



Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos en la costa ligados al cambio climático

**Actividad E.3.1.1 Informe técnico de la estrategia de adaptación y mitigación de la respuesta en la cuenca vertiente.**

**Informe del GT3: Desarrollo de herramientas de gestión basadas en el estudio integrado de la dinámica fluvial y costera**

**Due date of deliverable:** 30/09/2020

**Actual submission date:** 31/01/2021

**Lead contractor for this deliverable:** UGR

**Autores**

Marina Cantalejo, Manuel Cobos Budía, Asunción Baquerizo Azofra, Agustín Millares Valenzuela, Rosa María Mateos, Jorge Pedro Galve Arnedo, Juan Antonio Luque Espinar, Cristina Reyes Carmona

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF)



## Índice

Informe del GT3: .....	1
Lead contractor for this deliverable: UGR .....	1
<b>1 INTRODUCCIÓN. ....</b>	<b>3</b>
<b>2 DATOS PREVIOS. ....</b>	<b>5</b>
2.1 Información procedente del registro histórico.....	5
2.2 Información procedente del proyecto EURO - CORDEX.....	6
<b>3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS AGENTES HIDRO-METEOROLÓGICOS. ....</b>	<b>7</b>
<b>4 RESULTADOS. ....</b>	<b>11</b>
4.1 Caracterización de la precipitación: Series del registro histórico.....	11
<b>4.1.1 Identificación de los eventos estadísticamente independientes. ....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.2 Ajuste de la cópula a las variables de estado: Duración del evento y calma. ....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.3 Modelo de probabilidad univariado no estacionario.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.4 Simulación de las series de precipitación en las distintas regiones de la cuenca. ....</b>	<b>17</b>
4.2 Comparación con los resultados obtenidos por las proyecciones proporcionadas por el proyecto EURO-CORDEX.....	18
<b>4.2.1 Regionalización según la definición de evento.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.2 Ajuste Cópula a las variables de estado: Duración del evento y calma. ....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.3 Modelo de probabilidad univariado no estacionario.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.4 Simulación de las series de precipitación a futuro en las distintas regiones de la cuenca.....</b>	<b>24</b>
4.3 Simulación del comportamiento hidro-meteorológico en la zona alta de la cuenca del Guadalfeo.....	25
<b>4.3.1 Obtención de las series de precipitación y temperatura.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3.2 Resultados de las simulaciones con WiMMed. ....</b>	<b>25</b>
<b>4.3.3 Análisis del flujo de agua y sedimento simulado.....</b>	<b>29</b>
<b>5 CONCLUSIONES. ....</b>	<b>33</b>
<b>6 REFERENCIAS. ....</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El Grupo de Trabajo 3 (GT3), del proyecto RISKCOAST, centra su actividad en la elaboración de herramientas que permitan obtener un pronóstico del comportamiento hidrológico, erosivo y sedimentario de la cuenca en un contexto de cambio climático y establecer estrategias de adaptación y mitigación de los efectos adversos sobre las infraestructuras existentes a lo largo de la red fluvial y en la costa.

La Actividad 3.1 “*Análisis de la respuesta de la cuenca ante eventos extremos bajo escenarios de cambio climático*”, se ha centrado en la reproducción de escenarios climáticos, a partir de los datos proporcionados por las bases de datos de EURO-CORDEX, mediante el análisis estocástico de los agentes forzadores (precipitación) y en la cuantificación de los efectos producidos en el comportamiento hidrológico y erosivo de la cuenca. La cartografía y resultados sobre los flujos de agua y sedimento obtenidos serán los que ayuden a evaluar el riesgo a lo largo de la red fluvial y las zonas costeras, además de definir las líneas estratégicas de adaptación y mitigación ante una situación de emergencia.

La zona de estudio seleccionada es la cuenca del Guadalfeo, situada al sur de la provincia de Granada y caracterizada por ser una cuenca vertiente montañosa, con gran variabilidad espacial y temporal de los agentes hidrometeorológicos y una dinámica pluvio-nival que condiciona en gran medida los flujos de agua y sedimentos. Cuenta con una gran variabilidad climática (clima de alta montaña, mediterráneo, subtropical...) y presenta diversas infraestructuras hidráulicas a lo largo de la red de drenaje que condicionan la morfodinámica fluvial y costera.

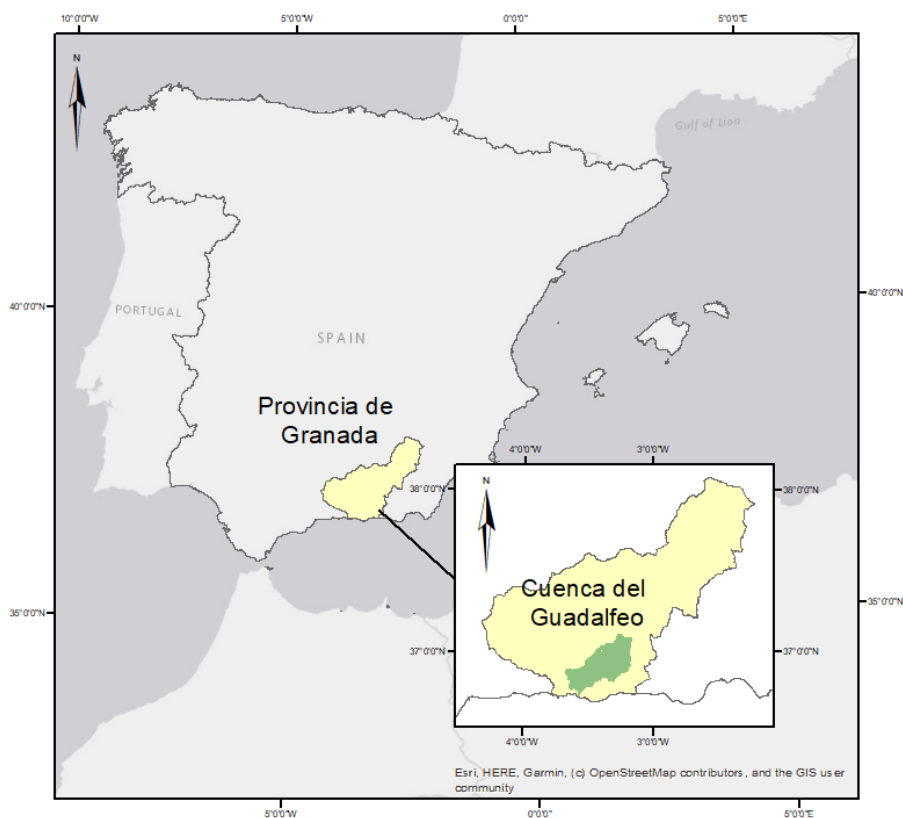
La respuesta del sistema considerado a los cambios previstos en el comportamiento de los agentes atmosféricos de aquí a final de siglo será analizada para la definición de las estrategias de adaptación y conservación del medio natural.

El principal objetivo de este informe es describir la metodología para obtener una caracterización de los agentes hidro-meteorológicos (precipitación) atendiendo a los registros más actuales y compararlos con las proyecciones climáticas correspondientes a diferentes simulaciones de escenarios climáticos regionalizados, publicadas en el proyecto EURO-CORDEX y, posteriormente, evaluar su impacto en el flujo de agua. Para ello, se han analizado las variaciones espaciales sufridas por estos agentes meteorológicos en un horizonte 2100 y sus efectos en el régimen de caudales de la parte de la cuenca cuyo curso fluvial no se encuentra regulado.

El análisis se realiza a partir de una metodología validada para las variables de clima

marítimo y desarrollada por el grupo de investigación de Dinámica de Flujos Ambientales (Solari, 2011; Lira, 2020a), adaptada al clima hidrológico dentro del proyecto Riskcoast, que permite simular estocásticamente las series de precipitación, considerando la dependencia temporal y espacial de dicha variable. Finalmente, y mediante el uso del modelo distribuido de base física WIMMed (Herrero, 2014) se va a evaluar el comportamiento hidrológico en las condiciones actuales, y las proyecciones de futuro, evaluando los cambios producidos en el régimen pluvio- nival y de caudales.

El interés de la caracterización de los agentes forzadores y su comportamiento a futuro para la gestión de los riesgos asociados a la costa, radica en a) la frecuencia y magnitud de las riadas que afectan al litoral, b) los flujos de sedimento fluvial y su afeción a la morfodinámica litoral y c) la capacidad de regulación y control de riadas por parte de las infraestructuras existentes.



*Figura 1\_ Localización de la cuenca de estudio.*

## 2 DATOS PREVIOS

La caracterización del clima pretende recoger tanto la variabilidad espacial del comportamiento de la lluvia, como los cambios experimentados durante el periodo 2085-2100. Para ello, se hace uso de los registros históricos y los datos facilitados por el proyecto EURO -CORDEX. Esta base de datos europea proporciona multitud de variables climáticas como resultado de diferentes escenarios futuros de cambio climático. La iniciativa CORDEX y EURO-CORDEX, generadas por el Programa Mundial de Investigación sobre el Clima (PMIC), proporciona un marco coordinado de resultados de Modelos de Circulación Global (MCG) regionalizados tomando como referencia el “Fifth Assessment Report (AR5)” del año 2014 (Pachauri et al., 2014). El “Sixth Assessment Report (AR6)” está planificado para antes de 2022. Dispone de una interfaz gráfica de descarga de datos para la región europea y su aplicación en estudios de impacto, adaptación y mitigación del cambio climático (Giorgi, 2009). Las simulaciones incluidas en EURO-CORDEX no solo consideran los nuevos escenarios RCP (Representative Concentration Pathways), sino que también aumentan la resolución espacial con tamaños de cuadrícula de unos 12 km.

### 2.1 Información procedente del registro histórico

Los datos de precipitación proceden de las observaciones tomadas por las estaciones meteorológicas distribuidas en la cuenca de estudio. En total, 29 estaciones que registran la precipitación (de 1946–2015) y 16 de temperatura (1948–2015).

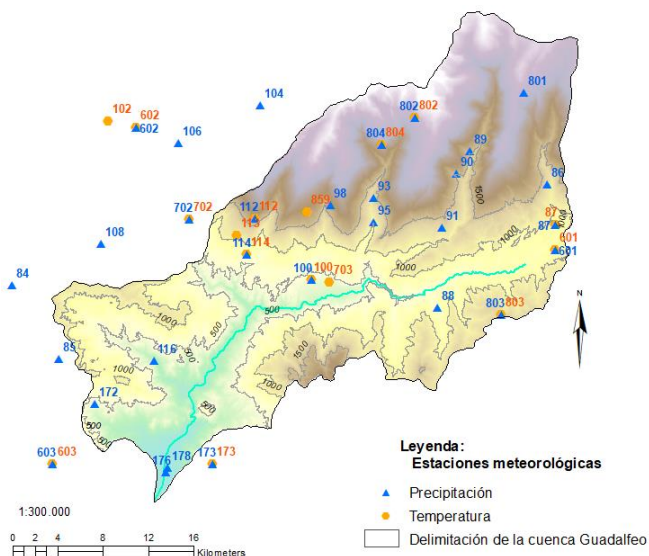


Figura 2\_ Localización de las estaciones meteorológicas. (escala: 1:300.000).

## 2.2 Información procedente del proyecto EURO-CORDEX

Para evaluar los cambios que previsiblemente se produzcan en el comportamiento climático para finales de siglo (periodo 2085–2100), se ha hecho uso de las proyecciones regionalizadas para el dominio EUR-11 (con una resolución de los datos de 12,5 km).

Los escenarios de emisión RCP (Trayectorias de Concentración Representativas) describen las diferentes proyecciones para las emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles y usos del suelo a lo largo del siglo XXI (*5º informe del IPCC*). De esta manera, los RCP tienen en cuenta los efectos de las políticas climáticas durante el siglo XXI. Se diferencian entre sí por el forzamiento radiativo total aproximado para el año 2100, aunque son valores puramente indicativos, ya que el forzamiento radiativo resultante varía de un modelo a otro. Se ha incluido un escenario que considera una reducción importante de las emisiones (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5 Y RCP 6.0) y un escenario de altas emisiones (RCP 8.5). Para el presente informe se ha seleccionado el escenario RCP 4.5 que corresponde a un escenario intermedio de emisiones, y el escenario RCP 8.5 asociado al escenario más desfavorecedor, en el que no se controlan las emisiones.

Cada uno de los escenarios ha sido simulado a través de modelos climáticos (globales y regionales). Las proyecciones climáticas proporcionadas por cada modelo varían dentro de cada uno de los escenarios debido a sus características propias, por lo que se seleccionan dos modelos globales (SMHI-CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, SMHI-IPSL-IPSL-CM5A-MR) y uno regional (RCA4) para cada escenario (RCP 4.5 y RCP 8.5) con la intención de tener en cuenta la variabilidad/incertidumbre de las proyecciones modeladas. La resolución temporal de datos cada 3hr para el caso de la precipitación, solo ha permitido seleccionar un modelo regional (RCA4).

Para poder hacer un estudio comparativo de las series históricas recogidas por las estaciones físicas y las proyecciones, se analizan solo las señales de la malla que se encuentran más cercanas a la localización de estas estaciones, y posteriormente se modela el comportamiento hidrológico de la cuenca con el registro actual y el futuro. Procediendo de esta manera es posible sacar conclusiones de las variaciones que se previsiblemente se van a producir dentro de las diferentes regiones climáticas que se han establecido dentro de la cuenca.

### 3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS AGENTES HIDRO-METEOROLÓGICOS

Para esta tarea se propone una metodología que permite, partiendo de los registros históricos y pronósticos disponibles, simular estocásticamente series de los agentes forzadores que representan la distribución espacial y temporal de la precipitación y condicionan el sistema hidrológico y fluvial. Como se ha comentado, esta metodología que ha sido validada con variables de clima marítimo tanto para datos históricos (Lira-Loarca et al. 2020) como para proyecciones a futuro (Lira-Loarca et al., 2021), que ha sido adaptada a las variables hidro-meteorológicas en el proyecto RiskCoast.

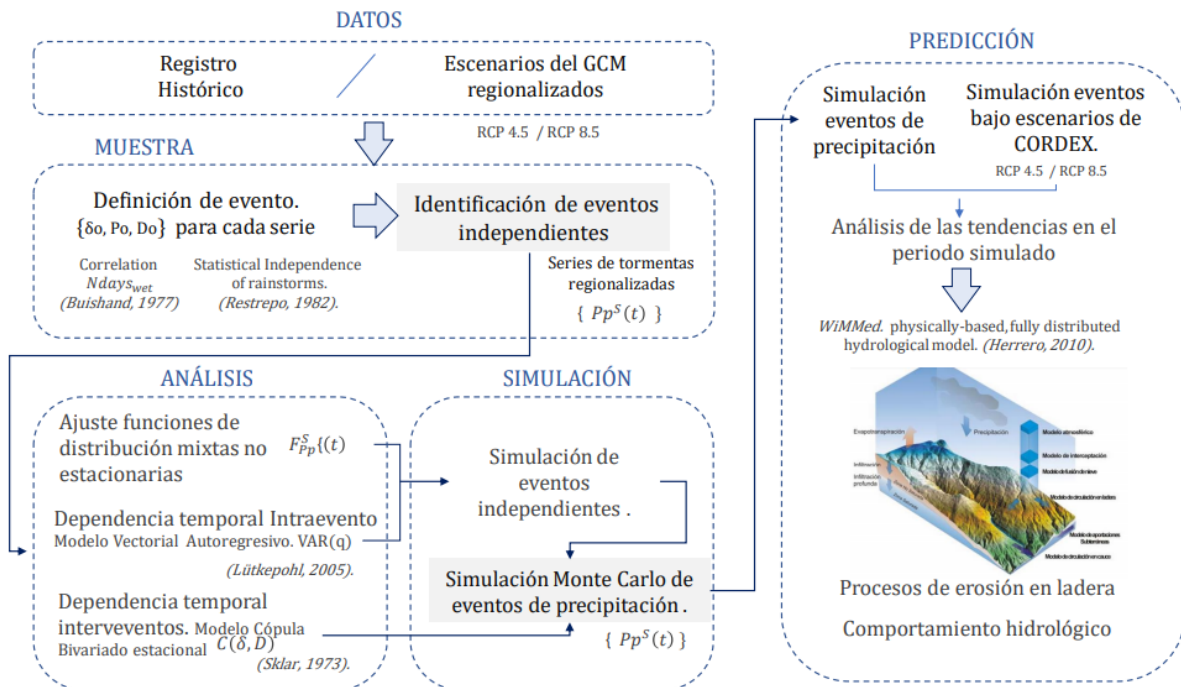


Figura 3\_ Esquema metodológico para el análisis, caracterización y generación estocástica de series de precipitación.

Se parte de las series temporales de precipitación (históricas o proyecciones) en distintos puntos de la cuenca que se consideran una sucesión de estados climáticos. Se elige entre ellas una sobre la cual se identifican los eventos significativos para, posteriormente, analizar las funciones de distribución marginales no estacionarias de las variables que caracterizan espacialmente y su variabilidad conjunta.

Los eventos de precipitación que pueden considerarse significativos (Buishand, 1977; Menabde, 2000) se definen a partir de los siguientes tres parámetros: el volumen mínimo de precipitación recogida en dicho estado,  $Pp$  (mm), la duración mínima del evento,  $D$ , (días) y duración mínima

de la calma que la sucede  $\delta$  (días). Sus valores se escogen de tal manera que se pueda garantizar que los eventos son estadísticamente independientes (Restrepo & Eagleson, 1981). En el caso del volumen de precipitación, el umbral puede variar espacialmente, por lo que se agrupan por regiones aquellas estaciones cercanas que presentan una definición de evento similar. Se atiende además a criterios geográficos y de relieve.

Una vez identificados los eventos/tormentas, se procede a caracterizar estocásticamente la precipitación, siguiendo la metodología propuesta (Lira-Loarca et al., 2019) para variables del clima marítimo, que incluye:

- La caracterización de la interdependencia de las variables que definen la duración de un evento,  $D$ , y de la calma que le sigue,  $\delta$ , se hace mediante cópulas (Sklar, 1959) que se definen para distintas estaciones del año, lo que permite tener en cuenta su variabilidad temporal,  $F(D^S(t), \delta^S(t))$ .
- La estimación de los parámetros de los modelos probabilísticos univariados no estacionarios  $F_{pp}^S(t)$ , que proporcionan la distribución conjunta de la variable volumen de precipitación en el evento ( $Pp^S(t)$ ) en la estación  $s$  según el momento del año.
- La caracterización de la dependencia temporal multivariada de el valor de cada variable con un número  $q$  dado de valores ocurridos anteriormente en esa misma localización y en las demás estaciones que forman el grupo. Esto se realiza mediante un modelo vectorial autoregresivo VAR( $q$ ), que asume una relación lineal entre dichos valores (véase p.e. Lütkepohl, 2005).

Finalmente, se procede a la generación de series de precipitación estadísticamente equivalentes a las analizadas con técnicas de simulación de Monte Carlo. El proceso de simulación comienza con:

- La generación de la pareja  $D^1, \delta^1$  del primer evento de tormenta utilizando la cópula  $F(D^S(t), \delta^S(t))$  correspondiente.
- Conocida la duración del evento, se genera una serie de precipitación de duración  $D^1$  utilizando la estructura del modelo VAR y las distribuciones mixtas no estacionarias marginales de las variables.

Se le añade el tiempo de calma  $\delta^1$  y se repite el proceso hasta que se alcance la fecha de fin de la simulación

Generadas las series de precipitación a futuro a partir del registro histórico, se analizan las tendencias comparando con los resultados regionalizados del proyecto EURO-CORDEX.



La información generada y la respuesta del sistema a cada realización permitirá acotar la incertidumbre asociada a las variables climáticas y su impacto en los procesos hidrológicos y erosivos dando valores probabilistas en vez de deterministas para cada uno de los escenarios que se planteen en la tarea 3 propuesta en este proyecto de investigación.

Estas tendencias, para cada uno de los escenarios climáticos futuros, permitirán obtener, a través del modelado hidrológico distribuido y de base física con el modelo WiMMed (Herrero, 2010), resultados sobre cambios en el comportamiento hidrológico, los flujos de agua y sedimento y su impacto en el sistema fluvial y costero. Se generará cartografía relacionada con el aumento del riesgo asociado por cambio climático que permitirá identificar zonas vulnerables y de actuación en situación de emergencia.

WiMMed (Herrero, 2014), es un modelo distribuido de base física, diseñado específicamente para reproducir la variabilidad espacial y temporal de los agentes forzadores y procesos particularmente relevantes en ambientes montañosos y semiáridos. El modelo se basa en la superposición de diferentes capas de información distribuida sobre la vegetación, las propiedades del suelo y las aportaciones de caudal base, utilizando el MDT como referencia para cálculos topográficos e hidrológicos. WiMMed incluye algoritmos específicos para la interpolación espacial y temporal de la lluvia, precipitación en forma de nieve, temperatura, radiación solar, viento y humedad relativa, teniendo en cuenta el efecto topográfico (Aguilar, 2014). En cada celda, WiMMed implementa la interceptación de lluvia por la vegetación y la dinámica de la nieve utilizando un modelo 1-D de energía y balance de masa (Herrero, 2009). La infiltración y el movimiento del agua del suelo se calculan mediante el análisis físico de Green y Ampt considerando el tiempo de inundación de Sherman, la ecuación de Darcy-Buckingham y la conductividad del flujo no saturado mediante la aproximación de Van-Genuchten-Mualem. El módulo de erosión y transporte en el sistema de ladera, incluye el modelado de procesos de impacto de gota de lluvia y por flujo concentrado en regueros, así como el flujo del sedimento y el balance erosión/depósito a lo largo de la red de drenaje según la capacidad del transporte (Herrero, 2019). La información necesaria para su implementación incluye información distribuida del suelo (permeabilidad, espesor, potencial matricial, y erodibilidad surco e intersurco, principalmente), ubicación y serie meteorológica disponible (precipitación, temperatura, radiación y velocidad del viento, principalmente) y el MDT de la cuenca estudiada.

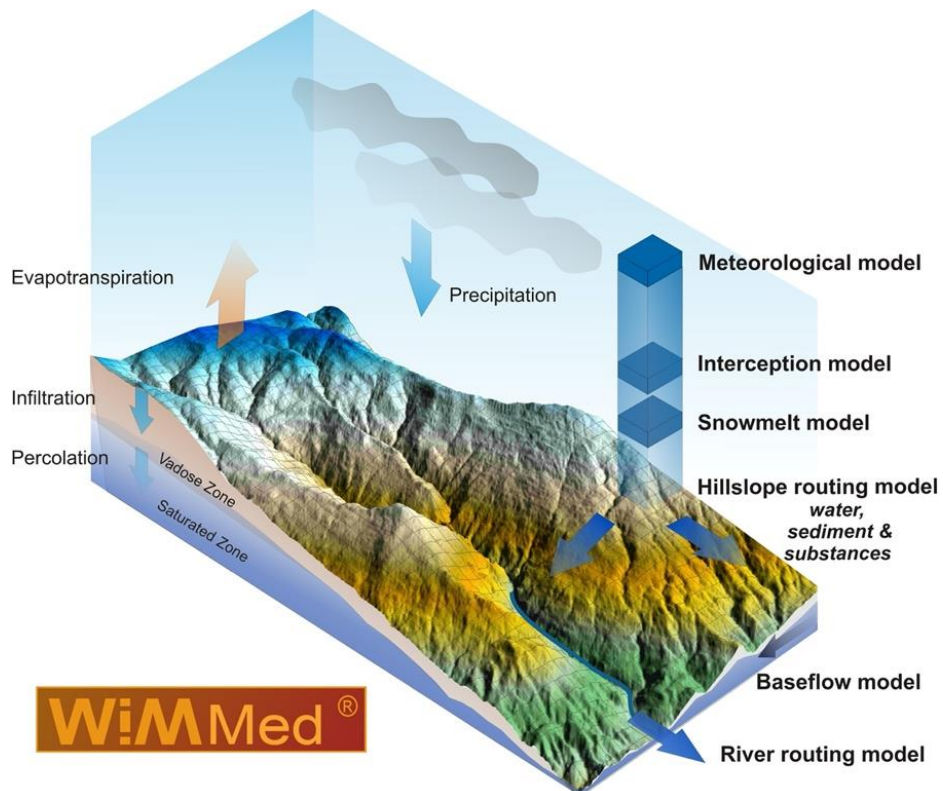


Figura 4\_ Esquema del modelo WiMMed (Herrero, 2014).

El modelo se calibró y validó para flujo de agua y sedimento en los puntos de salida de la cuenca a partir de información de caudales, sólido en suspensión y volumen de sedimentación de embalses (Millares, 2014; Millares 2020b). Los resultados obtenidos en simulaciones a largo plazo se compararon en términos de rendimiento específico de sedimento (t/ha año) con las tasas de erosión potencial estimadas en el Inventario Nacional de Erosión de Suelo (INES) obtenidas a partir del modelo RUSLE y con el caudal medio diario registrado en la estación de aforo de Órgiva.

## 4 RESULTADOS.

### 4.1 Caracterización de la precipitación a partir de las series del registro histórico.

#### 4.1.1 Identificación de los eventos estadísticamente independientes.

En primer lugar, se presenta una regionalización del comportamiento pluvial en la zona de estudio a partir del criterio establecido para la definición de evento independiente. Cada zona presenta un criterio distinto que garantiza la independencia estadística entre eventos, según la duración de la calma mínima ( $\delta_0$ ). Esto resulta ser un requisito indispensable para garantizar la simulación estocástica de las variables.

Tras aplicar la metodología propuesta por (Restrepo & Eagleson, 1981), se distinguen los clústeres de estaciones con un umbral de calma ( $\delta_0$ ) parecido y que se encuentran geográficamente cercanos. Esto nos permite “dividir” la cuenca en 7 zonas, con la intención de considerar las señales de precipitación que estén dentro de una misma zona como variables dependientes entre sí.

En la Figura 5 se muestra, para cada una de las 7 regiones, el valor de calma mínima ( $\delta_0$ ) que garantiza la agrupación de los datos precipitación en eventos estadísticamente independientes entre sí.

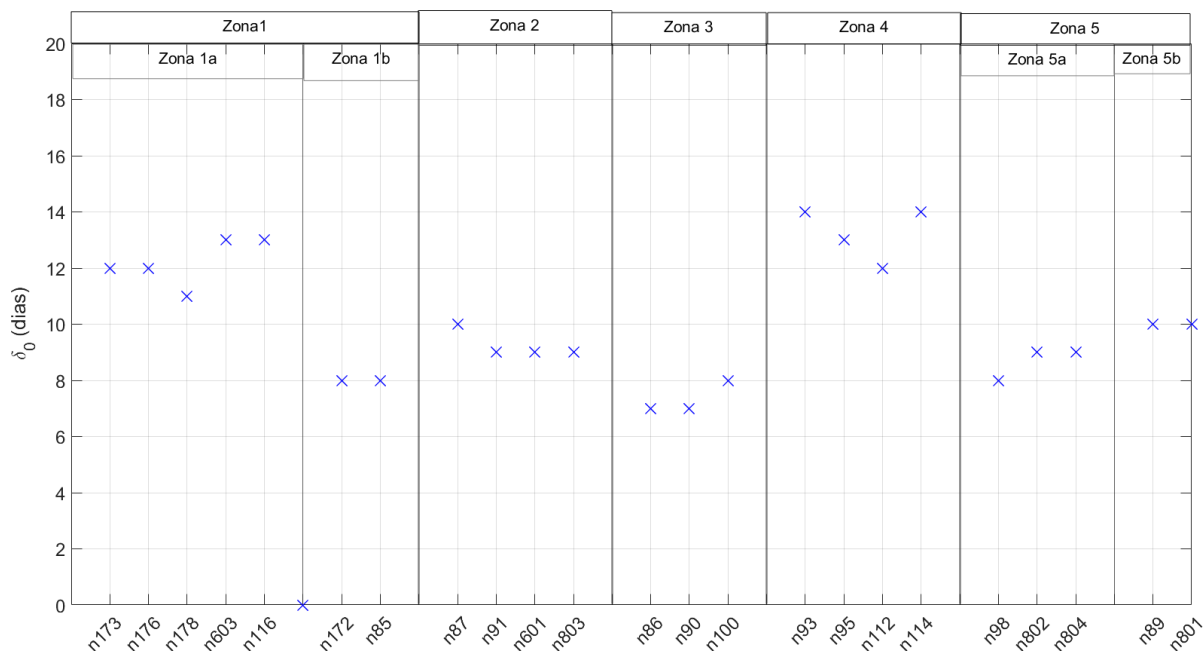


Figura 5\_ Umbral mínimo de tiempo entre eventos ( $\delta_0$ ) para garantizar la independencia estadística de los eventos de precipitación simulados estocásticamente. Datos procedentes del registro histórico. Metodología propuesta por Restrepo & Eagleson, 1981.

En cuanto al umbral escogido para justificar que se ha dado un evento lluvioso, se sigue las recomendaciones estipuladas por (Buishand, 1977), en donde se establece un umbral de 0.7 mm/día para cualquier punto de la cuenca.

Con las series originales de precipitación agrupadas por eventos y caracterizadas para cada región, se procede a analizar los 3 estadísticos (el volumen de precipitación ( $P_p$ , mm/evento), la duración del evento ( $D$ , días) y las calmas entre eventos ( $\delta$ , días), que describen como son las tormentas en la zona de estudio.

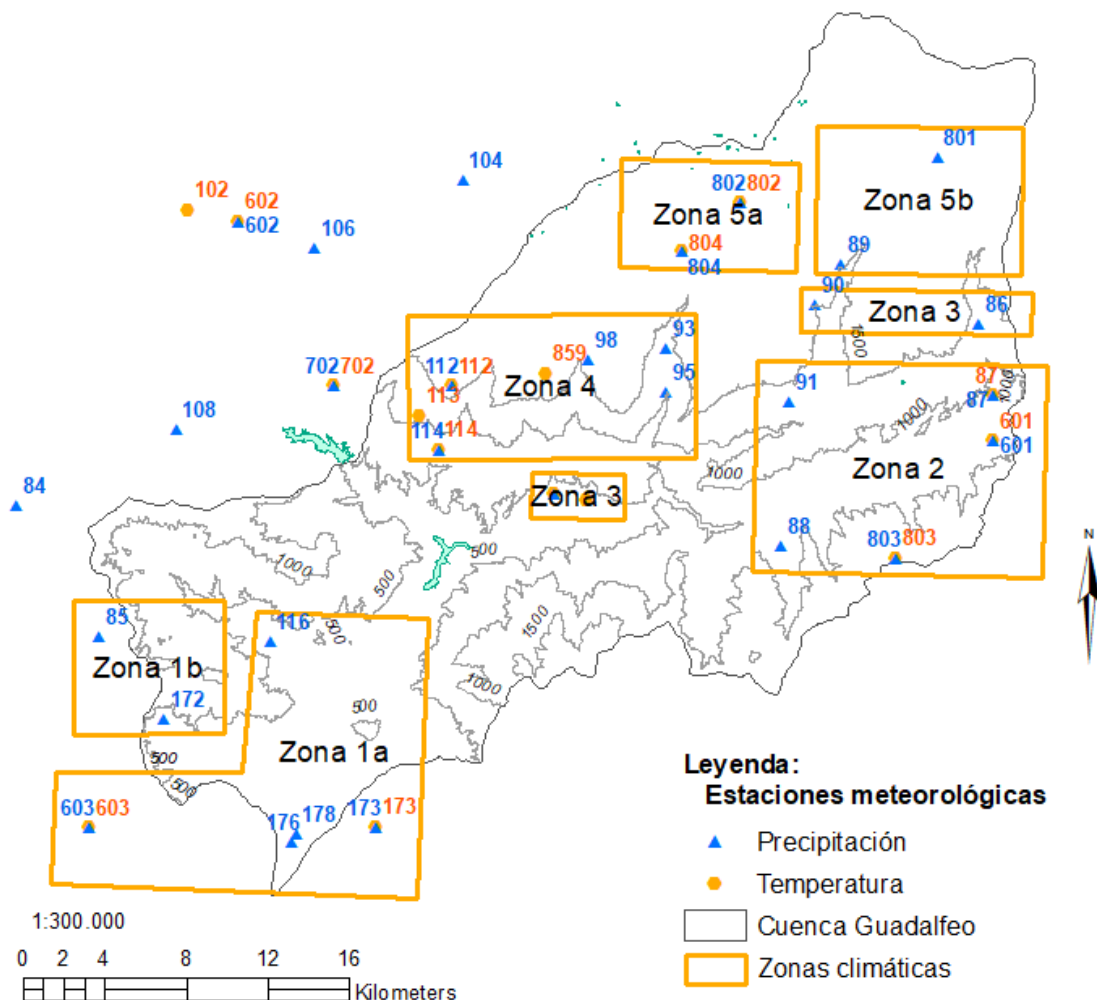


Figura 6\_ Regionalización climática de la cuenca atendiendo al criterio de independencia estadística de eventos. Datos del registro histórico. (escala: 1:300.000).

#### **4.1.2 Ajuste de la cópula a las variables de estado: Duración del evento y calma.**

Para conseguir simular estocásticamente las series de precipitación, es necesario caracterizar en términos de probabilidad los descriptores que definen los eventos de tormenta. En el caso de la duración ( $D$ , días) y las calmas ( $\delta$ , días), al ser variables dependientes entre sí, deben ajustarse a una función de distribución conjunta. Para ello, se emplean las cópulas (Sklar, 1959), entre las cuales se ha seleccionado la cópula paramétrica de la familia 'Clayton' (cópula Arquimediana).

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, la definición de evento independiente varía dependiendo de la zona en la que nos encontremos, por lo que quedan directamente caracterizadas espacialmente la duración y la calma con el análisis de una u otra estación.

Por otro lado, distinguiendo las muestras de duración ( $D$ , días) y calma ( $\delta$ , días) por estaciones del año, se consigue tener en cuenta esa variabilidad temporal de estos descriptores. Debido a la ausencia de suficientes eventos de tormenta en verano, se decidió agrupar las muestras en periodos semi - anuales, considerando por un lado los eventos en invierno-primavera, y por otro los de otoño-verano.

El valor de los parámetros del ajuste de la cópula ( $\theta$ ,  $\tau$ ) nos permite comparar entre regiones y por época del año, el comportamiento de los descriptores (duración y calmas) derivados de la serie de eventos.

Dicho esto, de la siguiente Figura 7 se puede sacar las siguientes conclusiones:

- Para el periodo invierno-primavera, se puede apreciar que existe un comportamiento regional de los descriptores (duración - calmas) atendiendo al gradiente altitudinal. Las zonas 1a, 1b y 2, localizadas en una franja altitudinal media-baja, presentan duraciones de eventos inferiores y calmas mayores que las zonas 4, 5a y 5b, situadas a una mayor altura.
- En el caso del periodo verano-otoño, el comportamiento es similar para cualquiera de las regiones analizadas en la cuenca (los parámetros de las cópulas son similares).

De esta manera se explica que las muestras de duración-calmas en verano, se distribuyen de una manera similar para cualquiera de las regiones analizadas, debido a la escasez de eventos durante esta época del año. No ocurre así cuando se analizan las muestras asociadas al invierno, donde se aprecia una mayor variabilidad en el comportamiento de las tormentas entre regiones, pudiendo ser causa de eventos intensos que se producen de manera localizada.

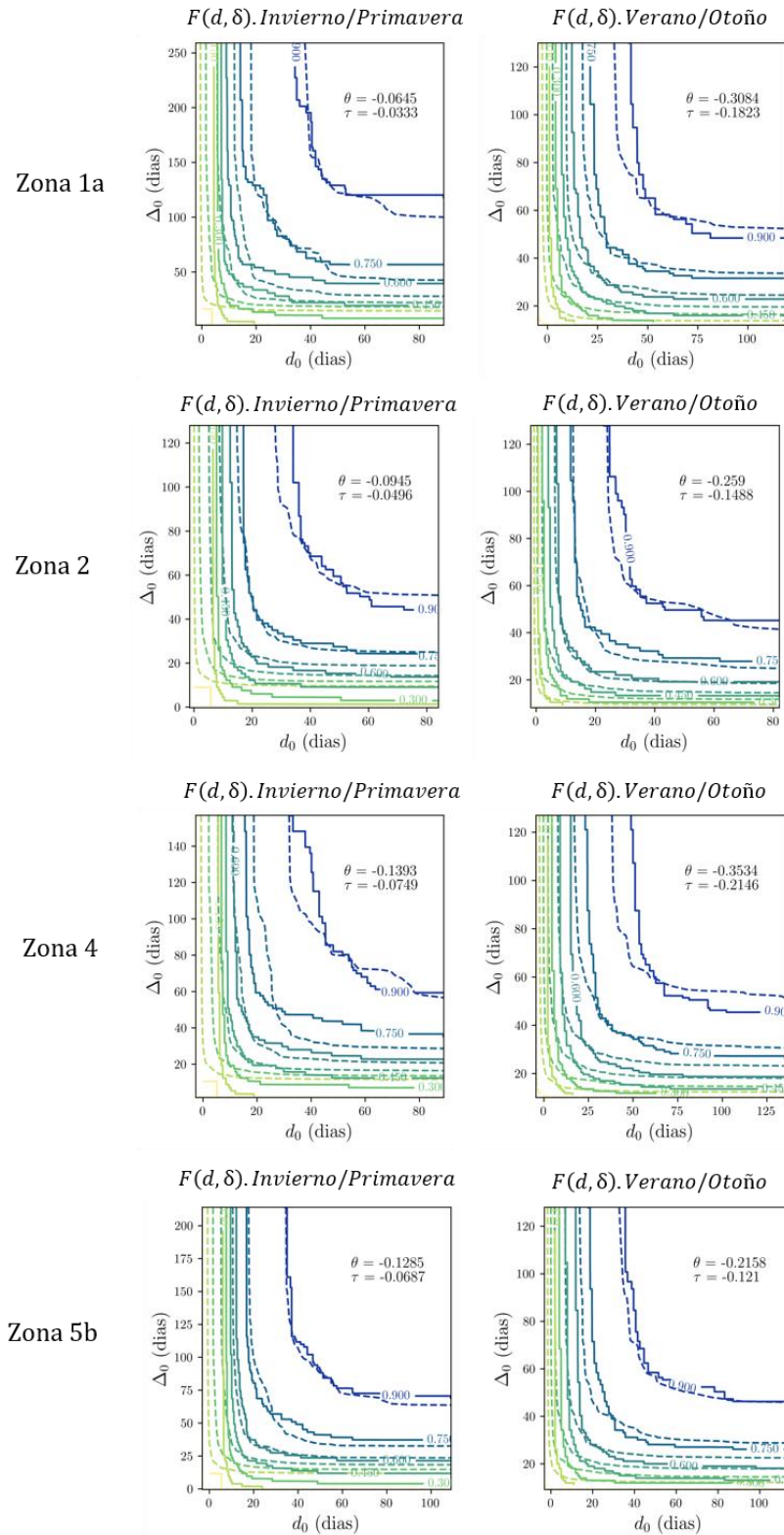


Figura 7\_ Ajuste de los parámetros de la cópula Clayton a la distribución empírica conjunta de las variables duración evento,  $D$ , y calmas,  $\delta$  a partir de los registros históricos en la zona de estudio. Zonas observadas: 1a, 2, 4, 5b.

### **4.1.3 Modelo de probabilidad univariado no estacionario.**

El último descriptor que queda por caracterizar es el volumen de precipitación asociado al evento  $Pp^S$ . De las muestras obtenidas para cada estación, se ajusta una distribución no estacionaria mixta  $F_{Pp}^S(t)$  compuesta por una función de probabilidad 'Normal' para la cola inferior y el cuerpo central, y otra asociada a la cola superior de tipo 'Valores Extremos Generalizada' (GEV). El peso asignado a cada distribución es de 0,5 para la distribución "normal" y 0,5 para la GEV.

Esta definición del modelo de probabilidad se mantiene para cualquiera de las series estudiadas en distintos puntos de la cuenca.

En la Figura 8 se presenta los percentiles empíricos variables a lo largo del año y el ajuste conseguido por el modelo de probabilidad  $F_{Pp}^S(t)$  definido. Cabe destacar la calidad del ajuste independientemente de la serie analizada.

El modelo es capaz de captar:

- Los cambios en el comportamiento de la precipitación según la época del año. Todas las series presentan un comportamiento anual marcado por los picos de invierno-otoño y un descenso considerable en verano.
- Analizando por separado las series, el comportamiento diferenciado en el espacio. El ajuste de los datos que se encuentran por debajo del percentil 75 es homogéneo en todas las series analizadas. Los eventos más extremos (> percentil 75%, sobre todo los del percentil 99%) , presentan un comportamiento más diferenciado entre estaciones, llegando a registrarse en la parte alta de la cuenca ( zona 5b ) los eventos más extremos.

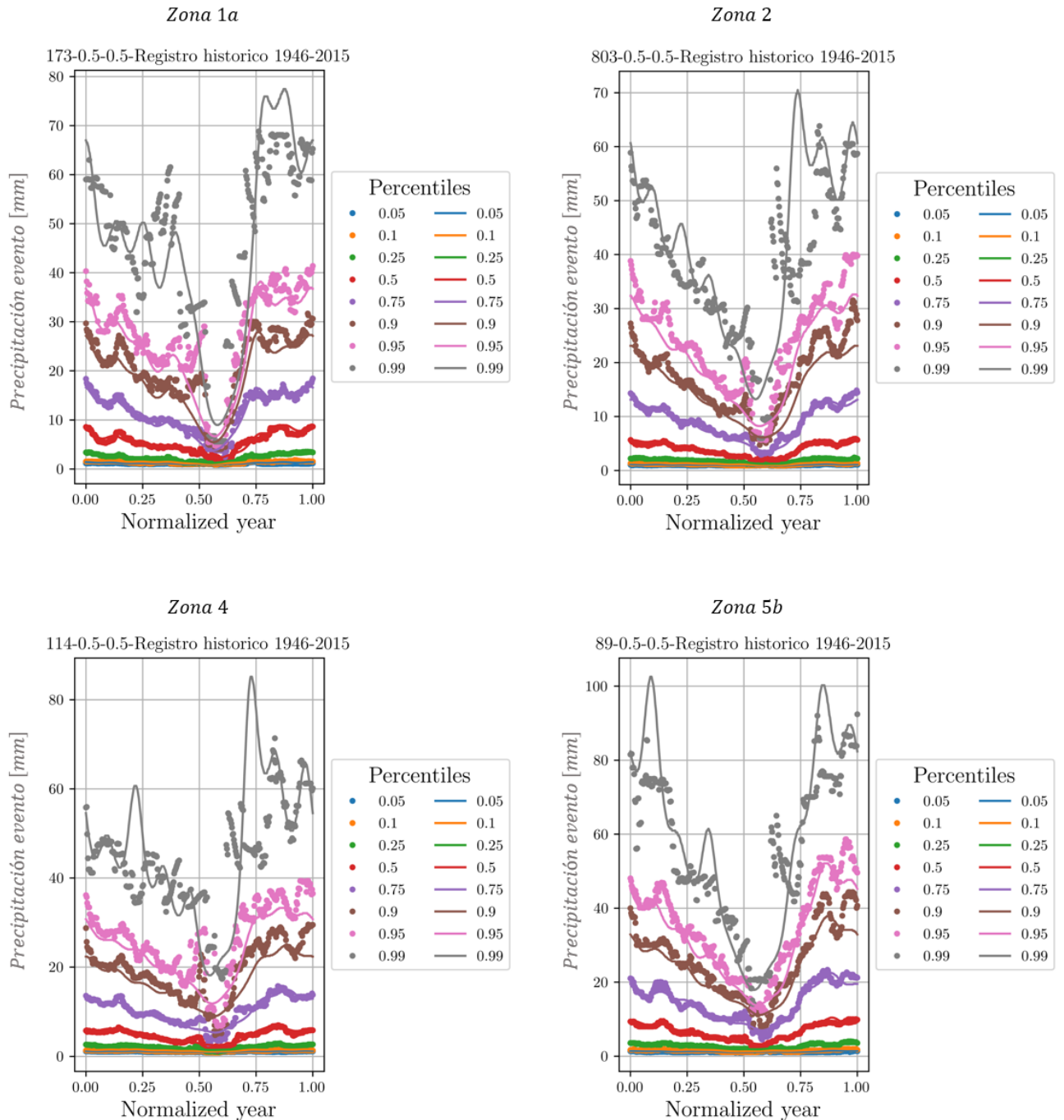


Figura 8\_Función de distribución acumulada de  $Pp^s$ . Percentiles de iso-probabilidad (5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99) de los datos empíricos y de la función de distribución no estacionaria ajustada. Datos analizados procedentes del registro histórico.



#### 4.1.4 Simulación de las series de precipitación en las distintas regiones de la cuenca.

El objetivo final de esta metodología es poder simular eventos de precipitación de manera estocástica en cualquiera de las regiones estudiadas teniendo en cuenta la relación de dependencia existente entre el valor de la precipitación en los instantes anteriores y entre señales que se encuentran dentro de una misma zona climática, consiguiendo obtener relación espacial entre los eventos simulados en esa zona

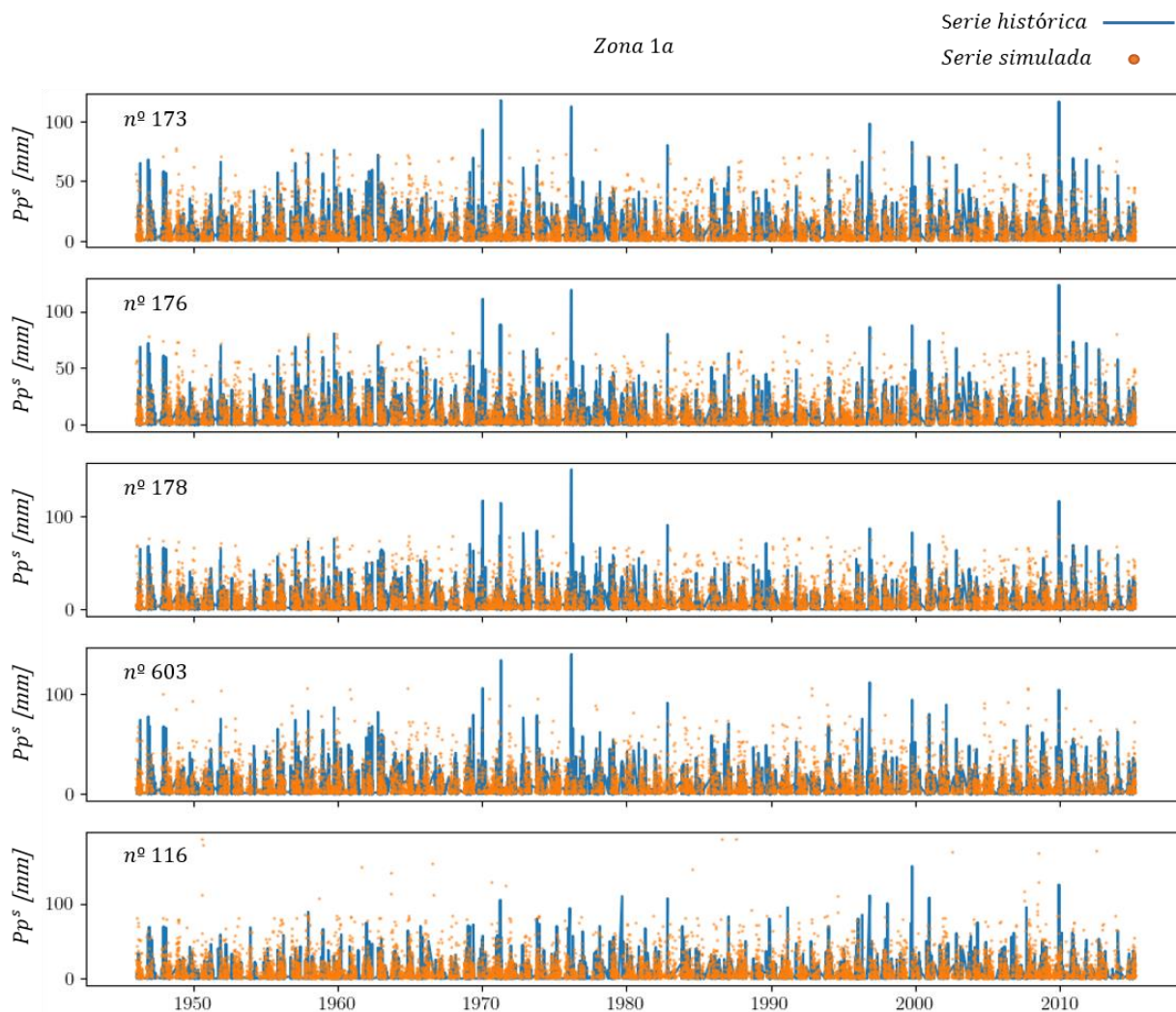


Figura 9\_Simulación de las tormentas de precipitación de las estaciones situadas en la zona 1a. En azul, los eventos agrupados partiendo de las series históricas. En naranja, las simulaciones estocásticas efectuadas a partir de la información derivada del registro histórico.

## 4.2 Caracterización de la precipitación a partir de las proyecciones proporcionadas por el proyecto EURO-CORDEX. Comparación con la caracterización del registro histórico.

### 4.2.1 Regionalización según la definición de evento.

De manera análoga se aplica la metodología de Restrepo & Eagleson, 1982, a las proyecciones de EURO-CORDEX. Las proyecciones asignadas a las estaciones meteorológicas existentes provienen de una malla con resolución 12,5 km. Como consecuencia, el nº de series de precipitación a analizar (8) disminuye respecto de las observaciones históricas (23), al coincidir las proyecciones de las estaciones cercanas entre sí. En la Figura 10, quedan agrupadas las estaciones de precipitación, a las que les corresponde por cercanía, la misma proyección de EURO-CORDEX. Se pueden observar los resultados del umbral mínimo de calmas asociado a cada modelo y escenario. Para el modelo CNRM, los resultados de  $\delta o$  se muestran más homogéneos para cualquier punto de la cuenca, lo que permitiría simular de manera conjunta toda la cuenca. Sin embargo, los resultados procedentes del modelo IPLS obligan a proponer una nueva regionalización climática y simular por separado. Es necesario mantener para ambos modelos esta zonificación, para poder hacer un análisis comparativo de los resultados.

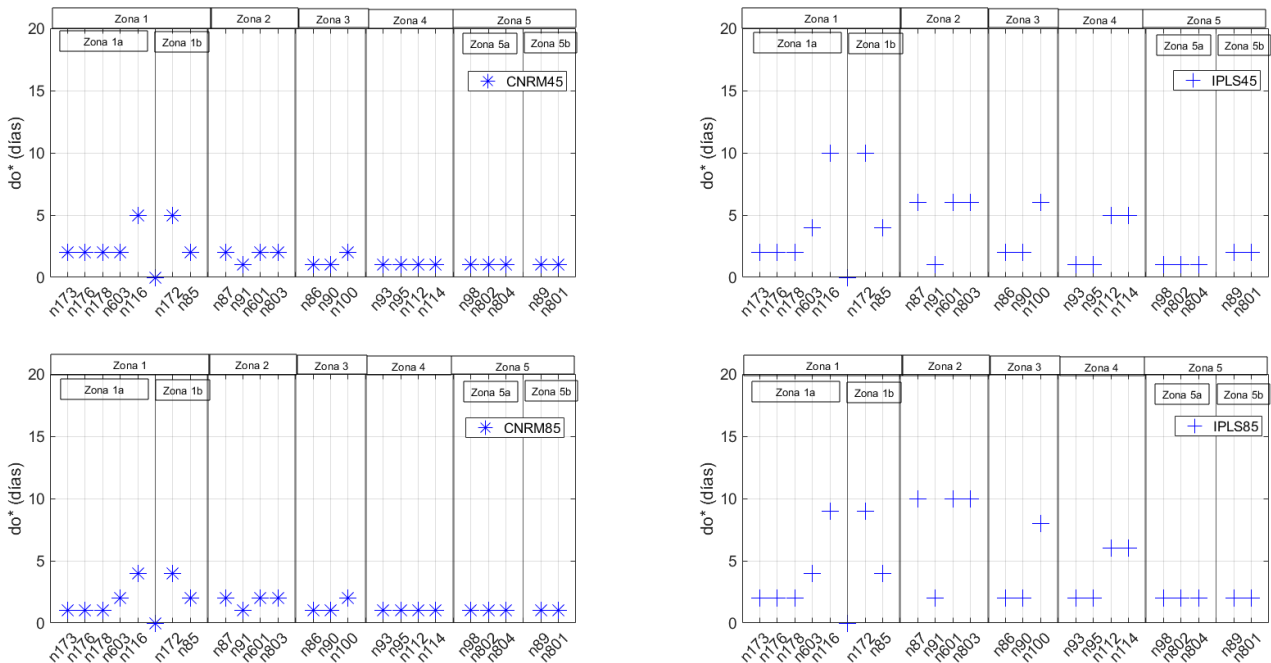


Figura 10\_ Umbral mínimo de tiempo entre eventos ( $\delta o$ ) para garantizar la independencia estadística de los eventos de precipitación simulados estocásticamente. Datos procedentes de CORDEX. Metodología propuesta por Restrepo & Eagleson, 1981.

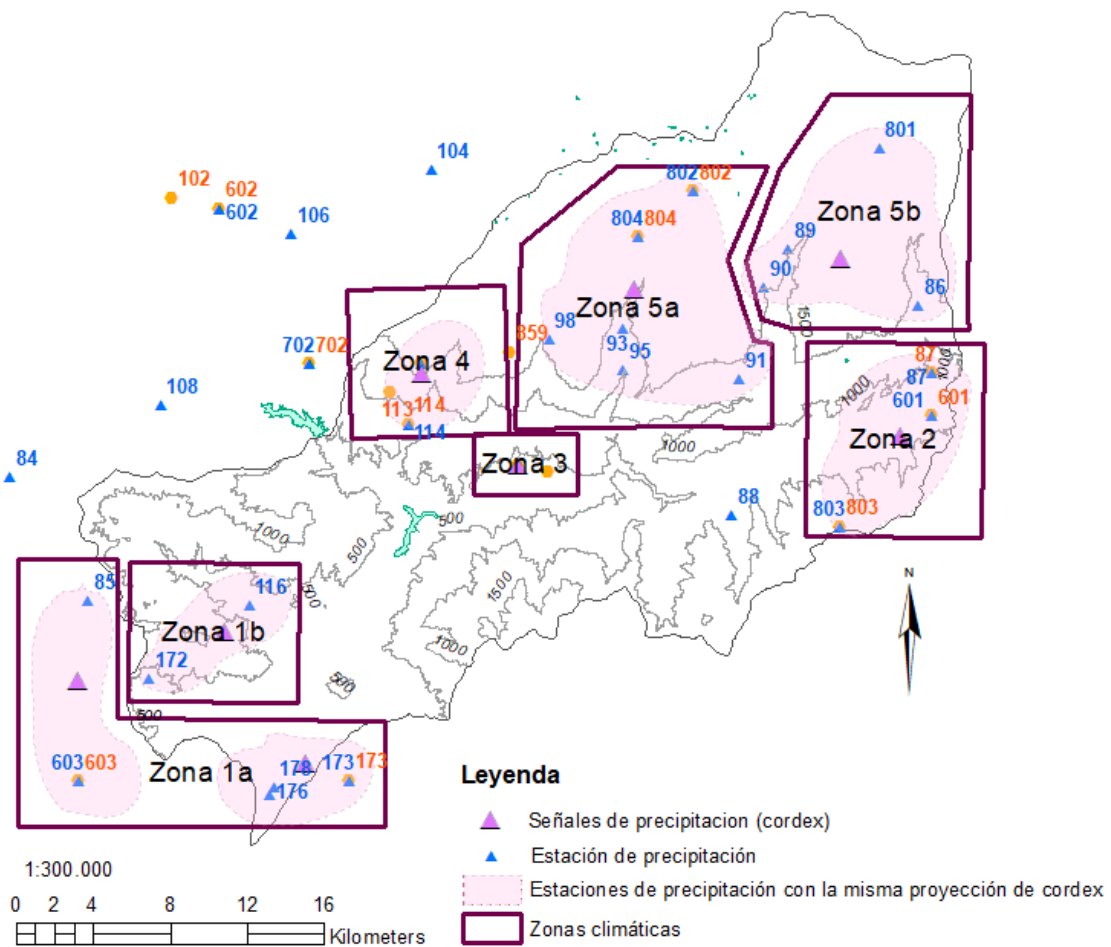


Figura 11\_Regionalización climática de la cuenca atendiendo al criterio de independencia estadística de eventos. Datos de CORDEX a partir de los resultados regionalizados del Modelo de Circulación Global IPLS. (escala: 1:300.000).

Análogamente al procedimiento seguido con las series históricas, se agrupan las proyecciones que poseen el mismo criterio de independencia ( $\delta o$ ) y se simulan conjuntamente los eventos de precipitación. Al disminuir las señales de precipitación disponibles, solo se ha encontrado una señal de precipitación por zona, de manera que en el análisis de la dependencia solo se tendrá en cuenta la variable temporal y no la espacial como ocurría en el caso anterior.

#### **4.2.2 Ajuste Cópula a las variables de estado: Duración del evento y calma.**

Siguiendo el mismo procedimiento mencionado en el apartado 4.1.2, se caracteriza la distribución conjunta de las variables {duración eventos y calmas}, agrupadas por eventos según el criterio definido en el apartado 4.2.1, mediante la cópula Arquimediana paramétrica de la familia 'Clayton'.

Se modifica poco el comportamiento conjunto de los descriptores (duración-calmas) para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, por lo que se comentan los resultados haciendo referencia al RCP 45.

Analizando los resultados obtenidos por los modelos (SMHI-CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, SMHI-IPSL-IPSL-CM5A-MR), en ambos se sigue cumpliendo el comportamiento espacial descrito anteriormente para los datos del registro histórico. Durante el periodo invierno – primavera, la distribución conjunta de las duraciones - calmas varía dependiendo de la zona analizada, mientras que en verano los parámetros de las cópulas en las diferentes regiones se mantienen parecidos (a excepción en este caso de la zona de alta montaña, donde se detecta una disminución de las calmas entre eventos).

Aunque la relación anterior se mantenga para las proyecciones futuras, las duraciones de los eventos si han sufrido un descenso en cualquiera de las regiones estudiadas. Sin embargo, las calmas entre eventos se mantienen. La única región en la que se aprecia una reducción de las calmas es en la zona de alta montaña (zona 5a,5b).

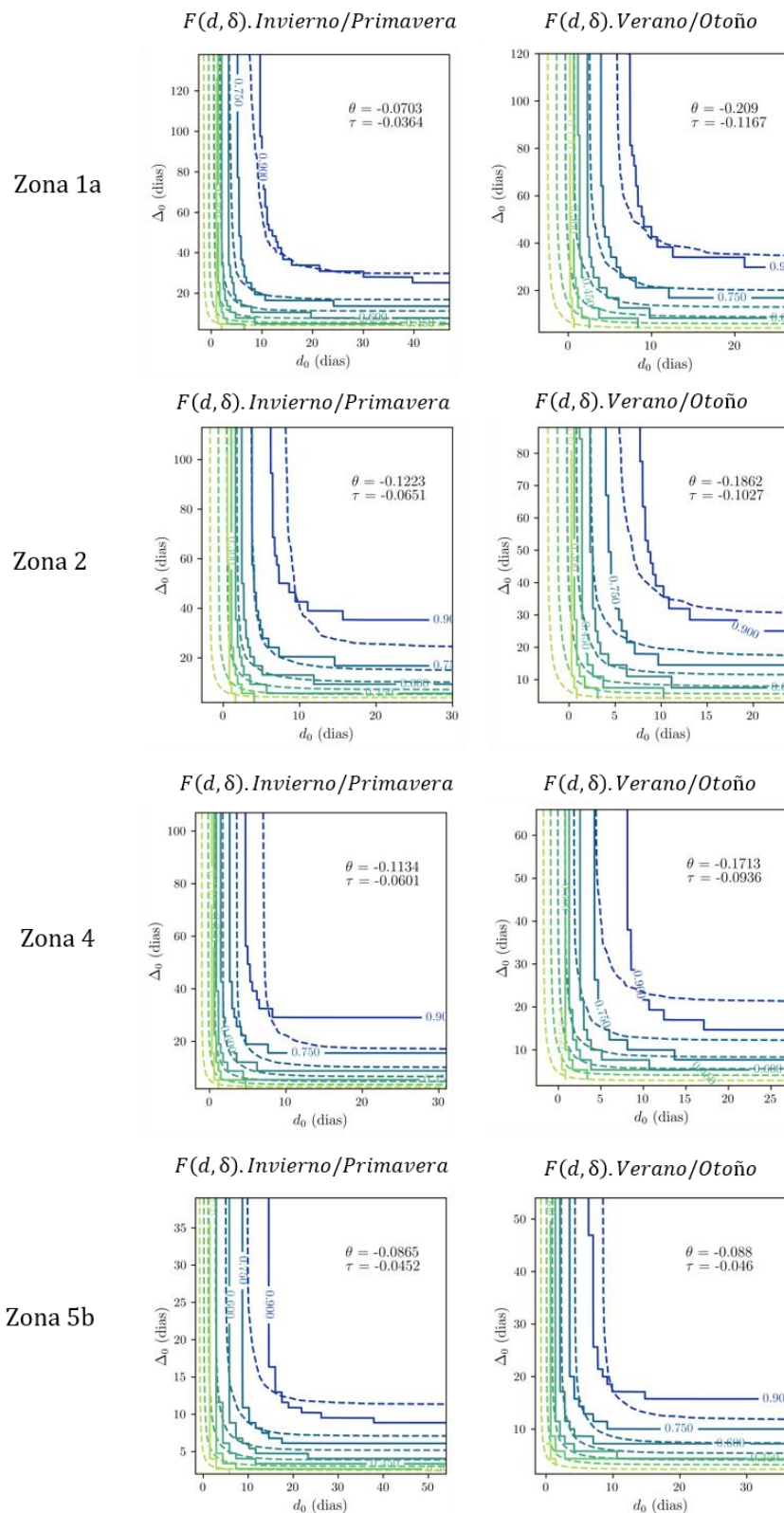


Figura 12\_Ajuste de los parámetros de la cópula Clayton a la distribución empírica conjunta de las variables duración evento,  $D$ , calmas  $\delta$  a partir de los datos regionalizados del modelo IPLS disponible en la base de datos EURO-CORDEX. Zonas observadas: 1a, 2, 4, 5b.

### **4.2.3 Modelo de probabilidad univariado no estacionario.**

La variable “volumen de precipitación asociado al evento” ( $Pp^S$ ), es caracterizada por el mismo modelo de probabilidad ( $F_{Pp}^S(t)$ ) planteado para los datos analizados del registro histórico (distribución no estacionaria mixta  $F_{Pp}^S(t)$  compuesta por una función tipo ‘Normal’ para la cola inferior y el cuerpo central, y otra asociada a la cola superior de tipo ‘Valores Extremos Generalizada’ (GEV). El peso asignado a cada distribución es de 0,5 para la distribución “normal” y 0,5 para la “gev”).

Igualmente, todas las series estudiadas son ajustadas adecuadamente con este modelo. Se puede apreciar, en la siguiente figura (Figura 13), los siguientes aspectos a comparar con los ajustes obtenidos para los datos históricos.

- Aumentan un 25% los eventos extremos (>percentil 90%) en las zonas de alta montaña.
- Aumentan un 15% en las zonas de gradiente altitudinal bajo -medio (zona 1a,1b, 2) a partir del percentil 99%. Por debajo del percentil 95, los eventos experimentan una reducción media del 12%.

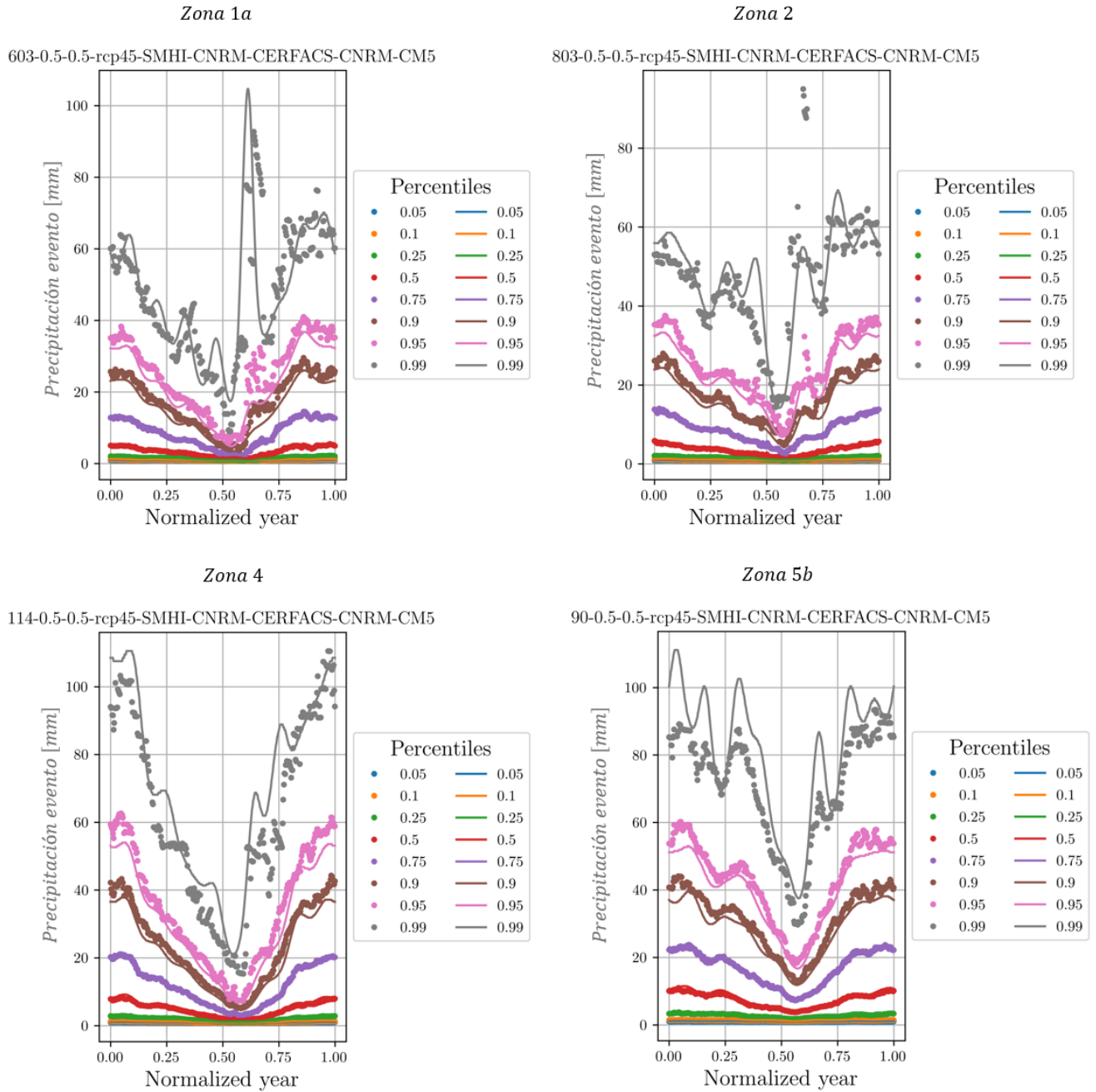


Figura 13\_ Función de distribución acumulada de  $Pp^s$ . Percentiles de iso-probabilidad (5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99) de los datos empíricos y de la función de distribución no estacionaria ajustada. Datos analizados procedentes del modelo CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.

#### 4.2.4 Simulación de las series de precipitación a futuro en las distintas regiones de la cuenca.

Finalmente se presentan las simulaciones a futuro de las series de precipitación. En particular, cabe destacar que la única región en donde se ha considerado la dependencia espacial entre variables es en la zona 1a, debido a la cercanía de 2 señales de precipitación distintas con un criterio de independencia similar, que permitía su simulación conjunta. La dependencia temporal de las variables es tenida en cuenta para todas las zonas analizadas. El siguiente paso será conseguir esa relación espacial entre todas las estaciones de la cuenca.

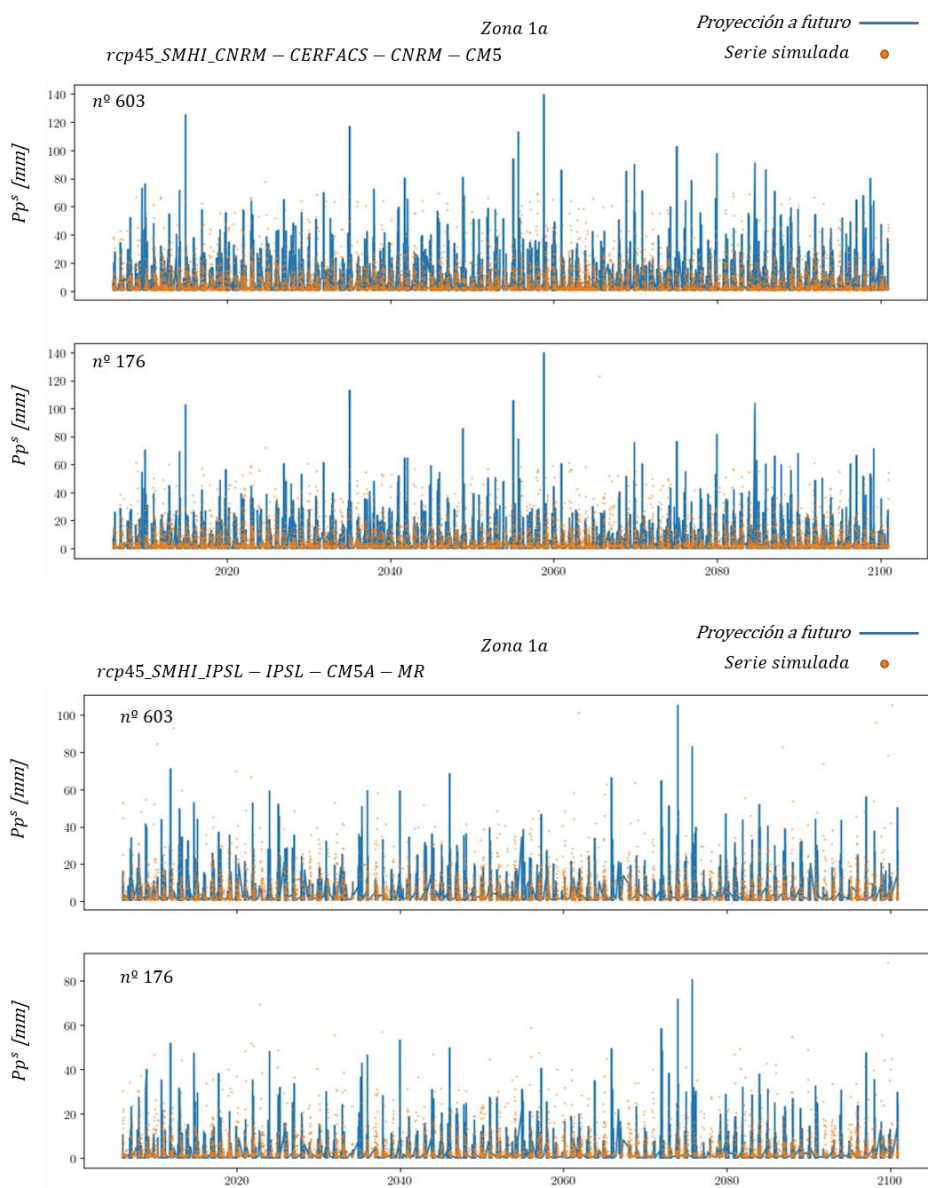


Figura 14\_ Simulación de las proyecciones de precipitación situadas en la zona 1a. En azul, los eventos agrupados partiendo de las proyecciones de EURO-CORDEX. En naranja, las simulaciones efectuadas desde 2006 hasta 2100.



### 4.3 Simulación del comportamiento hidro-meteorológico en la zona alta de la cuenca del Guadalfeo.

#### 4.3.1 Obtención de las series de precipitación y temperatura.

Para la realización de un análisis comparativo entre los resultados, se establecen dos periodos de referencia a comparar de 15 años: uno correspondiente a un periodo actual (1999 – 2014) y otro para el intervalo de tiempo (2085 – 2100).

Para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca según las proyecciones futuras, se realiza un ajuste de la función de distribución de los datos históricos, mediante la corrección del sesgo estadístico (bias adjustment), permitiendo recoger el comportamiento de la precipitación y temperatura del periodo 2085 – 2100 y trasladarlo a los datos del registro histórico. En la siguiente figura, se muestra una comparativa de la distribución de los datos procedentes de EURO-CORDEX y de la serie histórica (naranja) y otra que compara los datos de EURO-CORDEX con la serie del registro histórico modificada para que sea similar su distribución a las proyecciones futuras (azul). Todo ello aplicado a la precipitación (izq) y la temperatura (der). Se puede apreciar como la distribución de los datos históricos modificados respecto a las proyecciones futuras, presenta un ajuste mucho más preciso para los datos de temperatura al coincidir con la línea roja. En el caso de la precipitación, el ajuste es bueno para el cuerpo central y la cola inferior, y se aprecia cierta desviación de los datos de la cola superior, sobreestimando su valor.

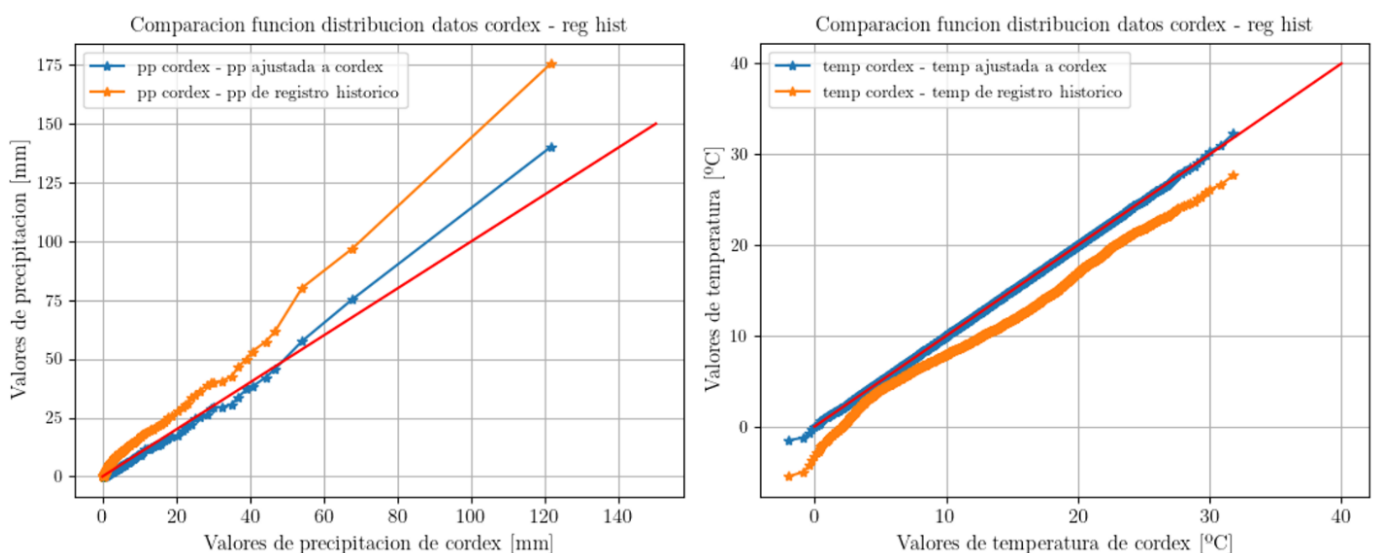


Figura 15\_ Gráfico Q-Q de la precipitación (izquierda) y temperatura (derecha).

#### **4.3.2 Resultados de las simulaciones con WiMMed.**

En este apartado se muestran las variaciones en el comportamiento hidro – meteorológico de la cuenca, considerando los datos de precipitación y temperatura del registro histórico y los obtenidos por las proyecciones de EURO-CORDEX. Debido a la gran variabilidad de las proyecciones presentadas por los modelos disponibles de EURO-CORDEX, es necesario hacer previamente una referencia a la incertidumbre de los datos de entrada del modelo y justificar el modelo seleccionado para el contraste de resultados.

Comparando la precipitación media anual observada entre 1999 – 2014 (631 mm media /año) en la zona de estudio, con la proporcionada por los modelos entre 2085 -2100, se han observado variaciones en la región de estudio muy acusadas. El modelo CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, ofrece unas proyecciones que estiman un aumento de la precipitación media anual en la zona de estudio de entre 89 y 67% (1306 mm a 1057 mm), mientras que el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR, ofrece resultados opuestos, con una disminución de la precipitación de entre el 21% y 39 % (498 a 382 mm). Por tanto, la precipitación acumulada no muestra una tendencia similar entre proyecciones de diferentes modelos, incluso en el signo. (Mestre et al., 2018).

En cuanto a las series de temperatura, las variaciones sufridas entre los modelos oscilan, para la temperatura media, en 5% a 10% (0.52 a 0.90 °C) con el modelo CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, y de 6% a 30% (0.4 a 3.47 °C) para el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR.

Para evaluar los efectos adversos del cambio climático, se ha seleccionado el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR por adecuarse mejor a las tendencias indicadas por el informe de evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España (CEDEX, 2017), en el que se estima una reducción de la precipitación en las cuencas mediterráneas andaluzas entre -11% y -40%.

Al tratarse de una cuenca montañosa, las variables asociadas a la nieve cobran gran relevancia, mostrándose una sensibilidad muy alta en el comportamiento de la temperatura de la nieve, la precipitación en nieve y la fusión. Pueden apreciarse diferencias entre escenarios de -1.4 °C en la temperatura de la nieve, de 200 mm/añual en la precipitación nival y 190 mm/añual en el proceso de fusión. En cuanto al resto de variables, se aprecia una diferencia entre escenarios de 3°C para la temperatura media, de 300 mm/añual para la precipitación y de 5 mm/añual en el caso de la escorrentía superficial.

En la siguiente tabla se muestran las variaciones medias experimentadas en el comportamiento de los agentes forzadores entre el periodo actual (1999 -2014) y las previsiones futuras simuladas con el modelo WiMMed (2085 – 2100).

*Tabla 1\_ Variación media experimentada entre el periodo 1998 – 2014 y 2085 – 2100 para los*

escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Variable	Variaciones entre el registro histórico y el escenario RCP 4.5	Variaciones entre el registro histórico y el escenario RCP 8.5
Precipitación en nieve	-18 mm/añual	-164 mm/añual
Fusión de la nieve	3 mm/añual	-130 mm/añual
Temperatura media	1 °C	4 °C
Precipitación	-110 mm/añual	- 340 mm/añual

Las variaciones espaciales de las variables mencionadas en la anterior tabla, se representan en la Figura 16. En ambos escenarios (RCP4.5 Y RCP8.5) se aprecian cambios más acusados en la zona de gradiente altitudinal mayor, correspondiente a Sierra Nevada. Es destacable una predicción en el aumento de la temperatura media de entre 4°C y 8°C en esta zona, mientras que dicha variación disminuye conforme bajamos en altura (Figura 16). En promedio en toda la cuenca, se estima un aumento de la temperatura de 1°C para el RCP 4.5 y de 4°C para el RCP 8.5. Relativo a la precipitación media, el RCP 4.5 muestra una variabilidad espacial alta en su comportamiento. De media, se estima un aumento de 100 mm/añual (13%), respecto del periodo de referencia, en la zona más elevada. Sin embargo, la Sierra de la Contraviesa experimenta una reducción de hasta 400 mm/añual (54%). En promedio, la reducción de la precipitación anual para el RCP 4.5 se estima en 110 mm (15%). Analizando el RCP 8.5, el comportamiento espacial es mucho más homogéneo, pero siendo las predicciones anuales en el descenso de la precipitación son 3 veces mayor (46 %) a las estimadas por el RCP 4.5 (Tabla 1). En cuanto a la fusión media experimentada para el RCP 4.5, se produce un aumento respecto a la fusión registrada durante el periodo 1999 - 2014, de 100 mm (53%) en la zona más elevada de la cuenca. Inmediatamente por debajo se experimenta un descenso de 100 mm y en el resto de la cuenca no se aprecian variaciones acusadas en su comportamiento. Este comportamiento señala una disminución de las reservas de nieve en la cuenca. Sin embargo, en el RCP8.5 se aprecia una disminución de la fusión media anual de hasta - 300 mm en la zona de Sierra Nevada, estando en consonancia con la disminución de la precipitación en forma de nieve en los gradientes altitudinales más altos (de hasta -500 mm de media anual para el RCP8.5). Este escenario representa una situación en la que la reserva de nieve se ha agotado, ya que tanto la precipitación en forma de nieve como la fusión descienden drásticamente.

Diferencia de la media anual entre el registro histórico y el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR

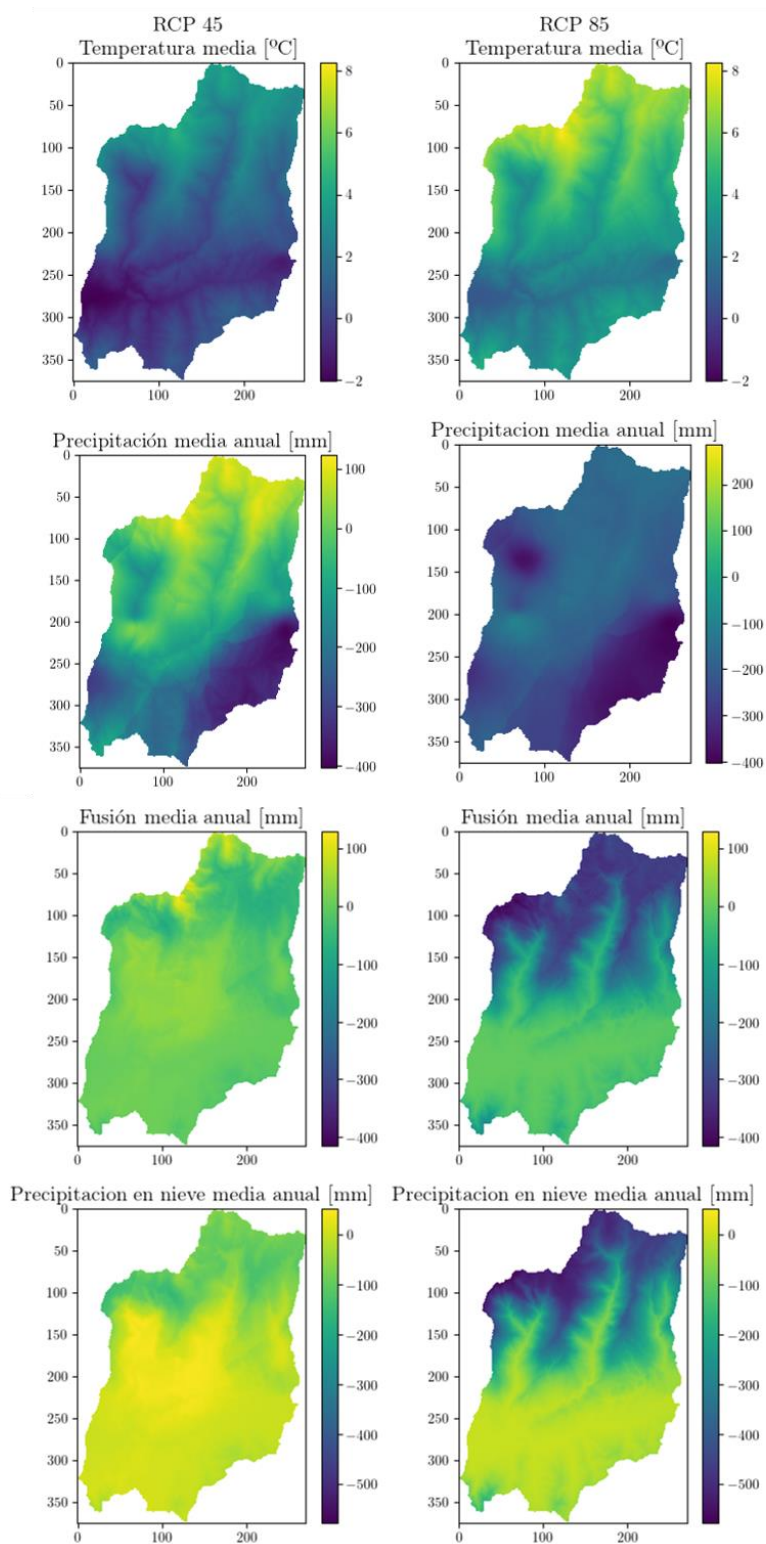


Figura 16\_Diferencias de la media anual entre el registro histórico y los resultados obtenidos por el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR para el escenario RCP 45(izquierda) Y RCP85 (derecha).

### 4.3.3 Análisis del flujo de agua y sedimento simulado.

Finalmente, evaluamos los cambios producidos por los agentes hidro-meteorológicos sobre el flujo de agua, a la salida de la cuenca vertiente estudiada. (Localización del punto de control 110 en la Figura 17).

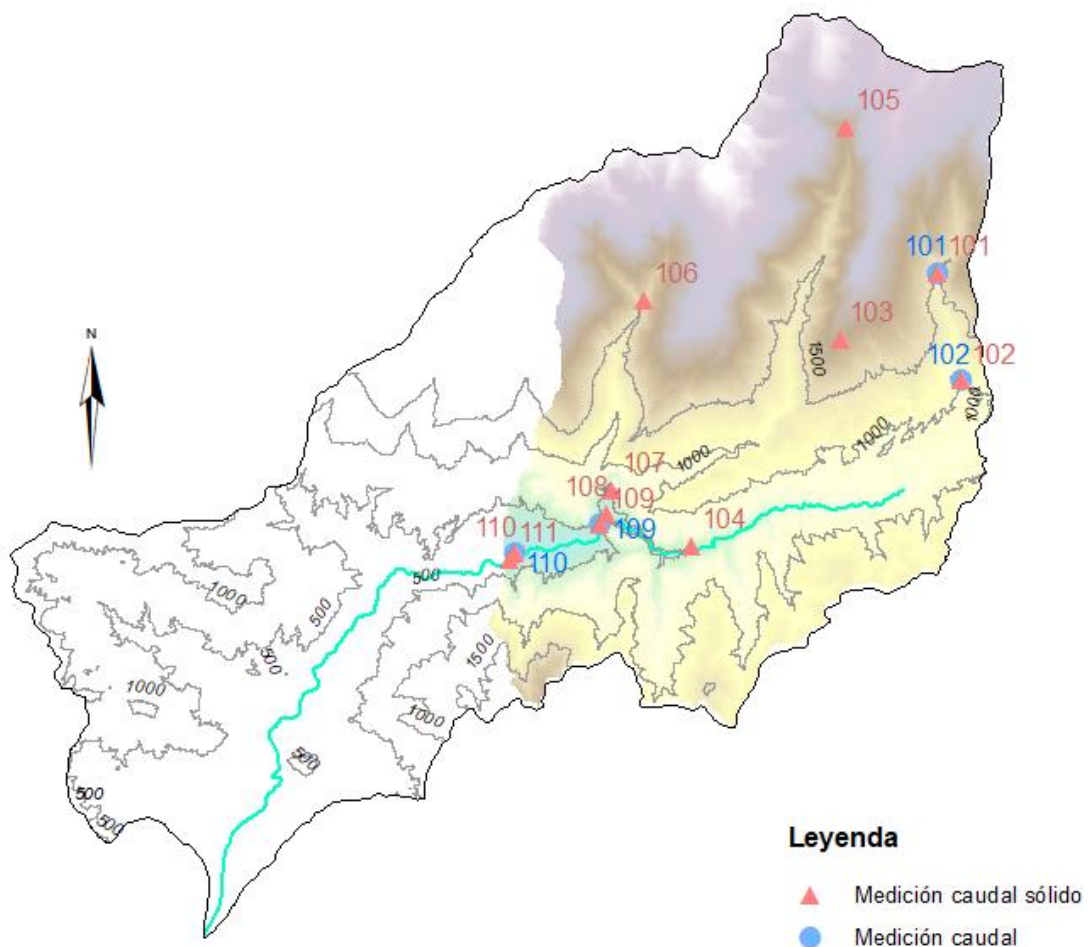


Figura 17 Localización de los puntos donde se evalúa el flujo de agua (azul) y sedimento (rojo). Escala: 1:300.000.

Tabla 2\_Volumen anual medio [hm<sup>3</sup>] obtenidos de las simulaciones en el punto de control 110.

Modelo	Punto de control 110
Registro histórico	126,05 hm <sup>3</sup>
RCP 4.5 - IPSL-IPSL-CM5A-MR	105,63 hm <sup>3</sup>
RCP 8.5 - IPSL-IPSL-CM5A-MR	41,43 hm <sup>3</sup>

Al igual que ocurría con los agentes forzadores evaluados en el anterior apartado, se aprecian variaciones significativas en las simulaciones de cada uno de los escenarios evaluados. Las aportaciones medias anuales oscilan entre 105 hm<sup>3</sup> para el RCP4.5 y 41 hm<sup>3</sup> para el RCP 8.5. Esto supone una disminución del volumen medio anual registrado en el punto 110 de un 16% (21 hm<sup>3</sup>) para el RCP 4.5 y un 67 % (85 hm<sup>3</sup>) para el RCP 8.5.

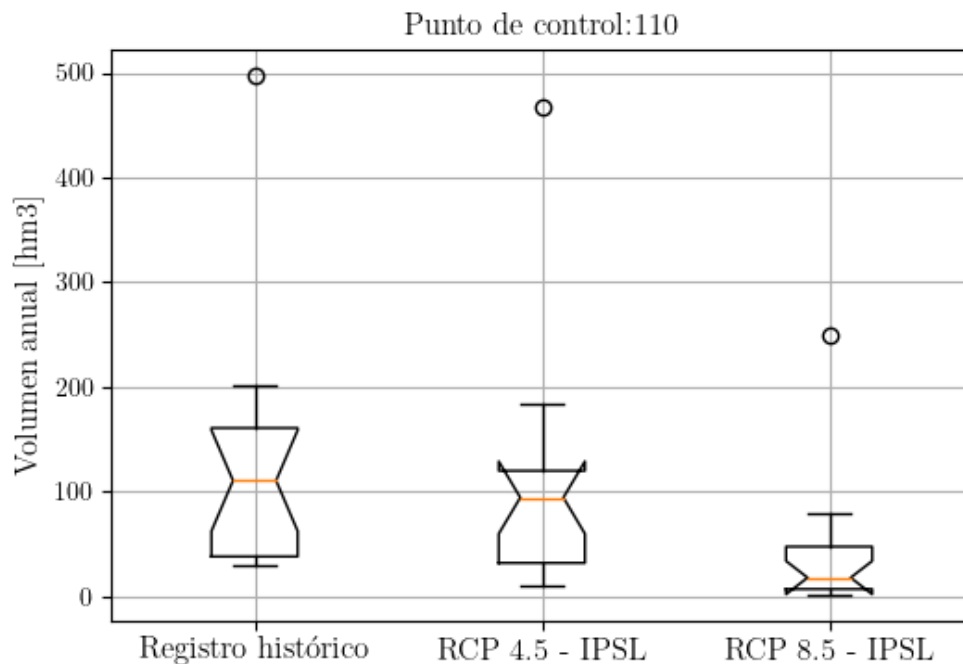


Figura 18\_ Gráfico de cajas. Volumen aportación anual [hm<sup>3</sup>] registrado en el punto de control 110.

En la Figura 18, se muestran los cambios producidos en la distribución de la aportación anual (hm<sup>3</sup>) entre los escenarios evaluados. Entre el registro histórico y el escenario RCP 4.5 cabe destacar la disminución de los valores de aportación, del cuerpo central de la distribución, en un 15%. Sin embargo, el valor extremo superior y valor atípico sufren una variación menor (del 7,9%). En cuanto al escenario RCP 8.5, la disminución es más acusada para los valores del cuerpo central y los valores extremos superior e inferior. La distribución de la aportación para el RCP 8.5 disminuye un 75% en conjunto.

En la siguiente figura, se representa la frecuencia con la que se alcanzan caudales pico por encima del percentil 99% registrado por las simulaciones históricas (correspondiente a 30 m<sup>3</sup>/s). Se puede observar como el nº de eventos registrados con caudales entre 40 – 60 m<sup>3</sup>/s es mayor para el escenario RCP 4.5. Esto explicaría un aumento del nº eventos extremos en el escenario RCP 4.5 respecto del periodo de referencia (1999 -2014). El escenario RCP 8.5 refleja una disminución del caudal extremo, respecto del periodo histórico, lo cual indica una disminución del nº de eventos de precipitación extremos, o incluso la escasa o nula contribución observada del proceso de fusión al caudal fluvial.

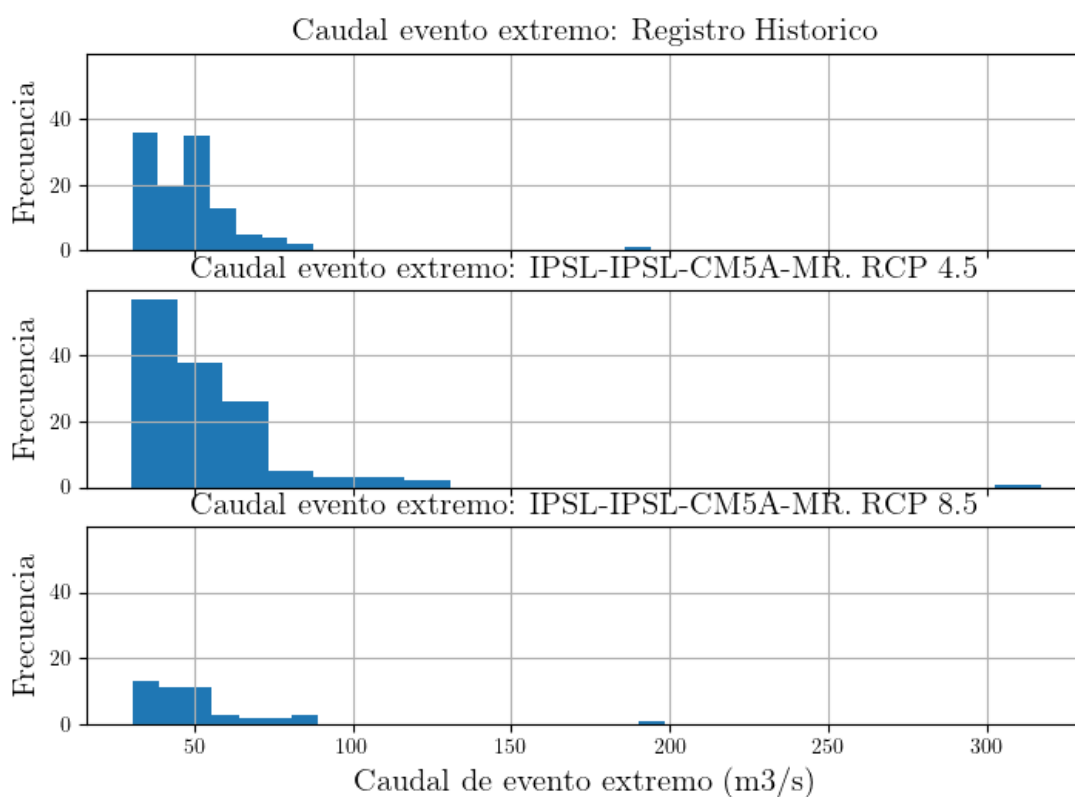


Figura 19\_Histograma de los caudales superiores a 30 m<sup>3</sup>/s. De arriba abajo: Caudales simulados a partir del registro histórico – RCP 4.5 modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR - RCP 8.5 modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR

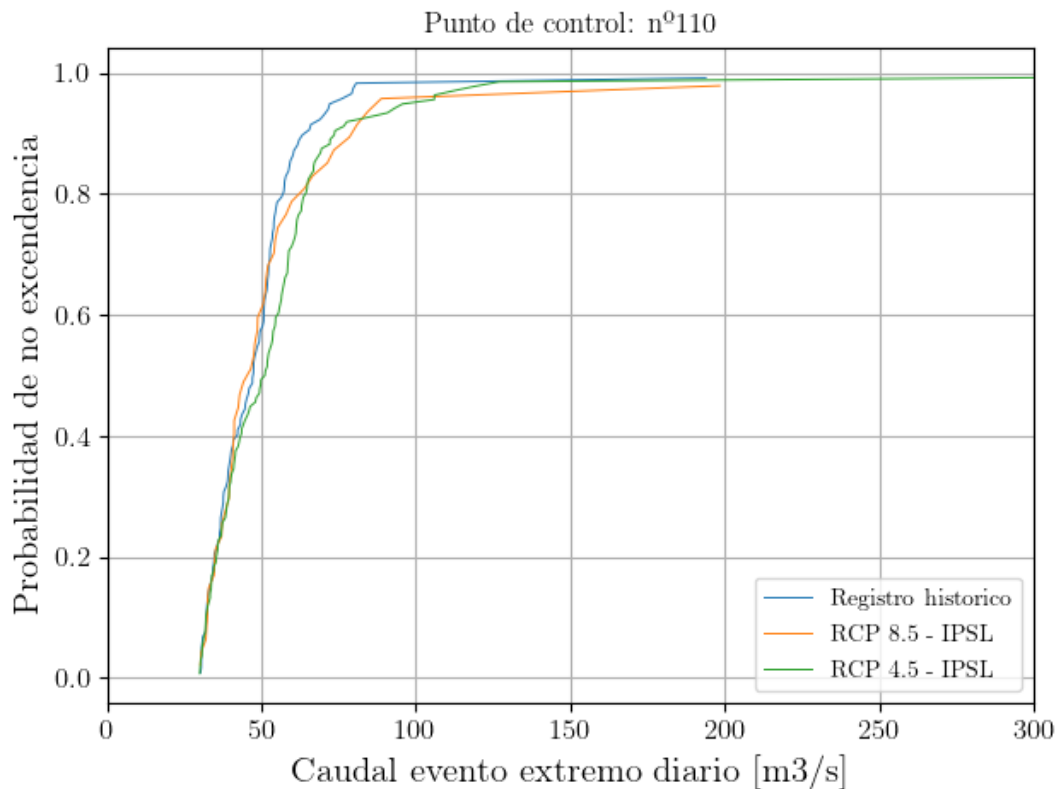


Figura 20\_ Función de distribución empírica de los caudales superiores a 30[m<sup>3</sup>/s] simulado a partir de: datos del registro histórico, RCP4.5 modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR y RCP 8.5 modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR.

Analizando la función de distribución empírica de los datos de caudal asociado a eventos extremos (percentil 99% del caudal medio del registro histórico) entre escenarios, se obtiene que para caudales inferiores a 40 m<sup>3</sup>/s, la probabilidad de excedencia es similar entre las diferentes simulaciones realizadas. En el caso de caudales superiores a 40 m<sup>3</sup>/s, el escenario RCP 4.5, presenta una probabilidad de excedencia superior al resto de casos analizados, del 60%.



## 5 CONCLUSIONES.

El análisis de los datos de precipitación y temperatura procedentes de EURO-CORDEX pone de manifiesto la elevada incertidumbre asociada a la predicción del comportamiento de estas variables meteorológicas. Esto hace que el análisis del riesgo asociado a las inundaciones, periodos de sequía y disminución del aporte de sedimento a las zonas costeras, se encuentre muy influenciado por la variabilidad de las predicciones aportadas por los modelos.

El empleo de las proyecciones de MCR (Modelos Climáticos Regionalizados) resulta interesante por la alta resolución de la información proporcionada y porque aporta información relativa al cambio en los extremos climáticos. Sin embargo, presenta limitaciones debido a que no se corrigen los errores generados en los MCG (Modelos de Circulación Global), proporcionando un ajuste más pobre de los valores de precipitación simulados. Esto se traduce en que no todas las proyecciones presentan una tendencia negativa de la precipitación observada a futuro. El modelo CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, muestra valores medios de precipitación que aumentan hasta un 67% para el RCP más desfavorable, mientras que el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR llega a pronosticar una disminución de hasta 40%. El sesgo de los valores climáticos de partida detectados en este informe, condiciona en gran medida la simulación hidrológica y es un indicativo de la incertidumbre de los resultados de la evaluación del impacto.

Para evaluar los efectos más adversos del impacto del cambio climático teniendo en cuenta las indicaciones más desfavorables documentadas en el 5º informe de IPCC, que apuntan a una disminución de los recursos hídricos, se selecciona el modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR cuyas proyecciones reflejan este comportamiento.

Para la zona de estudio, caben destacar las siguientes tendencias en el comportamiento de los agentes hidro-meteorológicos, comparando siempre con el periodo de referencia definido de 1999 – 2014 y mostrando una horquilla de valores correspondientes a los escenarios evaluados (RCP 4.5 y RCP 8.5).

- Las predicciones apuntan a una reducción media de la precipitación entre 15% – 45%.
- Un aumento de la temperatura media en la cuenca de 1°C a 4 °C.
- Para el escenario RCP 4.5, se estima un aumento de la fusión en la zona más alta de la cuenca (53%) debido al aumento de la temperatura. La precipitación en forma de nieve no sufre una variación importante, pero este comportamiento en su conjunto afectaría a la dinámica hidrológica con una considerable menor reserva y persistencia de la cobertura de la nieve en Sierra Nevada.

- En el caso del RCP 8.5, tanto la fusión de la nieve como la precipitación descienden drásticamente, y apuntan a un agotamiento total de los recursos nivales.

Estas variaciones propician un cambio en el régimen de aportaciones, en donde se observa:

- Una disminución de las aportaciones en el escenario RCP 4.5 de un 16 % de media.
- En un escenario más desfavorable, RCP 8.5, el descenso de la aportación fluvial disminuye a un 67 %.
- En el caso de las riadas asociadas a caudales superiores a 30 m<sup>3</sup>/s, el escenario RCP 4.5 presenta un aumento del 50%, principalmente por la ocurrencia de eventos con una intensidad mayor a la observada en el registro histórico, pero que además puede verse acentuada por una disminución de la precipitación en forma de nieve que contribuye a la laminación de eventos.
- El escenario RCP 8.5 refleja una disminución del 50% de este tipo de eventos, debido a la disminución tan drástica que sufre la precipitación, y el agotamiento de los recursos nivales que dejan de aportar al caudal fluvial.

A pesar de la variabilidad de los resultados obtenidos entre los 2 escenarios evaluados, se puede apreciar una pauta general en el comportamiento de los agentes hidro-meteorológicos y la respuesta hidrológica en la cuenca. Las proyecciones analizadas apuntan a un aumento de la temperatura media general en la cuenca, con la consiguiente disminución de los recursos nivales en el entorno de Sierra Nevada, que contribuirá a la disminución de las aportaciones medias anuales. Además, se aprecia una tendencia clara de la disminución de la precipitación, aunque un posible aumento importante de los eventos más extremos (caudales superiores a los 30 m<sup>3</sup>/s) según los resultados evaluados para el RCP 4.5. Esta tendencia produciría cambios importantes en la dinámica del transporte de sedimento, pudiendo ocasionar un aceleramiento del proceso de colmatación de embalses y diques, con la consecuente disminución de la capacidad de laminación de estas avenidas. Aguas abajo, el sistema costero se ve afectado por la falta de aporte de sedimento continuado, repercutiendo en la morfodinámica del sistema costero al aumentar el riesgo del retroceso de la línea de costa. Además, un aumento de la frecuencia de las avenidas y una menor capacidad de laminación por parte del sistema, conllevaría un aumento del riesgo de inundación en las poblaciones costeras.

## 6 REFERENCIAS.

- Aguilar, C., Herrero, J., Millares, A., Losada, M. A., Polo, M. J. (2014). Meteomap: Generation of meteorological variables for distributed physically-based hydrological modeling. CUNY Academic Works.
- Barra, A., Monserrat, O., Solari, L., Herrera, G., Lopez, C., Onori, R., Reichenbach, P., González-Alonso, E., Mateos, R.M., Bianchini, S., et al. (2018). The safety project: Sentinel-1 for the management of geological risk. In Proceedings of the WIT Transactions on Engineering Sciences
- Bergillos, R. J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., and Losada, M. A. (2016). Impact of river regulation on a Mediterranean delta: assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research*, 52(7):5132-5148.
- Buishand, T.A. (1977). Stochastic modelling of daily rainfall sequences. Mededlingen Landbouwhogeschool Wageningen, 45-49.
- Egüen, M., Aguilar, C., Polo, M. J., Moreno, I., Herrero, J., Millares, A., Losada, M. A. (2009). WiMMed, a distributed physically-based watershed model (II): Application examples. *Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental & Computational Solutions*, 229-232.
- Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Egüen, M., Carpintero, M., Polo, M., Losada, M. A. (2010). WiMMed. User Manual v1.1. University of Granada, Granada.
- Herrero, J., Millares, A., Aguilar, C., Egüen, M., Losada, M.A., Polo, M.J. (2014). Coupling spatial and time scales in the hydrological modelling of Mediterranean regions: WiMMed. CUNY Academic Works.
- Herrero, J., Polo, M. J., Moñino, A., M. Losada. (2009). An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *Journal of Hydrology* 371(1), 98–107.
- Lira-Loarca, A., Cobos, M., Losada, M.A., Baquerizo, A. (2019). Storm characterization and simulation for damage evolution models of maritime structures. *Coastal Engineering*
- Lütkepohl, H. (2005). *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*. Springer Business Media.
- Millares, A., Herrero, H., Bermúdez, M., Leiva, J.F., Cantalejo, M. (2020). Long-term modeling of soil loss and fluvial transport processes in a mountainous semi-arid basin, southern Spain. *River Flow 2020 - Twentieth International Conference on Fluvial Hydraulic*, Delf, Netherlands (under review)
- Millares, A., Díez-Minguito, M., Moñino, A. (2019). Evaluating gully effects on modeling erosive responses at basin scale. *Environmental Modelling & Software*, 111, 61-71.
- Millares, A., Díez-Minguito, M., Moñino, A. (2019). Evaluating gully effects on modeling erosive responses at basin scale. *Environmental Modelling & Software*, 111, 61-71.
- Millares, A., Moñino, A. (2018). Sediment yield and transport process assessment from reservoir monitoring in a semi-arid mountainous river. *Hydrological Processes* 32(19), 2990–3005.

Millares, A., Moñino, A., Arjona, S., Baquerizo, A. (2018). Suspended sediment dynamics by event typology and its siltation effects in a semi-arid snowmelt-driven basin. In E3S Web of Conferences (Vol. 40, p. 04008). EDP Sciences

Millares, A., Gulliver, Z., and Polo, M. (2012). Scale effects on the estimation of erosion thresholds through a distributed and physically-based hydrological model. *Geomorphology*, 153-154:115-126.

Millares, A., Polo, M., Moñino, A., Herrero, J., and Losada, M. (2014). Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. *Geomorphology*, 206(0):330-342.

Piani, C., Haerter, J.O., Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99, 187–192.

Restrepo, P., Eagleson, P. (1981). Identification of independent rainstorms. *Journal of Hydrology*. (Vol. 55, p303-319)

Rodríguez, J. (2008). Sistema de Inferencia Espacial de Propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Herramienta de Apoyo a la Simulación de Procesos Agro-Hidrológicos a Escala Regional. Informe Final. Empresa Pública de Desarrollo Agrario y Pesquero, Consejería de Agricultura y Pesca.

Sklar, M. (1959). Functions de repartition an dimensions et leurs marges. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris* 8, 229 – 231.