conjunta de superar unos determinados umbrales en cada cuenca de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.	28
Figure 18. Catástrofes en Catalunya ocasionadas por eventos extremos ilustradas en la prensa.	31



Índice de tablas

Tabla 1. Numero de EMAs y puntos SIMAR en cada área de estudio.	14
Tabla 2. Cópulas obtenidas para cada una de las cuencas de estudio.	27
Tabla 3. Probabilidad de ocurrencia de eventos simultáneamente en Girona N y en Ebro inferior y delta.	29

1. Introducción

La zona costera del noroeste del Mediterráneo es una zona muy poblada y desarrollada en la que el impacto de riesgos naturales como inundaciones repentinas y tormentas costeras pueden provocar daños frecuentes e importantes. Las zonas costeras son una de las áreas de mayor riesgo del mundo dada la concentración de peligros naturales, personas y edificios a lo largo de las costas. Entre las diferentes amenazas, las inundaciones son actualmente las más frecuentes, peligrosas y costosas (IPCC, 2012; Blöschl et al., 2020), y es muy probable que aumenten considerablemente con el cambio climático (por ejemplo, Hallegatte et al., 2013; IPCC, 2012; Blöschl et al., 2020).

A lo largo de la historia, han sucedido diversas catástrofes en Catalunya, como las “Riadas del Valles” en el 1962 o la más reciente, la tormenta “Gloria”, que han provocado víctimas mortales, inundaciones, deslizamientos de tierra, desbordamientos y daños severos en infraestructuras (e.g, Canals y Miranda, 2020). Estas catástrofes han sido consecuencia de episodios extremos de precipitación o de tormentas costeras sucesivos. Cuando estas dos amenazas ocurren simultáneamente se produce lo que se denomina un evento compuesto, lo que puede incrementar la extensión temporal y espacial del impacto. De acuerdo con el Informe Especial del IPCC sobre *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (IPCC SREX), define un evento compuesto como:

"(1) dos o más eventos extremos que ocurren simultánea o sucesivamente, (2) combinaciones de eventos extremos con condiciones subyacentes que amplifican el impacto de los eventos, o (3) combinaciones de sucesos que no son en sí mismos extremos pero que conducen a un suceso o impacto extremo cuando se combinan".

En cualquier caso, desde el punto de vista de la gestión del riesgo son eventos críticos ya que requerirán un esfuerzo de los servicios de protección al presentarse situaciones del tipo (i) generación de daños de gran magnitud (debido a la intensificación de los daños que se hubiesen generado por separado, eventos compuestos multivariantes), (ii) necesidad de actuar en zonas distantes del territorio (cuando en una parte se produce una lluvia torrencial mientras que la tormenta costera actúa en otra zona, eventos compuestos espacialmente), o (iii) extensión en el tiempo de las actuaciones (cuando ambos eventos se producen dentro de una ventana de tiempo determinada, eventos compuestos temporalmente) (e.g. ver Zscheischler et al. 2020).

Como se mencionó anteriormente, dadas las características de las condiciones de la zona de estudio, los eventos compuestos considerados aquí estarán formados por la contribución de precipitaciones torrenciales y temporales de oleaje. La gravedad de los daños inducidos, y la gran variación espacial detectada en sus características a escala regional, hace necesario evaluar los posibles cambios en su ocurrencia temporal y temporal y espacial, así como en su intensidad. Por ello, este trabajo servirá como punto de partida para establecer la situación de referencia, es decir, cuáles son las características actuales de estos eventos y como se distribuyen a lo largo del territorio. En el contexto de ingeniería, la descripción de fenómenos que ocurren en el tiempo con un tamaño determinado y

la modelización de fenómenos extremos resulta de gran importancia, por su relación con la evaluación de riesgos. Es importante caracterizar estos fenómenos, su probabilidad de ocurrencia, así como la magnitud esperable de los eventos que determinarán los daños a lo largo de la costa, para una correcta gestión de la capacidad de respuesta de los servicios a las emergencias.

Para situar este estudio en el contexto de la gestión de riesgos, este trabajo también ilustrará el impacto asociado a determinados eventos compuestos. Uno de los problemas para contabilizar adecuadamente estos impactos en grandes áreas geográficas es la dificultad de obtener datos locales después de los eventos en todo el territorio. Sin embargo, una forma de identificar los acontecimientos notables es considerar la importancia de sus impactos asociados en términos cualitativos mediante el análisis de la cobertura de prensa posterior al suceso (e.g. Llasat et al. 2009).

Dentro de este contexto, el presente estudio analiza la ocurrencia y las características de los eventos extremos compuestos a lo largo de la costa catalana como paradigma del noroeste del Mediterráneo. Se analizará el acontecimiento de eventos compuestos por episodios de lluvias intensas, como aproximación a las inundaciones repentinas, y tormentas costeras, utilizando la altura de ola máxima significativa. El análisis se realiza regionalmente a lo largo de una extensión de costa de unos 600 km considerando las principales cuencas hidrográficas a lo largo de la costa catalana (siete) y las áreas costeras correspondientes, evaluando en qué áreas es mayor la probabilidad de ocurrencia de los eventos compuestos. Asimismo, se realiza un análisis de dependencia entre ambos componentes para estudiar la dependencia entre los episodios de precipitación y de oleaje en las diferentes zonas de la costa de Catalunya. Utilizando las cópulas, se evalúa la posible magnitud de los eventos compuestos y la probabilidad de que se presenten episodios extremos simultáneamente en diferentes puntos de la costa.

En este ámbito, merece gran consideración el cambio climático. Si bien los resultados específicos y locales del cambio climático son ciertos, las evaluaciones recientes proyectan una alteración en la frecuencia, intensidad, extensión espacial o duración de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, incluyendo eventos climáticos e hidrometeorológicos como olas de calor, fuertes precipitaciones, sequías y ciclones (UNISDR, 2009e, 2011). En este estudio no se analizan las consecuencias del cambio climático, pero puede servir como estado de referencia para futuros estudios sobre los impactos del cambio climático o para comparar las características de eventos futuros con las características de los eventos actuales. En muchos ámbitos será necesario mejorar o reforzar los procesos de previsión y tratamiento de los efectos adversos asociados a los fenómenos meteorológicos y climáticos. Esta conclusión se ve respaldada por el hecho de que, a pesar de los crecientes conocimientos y comprensión de los factores que provocan los efectos adversos, y a pesar de los importantes avances de las últimas décadas en la reducción de la pérdida de vidas con la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos, la intervención social ante la variabilidad climática histórica no ha seguido el mismo ritmo, con el paso de los años, se deberá integrar más estrechamente el cambio climático con la práctica de gestión de riesgos de las catástrofes naturales.

2. Área de estudio

El dominio de estudio se encuentra en el noreste de la Península Ibérica y está formado por la zona costera a lo largo de Cataluña y las cuencas hidrográficas que desembocan en ella. El litoral discurre en dirección SE-NE y está delimitada por dos cordilleras paralelas situadas cerca del mar: la cordillera litoral y la cordillera prelitoral. La parte norte de la región está limitada por los Pirineos, que van de oeste a este, con altitudes superiores a 2000 metros. Por lo tanto, la región es propensa al desarrollo de inundaciones repentinas. El litoral catalán se extiende unos 600 km, de los cuales ~ 280 km corresponden a costas sedimentarias. La combinación de la disminución de los aportes de sedimentos fluviales, el nivel actual de urbanización y desarrollo de infraestructuras, y la dinámica natural del litoral ha provocado una erosión general de la línea de costa durante las últimas décadas (Jiménez y Valdemoro, 2019).

Para realizar un estudio integrado de los eventos compuestos terrestres (precipitaciones) y costeros (olas), la región de estudio se dividió en siete zonas, siguiendo estudios anteriores sobre inundaciones repentinas (por ejemplo, Llasat et al., 2016), dividiendo la región en sus principales grupos de captaciones naturales a lo largo de la costa (Figura 1). Estas zonas fueron denominadas cuencas o áreas y se enumeraron del 1 al 7 en dirección norte-sur de la siguiente manera: Cuenca 1, Girona Norte. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona Norte. Cuenca 6, Tarragona Sur. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta. Cada zona está compuesta por varias cuencas fluviales y/o grupos de captaciones torrenciales que desembocan en su correspondiente tramo costero.

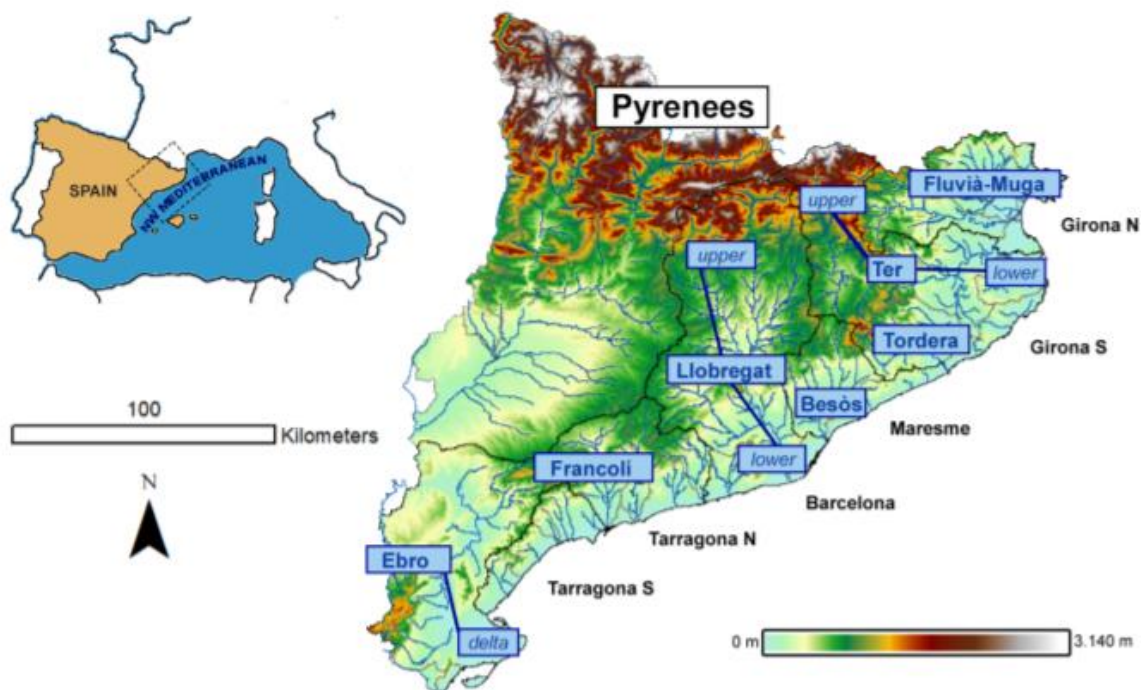


Figura 1. Área de estudio y principales sistemas fluviales costeros (Sanuy, Jiménez y Llasat, 2021).

3. Datos

La precipitación se caracterizó utilizando datos de precipitación diaria (P24h), los datos fueron obtenidos de la base de datos de la Agencia Española de Meteorología (AEMET), que incluye registros de 491 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) en Catalunya que cubren, de forma no homogénea, el periodo comprendido entre 1950 y 2015. Se seleccionaron 69 de todas estas estaciones meteorológicas repartidas en las 7 diferentes áreas de estudio y se agruparon los registros de las diferentes EMAs en sus áreas correspondientes (Tabla 1). Todos los registros de precipitación tratados en este estudio superan el umbral de $P_{24h} > 40 \text{ mm}$, ya que es el valor umbral de precipitación diaria que indica que las lluvias han sido intensas (Cortès et al., 2018).

Los datos de oleaje se obtuvieron de la base de datos SIMAR de Puertos del Estado, concretamente, se trataron los datos de 14 puntos SIMAR repartidos a lo largo de la costa catalana. “El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza” (*Conjunto de datos SIMAR, Puertos del Estado*). Estos conjuntos de datos muestran principalmente los registros horarios la altura significativa de la ola, su período y su dirección durante el periodo comprendido entre 1958 y 2020.



Figura 2. Localización de los 14 puntos SIMAR.

Seguidamente, se seleccionaron solo los registros de oleaje que pertenecían a tormentas acontecidas durante el periodo de registro. Se define una tormenta como un evento de oleaje en el que la altura de ola excede un determinado valor umbral durante un periodo de tiempo, por lo que el primer paso es la definición de la altura de ola umbral. Tradicionalmente esta selección se hace con base en las características locales del régimen de oleaje, por consiguiente, al tratarse del Mar Mediterráneo, se definió la altura de ola umbral en los 2 metros (Mendoza, y Jiménez, 2008).

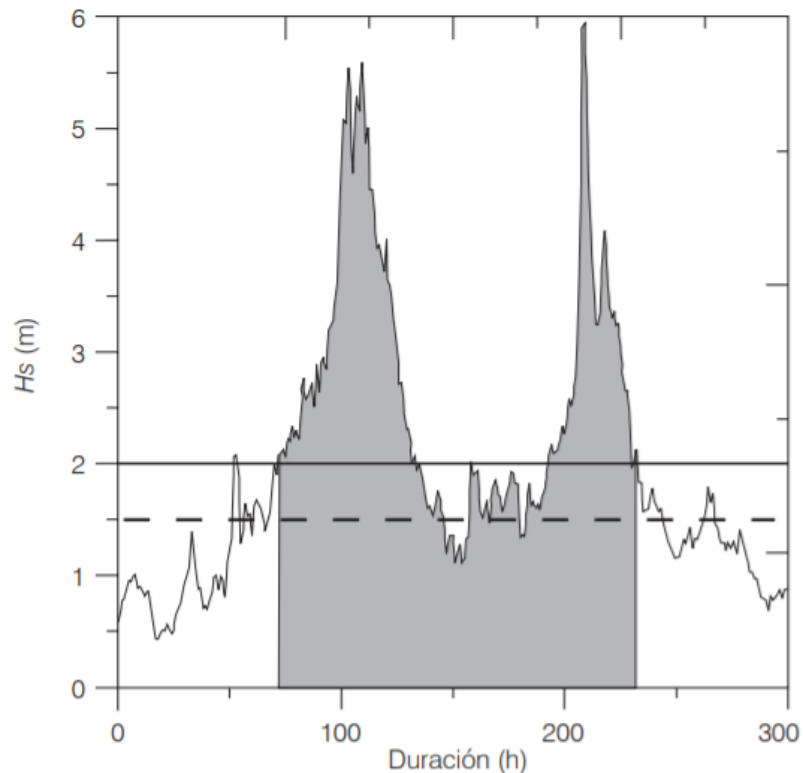


Figura 3. Definición de tormenta de oleaje con umbral de Hs 2 m. (Mendoza, y Jiménez, 2008).

Por lo tanto, una vez agrupados los registros de cada punto SIMAR en sus respectivas cuencas (Tabla 1), el primer paso fue seleccionar solo aquellas olas cuya altura significativa fuera igual o superara dicho umbral. Asimismo, se incluyó un criterio adicional para tener en cuenta la presencia de “tormentas de doble pico”, eventos separados por menos de tres días en los que se supera la altura de ola umbral y en los que la dirección del oleaje se mantiene constante, que son relativamente frecuentes en la zona, especialmente en el caso de los temporales más intensos.

Este proceso se realizó a partir de la función {Hs_storms} programada en el software Matlab (versión R2019b) por Marc Sanuy. Esta función devuelve un archivo “. mat” que incluye la hora, el día, el mes y el año en el que empieza y acaba la tormenta de oleaje, así como la altura de ola (Hs), el periodo pico (Tp), el periodo medio (Tm) y la dirección de la tormenta (Dir). Dicha función también tiene en cuenta las “tormentas de doble pico” y permite programar las horas de dependencia entre estas tormentas que superan el umbral para que sean consideradas como una sola.

Tabla 1. Numero de EMAs y puntos SIMAR en cada área de estudio.

ID	Cuenca	EMA	Puntos SIMAR
Area 1	Girona N	6	1
Area 2.a	Ter inferior y Tordera	9	2
Area 2.b	Ter superior	9	-
Area 3	Maresme	7	3
Area 4.a	Llobregat inferior	5	1
Area 4.b	Llobregat superior	6	-
Area 5	Tarragona N	8	2
Area 6	Tarragona S	5	2
Area 7	Ebro inferior	14	3
Total		69	14

4. Metodología

Una vez agrupados los registros en sus cuencas correspondientes y seleccionados aquellos registros de precipitación que superan el umbral de $P_{24h} \geq 40 \text{ mm}$ y aquellos registros de oleaje que superan el umbral de $H_s > 2 \text{ m}$ se procede a la identificación de eventos compuestos. Se identifican dos tipos de eventos compuestos, eventos compuestos de episodios simultáneos y eventos compuestos de episodios sucesivos, diferenciados por el parámetro τ , este parámetro define el tiempo comprendido entre el final de una de una tormenta de precipitación y el comienzo de una tormenta de oleaje o a la inversa. Los eventos compuestos de episodios simultáneos se determinan con un parámetro τ igual o menor a 0, es decir, una de las amenazas termina el mismo día que empieza la otra ($\tau = 0$) o dentro de su periodo de duración ($\tau < 0$), ver “Figuras 4 y 5” y los eventos compuestos de episodios sucesivos se determinan con un parámetro τ igual a 72 horas, es decir, hay un periodo de 3 días entre el fin de una de las amenazas y el comienzo de la otra.

1. En primer lugar, se crearon las “estaciones ideales” de cada cuenca para los datos de oleaje y de precipitación que cumplían con el valor umbral establecido. El objetivo de crear esta “estación ideal” es convertir todos los registros de las diversas estaciones de cada cuenca en una sola serie de datos, creando así, una “estación ideal” para cada zona de estudio. Cuando varias estaciones de una misma cuenca registraban la misma tormenta en el mismo periodo de tiempo, se selecciona el registro con valor máximo y se eliminan las de valor inferior.

2. Se definen eventos compuestos de episodios simultáneos ($\tau = 0$ ó $\tau < 0$) identificando las fechas en las que ambos fenómenos coinciden a lo largo de todo el territorio, es decir, como si toda la costa catalana, fuera una sola área. Un evento compuesto se identifica aquí cuando un episodio de lluvia fuerte en cualquier estación a lo largo de la costa se produce simultáneamente, con olas extremas en cualquier lugar a lo largo de la costa. Se descartan los periodos de registro con sólo eventos de tormentas costeras "puras", sin lluvia, o se descartan los episodios de lluvia pura, sin olas. Cada evento compuesto registrado se caracteriza en términos de la fecha de inicio y finalización del evento, la máxima altura significativa (Hs) y de máxima precipitación diaria (P24h) alcanzadas durante el evento (se muestra un ejemplo en el "Anexo II").

3. A continuación, se realiza el mismo proceso, pero para cada una de las siete cuencas de estudio. Es decir, un evento compuesto se identifica aquí cuando un episodio de lluvia fuerte en una cuenca geográfica se produce simultáneamente, con olas extremas en la misma cuenca geográfica. Al tener más de un punto de registro en varias de las cuencas, tanto para la precipitación como para el oleaje, en muchos casos se obtuvieron registros muy contiguos que no se habían tratado en la creación de las "estaciones ideales", ya que solo se trataban los registros con la misma fecha de inicio y de finalización. Por lo tanto, se estableció un tiempo de independencia entre eventos, si entre un registro de precipitación o de oleaje y el siguiente, había 72 horas o más se consideraban eventos individuales. Cuando dos de estos registros individuales coincidían o se solapaban en su periodo de duración, se escogía la máxima P24h en el caso de la lluvia y la máxima Hs en los casos del oleaje, y como periodo de duración del evento, el que comprendía ambos registros.

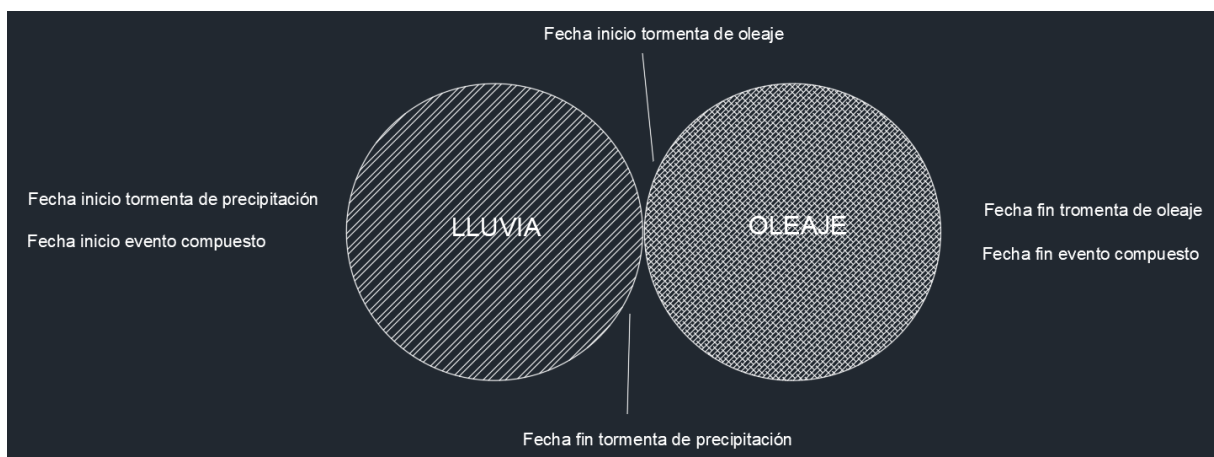


Figura 4. Ilustración representativa de evento compuesto con $\tau=0$

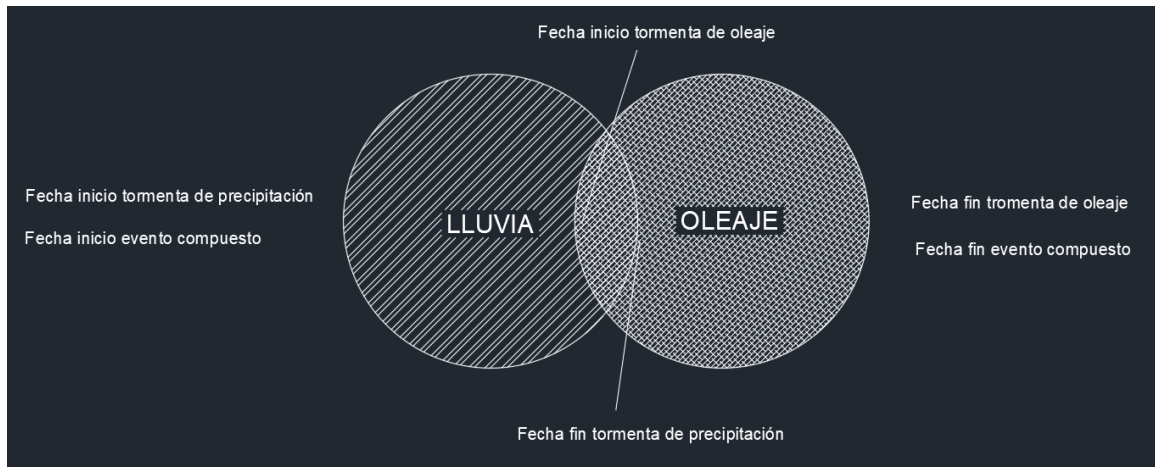


Figura 5. Ilustración representativa de evento compuesto con τ negativa.

4. También se identificaron eventos compuestos de episodios sucesivos ($\tau > 0$) en cada cuenca, esta τ se estableció en 72 horas, estimando que, desde el punto de vista de la gestión de recursos, episodios extremos de oleaje y de precipitación que ocurren en la misma zona en un periodo de 3 días son considerados eventos compuestos (Figura 6).

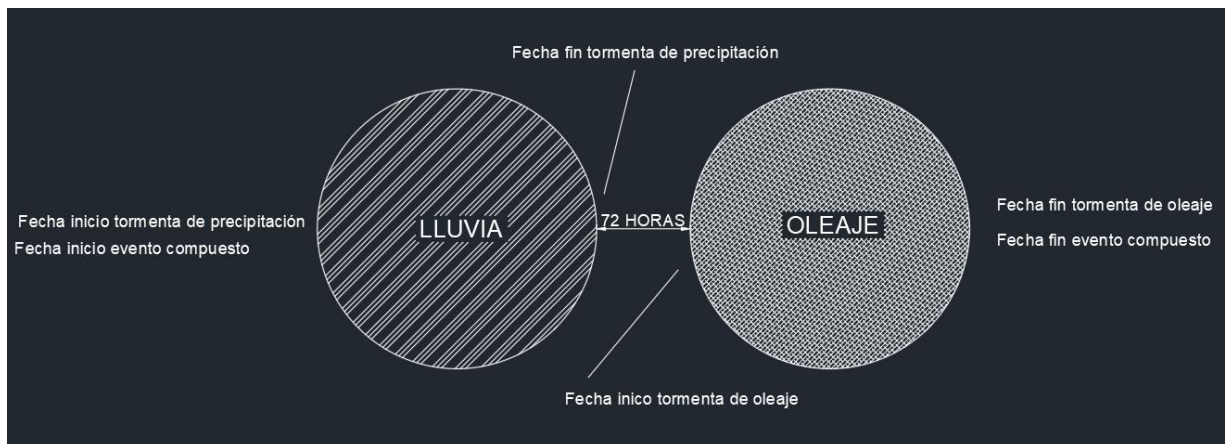


Figura 6. Ilustración representativa de evento compuesto con $\tau = 72$ horas.

4.1 Modelización marginal

Una vez obtenidos los resultados de los eventos compuestos registrados en la costa de Catalunya desde el año 1958 al 2015 para cada una de las áreas de estudio, se procede a estudiar la probabilidad de ocurrencia de los eventos y la dependencia entre ambas amenazas mediante cópulas en cada una de las cuencas.

Primeramente, se trataron ambos eventos (cada variable) marginalmente, es decir, individualmente. Las variables, oleaje y precipitación, se ajustaron mediante la distribución Generalizada de Pareto (GPD), modelo para excesos sobre un umbral. La distribución GPD se parametriza mediante β y ξ , el parámetro β ($\beta > 0$) es el de escala y el parámetro ξ , es el de forma, y puede tomar cualquier valor real pero sus valores clasifican el tipo de distribución. En particular las GPD con $\xi < 0$ tienen el soporte limitado de forma que $y_{sup} = \beta/\xi$. Este tipo de distribuciones pertenecen al dominio de atracción (DA) de Weibull. Para valores de $\xi > 0$, $y_{sup} = +\infty$, de forma que el soporte es infinito, y esas distribuciones pertenecen al DA de Fréchet. Finalmente, la distribución exponencial que se obtiene de la GPD con $\xi = 0$, también tiene el soporte infinito y pertenece al DA de Gumbel (Ortego y Egozcue, 2004). La GPD tiene la expresión:

$$F_Y(y|\beta, \xi) = 1 - \left(1 + \frac{\xi}{\beta}y\right)^{-\frac{1}{\xi}}, \quad 0 \leq y \leq y_{sup} \quad (1)$$

que toma la forma límite exponencial

$$F_Y(y|\beta, \xi = 0) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\beta}\right), \quad 0 \leq y \leq \infty \quad (2)$$

cuando $\xi = 0$. La ecuación (1) representa tres densidades de GPD para distintos valores del parámetro de forma ξ .

Antes de empezar a evaluar los ajustes de la distribución GPD, se decidió comprobar mediante el análisis de los gráficos realizados a partir de las funciones “`threshrange.plot`” y “`mrlplot`” de la versión 2.0 del “`package extRemes`” (Guillegand and Katz) del software R-Studio si los umbrales de $Hs \geq 2 m$ y $P24h \geq 40 mm$ eran suficientemente altos para considerar que los sucesos son extremos (Figuras 6 y 7), a pesar del conocimiento previo externo (por ejemplo, Mendoza y Jiménez, 2008 y Llasat et al., 2016).

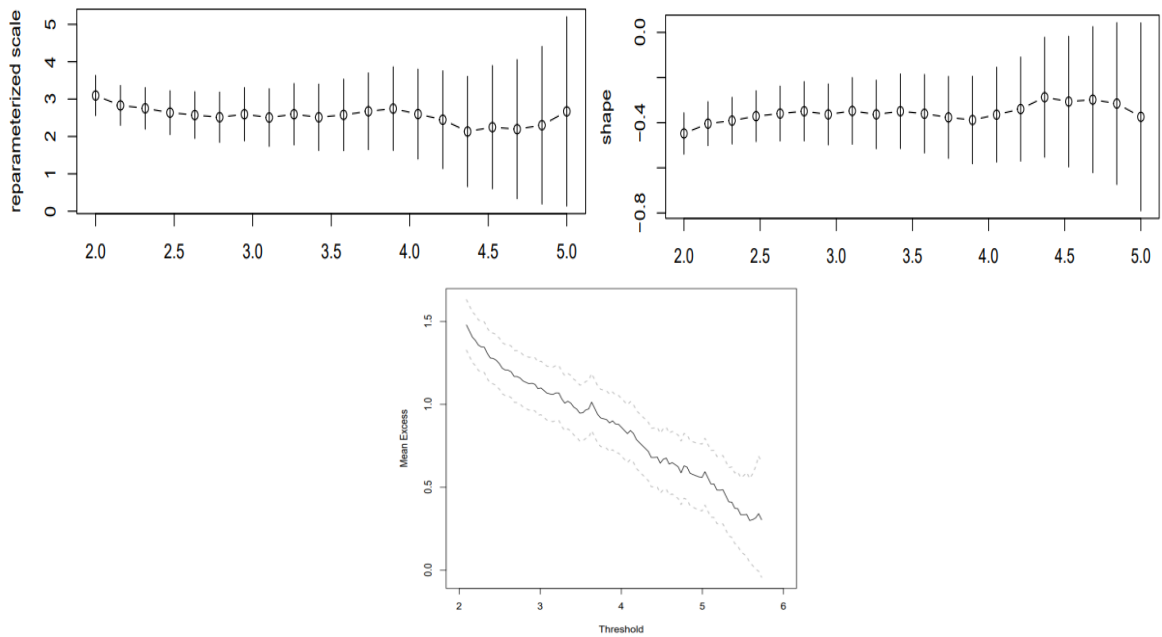


Figura 7. Gráficos de diagnóstico de selección de umbrales para el ajuste de la distribución GPD para la altura de ola significativa.

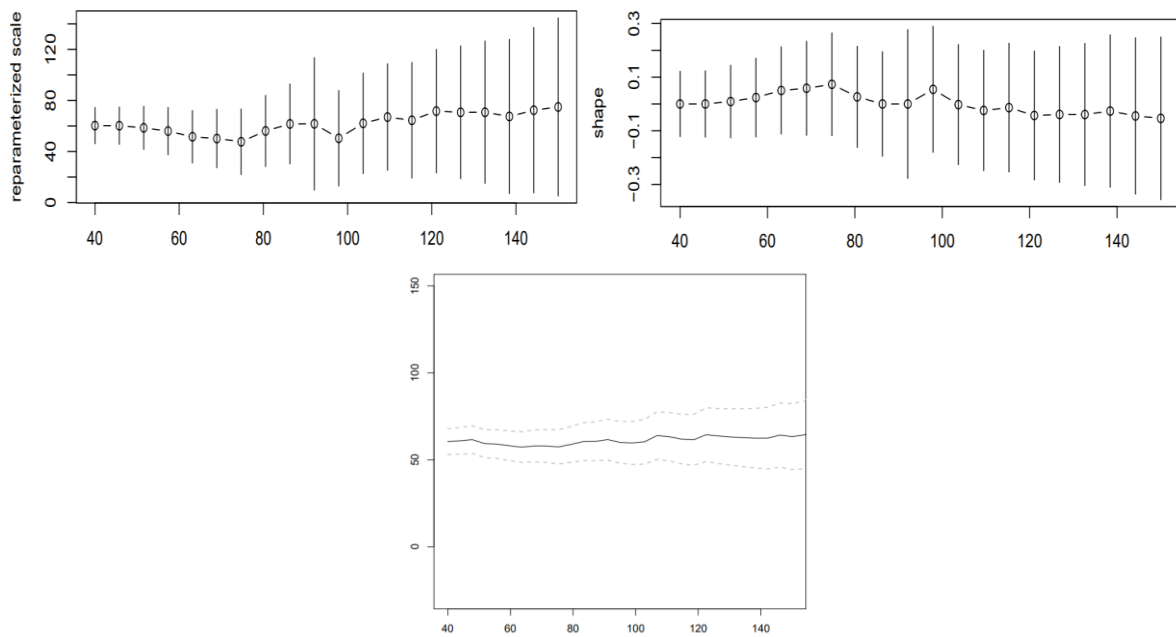


Figure 8. Gráficos de diagnóstico de selección de umbrales para el ajuste de la distribución GPD para la precipitación.

En las Figuras 7 y 8, se muestra arriba a la izquierda el parámetro de escala reparametrizado con límites de confianza del 95% en un rango de 20 umbrales igualmente espaciados de una altura de ola de 2 metros a una altura de ola de 5 metros para los gráficos de los datos de oleaje y un rango de 20 umbrales igualmente espaciados de una precipitación de 40 mm a una precipitación de 150 mm para los gráficos de los datos de la lluvia, ya que son los rangos en los cuales se disponen de una mayor abundancia de datos (arriba a la izquierda). Arriba a la derecha se muestra el parámetro de forma con intervalos de confianza del 95% para el mismo rango de umbrales y el panel inferior representa el gráfico de la vida residual media con líneas grises discontinuas que indican los intervalos de confianza del 95% para los excesos medios.

El último panel de la figura 6 (panel inferior en el centro) suele ser más difícil de interpretar, pero la idea es seleccionar un umbral cuyo gráfico sea lineal, de nuevo dentro de los límites de la incertidumbre, a medida que el umbral aumenta. De nuevo, 2 metros de altura de ola y 40 mm de precipitación parece ser una elección razonable para el umbral, ya que una línea razonablemente recta podría situarse dentro de los límites de la incertidumbre a partir de este punto. Analizando este último panel también se puede realizar una primera aproximación del valor del parámetro ξ , evaluando el sentido de la pendiente, y por consiguiente del dominio de atracción al que pertenecen cada una de las marginales (Ecuación 1). En el caso del oleaje, se aprecia que el sentido de la pendiente es decreciente y por lo tanto, el parámetro ξ tendrá un valor negativo y la distribución pertenecerá al dominio de atracción de Weibull. En el caso de la precipitación, la pendiente no tiende a decrecer ni a crecer, por lo tanto, el parámetro ξ tendrá un valor muy cercano a 0 y seguramente, obtendrá una distribución exponencial que pertenecerá al dominio de atracción de Gumbel.

Una vez ratificado que los umbrales de $H_s \geq 2 \text{ m}$ para las tormentas de oleaje y $P_{24h} \geq 40 \text{ mm}$ para las tormentas de precipitación son suficientes para que los sucesos sean extremos, se procede a comprobar que la distribución GPD se ajusta correctamente a los datos de oleaje y de precipitación y a calcular los parámetros estimados que definen la distribución. Para realizar el proceso que se muestra a continuación se utilizó R-Studio, un entorno de desarrollo para la programación de gráficos y computación estadística, en concreto, la versión 2.0 del “package extRemes”, un paquete de software que acompaña a Coles S. (2001).

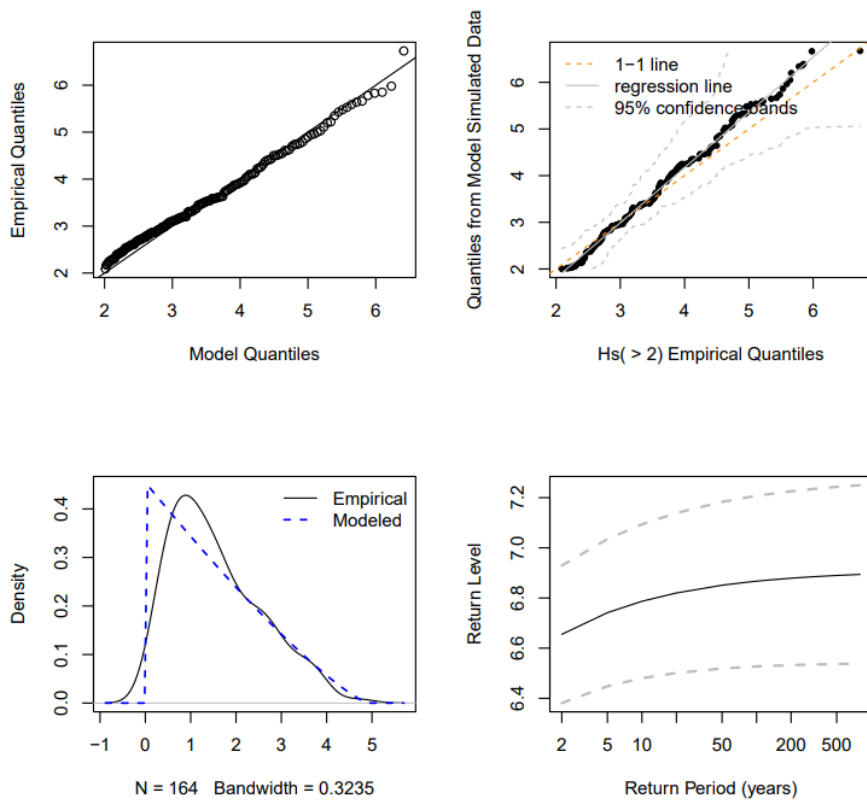


Figura 9. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa.

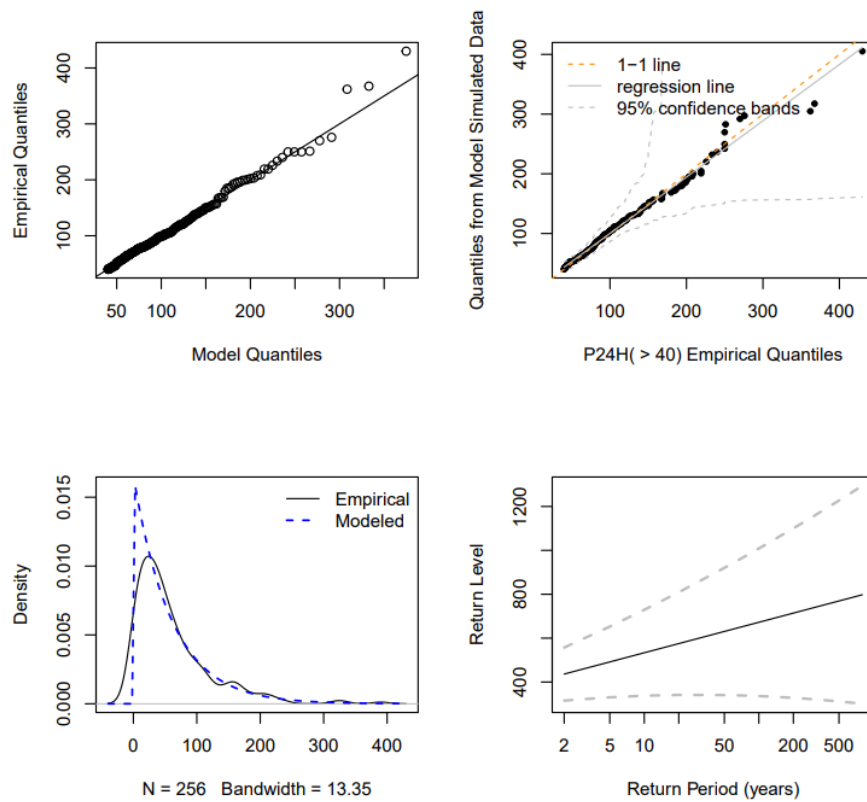


Figura 10. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de la precipitación

Las Figuras 8 y 9 muestran el diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa y de precipitación diaria, respectivamente. Arriba a la izquierda se representa el gráfico de cuantiles, los cuantiles teóricos de muestra extraídos de la distribución GPD ajustada contra los cuantiles empíricos, con bandas de confianza del 95% (arriba a la derecha). Abajo a la izquierda se muestra el gráfico de densidad de los datos empíricos y de la distribución GPD ajustada y abajo a la derecha el gráfico del periodo de retorno con intervalos de confianza de aproximación normal del 95%. Obsérvese que la llamada a la función original se adjunta como etiqueta principal.

Por lo tanto, se podría concluir que, para ambos conjuntos de datos, los ajustes son relativamente buenos, los cuantiles empíricos se ajustan correctamente a los cuantiles teóricos de la distribución y la distribución empírica y la modelada son similares. Tanto este proceso como el de comprobación del umbral, se realizaron para los datos de oleaje y de precipitación para el conjunto de datos de los eventos compuestos obtenidos considerando toda la zona de estudio como una sola área (en el Anexo I se presentan los ajustes de cada una de las cuencas).

Seguidamente se obtuvieron los valores de β y ξ estimados en los ajustes de la distribución GPD para cada una de las cuencas. Para los datos de la altura significativa en todos los casos se obtuvo un dominio de atracción de Weibull ($\xi < 0$). Para los datos de precipitación se obtuvieron dominios de atracción más diversos a lo largo de la costa, debido a esto, se tuvo que realizar un test de razón de verosimilitudes, comprobando que el dominio de atracción de Gumbel ($\xi = 0$) era el que mejor se ajustaba en la mayoría de los casos.

4.2 Análisis de dependencia

Una vez tratadas las variables individuales de cada cuenca marginalmente, se procedió a la identificación de la copula que mejor se ajustaba a las variables de estudio. La copula representa una forma paramétrica conveniente para modelar la estructura de dependencia en distribuciones conjuntas de variables aleatorias independientes, en particular para parejas de variables aleatorias (Nelsen, 2006). Las cópulas pueden extraer la estructura de dependencia de la función de distribución conjunta de un vector de variables aleatorias y, al mismo tiempo, permiten separar la estructura de dependencia del comportamiento marginal (Escarela y Hernández, 2009). En otras palabras, las cópulas son funciones de probabilidad que unen dos funciones marginales, y tienen la capacidad de describir su comportamiento y su dependencia.

Se utilizó la función `BiCopSelect()`, función de la versión 2.4.3 del “package VineCopula” (Nagler, et al. 2021) de R-Studio, que induce pseudo-observaciones en el algoritmo de selección eliminando el efecto de las marginales. Esta función selecciona una familia de cópulas bivariadas adecuada para unos datos dados. Las cópulas pueden seleccionarse según los Criterios de Información de Akaike y Bayesiano (AIC y BIC, respectivamente). En primer lugar, se ajustan todas las cópulas disponibles mediante una estimación de máxima verosimilitud y se calculan las pseudo-observaciones para la inferencia de la cópula. A continuación, se calculan los criterios para todas las familias de cópulas

disponibles y se elige la familia con el valor mínimo. Cuando se comparan modelos ajustados por máxima verosimilitud a los mismos datos, cuanto más pequeño sea el AIC o el BIC, mejor será el ajuste.

La diferencia entre los diferentes tipos de cópulas radica principalmente en el foco de dependencia entre las marginales. Por ejemplo, las cópulas Frank muestran dependencia entre las variables en el centro, es decir para valores de la precipitación y del oleaje intermedios, en cambio las cópulas de Gumbel y de Clayton muestran el foco de dependencia en los extremos, es decir para valores de la precipitación y del oleaje bajos o altos, ver Figura 11.

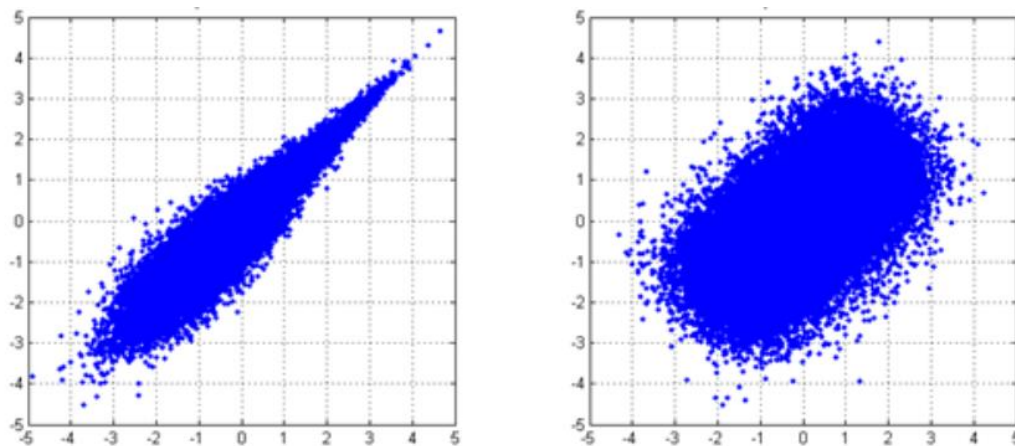


Figure 11. Diferencias en los focos de dependencia entre la cópula de Gumbel (izquierda) y la cópula de Frank (derecha).

Por lo tanto, la cópula seleccionada indicará si la dependencia entre ambas marginales se produce para umbrales altos, intermedios o bajos en cada una de las cuencas. En la Tabla 2, en el apartado de análisis de resultados, se muestran las cópulas que mejor se ajustaron a los datos de Hs y de P24h de cada una de las cuencas. La Figura 12 muestra un resumen esquemático de la metodología seguida durante el estudio.

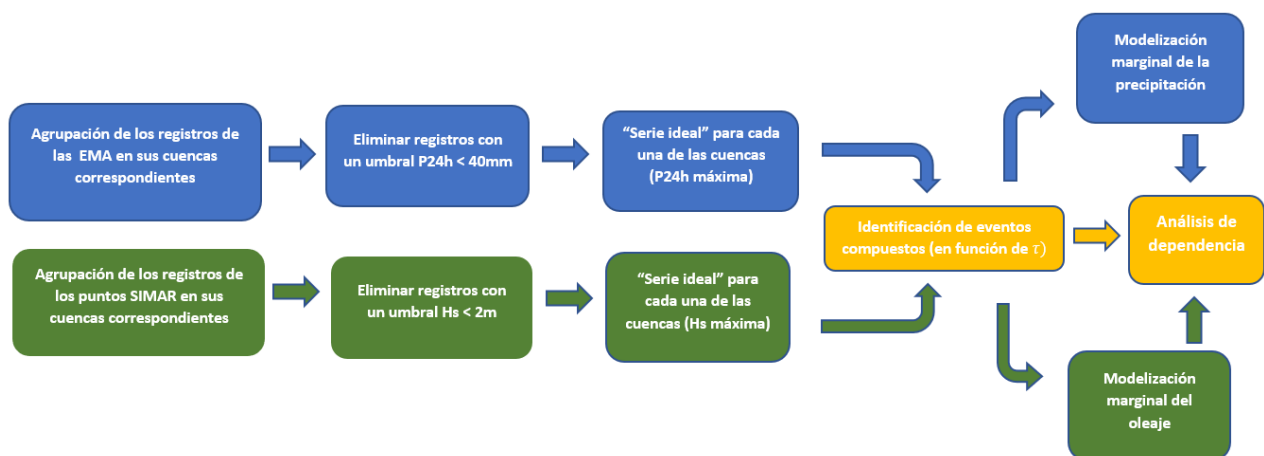


Figura 12. Representación gráfica general de la metodología.

5. Análisis de resultados

Una vez finalizado el proceso de identificación de eventos compuestos, se realizó un primer análisis de los resultados y estos no fueron los esperados. En especial las tormentas de oleaje tenían una mayor duración a la usual en la zona de estudio y esto provocaba unos eventos compuestos excesivamente largos. Además, al obtener unos periodos de tormenta de oleaje tan extensos, el mismo periodo de dicha tormenta coincidía frecuentemente con dos o más registros de tormentas de precipitación. Por lo tanto, se decidió cambiar el tiempo de independencia de las “tormentas de doble pico” y el tiempo de independencia entre eventos para que estos fueran considerados individuales, tanto para los registros de episodios extremos de oleaje como de precipitación.

Este tiempo de independencia que anteriormente era igual o mayor a 72 horas, fue establecido en un tiempo de independencia igual o mayor a 48 horas para que los eventos sucesivos fueran considerados individuales. Este tiempo de independencia difiere del utilizado por otros autores (72 h), pero evita tormentas “artificialmente” largas. El cambio se realizó en la función de Matlab y se obtuvieron nuevos resultados para las tormentas de oleaje. Antes de empezar el análisis de dependencia, se repitió todo el proceso de identificación de eventos compuestos considerando este nuevo tiempo de independencia entre eventos. De esta manera se obtuvieron más eventos compuestos y de menor duración, resultados más coherentes para la zona de estudio.

Considerando toda la costa como una sola Cuenca, en el periodo comprendido entre 1958 y 2015 se identificaron 262 eventos compuestos de episodios simultáneos, lo que resulta en una media 4,5 eventos compuestos al año si se considera toda la costa como una misma zona de estudio. Tanto para el número de eventos individuales como para el de eventos compuestos, se obtuvo una gran variedad de episodios registrados a lo largo de la costa. Durante el periodo comprendido entre 1958 y 2015 el número máximo de eventos compuestos se ha producido en la Cuenca 2 (Ter-Tordera) con un total de 206 eventos compuestos considerando una τ igual o menor a 0 y 260 considerando una τ igual a 72 horas, con duraciones de hasta 8 días. El número mínimo de eventos compuestos se dio en la Cuenca 6 (Tarragona S), con un total de 37 eventos compuestos con duraciones de hasta 5 días considerando una τ igual o menor a 0.

En la figura 13 se muestra la media de eventos compuestos, tanto de eventos compuestos simultáneos ($\tau = 0$ ó $\tau < 0$) como sucesivos ($\tau = 72$ horas), por año en cada cuenca, considerando un periodo de estudio comprendido entre 1958 y 2020.

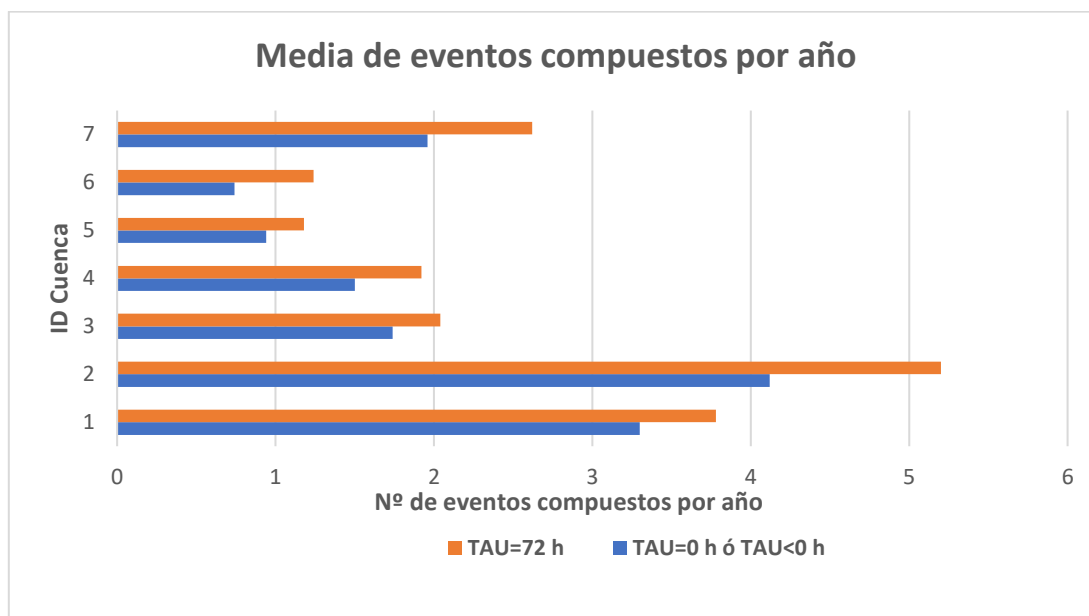


Figura 13. Media de eventos compuestos por año en las diferentes áreas de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.

Una zona con media de 3-4 eventos compuestos al año se puede caracterizar como un área con una probabilidad relativamente alta de experimentar extremos compuestos (Sanuy et al., 2021). Así, los dos sectores más septentrionales, Girona N y Baja Ter-Tordera (Áreas 1 y 2) son los más propensos a sufrir eventos compuestos, de tal manera que son las únicas zonas geográficas en las que las que su frecuencia de ocurrencia supera los 3 eventos compuestos por año. La otra zona que se acerca a dicha frecuencia es la zona más meridional (el bajo Ebro y Delta, Área 7). Destaca que, incluso para la escala relativamente pequeña de la zona de estudio, hay una variación significativa en la frecuencia de ocurrencia de eventos compuestos a lo largo del territorio.

Para la capacidad de respuesta de los servicios a las emergencias y para la gestión de recursos, es importante saber en qué periodos del año se presentan con mayor frecuencia eventos compuestos. La figura 14 muestra la distribución de los eventos compuestos en los diferentes meses del año basada en los eventos compuestos registrados desde el año 1958 y 2015.

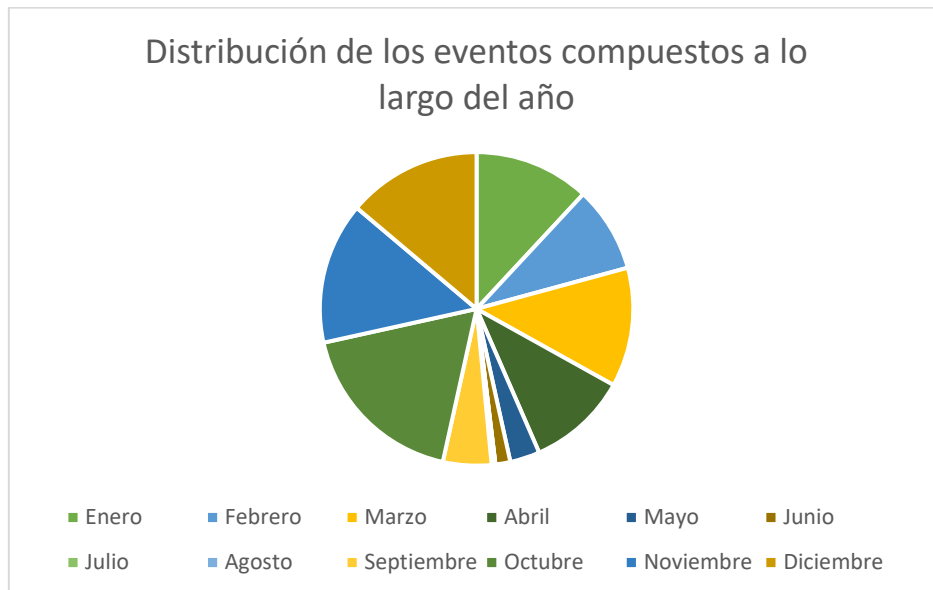


Figure 14. Distribución de los eventos compuestos a lo largo del año

La frecuencia de ocurrencia de eventos compuestos, así como de los eventos individuales que lo componen, es mucho mayor en el periodo comprendido entre octubre y abril que en los meses comprendidos entre mayo y septiembre. Cabe destacar que el mes en el que se ha presenciado el mayor número de eventos compuestos es el mes de octubre.

5.2 Análisis de resultados marginales

Es de vital importancia conocer la probabilidad que tienen ambas amenazas de superar ciertos valores umbrales, que determinarán el nivel de impacto de las tormentas. La acción sinérgica y/o acumulativa de diferentes amenazas no es el único factor que influye en el desbordamiento de la capacidad de respuesta de los servicios a las emergencias, también hay que tener en cuenta la posible magnitud de estas amenazas. A continuación, se muestran dos gráficas representativas (Figuras 15 y 16) de la probabilidad de exceder ciertos umbrales para cada una de las marginales, Hs y P24h, en las diferentes cuencas de estudio, en las que se aprecia el diferente comportamiento de los episodios extremos a lo largo de la costa mediterránea noroccidental.

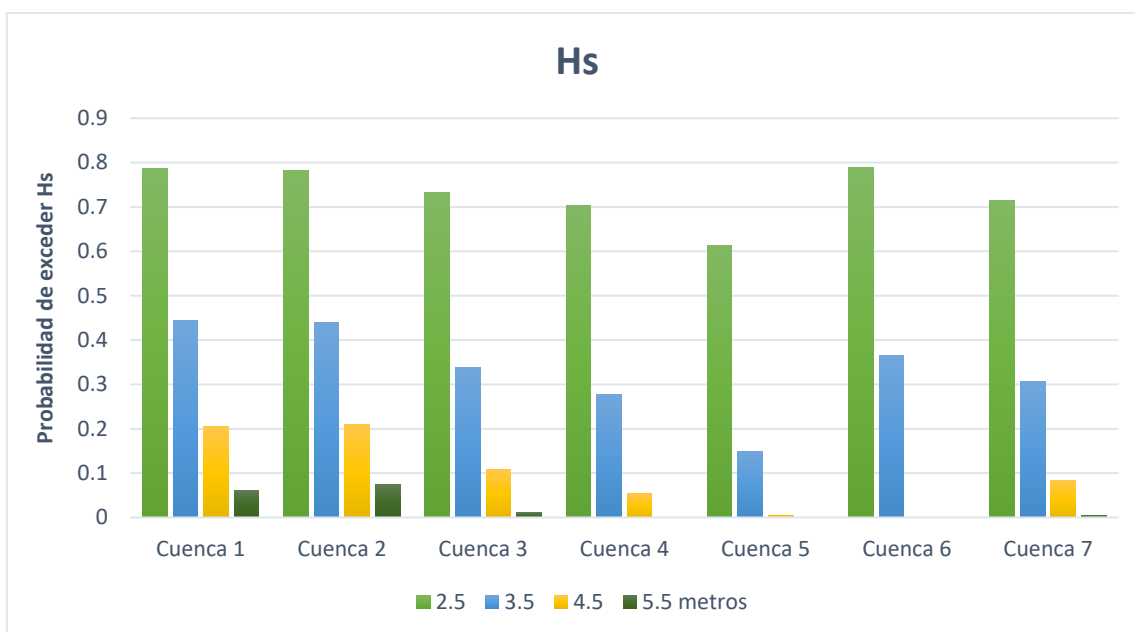


Figura 15. Probabilidad de exceso de una determinada Hs en las diferentes cuencas de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.

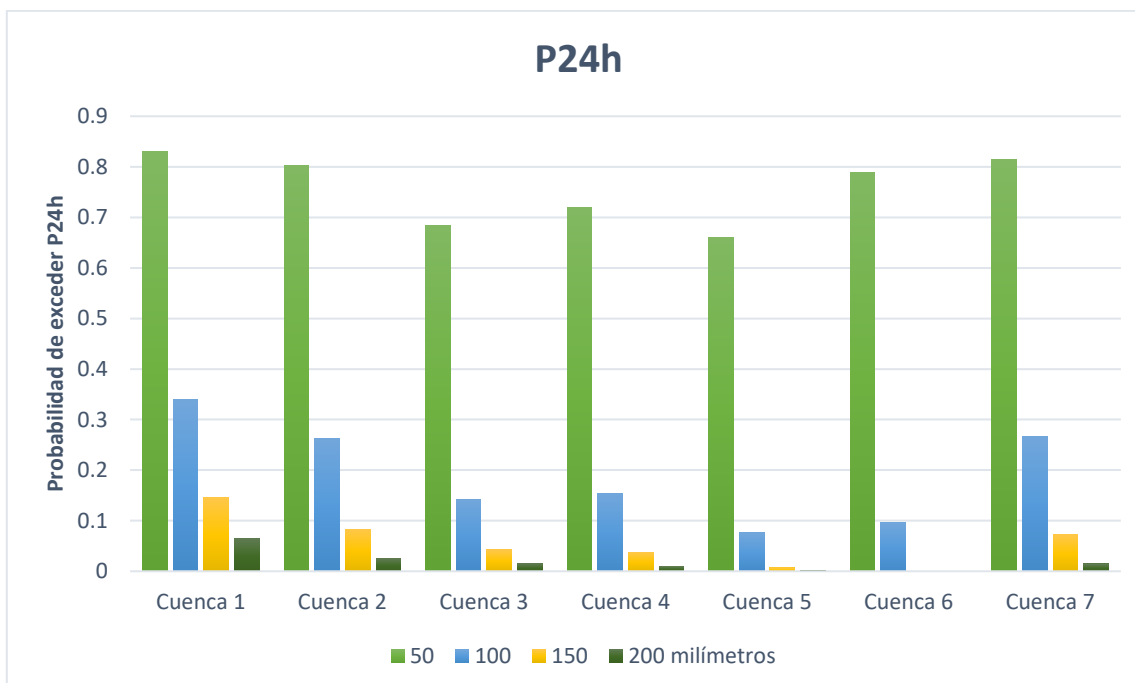


Figura 16. Probabilidad de exceso de una determinada P24h en las diferentes cuencas de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.

La probabilidad de superar umbrales bajos es considerablemente uniforme a lo largo de la costa. La mayor probabilidad de superar precipitaciones diarias de 50 mm se produce en las cuencas 1 y 6, donde supera el 80% y en cuanto al oleaje, la probabilidad de superar una altura significativa de 2.5 metros roza el 80% en las cuencas 1, 2 y 6. Las diferencias notables aparecen en los casos de tormentas más severas, cuando se establece un umbral superior. La probabilidad de superar precipitaciones diarias de 100 mm solo supera el 25% en las Cuencas 1, 2 y 7, produciéndose el máximo en el área Girona Norte (34%). La probabilidad de superar olas de $H_s = 4,5$ metros es del 20,4% y del 20,9% en las Cuencas 1 y 2, respectivamente, mientras que en las demás cuencas no se supera el 10%. La severidad de las tormentas extremas aumenta, especialmente en los extremos norte y sur (Girona N, baja Ter-Tordera y delta del Ebro) donde se han registrado tormentas costeras extremas ($H_s > 5,5$ m) y episodios de lluvia extremos ($P_{24h} > 200$ mm). La probabilidad de ocurrencia de tormentas de este calibre en la zona central de la costa, Tarragona N y Tarragona S (Cuencas 5 y 6) es prácticamente nula, donde no se han registrado $H_s > 4,5$ m ni $P_{24h} > 150$ mm. La probabilidad mínima de superar cualquier umbral para las dos amenazas se produce en Tarragona Norte (Cuenca 5). Nótese de nuevo, las diferencias a lo largo de la costa a pesar de su pequeña escala (600 km), lo que puede tener importantes implicaciones para la gestión del riesgo.

5.3 Análisis de resultados conjuntos

Una vez, tratadas y evaluadas las variables marginalmente, se procedió a tratarlas conjuntamente mediante la cópula que se adaptaba mejor a los datos de precipitación y oleaje de cada una de las cuencas. A continuación, se muestra una tabla resumen de las cópulas obtenidas para cada área de estudio.

Tabla 2. Cópulas obtenidas para cada una de las cuencas de estudio.

Cuenca 1 (Girona N)	Frank Copula	Cuenca 5 (Tarragona N)	Independence Copula
Cuenca 2 (Ter-Tordera)	Frank Copula	Cuenca 6 (Tarragona S)	Survival Gumbel
Cuenca 3 (Maresme)	Clayton Copula	Cuenca 7 (Ebro y Delta)	Independence Copula
Cuenca 4 (Llobregat)	Rotated Tawn		

La Tabla 2 muestra una variedad considerable en la dependencia entre las dos marginales a lo largo de la zona de estudio. En los sectores Girona N y Ter-Tordera existe un foco de dependencia entre las variables para valores de precipitación y oleaje intermedios. En la Cuenca 3, la cópula que mejor se ajusta a los datos dados es una cópula Clayton, que muestra una independencia no nula entre las dos variables para valores bajos. En Tarragona N y en el Ebro inferior y Delta se obtuvo una cópula que resulta de una estructura de dependencia en la que cada variable individual es independiente de las demás, es decir, en estas cuencas no se encontró ninguna dependencia entre las variables individuales. Por lo tanto, se podría concluir que en todas las zonas de estudio, excepto en las Cuencas

5 y 7, existe una dependencia entre las tormentas de oleaje y de precipitación, produciéndose la dependencia para los valores de las amenazas de mayor severidad en el sector de la costa más septentrional.

Mediante la cópula seleccionada, es posible calcular la probabilidad conjunta de ocurrencia de las amenazas para diferentes valores umbrales de oleaje y de precipitación, pudiendo conocer así la posible magnitud de los sucesos. A parte de poder calcular la probabilidad conjunta de ocurrencia en una misma cuenca, el uso de la cópula también permite calcular la probabilidad conjunta de ocurrencia simultánea de ambos eventos en diferentes puntos de la costa.

La Figura 17 muestra para cada cuenca de estudio, la probabilidad de superar simultáneamente 3 conjuntos de valores umbrales. La columna en verde indica la probabilidad de superar al mismo tiempo en una misma cuenca una Hs de 2,5 metros y una P24h de 50 mm (umbrales que provocarían un evento compuesto, pero que dentro del contexto son sencillos de alcanzar), la columna azul representa la probabilidad de superar una Hs de 3,5 metros y una P24h de 100 mm simultáneamente en una misma cuenca (umbrales intermedios) y por último la columna ámbar indica la probabilidad de superar a la vez los umbrales de 4,5 metros para la Hs y de 150 mm en la misma cuenca de estudio (umbrales muy altos, que darían lugar a un evento compuesto con consecuencias seguramente graves).

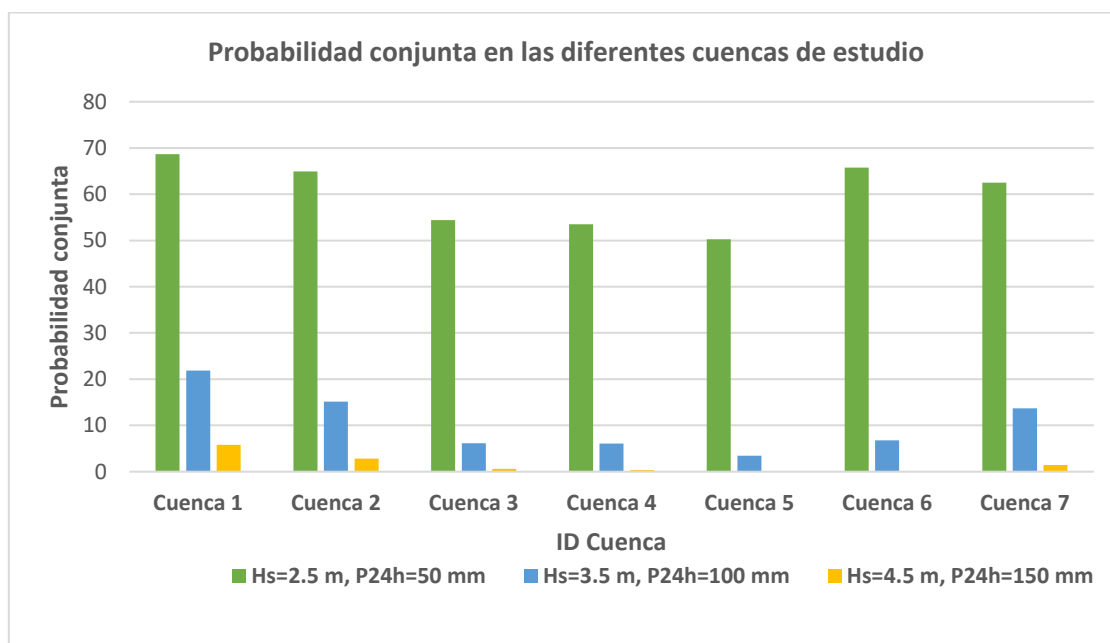


Figure 17. Probabilidad conjunta de superar unos determinados umbrales en cada cuenca de estudio. Cuenca 1, Girona N. Cuenca 2, Ter y Tordera. Cuenca 3, Maresme. Cuenca 4, Llobregat. Cuenca 5, Tarragona N. Cuenca 6, Tarragona S. Cuenca 7, Ebro inferior y Delta.

La probabilidad de superar simultáneamente umbrales bajos (bajos en el contexto de episodios extremos) es igual o superior al 50% en todas las cuencas, obteniendo la máxima probabilidad conjunta de ocurrencia en la zona de Girona N, con una probabilidad del 68,7%. La probabilidad conjunta disminuye considerablemente cuando se aumentan estos umbrales, solo en la Cuenca 1 se excede el 20% de probabilidad de sobrepasar los umbrales intermedios de Hs igual a 3,5 metros y de P24h igual a 100 mm (21,8%), y solo se supera el 10% en Girona N (15,17%) y en el delta del Ebro (13,7%). La probabilidad de exceder umbrales extremos simultáneamente fue menor al 1% en todas las cuencas, excepto en los dos sectores más septentrionales, Girona N (5,8%) y baja Ter-Tordera (2,8%) y en la zona más meridional, el bajo Ebro y Delta (1,5%).

Hasta el momento se ha analizado la probabilidad de ocurrencia de eventos compuestos y de su posible magnitud, suponiendo que ambas amenazas sucedían simultáneamente en la misma zona geográfica. Pero, para la gestión de los recursos, la situación más complicada es tener que atender al mismo tiempo situaciones de emergencia en diferentes puntos de la costa manteniendo la capacidad de respuesta durante un periodo de tiempo en diferentes regiones. Como se ha podido ver, las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de eventos compuestos y a la vez con mayor probabilidad de que estos episodios sean de grandes magnitudes, son los sectores situados en los extremos de la costa. Por lo tanto, se evaluó la probabilidad de que simultáneamente, se superasen ciertos umbrales de altura de ola significativa en la Cuenca 1 (Girona N) y ciertos umbrales de P24h en la Cuenca 7 (Ebro inferior y Delta) y a la inversa. También se evaluó la probabilidad de que sucedan fuertes episodios de lluvia o fuertes episodios de oleaje en ambas cuencas simultáneamente.

Tabla 3. Probabilidad de ocurrencia de eventos simultáneamente en Girona N y en Ebro inferior y delta.

Cuenca 1 (Hs)	Cuenca 7 (P24h)	Probabilidad
2,5 m	50 mm	67,8%
3,5 m	100 mm	18,27%
4,5 m	150 mm	3,44%
5,5 m	200 mm	0,36%

Cuenca 7 (Hs)	Cuenca 1 (P24h)	Probabilidad
2,5 m	50 mm	63,3%
3,5 m	100 mm	16,5%
4,5 m	150 mm	2,7%
5,5 m	200 mm	0,91%

Cuenca 1	Cuenca 7	Probabilidad
Hs = 4,5 m	Hs = 4,5 m	4%
Hs = 5,5 m	Hs = 5,5 m	0,13%
P24h = 150 mm	P24h = 150 mm	2,55%
P24h = 200 mm	P24h = 200 mm	0,3%

La probabilidad de que se den episodios de tormenta costera y de tormenta de precipitación simultáneamente en ambos extremos de la costa es relativamente alta, superior al 60%. La probabilidad de que sucedan eventos compuestos de grandes magnitudes ($H_s = 4,5\text{m}$ y $P_{24h} = 150\text{ mm}$), supera el 2,5% tanto en la hipótesis en la que se considera que los episodios de fuerte oleaje sucedan en Girona N y los episodios de fuertes lluvias en el Ebro inferior y Delta, como en la hipótesis inversa. Hay que recordar que la probabilidad de superar estos umbrales en las demás cuencas geográficas es prácticamente nula. En la tabla de la derecha se puede apreciar que la probabilidad de que acontezcan olas de magnitudes insólitas ($H_s=5,5\text{m}$) es menor a la probabilidad de que acontezcan lluvias muy intensas ($P_{24h}=200\text{ mm}$), la principal causa de las inundaciones. El acontecimiento de estos episodios de grandes magnitudes en diferentes cuencas podría provocar el desbordamiento de los servicios de emergencia, ya que tendrían que atender al mismo tiempo dos amenazas “inusuales” de gran impacto en diferentes regiones durante varios días.

6. Discusión

Como se ha comentado en la introducción, una forma de identificar los daños producidos por eventos compuestos extremos y de considerar la importancia de sus impactos es el análisis de la cobertura de prensa posterior al suceso, en la Figura 18 se muestran las portadas de la prensa durante los días posteriores a las mayores catástrofes meteorológicas registradas en Catalunya y posteriormente se citan las principales características y consecuencias de algunos episodios, con mención especial al calentamiento global, que podría incrementar el número de acontecimientos similares a los comentados y su intensidad.

De hecho, si dividimos el periodo de estudio en dos tramos, (1958-1999 y 2000-2015) ya se aprecian los primeros aumentos. Considerando toda la costa como una misma zona de estudio, la media de eventos compuestos al año en el primer periodo es de 4,4 y en el segundo de 5,2. La media de altura de ola significativa máxima en los eventos compuestos identificados en el primer periodo es de 3,5 metros y en el segundo de 3,53 metros y lo mismo sucede con las lluvias, en el primer tramo la media de la precipitación diaria máxima en los eventos compuestos identificados es de 99,3 mm y en el segundo es de 101 mm. Pequeños aumentos que podrían seguir incrementando con el paso de los años.



Figure 18. Catàstrofes en Catalunya ocasionades por eventos extremos ilustradas en la prensa.

En 1962 se produjo una de las mayores catástrofes hídricas de la historia de España (se registraron precipitaciones de P24h=250 mm). El 25 de septiembre una torrencial lluvia inundó los municipios y ciudades de la comarca del Vallés desbordando los ríos del Besós y del Llobregat (Área 4). Fue tan contundente que dejó centenares de víctimas mortales y viviendas destrozadas.

Existen hechos más recientes, la severa tormenta Gloria tuvo lugar en la costa catalana en enero de 2020, con eventos que rompieron el récord en todas las áreas tanto para la altura de las olas (se registraron olas de Hs=7,6 metros) como para las precipitaciones (se registraron P24h=209 mm) en la zona más meridional (Cuenca 7). Los impactos de las olas produjeron una importante erosión en las playas, con desbordamiento masivo e inundación de zonas bajas como el delta del Ebro.

El temporal costero extremo fue acompañado de lluvias y tormentas muy intensas en todo el territorio, alcanzando valores récord de las últimas décadas, lo que contribuyó significativamente a las inundaciones a lo largo de algunas llanuras costeras, cortes puntuales y daños en carreteras y vías férreas. Las inversiones para reconstruir las infraestructuras portuarias afectadas por se estiman en unos 17,4 millones de euros, 6 millones de euros para reparar los daños en el dominio público costero (MITECO), y los daños debidos a las inundaciones en las márgenes de los ríos y llanuras de inundación fueron estimados en 42 millones de euros por la Agencia Catalana del Agua (ACA).

Episodios como los comentados podrían aumentar la probabilidad de ocurrencia de estos episodios, así como su magnitud. El calentamiento global juega un papel importante en la cantidad e intensidad de las tormentas. Explicado sencillamente, las tormentas se alimentan del agua evaporada de mares y océanos, cuando más alta sea la temperatura, mayor será la evaporación y consecuentemente, mayor será la intensidad de las tormentas. Debido al cambio climático, se está experimentando una subida del nivel del mar, provocando precipitaciones copiosas e incrementando la intensidad del viento, afectando al oleaje, provocando en un futuro tormentas más intensas y menos predecibles.

¿La consecuencia? Pérdidas de vidas humanas, cosechas, infraestructuras y servicios esenciales. ¿La solución? Abordar oportunamente los riesgos derivados del cambio climático, esto implica un entendimiento profundo de los eventos compuestos, así como de los fenómenos meteorológicos que los componen. Implica también conocer sus características y particularidades, como las posibles magnitudes de estos eventos y sus principales focos de ocurrencia. Cuando se habla de “riesgo asociado al cambio climático” se percibe como una realidad nueva, un “riesgo emergente” que no se ha analizado en profundidad hasta el último quinquenio, en el mejor de los casos. Por tanto, el “riesgo asociado al cambio climático” se puede configurar como un factor común desencadenante de un conjunto de riesgos que ya están en la mayor parte de los casos contemplados, pero nunca contemplados desde una certeza fidedigna, es por eso por lo que requieren especial atención en los planes de gestión de riesgos.

Asimismo, la Directiva de Inundaciones reconoce el cambio climático como “uno de los factores que están contribuyendo a aumentar la probabilidad de ocurrencia las inundaciones, así como su impacto negativo, y exige que esta influencia se tenga en consideración tanto en la realización de la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) para la identificación de las zonas de mayor riesgo de la cuenca como en la elaboración de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) y sus revisiones”. (*Planes de gestión de los riesgos de inundación, Gobierno de España*).

7. Resumen y conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, la costa mediterránea noroccidental representada por la zona litoral catalana se puede caracterizar como un área con una probabilidad relativamente alta de experimentar eventos extremos compuestos (más de 3-4 eventos compuestos de media al año). Sin embargo, incluso para la escala relativamente pequeña de la zona, hay una variación significativa en las características de los eventos a lo largo del territorio, lo que puede tener importantes implicaciones para la gestión del riesgo. A partir de los análisis realizados se ha podido comprobar que la probabilidad de ocurrencia de eventos compuestos, la posible magnitud de los eventos individuales y compuestos y la probabilidad conjunta de las amenazas varía considerablemente a lo largo de la costa.

Así, los dos sectores más septentrionales, Girona N y Baja Ter-Tordera (Áreas 1 y 2) son los más propensos a sufrir eventos compuestos, de tal manera que son las únicas zonas geográficas en las que las que su frecuencia de ocurrencia supera la media. Estas zonas también presentan la mayor dependencia en la intensidad de ambas amenazas (P24h y Hs). La otra zona en la que la ocurrencia de eventos compuestos se acerca a la frecuencia media a lo largo del territorio es la zona más meridional (el bajo Ebro y Delta, Área 7). La probabilidad de superar umbrales intermedios-altos también es superior en estas tres áreas, tanto para los análisis marginales como conjuntos. Los resultados obtenidos en el análisis de dependencia muestran un foco espacial de co-ocurrencia más frecuente y de mayor severidad en la costa más septentrional (Cuencas 1 y 2) para valores de Hs y P24h intermedios, mientras que, en las cuencas situadas en el centro de la costa, la dependencia entre las amenazas se produce para valores con umbrales bajos. La dependencia entre episodios de lluvia y de oleaje con umbrales altos es muy baja, los eventos de grandes magnitudes son prácticamente independientes en toda la costa. En cuanto a la simultaneidad de ocurrencia de eventos en diferentes puntos de la zona de estudio, la probabilidad de que acontezcan episodios de fuertes tormentas en ambos extremos de la costa es relativamente alta.

Como ya hemos visto, la presencia de eventos compuestos extremos puede provocar terribles secuelas, físicas y consecuentemente, económicas. La probabilidad de que vuelvan a suceder episodios de esta magnitud no es tan baja como se podría imaginar. De hecho, teniendo en cuenta los registros de las estaciones AEMET y de los puntos SIMAR, la probabilidad de que sucedan tormentas con altura de ola significativa de más de 6 metros es del 2,7 %, de que sucedan lluvias con una precipitación de más de 200 mm es del 7% en cualquier punto de la costa de Catalunya y la

probabilidad de que dos amenazas de este calibre se produzcan simultáneamente es del 0,5%. Es por esta razón, que es importante conocer en qué fechas del año es más probable que sucedan estos episodios, en qué zonas de la costa frecuentan más tanto los eventos individuales como los eventos compuestos y su posible magnitud y que probabilidad existe de que se den episodios de grandes magnitudes en las diferentes regiones de la costa. Cuanto mejor caracterizados estén los eventos compuestos y su probabilidad de ocurrencia, más sencilla será la gestión de recursos y mayor será la capacidad de respuesta de los servicios a las situaciones de emergencia.

El uso de la cópula es atractivo, pues permite una gran flexibilidad para modelar la distribución conjunta de una pareja aleatoria que pueda surgir de prácticamente cualquier disciplina, y lo hace de forma sencilla ya que solo se necesita especificar la función que copula y las marginales. Una vez estimada la cópula que mejor se ajusta a las dos variables marginales, se pueden realizar una gran variedad de análisis de probabilidad de ocurrencia de los eventos y de magnitud, así como evaluar la probabilidad conjunta de nuestros datos, ya sea en una misma cuenca o no, de manera sencilla.

Este análisis ha servido para caracterizar el escenario actual de estos eventos compuestos en el noroeste del Mediterráneo en una escala temporal de unos 57 años (1958 a 2015), que puede servir como estado de referencia para futuros estudios sobre los impactos del cambio climático. En muchos ámbitos será necesario mejorar o reforzar los procesos de previsión y tratamiento de los efectos adversos asociados a los fenómenos meteorológicos intensificados por el calentamiento global. A pesar de ser sencillo, este análisis nos permitió identificar la ocurrencia, las características principales y la distribución espacial de los principales tipos de eventos compuestos a lo largo de la zona costera catalana en el noroeste del Mediterráneo.

Disponibilidad del Código. Se utilizaron scripts de MATLAB R2019b para automatizar los diferentes pasos del análisis y no están disponibles públicamente.

Disponibilidad de los datos. Los datos de oleaje se obtuvieron de Puertos del Estado y los datos de lluvia se obtuvieron de la AEMET. No están disponibles públicamente.

Referencias

Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A., Barriendos, M., Böhm, O., Brázdil, R., Coeur, D., Demarée, G., Llasat, M.C., Macdonald, N., Retsö, D., Roald, L., Schmocker-Fackel, P., Amorim, I., Belínová, M., Benito, G., Bertolin, C., Camuffo, D., Cornel, D., Doktor, R., Elleder, L., Enzi, S., Garcia, J. C., Glaser, R., Hall, J., Haslinger, K., Hofstätter, M., Komma, J., Limanówka, D., Lun, D., Panin, A., Parajka, J., Petric, H., Rodrigo, F. S., Rohr, C., Schönbein, J., Schulte, L., Silva, L. P., Toonen, W. H. J., Valent, P., Waser, J., and Wetter, O.: *Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years*, *Nature*, 583, 560–566, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>, 2020.

Canals, M., Miranda, J. 2020. *Sobre el temporal Gloria (19-23.01.20), els seus efectes sobre el país i el que se'n deriva*: Report de Resposta Ràpida (R3). Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 2020.

Coles, S., *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, SPRINGER, London, 2001.

Cortès, M., M. Turco, M. Llasat-Botija, and M. C. Llasat. *The relationship between precipitation and insurance data for floods in a Mediterranean region (Northeast Spain)*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 857–868, doi.org/10.5194/nhess-18-857-2018, 2018

Escarela, G., Hernández, A., *Modelado de parejas aleatorias usando cópulas*, Departamento de Matemáticas, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Ciudad de México, México, Junio 2009.

Guillegand E. and Katz R.W., *extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R*, August 201d, Volume 72, Issue. 8, *Journal of Statistical Software*.

Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., and Corfee-Morlot, J.: *Future flood losses in major coastal cities*, *Nat. Clim. Change*, 3, 802–806, <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>, 2013.

Hofert M., Kojadinovic I., Maechler M. and Yan J. *copula: Multivariate Dependence with Copulas*. R package version 1.0-1 URL <https://CRAN.R-project.org/package=copula>, 2020

IPCC-2012, Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.T., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., and Midgley, P.M. (Eds.), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge, England, June 2012.

Jiménez, J. A. and Valdemoro, H. I.: *Shoreline evolution and its management implications in beaches along the Catalan coast*, in: *The Spanish Coastal Systems Dynamic Processes, Sediments and Management*, edited by: Morales, J. A., Springer, Berlin, 745–764, 2019.

Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., & López, L. A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), 2049-2061, 2009.

Llasat, M. C., Marcos, R., Turco, M., Gilabert, J., and Llasat-Botija, M.: *Trends in flash flood events versus convective precipitation in the Mediterranean region: the case of Catalonia*, *J. Hydrol.*, 541, 24–37, 2016.

Mendoza, T.E. y Jiménez, J.A., *Clasificación de tormentas costeras para el litoral catalán (Mediterráneo NO)*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Junio 2008.

Mendoza, E. T. and Jiménez, J. A.: *Regional vulnerability analysis of Catalan beaches to storms*, *P. I. Civil. Eng.-Mar. En.*, 162, 127– 135, <https://doi.org/10.1680/maen.2009.162.3.127>, 2009.

Mendoza, E. T., Jimenez, J. A., and Mateo, J.: *A coastal storms intensity scale for the Catalan Sea (NW Mediterranean)*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2453–2462, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2453-2011>, 2011.

Nagler T., Schepsmeier U., Stoeber J., Brechmann E.C, Graeler B. and Erhardt T. *VineCopula: Statistical Inference of Vine Copulas*. R package version 2.4.3. <https://CRAN.R-project.org/package=VineCopula>, 2021.

Nelsen, R. B., *An introduction to copulas*, Department of Mathematical Sciences Lewis & Clark College, Portland, USA, <https://doi.org/10.1007/0-387-28678-0>, 2006.

Ortego, M.I. y Egozcue J.J, *Procesos evaluados y modelos extremales*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2004.

Sanuy, M., Jiménez, J. A, M., Rigo T and Llasat M. C., *Classifying compound coastal storm and heavy rainfall events in the north-western Spanish Mediterranean*, *Laboratori d'Enginyeria Marítima*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, July 2021.

Sanuy, M. and Jiménez, J. A.: *Probabilistic characterisation of coastal storm-induced risks using Bayesian networks*, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 219–238, <https://doi.org/10.5194/nhess21-219-2021>, 2021.

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., et al.: A typology of compound weather and climate events, *Nat. Rev. Earth Environ.*, 1, 333-347, doi: 10.1038/s43017-020-0060-z, 2020.

ANEXO I

A continuación, se presentan los diagnósticos de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa y de precipitación de cada una de las cuencas de estudio. Una vez ratificado que los umbrales de $H_s=2\text{m}$ para las tormentas de oleaje y de $P_{24h}=40\text{mm}$ para las tormentas de precipitación eran aceptables en todas las cuencas, se comprobó que los ajustes fueran relativamente buenos, que los cuantiles empíricos se ajustasen correctamente a los cuantiles teóricos de la distribución y que la distribución empírica y la modelada fuesen similares.

Cuenca 1, Girona Norte

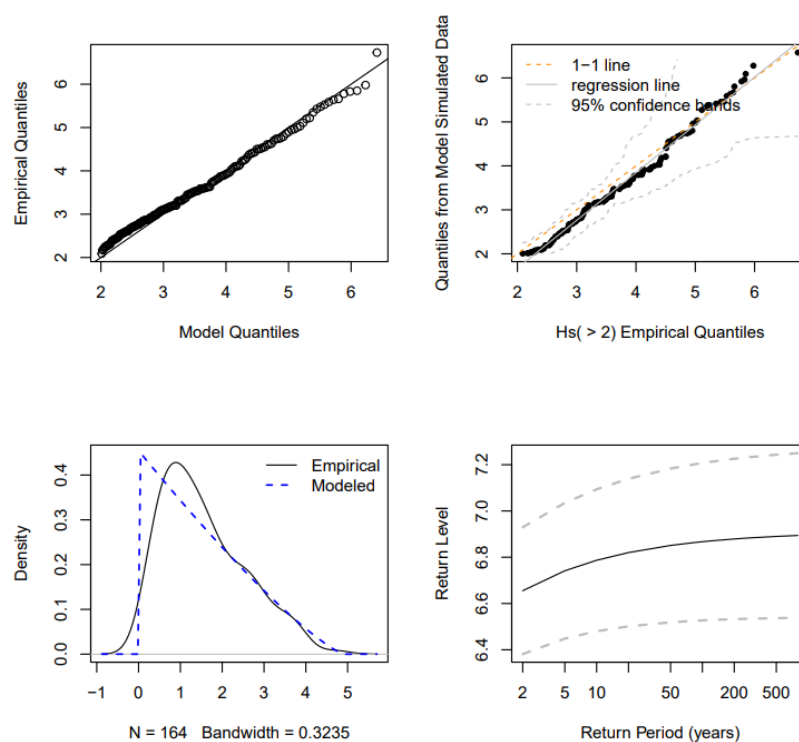


Figura A.1..Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 1.

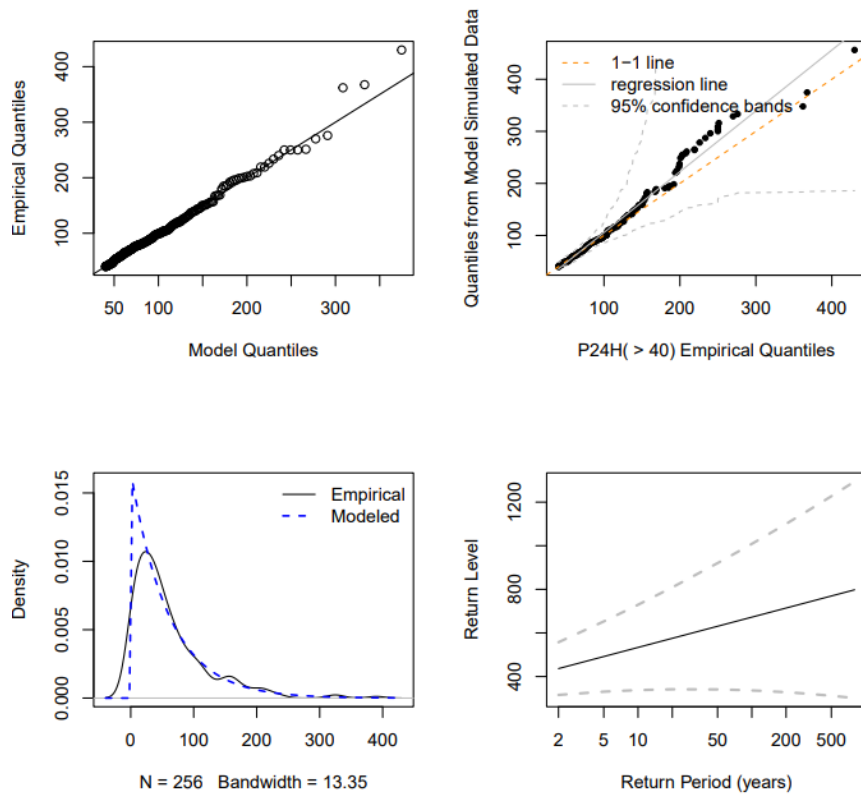


Figura A.2. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de precipitación de la Cuenca 1.

Cuenca 2, Ter-Tordera

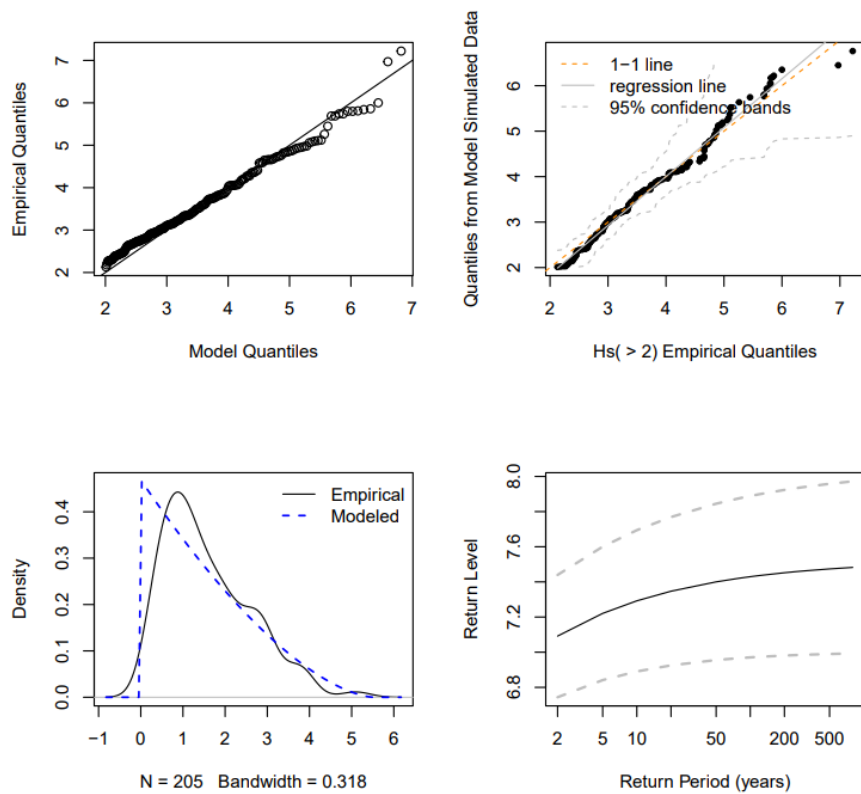


Figura A.3. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 2.

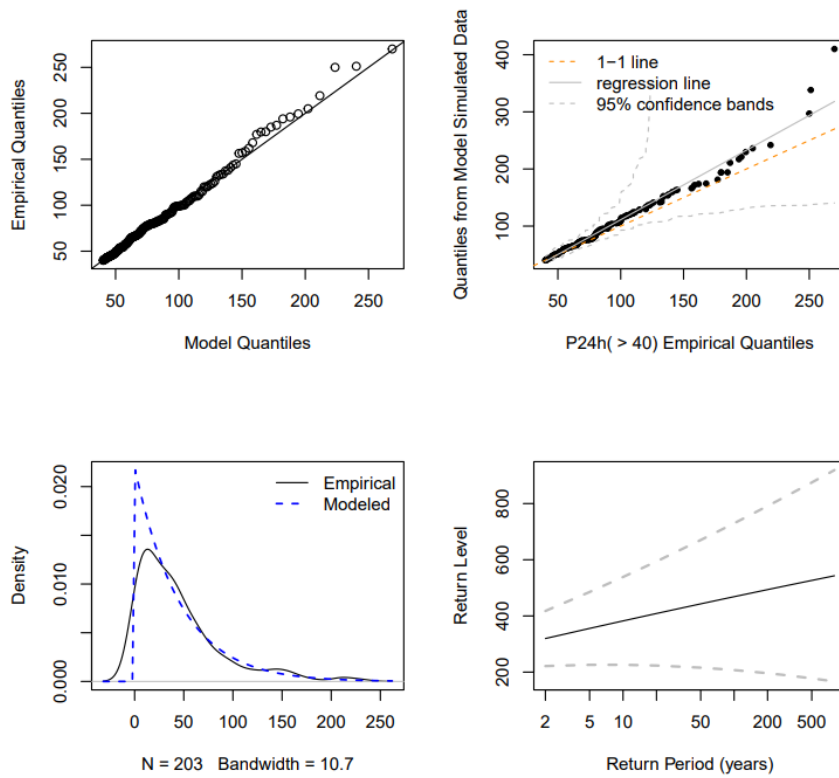


Figura A.4. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de precipitación de la Cuenca 2.

Cuenca 3, Maresme

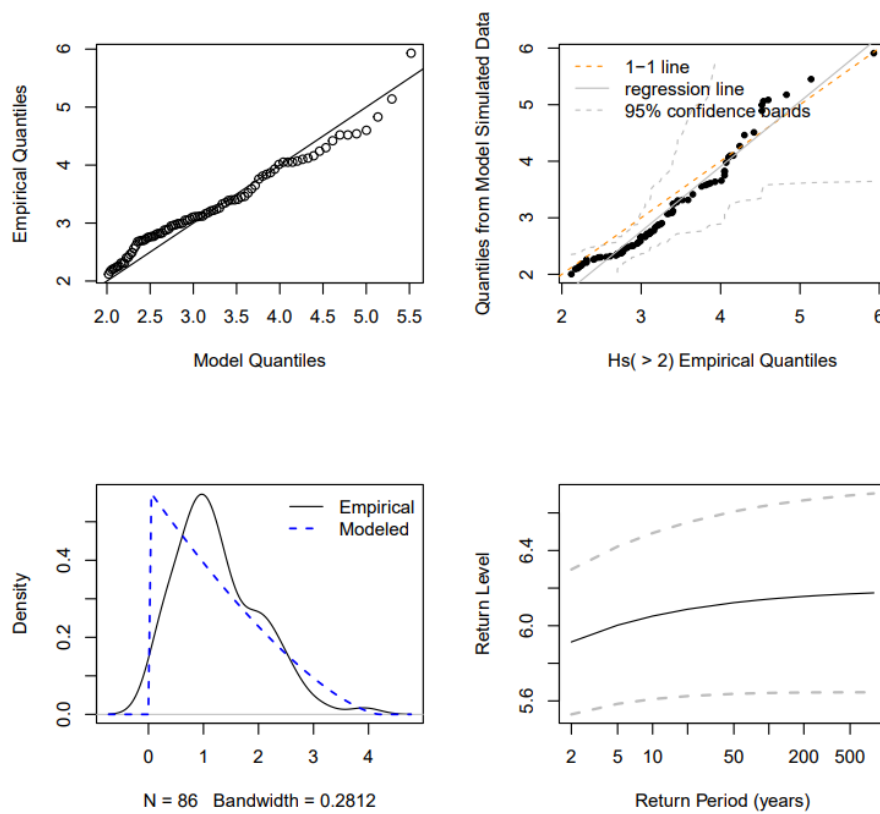


Figura A.5. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 3.

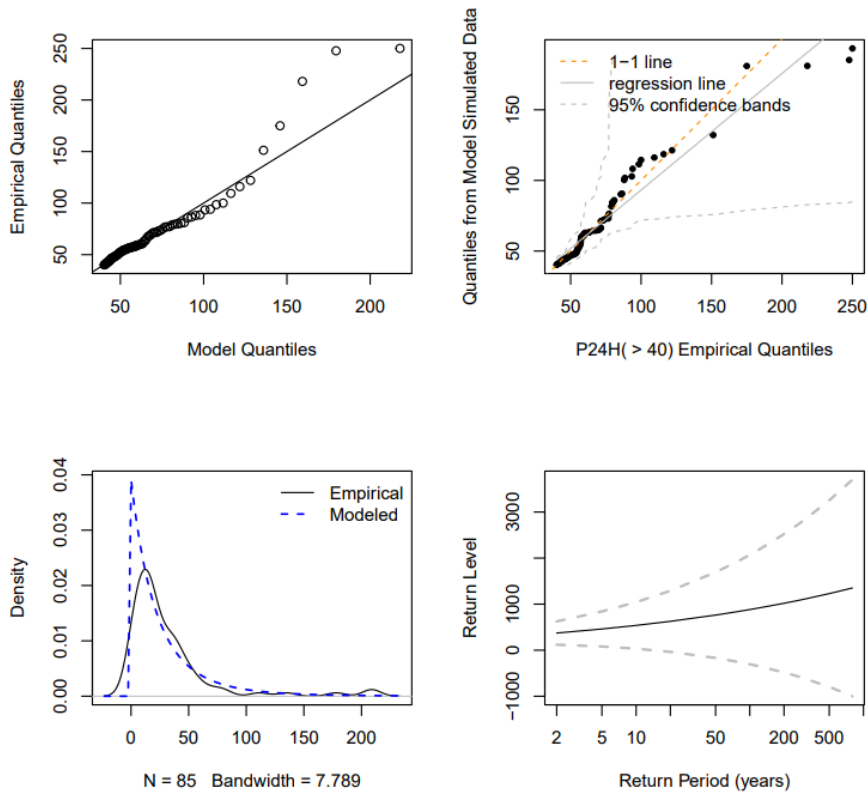


Figura A.6. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos precipitación de la Cuenca 3.

Cuenca 4, Llobregat

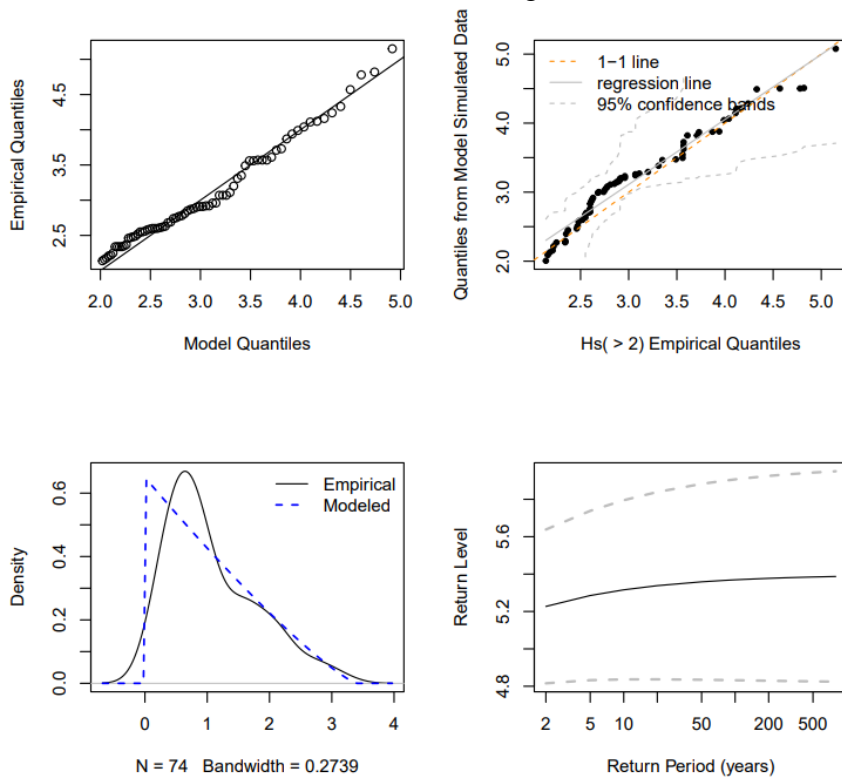


Figura A.7. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 4.

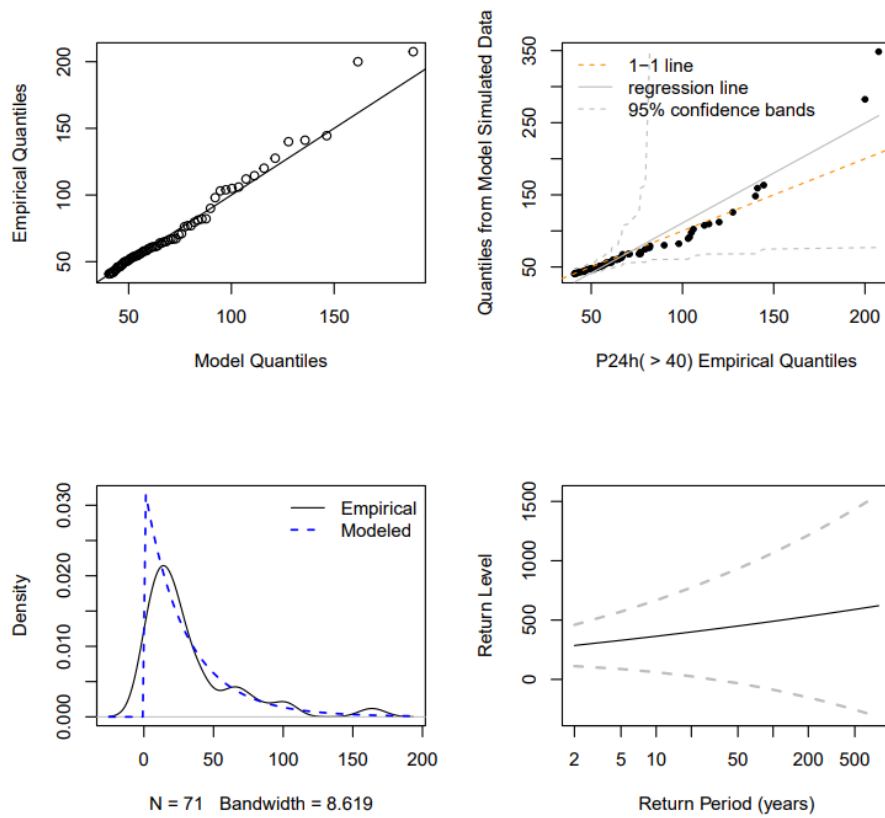


Figura A.8..Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de precipitación de la Cuenca 4.

Cuenca 5, Tarragona Norte

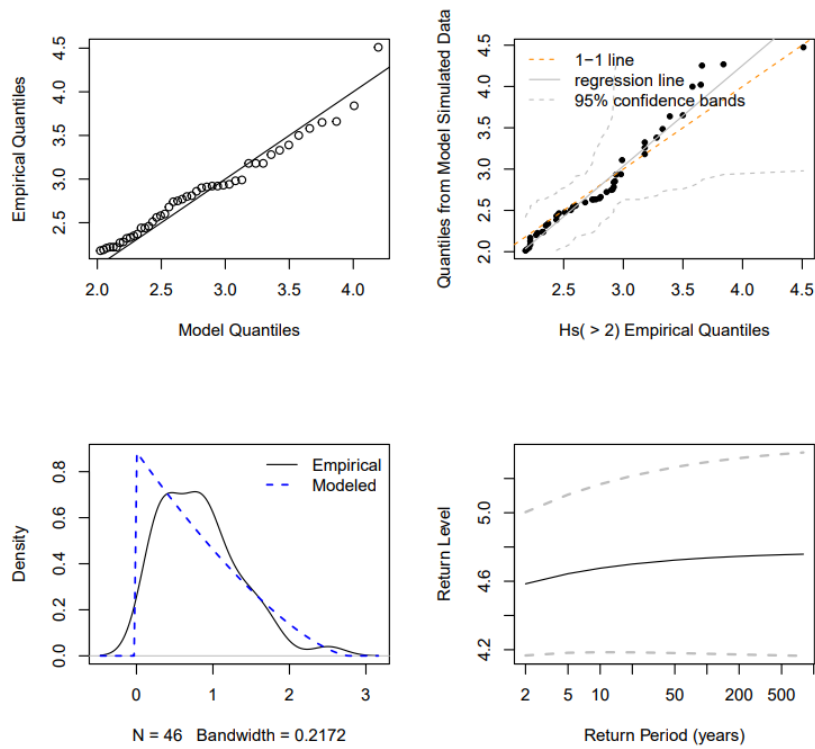


Figura A.9.Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 5.

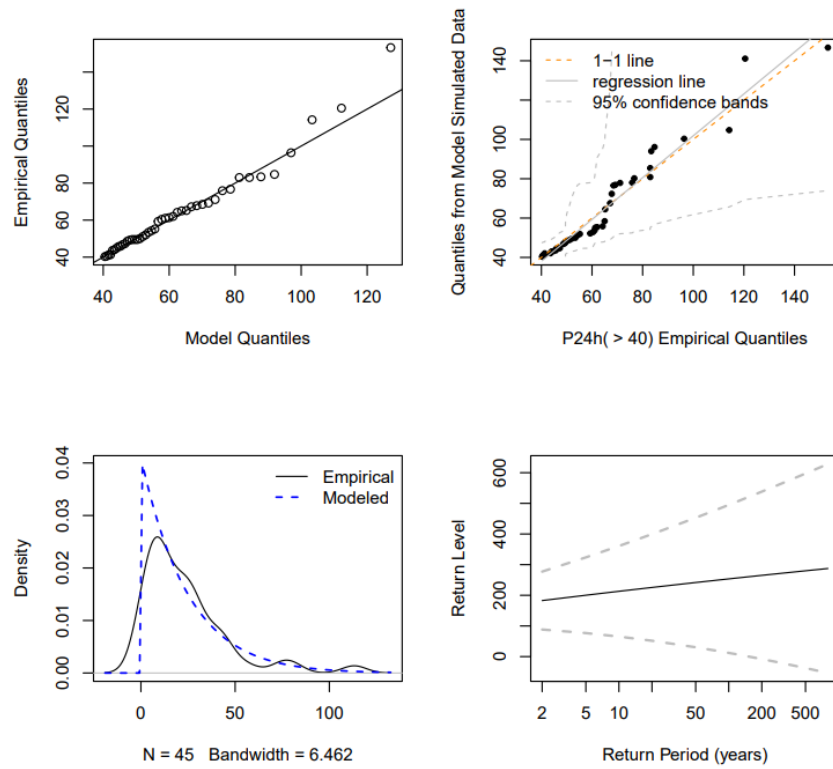


Figura A.20. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de precipitación de la Cuenca 5.

Cuenca 6, Tarragona Sur

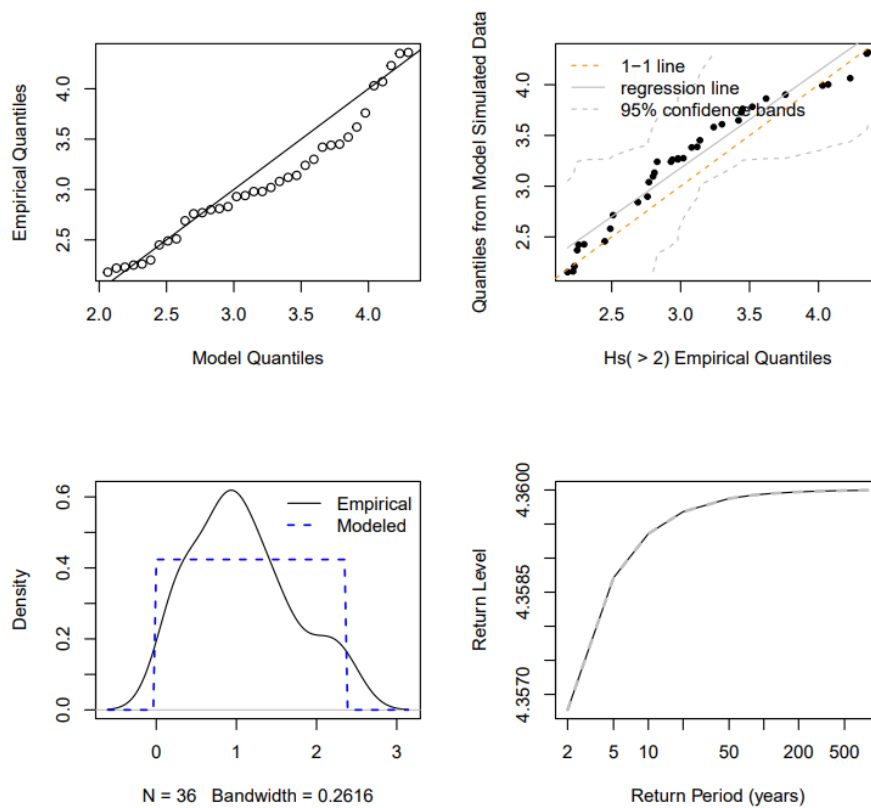


Figura A.11. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 6.

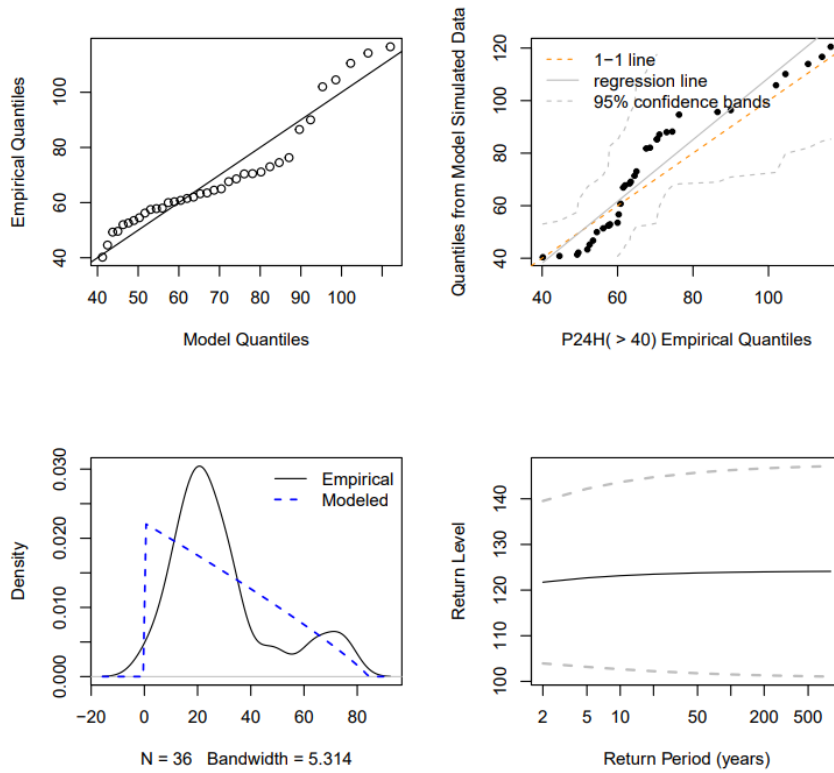


Figura A.32. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de precipitación de la Cuenca 6.

Cuenca 7, Ebro inferior y Delta

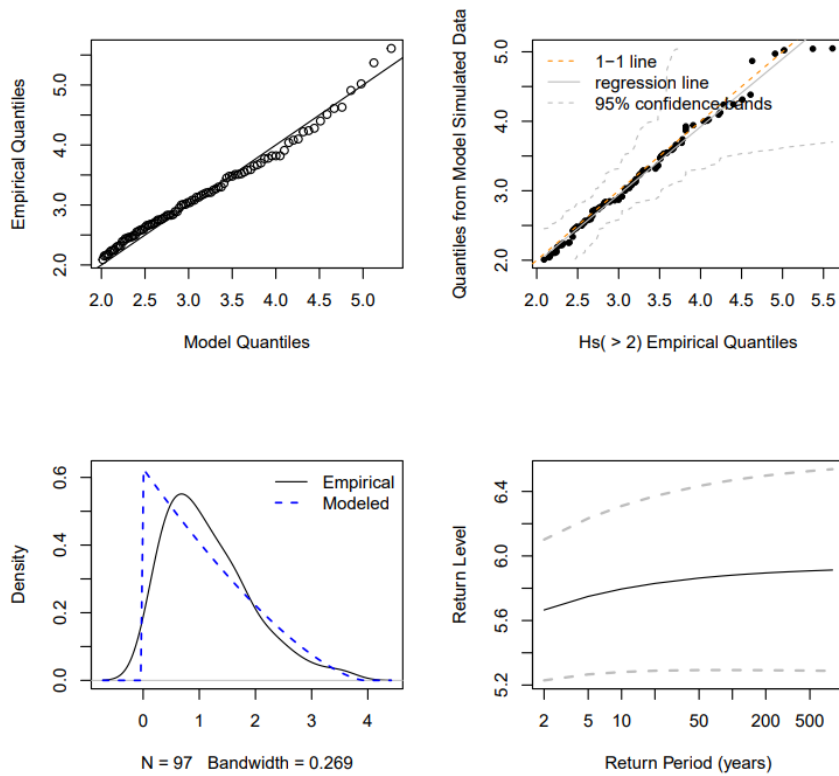


Figura A.43. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de altura de ola significativa de la Cuenca 7.

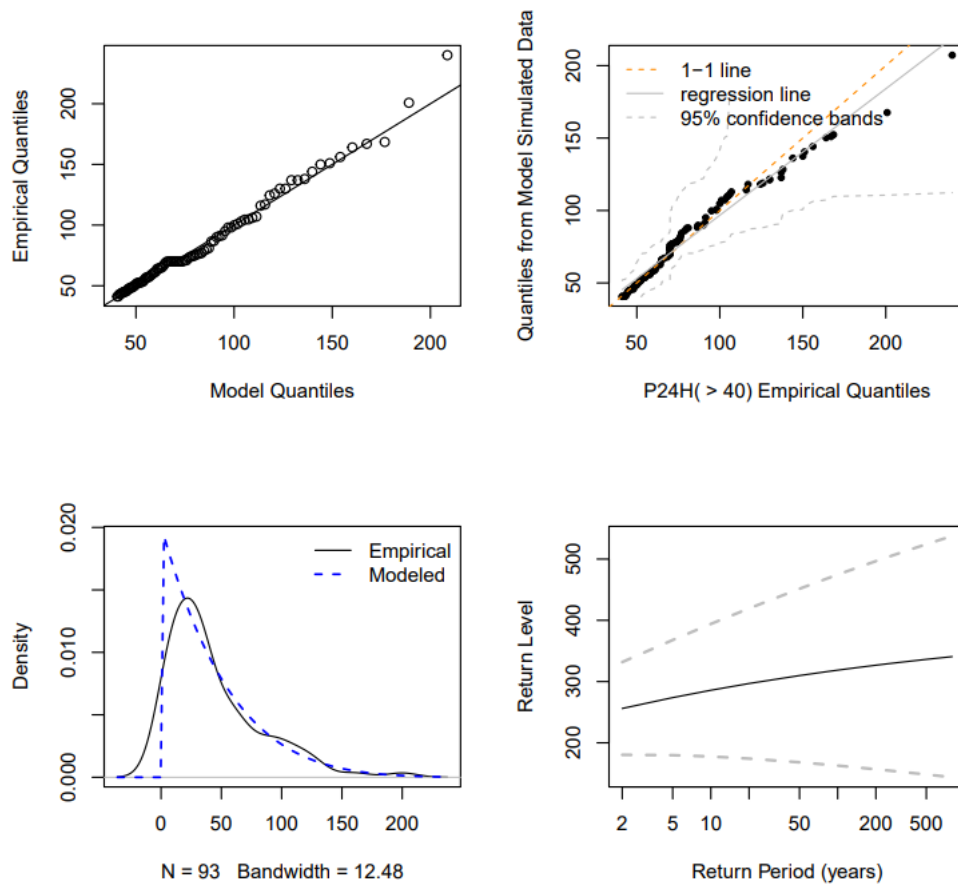


Figura A.14. Diagnóstico de la distribución GPD ajustada a los datos de precipitación de la Cuenca 7.

ANEXO II

A continuación, se presentan como ejemplo, los eventos compuestos obtenidos para una de las cuencas, específicamente de la Cuenca 6 (Tarragona S), esta cuenca en particular es en la que se registró el menor número de eventos compuestos en el periodo de estudio.

Tabla A.1. Eventos compuestos registrados en la Cuenca 6 entre 1958 y 2015.

Fecha inicio	Fecha fin	Hs	P24h
19/11/1967	22/11/1967	3.62	86.5
28/11/1968	30/11/1968	2.22	63.5
28/04/1969	29/04/1969	2.26	49.6
10/10/1970	13/10/1970	3.76	73
04/12/1971	06/12/1971	3.52	74.5
20/12/1973	25/12/1973	3.3	49.3
21/03/1974	23/03/1974	4.23	70.5
20/12/1976	21/12/1976	2.25	57.5
06/01/1977	07/01/1977	3.24	110.5
03/10/1987	05/10/1987	2.83	60.3
17/01/1988	18/01/1988	3.44	52.6
03/04/1988	05/04/1988	3.08	61.5
03/11/1988	05/11/1988	2.69	54.5
11/11/1988	13/11/1988	2.76	71.1
15/11/1989	17/11/1989	2.98	60.8
26/12/1989	29/12/1989	3.14	56.2
09/10/1994	11/10/1994	2.18	116.5
14/12/1995	16/12/1995	2.93	102
07/12/1996	08/12/1996	3.02	60
17/12/1997	18/12/1997	2.23	44.6
09/04/2000	10/04/2000	2.49	68.6
21/10/2000	26/10/2000	2.8	104.5
15/11/2001	16/11/2001	3.42	52
15/10/2003	18/10/2003	4.36	65
29/03/2004	30/03/2004	2.81	67.6
09/05/2008	11/05/2008	2.3	64.5
01/11/2008	02/11/2008	2.77	58
07/01/2010	10/01/2010	4.07	76.3
11/10/2010	13/10/2010	2.98	57.8
20/03/2012	22/03/2012	3.45	90
28/09/2012	30/09/2012	2.94	70.4
28/02/2013	01/03/2013	4.35	63.2
04/03/2013	06/03/2013	2.51	62
16/11/2013	19/11/2013	4.03	114.2
29/03/2014	31/03/2014	3.12	53.5
03/04/2014	04/04/2014	2.45	40.2