

Metodología basada en generadores meteorológicos para la estimación de avenidas extremas

A methodology based on weather generators for the estimation of extreme floods

Beneyto, C.^{a1}, Aranda, J.A.^{a2}, Benito, G.^b, Francés, F.^{ib a3}

^a Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, E-46022 Valencia, España.
E-mail: ^{a1} carbeib@alumni.upv.es, ^{a2} jaranda@dig.upv.es, ^{a3} ffrances@hma.upv.es

^b Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC, c/ José Gutiérrez Abascal, 2, E-28006, Madrid, España.
E-mail: benito@mncn.csic.es

Recibido: 30/07/2019

Aceptado: 04/10/2019

Publicado: 31/10/2019

Citar como: Beneyto, C., Aranda, J.A., Benito, G., Francés, F. (2019). A methodology based on weather generators for the estimation of extreme floods. *Ingeniería del agua*, 23(4), 259-273. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.12153>

RESUMEN

Una adecuada caracterización de las avenidas extremas es clave para el correcto diseño de las infraestructuras y la estimación del riesgo de inundación de una determinada área. Sin embargo, la escasa longitud de los registros pluviométricos y de aforos unido con la baja probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos hace que, a día de hoy, su adecuada estimación presente todavía grandes dificultades. Este trabajo presenta una metodología para la estimación de las avenidas extremas mediante la generación continua de series de precipitación a través de generadores meteorológicos y la integración de información de varios tipos (sistemática y no sistemática). Los resultados obtenidos en el caso de estudio, la Rambla de la Viuda, indican que el uso conjunto de series sintéticas continuas generadas mediante un generador meteorológico estocástico, un modelo hidrológico y la integración de registros sistemáticos y no sistemáticos reduce la incertidumbre de la estimación de avenidas extremas.

Palabras clave | generador meteorológico estocástico; extremos; modelo hidrológico; paleoavencidas.

ABSTRACT

An adequate characterization of extreme floods is key for the correct design of the infrastructures and for the flood risk estimation. However, the short length of the rainfall and flow data series along with the low probability of occurrence of this type of event cause that, to date, their adequate estimation still presents significant difficulties. This paper presents a methodology for the estimation of extreme floods based on the continuous generation of precipitation data series using weather generators and the integration of information of various types (systematic and non-systematic). The results obtained in the case study, Rambla de la Viuda, indicate that the joint use of continuous synthetic data series generated by a stochastic weather generator, a hydrological model and the integration of systematic and non-systematic information reduces the uncertainty in the estimation of extreme floods.

Key words | stochastic weather generator; methodology; extremes; hydrological model; palaeoflood.

INTRODUCCIÓN

La estimación de avenidas extremas ha sido históricamente un problema de gran relevancia que todavía hoy está presente entre la comunidad científica. La falta de registros de precipitación y de datos de aforos completos y suficientemente largos es el principal motivo por el cual existe una gran incertidumbre en la estimación de los caudales asociados a los cuantiles más altos. Sin embargo, los estudios de frecuencia de avenidas han sido utilizados para el diseño de infraestructuras desde hace más de un siglo y muchas de las grandes infraestructuras se dimensionan en base a la avenida de diseño que, generalmente, está asociada con periodos de retorno (T) altos o muy altos de hasta 10 000 años como en el caso de las presas de materiales sueltos. Además, la Directiva 2007/60 CE requiere que los estados miembros analicen la peligrosidad de las inundaciones en las áreas costeras y los corredores fluviales, elaboren mapas de riesgo de inundación y tomen medidas para mitigar el consiguiente riesgo.

Tradicionalmente, estos estudios se han realizado de una forma empírica, ajustando los *plotting positions* de los caudales instantáneos observados a una determinada función de distribución, obteniendo los caudales asociados a el periodo de retorno deseado (Singh y Strupczewski, 2002), o mediante procedimientos determinísticos como la Inundación Máxima Probable (England et al., 2014). Lógicamente, a mayor número de datos, mejor será el ajuste y menor será la incertidumbre asociada a los diferentes cuantiles. En el caso de España, la implantación de una red extensa de instrumental de aforo no tuvo lugar hasta hace unos pocos años, mejorando notablemente con la implantación de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) a raíz de las inundaciones de 1982 (de Andrés Conde et al., 2019). Por tanto, los rangos de longitud de las series de precipitación y de caudales que se pueden encontrar hoy en día solamente alcanzan, en el mejor de los casos, unos 50-100 años. Esto quiere decir que, con esta longitud de registros, es muy complicado obtener buenas estimaciones de los valores extremos y que generalmente sea necesario recurrir a otras metodologías y al apoyo con información de otras fuentes para ser capaces de reducir la incertidumbre de estas estimaciones. Además, en el caso de la costa mediterránea española, la combinación de sus complejos factores climáticos, estructurales y geomorfológicos característicos (Camarasa Belmonte y Segura Beltrán, 2001) hace que estas estimaciones sean aún más complicadas.

Un posible enfoque para solucionar esta problemática es a través de la utilización conjunta de series de precipitación generadas sintéticamente y un modelo hidrológico capaz de reproducir los procesos hidrológicos a diferentes escalas temporales. Estos modelos hidrológicos necesitan ser alimentados, entre otros, por *inputs* de precipitación, cuya longitud y robustez es clave para obtener buenas estimaciones. Como se ha comentado, estos registros son todavía cortos pero pueden ser extendidos, por ejemplo, mediante el uso directo de los modelos de circulación regionales como en Kay et al. (2006) o a través de procesos estocásticos como en Burton et al. (2008) o en Furrer y Katz (2008). Otras formas de generar variables meteorológicas son comentadas en Fatichi et al. (2011).

Algunos autores han utilizado generadores estocásticos de tormentas sintéticas aisladas para realizar estudios de frecuencia de inundaciones como en Sordo-Ward et al. (2013) o en Candela et al. (2014), o incluso a través de técnicas más complejas como la transposición estocástica de tormentas en Foufoula-Georgiou (1989), Taylor y Wilson (1990) o Wilson y Foufoula-Georgiou, (2007). Sin embargo, la generación de tormentas aisladas presenta el problema de la caracterización de las condiciones iniciales de la cuenca (Flores-Montoya et al., 2016), lo cual puede ser solucionada a través de la generación estocástica continua.

Una posibilidad para la generación continua de precipitación son los modelos de proceso puntual de clúster generalizado de Neyman-Scott de pulsos rectangulares (Cowpertwait et al., 1996). En este sentido, Cowpertwait et al. (2013) combina un proceso de punto espacio-temporal para modelar la precipitación y el modelo hidrológico distribuido conceptual de parámetros físicamente basados TETIS (Francés et al., 2007). Brocca et al. (2013) combina este proceso con un modelo semidistribuido y Flores-Montoya et al. (2016) proponen una metodología en la que se combina con un modelo distribuido basado en el evento.

Otra posibilidad para la generación continua es el uso de generadores meteorológicos estocásticos, que recientemente han tomado relevancia para la realización de estudios de impacto hidrológico (Haberlandt et al., 2011). Entre estos, cabe destacar Blazkova y Beven (2004), Caron et al. (2009), Khalili et al. (2011) entre otros.

Los generadores meteorológicos estocásticos generan series sintéticas de precipitación preservando las características estacionales y los principales estadísticos de los datos observados (Wilks y Wilby, 1999). Uno de los primeros en usar generadores meteorológicos fue Richardson (1981) el cual generó series de precipitación, temperatura máxima y mínima diaria y radiación solar

a escala diaria. Posteriormente este modelo fue evolucionando hasta desarrollar WGEN (Richardson y Wright, 1984). A este modelo le siguieron otros, entre los que podemos destacar, LARS-WG (Racsko et al., 1991; Semenov y Barrow, 1997; Semenov, 2002), el modelo CLIGEN (Nicks et al., 1994; Nicks y Gander, 1995), CLIMGEN (Stöckle et al., 1999; Mckague et al., 2003), o el modelo MulGETS (Chen et al., 2010; Chen et al., 2012; Chen et al., 2014).

Varios autores, sin embargo, han puesto de manifiesto que los generadores estocásticos no son capaces de reproducir correctamente los eventos extremos, es decir, la cola superior de la función de distribución de precipitación (Verdin et al., 2015) (Cavanaugh et al., 2015). Esta problemática ha sido abordada por varios autores que han propuesto la utilización de funciones de distribución de cola pesada y la integración de información de estudios regionales más extensos como en Evin et al. (2018) u otros muchos que pueden consultarse en Montes et al. (2018).

Otro análisis que se ha venido realizando en los estudios de frecuencia de avenidas para mejorar las estimaciones es la incorporación de información no sistemática de avenidas históricas obtenidas a través de registros históricos (Benito et al., 2004) evidencias sedimentológicas (Machado et al., 2017) o del análisis dendrogeomorfológico de árboles riparios (Ballesteros-Cánovas et al., 2013). Al proporcionar información más allá de los registros sistemáticos, generalmente, es posible extender la curva de frecuencia de inundación por encima del período de retorno de 100 años y, por tanto, reducir la incertidumbre de los cuantiles más altos. En el estudio llevado a cabo por Francés, (1998) para la cuenca del río Turia, por ejemplo, se concluye que los valores de los errores en la estimación disminuyen a medida que aumenta la cantidad de información utilizada para estimar el cuantil de inundación de 1000 años, observándose que el uso de información histórica reduce el error de estimación en aproximadamente el 50%. Otros estos estudios en esta línea pueden consultarse en (Wallis y Heights, 1986; Francés et al., 1994; Lang et al., 2004; England et al., 2010 y 2014; o Lam et al., 2017).

Este trabajo presenta una metodología para la estimación de las avenidas extremas basada en el uso de generadores meteorológicos estocásticos combinado con un modelo hidrológico distribuido en el espacio, y la incorporación de la información disponibles (sistemática y no sistemática) tanto para la calibración y la validación del generador meteorológico y el modelo hidrológico, con el fin de comprobar la robustez de los resultados.

METODOLOGÍA

La metodología comprende cuatro pasos: (1) implementación de un modelo hidrológico; (2) selección y calibración de un generador meteorológico estocástico a escala diaria; (3) generación de las series sintéticas de precipitación y temperatura que se utilizarán como *input* del modelo hidrológico; y (4) validación de la metodología y análisis de los resultados.

Implementación del modelo hidrológico

El primer paso corresponde con la implementación de un modelo hidrológico. Puesto que se pretende obtener los cuantiles asociados con periodos de retorno altos, es necesario disponer de series meteorológicas largas (al menos 1000 años). A pesar de que lo idóneo sería implementar el modelo hidrológico a escala subdiaria, el elevado número de años a simular requeriría un volumen de datos y tiempo inviable a efectos computacionales. Además, en la mayoría de los casos, el tipo de precipitaciones que producen los caudales más elevados en España tiene lugar en periodos de varios días. Por tanto, la implementación del modelo hidrológico se realizará a escala diaria ya que ésta es capaz de captar los fenómenos que nos interesan analizar y, además, en términos computacionales no requiere enormes exigencias.

En la literatura se pueden encontrar gran variedad de modelos hidrológicos de características diversas. Devia et al. (2015) clasifican los modelos hidrológicos atendiendo a la conceptualización de los procesos básicos en empíricos, conceptuales y físicamente basados. A su vez, de acuerdo con su representación espacial, éstos pueden ser agregados (comportándose la cuenca como una única unidad y, por tanto, obteniéndose caudales únicamente en el punto de desagüe) o distribuidos (donde la cuenca está dividida en celdas de cierto tamaño y en cada una de ellas se puede obtener información).

Ya que la presente metodología se basa en la integración de información procedente de diferentes fuentes de información (sistemática y no sistemática) y en diferentes puntos de la cuenca, es condición indispensable para la aplicación de la misma que el modelo sea un modelo distribuido. Por tanto, para la calibración y la posterior validación espacial, temporal y espacio-temporal, es necesario que se disponga de información de caudales observados en más de un punto de la cuenca y en diferentes momentos temporales.

Calibración del generador meteorológico

Hoy en día existe una gran variedad de generadores meteorológicos estocásticos, muchos de ellos centrados en la adecuada reproducción de las características estadísticas de los eventos extraordinarios. Es importante entender que no existe un generador mejor que otro, sino generadores que funcionan mejor que otros para determinadas características pluviométricas. Por tanto, para la selección del generador, es recomendable realizar una breve revisión del estado del arte e implementar al menos un par de generadores para determinar cuál es el que mejor reproduce las precipitaciones de una zona determinada. Además, es importante que el generador sea capaz de simular series de precipitación en más de un punto (*multisite*) debido a que posteriormente se utilizará un modelo hidrológico distribuido.

Una vez seleccionado el generador, su calibración se realizará en dos pasos: un primero en el que se calibrarán las lluvias ordinarias; y un segundo en el que se calibrarán las lluvias extraordinarias o extremas.

En el caso de las primeras, un alto porcentaje de las lluvias que se registran son ordinarias y, por tanto, en los datos observacionales que se disponga existe información suficiente para que los generadores meteorológicos sean capaces de reproducir estas lluvias adecuadamente. Así pues, una primera estimación de los parámetros del generador meteorológico puede realizarse a partir de las lluvias observadas. Sin embargo, en el caso de las lluvias extraordinarias se dispone, en el mejor de los casos, de tres o cuatro eventos en el registro pluviométrico, siendo poco probable que el generador sea capaz de reproducirlas adecuadamente ya que no dispone de información suficiente. Es por esto que se propone en este punto la integración de estudios regionales de precipitaciones máximas diarias capaces de aportar más información de los cuantiles más altos. La calibración de los parámetros dependerá del tipo de función de distribución marginal que el generador utilice para el ajuste de la cantidad de precipitación generada, cuyos parámetros tendrán que ser modificados en consecuencia para que las precipitaciones simuladas por el generador se ajusten a las del estudio regional.

Generación de series sintéticas

Una vez implementado el modelo hidrológico y calibrado el generador meteorológico, el siguiente paso será generar las series sintéticas de precipitación y temperatura que servirán como *input* del modelo hidrológico para obtener las series de caudales diarios. La longitud de las series generadas dependerá de la finalidad del estudio que se desee realizar y de la información que se disponga para validar los resultados.

Conversión de caudales diarios a instantáneos

Una vez obtenidas las series de caudales diarios del modelo hidrológico distribuido, se requiere convertirlos a caudales instantáneos ya que: (1) estos valores instantáneos se emplean en la mayor parte de estudios: inundación, seguridad de presas, etc.; y (2) debido a que, si se dispone de información histórica o paleocrecidas (Machado et al., 2017), esta información generalmente es de carácter instantánea no sistemática censurada y no puede ser convertida a diaria. Esta cuestión ha sido abordada por muchos autores desde hace muchos años. Las primeras transformaciones se basan en métodos empíricos. Así, Fuller (1914) llega a obtener el caudal instantáneo a partir del área de drenaje a través de la Ecuación 1.

$$k = \frac{Q_{max}}{Q} = 1 + \frac{a}{A^b} \quad (1)$$

Donde a y b son parámetros adimensionales obtenidos por Fuller del estudio de 24 cuencas de diferente tamaño en EE.UU. y A el área en km^2 .

Otro método empíricos en función de las características morfológicas puede encontrarse en Tucci y Silva (2016). Taguas et al. (2008) considera, además del área de drenaje de la cuenca, la pluviometría anual. Existen también métodos determinísticos que utilizan segundas aproximaciones (Linsley et al., 1968; Sangal, 1983). Algunos autores propone métodos determinísticos, pero integrando información regional (Chen et al., 2017; CEDEX, 2011). En ésta última, utilizándose los métodos empíricos anteriores e incluyendo la regionalización.

Cabe destacar los avances que han surgido en los últimos años que mejoraran la precisión de los resultados (Fathzadeh et al., 2017). Éstos se basan en dos técnicas: *adaptive neuro-fuzzy inference systems* (ANFIS) y *artificial neural networks* (ANN).

Siguiendo los resultados del trabajo de Jimeno-Sáez et al. (2017) donde se comparan los distintos métodos de transformación de caudales diarios en instantáneos en distintas cuenca de España, se concluye que, si bien estos últimos métodos obtienen mejores resultados, es necesario tener un conjunto de datos subdiarios importante para entrenar los modelos. Cuando el conjunto de datos disponibles es escaso, es preferibles los métodos empíricos con regionalización

Validación de la metodología

Por último, se llevará a cabo la validación de la metodología comparando los cuantiles de las precipitaciones diarias máximas anuales. Esta validación comprende dos pasos: (1) validación de los caudales asociados a cuantiles bajos; y (2) validación de los cuantiles de la parte alta de la función de distribución. Para ambos casos, será necesario obtener los cuantiles asociados de las series de caudales generadas. Un método comúnmente utilizado es mediante el cálculo de la función de distribución empírica o *plotting positions*, por ejemplo, utilizando la expresión de Cunnane (1978). Por tanto, y dada la gran longitud de las series de caudales generadas por el generador meteorológico, no será necesario ajustar estos datos a ninguna función de distribución ya que mediante las gráficas de los *plotting positions* se podrán determinar directamente los cuantiles de interés.

Una vez obtenido las posiciones gráficas de las series generadas, la primera validación se realizará con los cuantiles de los caudales observados en los registros de aforo. Puesto, como hemos comentado, estas series no son muy largas, los cuantiles asociados a estos caudales no irán más allá de los 60-70 años, por tanto, solo permitirán validar los cuantiles de los caudales generados hasta este rango de años. Además, para validar estos cuantiles, no será necesario la conversión de caudales diarios a instantáneos puesto que el modelo hidrológico esta implementado a escala diaria y los registros de aforos contienen información a la misma escala.

Para la segunda parte de la validación, sin embargo, sí que será necesario el paso de caudal diario a instantáneo puesto que se realizará por comparación con información no sistemática de registros históricos y paleocrecidas cuya conversión a diaria no es posible. Así, los cuantiles obtenidos de los caudales generadores deberán ser validados con la información histórica y de paleocrecidas que se disponga.

Este proceso de validación deberá repetirse en tantas estaciones con registros de aforo se disponga y en aquellos puntos en los que se disponga de información histórica y/o de paleocrecidas, retornando a la calibración del generador meteorológico y/o a la implementación del modelo hidrológico si la validación no es satisfactoria.

CASO DE ESTUDIO

Área de estudio

El área de estudio seleccionada para este trabajo es la Rambla de la Viuda (Figura 1), originada en la confluencia del río Monleon y Rambla Carbonera y desembocando en la margen izquierda del río Mijares, en las proximidades de su desembocadura en el mar Mediterráneo. Presenta un área de drenaje de 1.513 km^2 , ubicada casi en su totalidad en la provincia de Castelló,

Comunidad Valenciana. Dentro de la misma se encuentran los embalses de M^a. Cristina y Alcora, con una superficie de 247.2 y 26 ha y respectivamente, construidos con fines de regulación y riego (Mateu, 1974).

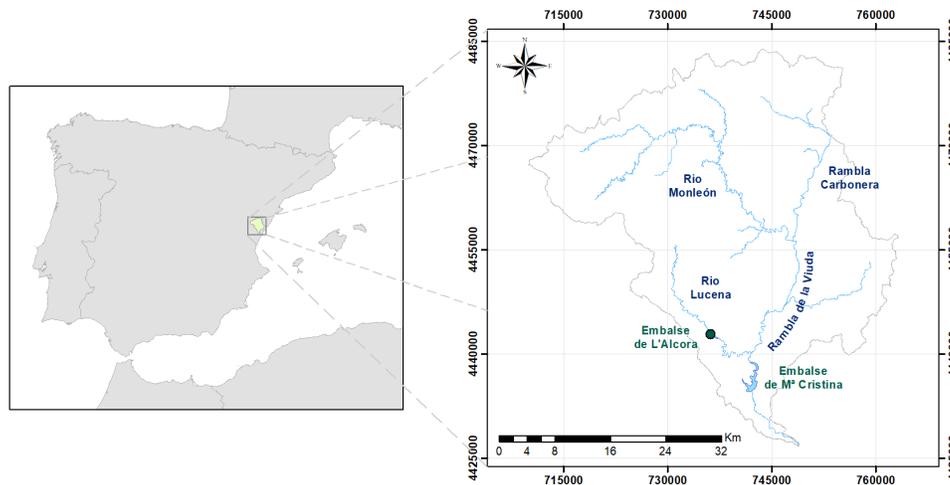


Figura 1 | Área de estudio: Rambla de la Viuda.

En la parte alta de la cuenca se alcanza una elevación de 1750 m.s.n.m., con un sustrato dominado por calizas de edad Jurásico y Cretácico con un alto grado de fracturación y karstificación, lo que favorece la infiltración y la percolación al acuífero kárstico desconectado de los cauces. Las partes más bajas de las cuencas están ubicadas en las llanuras costeras y están formadas por depósitos aluviales, principalmente conglomerados, del Terciario y Cuaternario. Los cauces en la cabecera de la cuenca se encajan en valles profundos y estrechos, mientras que en las partes más bajas estos son amplios, pudiendo el ancho de las secciones transversales llegar a ser 100 veces su profundidad (Camarasa Belmonte y Segura Beltrán, 2001).

Como es característico del ámbito mediterráneo, La Rambla de la Viuda es un río efímero claramente marcado por el régimen de precipitaciones, únicamente registrando caudal en el 8% de los días del año (Camarasa Belmonte y Segura Beltrán, 2001). La precipitación media anual es de alrededor de 600 mm, sin embargo, la precipitación que genera flujo en el cauce principal se registra principalmente los meses de otoño asociados a sistemas convectivos mesoescalares. La media de eventos de lluvia intensa que ha generado flujo en la Rambla durante el periodo 1960-2000 ha sido de 2-3 eventos por año, con una duración media de 30 días (Camarasa Belmonte y Segura Beltrán, 2001).

Información hidrometeorológica e histórica

Información hidrometeorológica

La información hidrometeorológica utilizada en el presente estudio se ha obtenido de diferentes fuentes. Las series de precipitación y temperaturas máximas y mínimas diarias han sido obtenidas del conjunto de datos de Spain02-v4 (Herrera et al., 2016). Un total de 20 pluviómetros y termómetros (Figura 2) fueron seleccionados con registros diarios desde 1971 hasta 2007 (37 años). Además, para la calibración del generador meteorológico, se utilizó el estudio regional de máximas lluvias diarias (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 1999), siendo éste actualizado mediante los coeficientes de variación con los registros de precipitaciones de la serie de precipitación de Spain02.

En cuanto a la información de caudales diarios, esta fue obtenida del SAIH del Júcar, concretamente en los aforos de M^a Cristina, Alcora, Monleon y Vall d'Alba (Tabla 1).

Tabla 1 | Datos de aforos diarios.

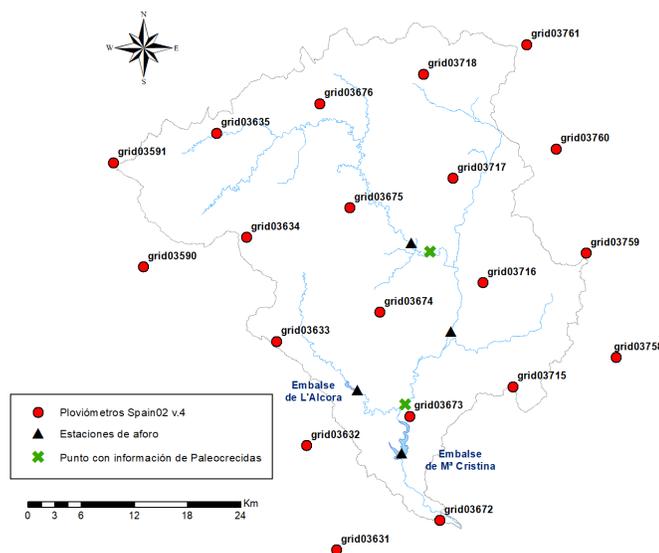
	Longitud de las series (años completos)	Periodo		Comentarios
		Inicio	Final	
M ^a Cristina (Embalse)	59	1/10/1959	17/12/2018	Nivel de embalse y caudal de salida
Alcora (Embalse)	56	1/10/1959	30/09/2015	Nivel de embalse y caudal de salida
Vall d'Alba	15	13/05/2004	17/12/2018	-
Monleon	14	1/11/2005	20/12/2018	-

Además, para una mejor comprensión de la relación entre caudales diarios e instantáneos, se obtuvo información subdiaria (cincominutal) en el embalse de M^a Cristina para el evento de octubre del 2000 así como de los registros disponibles en los ríos cercanos, concretamente los ríos Matarraña, Pena y Bergantes

Información histórica y paleocrecidas

La información histórica y de paleocrecidas utilizada en este estudio para la validación de la metodología fue obtenida del estudio llevado a cabo por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y puede ser consultado en Machado et al. (2017). Este estudio establece una cronología de las grandes inundaciones ocurridas en la Rambla de la Viuda desde 1406 basada en el análisis de los patrones seculares de inundación (magnitud y frecuencia) a partir evidencias sedimentarias contrastadas con datos documentales (documentos escritos históricos).

Los lugares en los que se dispone de esta información, que puede observarse en la Figura 2, se localizan en dos puntos del área de estudio: en el río Monleon cercano a la confluencia con la Rambla Carbonera; y en la Rambla de la Viuda justo aguas arriba de la confluencia con el río Lucena.

**Figura 2** | Red de pluviómetros, aforos y puntos con información histórica y paleocrecidas.

Generador meteorológico

Como se propone en el apartado de la metodología, se llevó a cabo una revisión del estado del arte de los generadores meteorológicos diarios existentes. Atendiendo a la comparación llevada a cabo por Mehan et al. (2017), entre todos los generadores

comparados se decidió escoger el generador MulGETS (Chen et al., 2014) debido a su fácil manejo y por haber obtenido buenos resultados en otras cuencas de características similares. Además, se decidió incorporar en el estudio el generador GWEX (Evin et al., 2018) ya que éste trata de abordar el problema de la subestimación de extremos mediante el ajuste de una función de distribución de cola pesada (E-GPD), el cálculo de uno de sus parámetros mediante un estudio regionalizado más robusto y mediante la generación de la precipitación agregada en periodos de tres días, lo que encajaba perfectamente con el tipo de precipitaciones que afectan nuestra área de estudio. Se realizaron varias comprobaciones (Figura 3) y se verificó que, efectivamente, el generador GWEX reproducía mejor las precipitaciones que el generador MulGETS en nuestra área de estudio, por tanto, fue el modelo elegido para proseguir el estudio.

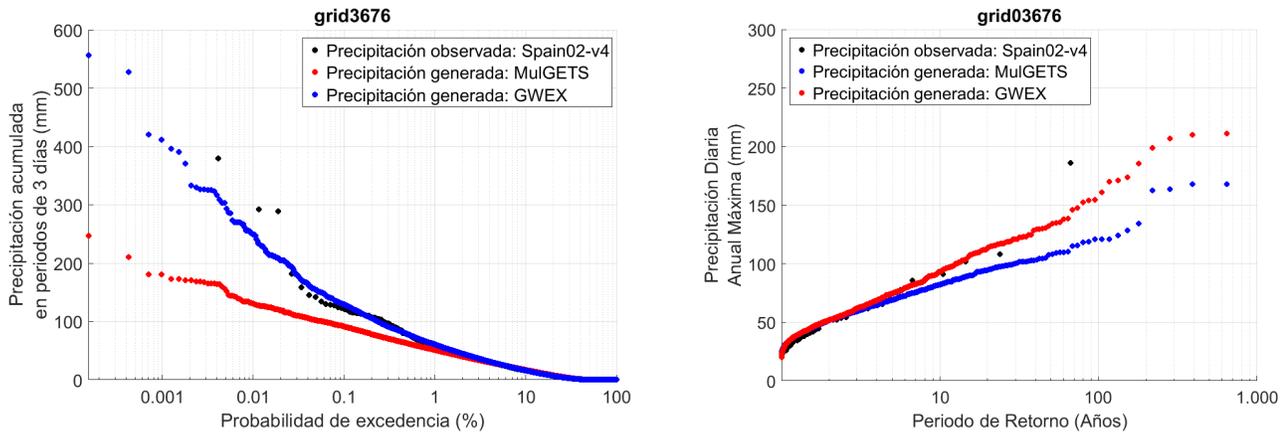


Figura 3 | Probabilidad de excedencia de las precipitaciones diarias máximas anuales acumuladas en 3 días (izquierda) y *plotting positions* de las precipitaciones diarias máximas anuales (derecha) en el punto de la rejilla de Spain02_v4 “grid3676” con los datos de Spain02_v4 y con los 1000 años generados con MulGETS y con GWEX.

Una vez seleccionado el generador meteorológico, se procedió a su calibración. Los parámetros relativos a la probabilidad de ocurrencia y a la dependencia tanto temporal como espacial fueron estimados de los 37 años de precipitación observada. En cuanto a la cantidad de precipitación, se distinguieron dos poblaciones de precipitación: las precipitaciones ordinarias; y las precipitaciones intensas fruto de los sistemas convectivos mesoescalares durante los meses de septiembre, octubre y noviembre. Dos de los tres parámetros de sus funciones de distribución marginales E-GPD (parámetro de escala y de la transformación) fueron primeramente estimados con las observaciones para ambas poblaciones. El tercer parámetro (parámetro de forma ξ), el cual tiene influencia directa en los valores de precipitación asociados a periodos de retorno altos, fue estimado con la población de precipitaciones intensas por el método de prueba y error, comparando las series de 1000 años generadas con los cuantiles de precipitación del estudio regional actualizado de máximas lluvias diarias, mejorando notablemente el ajuste (Figura 4).

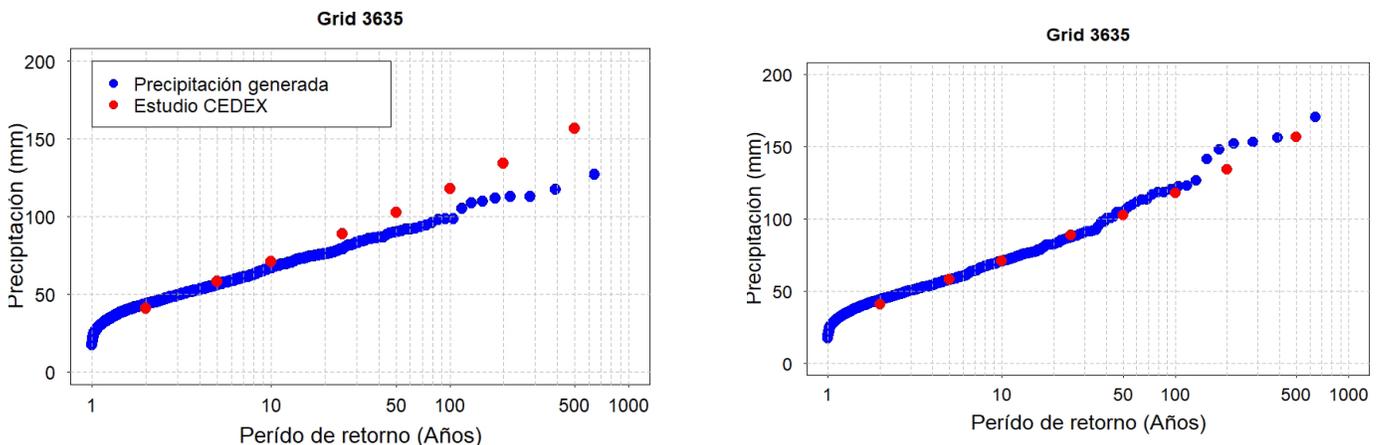


Figura 4 | *Plotting positions* de la precipitación diaria máxima anual generada y valores de los cuantiles de precipitación del estudio de máximas lluvias diarias actualizado en el “grid3635” antes del ajuste ($\xi=0.05$ por defecto)(izquierda) y una vez ajustado ($\xi=0.22$)(derecha).

Modelo hidrológico

El modelo hidrológico utilizado en este estudio fue el modelo ecohidrológico TETIS (Francés et al., 2007) que ha sido desarrollado por el Grupo de Investigación de Hidrología y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València. Es un modelo distribuido en el espacio con una estructura conceptual de tanques que simula los componentes principales del ciclo hidrológico (incluyendo un submodelo para sedimentos, vegetación y nitrógeno) donde los parámetros son físicamente basados. Además, este modelo incorpora una estructura efectiva de parámetros, lo que quiere decir que únicamente hay que calibrar nueve factores correctores que multiplican al conjunto de celdas de cada mapa, lo que lo convierte en un modelo parsimonioso. La utilización de este modelo ha obtenido resultados satisfactorios en muchos estudios para diferentes climas y escenarios como en (Vašková et al., 2004; Vélez et al., 2007; Cowperrwait et al., 2013).

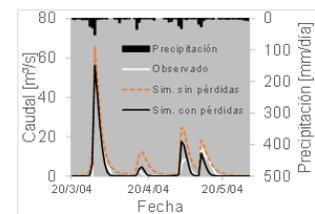
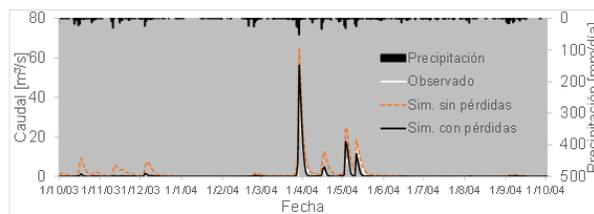
La implementación del modelo TETIS se realizó a escala diaria basándose en la implementación realizada en trabajos anteriores por Montalvo y Francés (2017). Se utilizaron los pluviómetros de Spain02 v4 y los registros de caudal en Vall d'Alba y a la entrada del embalse de M^a Cristina, estos últimos a través del análisis del balance en el embalse. La evapotranspiración de referencia se calculó utilizando la fórmula de Hargreaves y Samani (1985).

En una primera implementación, se pudo observar que el máximo caudal se daba un día después de producidos los eventos de precipitación máxima, sin embargo, el área de la cuenca, no era lo suficientemente grande para que su tiempo de concentración fuese de un día. Analizando los posibles motivos se llegó a la conclusión de que esto se debía a los diferentes intervalos de agregación de la precipitación y caudal, la primera agregada de 07:00 a 07:00 mientras que la serie de caudales agregada de 0:00 a 0:00. Por tanto, se decidió desfazar la serie de caudales un día para la calibración del modelo.

Además, observando el hidrograma simulado a la entrada del embalse de M^a. Cristina en el periodo 2003-2004 (calibración) tras la corrección del desfase temporal, se pudo apreciar que el mismo presentaba escorrentía en partes del periodo (octubre 2003 – enero 2004) que el hidrograma observado no mostraba a pesar de que existían lluvias registradas, siendo un claro indicio de la existencia de pérdidas en la cuenca, probablemente debidas a la alta karstificación de la parte alta de la cuenca. Se analizaron los tramos del cauce que discurrían por zona kárstica y se cuantificaron las pérdidas medias. Finalmente, éstas se incluyeron en el modelo a través de caudales extraídos al final de cada uno de estos tramos. Los resultados finales de la implementación del modelo hidrológico pueden observarse en la figura 5

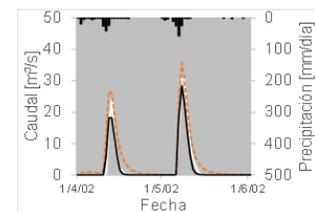
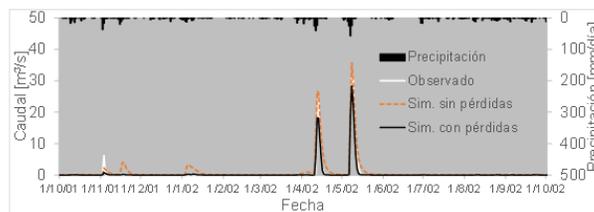
Calibración:

M. Cristina (2003-2004)
EF₂ = 0.930



Validación temporal:

M. Cristina (2000-2001)
EF₂ = 0.928



Validación espacial:

Vall d'Alba (2003-2004)
EF₂ = 0.428

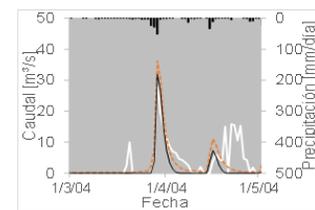
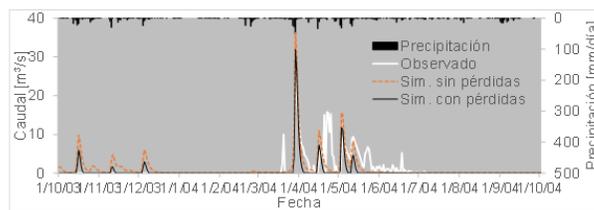


Figura 5 | Resultados de la implementación del modelo hidrológico (Montalvo y Francés, 2017)

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Los resultados de la metodología propuesta aplicada en la cuenca de la Rambla de la Viuda pueden observarse en la figura 6 y figura 7. Estas gráficas presentan los *plotting positions* de los caudales anuales máximos obtenidos mediante la expresión de Cunnane (1978). En función de la comparación que se lleve a cabo, estos caudales pueden ser; diarios, obtenidos directamente del modelo hidrológico; o instantáneos, obtenidos mediante la fórmula de Fuller (1914). En este último caso, se partió de los parámetros estimados en el estudio del CEDEX (2011) para la cuenca del río Júcar, calibrándose uno de sus parámetros para una mejor representación de la cuenca de estudio ($a=82.86$, $b=0.51$). En la Figura 6 se comparan los caudales diarios máximos anuales generados con TETIS a partir de las lluvias simuladas con GWEX con los observados (SAIH) a la entrada del embalse de María Cristina, en el aforo de Vall d'Alba y en el aforo de Monleon. Como se comentó en el apartado de la metodología, esta comparación se realizó para verificar que los caudales asociados con la parte inferior de la función de distribución eran reproducidos adecuadamente.

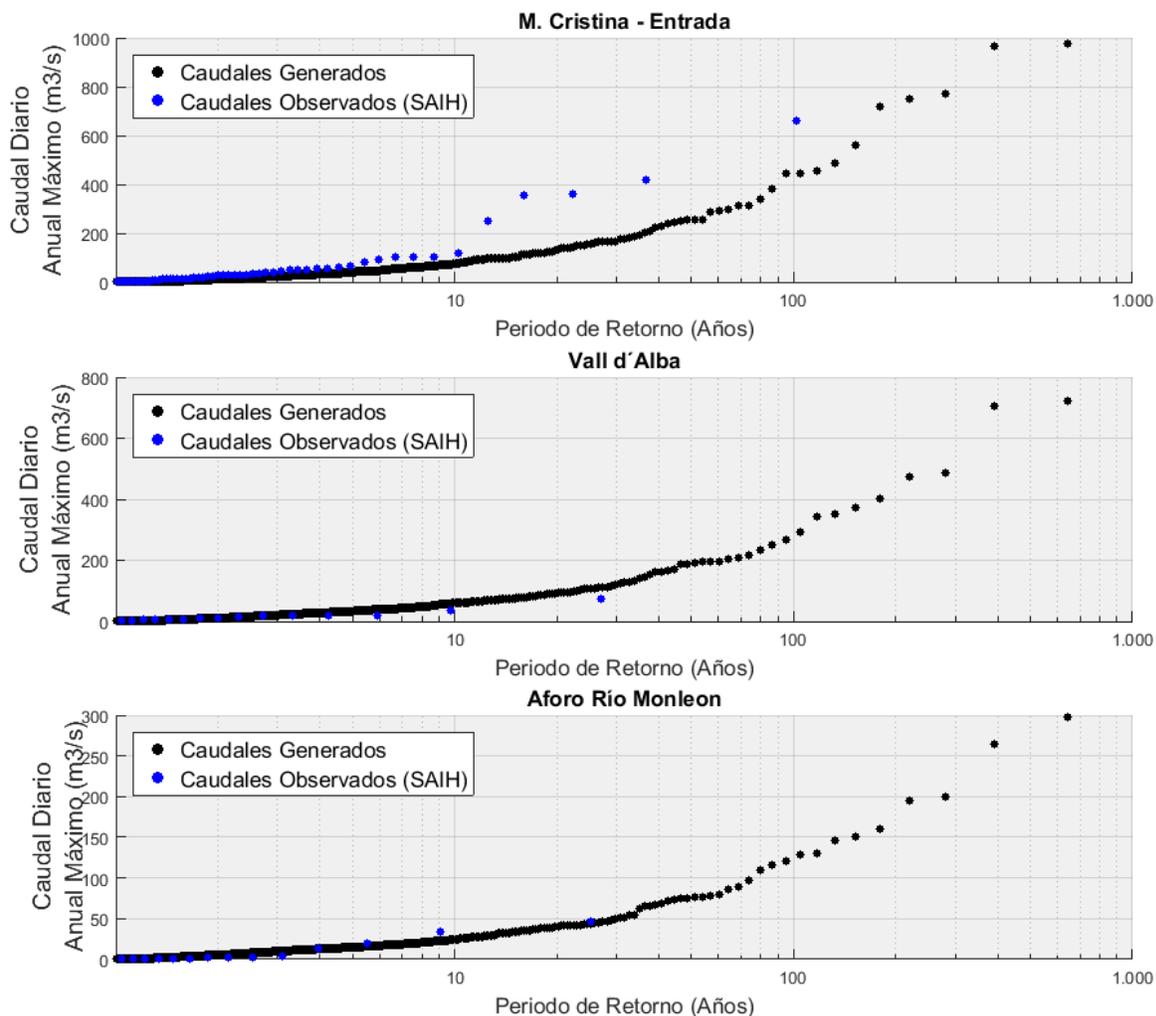


Figura 6 | *Plotting positions* de los caudales diarios máximos anuales generados (GWEX + TETIS) y observados (SAIH).

Como se puede apreciar en la figura 6, los caudales diarios generados se ajustaron bastante bien en el caso de los aforos de Vall d'Alba y Monleon, sin embargo, en el caso de los caudales simulados a la entrada del embalse de María Cristina, a partir del cuantil de 10 años, éstos fueron claramente subestimados. Después de estudiar los posibles motivos de estas diferencias se llegó a la conclusión de que éstas podían ser causadas por la escasa longitud de la serie de caudales observados y, por tanto, su posible no

representatividad estadística. En cualquier caso, no es el objetivo principal de la presente metodología la perfecta estimación de los caudales asociados a estos cuantiles sino aquellos asociados con periodos de retorno altos.

En cuanto a la validación de la parte alta de la función de distribución, los caudales generados fueron comparados con la información histórica y de paleocrecidas del estudio de Machado et al. (2017). Esta información de paleocrecidas muestra que tanto en el río Monleón como en la Rambla de la Viuda, los mayores caudales de los últimos 500 años se registraron en la inundación de 1883, con un caudal estimado de $970 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $1830 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente.

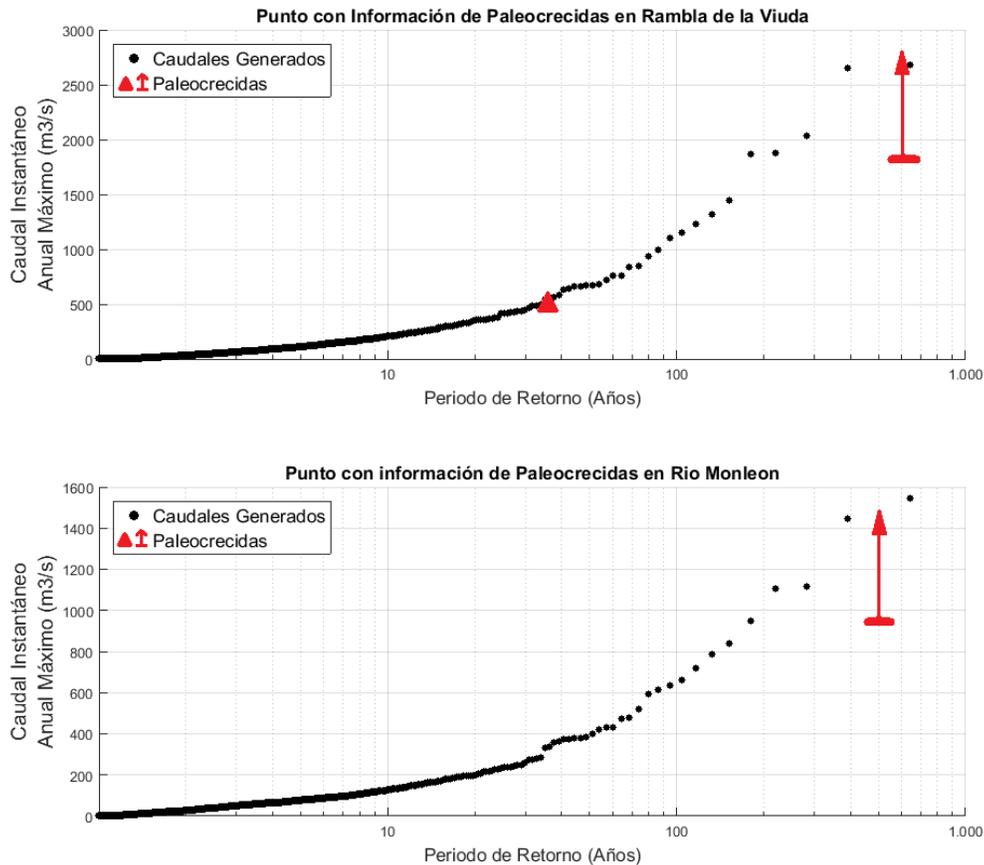


Figura 7 | Plotting positions de los caudales instantáneos generados (GWEX + TETIS) y los cuantiles obtenidos a partir de la información histórica y de paleocrecidas.

Como se puede apreciar en la figura 7, estos caudales validaron para ambas ubicaciones con información histórica y de paleocrecidas, demostrándose así que la metodología fue implementada de una forma satisfactoria.

Así pues, en este trabajo se ha presentado una metodología para la estimación de los cuantiles asociados a periodos de retorno altos mediante la generación de series sintéticas de precipitación con generadores meteorológicos estocásticos, incrementando, además, la información utilizada en la estimación mediante la incorporación de información no sistemática. Los resultados obtenidos en el caso de estudio presentado demuestran que es una metodología válida. El uso de un generador meteorológico capaz de simular series continuas de precipitación en estudios de frecuencia de avenidas presenta una clara mejora frente al uso de tormentas aisladas, resolviendo el problema de la caracterización de las condiciones iniciales de la cuenca. Además, la integración de información de estudios regionales para la calibración del generador ha demostrado ser clave para el correcto desempeño del mismo, especialmente para aquellas precipitaciones asociadas con periodos de retorno altos. Por último, la información adicional de la parte alta de la función de distribución que aporta el uso de información histórica y de paleocrecidas resulta imprescindible para una correcta validación de la metodología.

Entre las posibles líneas de investigación futuras se encuentra la implementación de un modelo hidrológico a escala subdiaria para tratar de obtener un mejor conocimiento de la relación Q_d/Q_i , la validación de la metodología mediante la implementación de la misma en otras áreas de estudio o la exploración de diversos métodos para estimar la incertidumbre asociada los cuantiles más altos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha estado financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto de investigación TETISCHANGE (RTI2018-093717-B-100), y por el proyecto EPHIMED (CGL2017-86839-C3-1-R) (co-financiado con fondos Europeos FEDER).

REFERENCIAS

- Ballesteros-Cánovas, J.A., Sanchez-Silva, M., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A. 2013. An Integrated Approach to Flood Risk Management: A Case Study of Navaluenga (Central Spain). *Water Resources Management*, 27, 3051-3069.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., Bobée, B. 2004. Use of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods. *Natural Hazards*, 31, 623-643.
- Blazkova, S., Beven, K. 2004. Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 292, 153-172.
- Brocca, L., Liersch, S., Melone, F., Moramarco, T., Volk, M. 2013. Application of a model-based rainfall-runoff database as efficient tool for flood risk management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3159-3169.
- Burton, A., Kilsby, C.G., Fowler, H.J., Cowpertwait, P.S.P., O'Connell, P.E. 2008. RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environmental Modelling and Software*, 23, 1356-1369. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.04.003>
- Camarasa Belmonte, A.M., Segura Beltrán, F. 2001. Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *Catena*, 45, 229-249. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00146-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00146-1)
- Candela, A., Brigandì, G., Aronica, G.T. 2014. Estimation of synthetic flood design hydrographs using a distributed rainfall-runoff model coupled with a copula-based single storm rainfall generator. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1819-1833. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1819-2014>
- Caron, A., Leconte, R., Brissette, F. 2009. An Improved Stochastic Weather Generator for Hydrological Impact Studies. *Canadian Water Resources Journal*, 33, 233-256. <https://doi.org/10.4296/cwrj3303233>
- Cavanaugh, N.R., Gershunov, A., Panorska, A.K., Kozubowski, T.J. 2015. On the Probability Distribution of Daily Precipitation Extremes. *Geophysical Research Letters*, 42, 1560-1567.
- CEDEX, 2011. Mapa de Caudales Máximos. Memoria Técnica. Madrid (España).
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R. 2010. A daily stochastic weather generator for preserving low-frequency of climate variability. *Journal of Hydrology*, 388, 480-490. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.032>
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R. 2012. WeaGETS – a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. *Procedia Environmental Sciences* 13, 2222-2235. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.211>
- Chen, J., Brissette, F., Zhang, X.J. 2014. Multi-Site Stochastic Weather Generator for Daily Precipitation and Temperature. *Transactions of the ASABE*, 57, 1375-1391. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10685>

- Chen, B., Krajewski, W.F., Liu, F., Fang, W., Xu, Z. 2017. Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow. *Hydrology Research*, 48, 1474-1488. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.200>
- Cowpertwait, P., Ocio, D., Collazos, G., De Cos, O., Stocker, C. 2013. Regionalised spatiotemporal rainfall and temperature models for flood studies in the Basque Country, Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 479-494. <https://doi.org/10.5194/hess-17-479-2013>
- Cowpertwait, P.S.P., O'Connell, P.E., Metcalfe, A. V., Mawdsley, J.A. 1996. Stochastic point process modelling of rainfall. II. Regionalisation and disaggregation. *Journal of Hydrology*, 175, 47-65. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80005-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80005-9)
- Cunnane, C. 1978. Unbiased plotting positions—a review. *Journal of Hydrology*, 37, 205-222. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90017-3)
- de Andrés Conde, C., González Vallvé, J.L., Centeno Gutiérrez, S. 2019. Los sistemas automáticos de información hidrológica (SAIH) una innovación que se exporta. *Revista Digital del Cedex*, 101-106.
- Devia, G.K., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S. 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- England, J.F., Godaire, J.E., Klinger, R.E., Bauer, T.R., Julien, P.Y. 2010. Paleohydrologic bounds and extreme flood frequency of the Upper Arkansas River, Colorado, USA. *Geomorphology*, 124, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.021>
- England, J.F., Julien, P.Y., Velleux, M.L. 2014. Physically-based extreme flood frequency with stochastic storm transposition and paleoflood data on large watersheds. *Journal of Hydrology*, 510, 228-245. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.021>
- Evin, G., Favre, A.C., Hingray, B. 2018. Stochastic generation of multi-site daily precipitation focusing on extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 655-672. <https://doi.org/10.5194/hess-22-655-2018>
- Fathzadeh, A., Jaydari, A., Taghizadeh-Mehrzardi, R. 2017. Comparison of different methods for reconstruction of instantaneous peak flow data. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 23, 41-49. <https://doi.org/10.1080/10798587.2015.1120991>
- Faticchi, S., Ivanov, V.Y., Caporali, E. 2011. Simulation of future climate scenarios with a weather generator. *Advances in Water Resources*, 34, 448-467. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.013>
- Flores-Montoya, I., Sordo-Ward, Á., Mediero, L., Garrote, L. 2016. Fully stochastic distributed methodology for multivariate flood frequency analysis. *Water (Switzerland)*, 8.
- Foufoula-Georgiou, E. 1989. A probabilistic storm transposition approach for estimating exceedance probabilities of extreme precipitation depths. *Water Resources Research*, 25, 799-815. <https://doi.org/10.1029/WR025i005p00799>
- Francés, F. 1998. Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12, 267-283. <https://doi.org/10.1007/s004770050021>
- Francés, F., Salas, J.D., Boes, D.C. 1994. Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models. *Water Resources Research*, 30, 1653-1664. <https://doi.org/10.1029/94WR00154>
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J. 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332, 226-240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Fuller, W. 1914. Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 77, 564-617.
- Furrer, E.M., Katz, R.W. 2008. Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators. *Water Resources Research*, 44, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2008WR007316>
- Haberlandt, U., Hundecha, Y., Pahlow, M., Schumann, A.H. 2011. Rainfall Generators for Application in Flood Studies. En: Schumann, A.H. (Ed.), *Flood Risk Assessment and Management: How to Specify Hydrological Loads, Their Consequences and Uncertainties*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 117-147. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9917-4_7

- Hargreaves, G., Samani, Z. 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1, 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. 2016. Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, 36, 900-908. <https://doi.org/10.1002/joc.4391>
- Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Pulido-Velazquez, D., Cecilia, J. 2017. Estimation of Instantaneous Peak Flow Using Machine-Learning Models and Empirical Formula in Peninsular Spain. *Water*, 9, 347. <https://doi.org/10.3390/w9050347>
- Kay, A.L., Reynard, N.S., Jones, R.G. 2006. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. *Journal of Hydrology*, 318, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.012>
- Khalili, M., Brissette, F., Leconte, R. 2011. Effectiveness of Multi-Site Weather Generator for Hydrological Modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, 47, 303-314. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00514.x>
- Lam, D., Thompson, C., Croke, J., Sharma, A., Macklin, M. 2017. Reducing uncertainty with flood frequency analysis: The contribution of paleoflood and historical flood information. *Water Resources Research*, 53, 2312-2327. <https://doi.org/10.1002/2016WR019959>
- Linsley, R., Kohler, M., Paulhus, J.L. 1968. Applied hydrology. *Journal of Hydrology*, 6, 224-225. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(68\)90169-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(68)90169-8)
- Machado, M.J., Medialdea, A., Calle, M., Rico, M.T., Sánchez-Moya, Y., Sopena, A., Benito, G. 2017. Historical palaeohydrology and landscape resilience of a Mediterranean rambla (Castellón, NE Spain): Floods and people. *Quaternary Science Reviews*, 171, 182-198. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.07.014>
- Mateu, J.F. 1974. La Rambla de la Viuda. Clima e Hidrología. *Cuadernos de Geografía*.
- Mckague, K., Rudra, R., Ogilvie, J. 2003. CLIMGEN - a convenient weather generation tool for canadian climate stations 26.
- Mehan, S., Guo, T., Gitau, M., Flanagan, D.C. 2017. Comparative Study of Different Stochastic Weather Generators for Long-Term Climate Data Simulation. *Climate*, 5, 26. <https://doi.org/10.3390/cli5020026>
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 1999. Máximas lluvias diarias en España Peninsular, Serie monográfica.
- Montalvo, C., Francés, F. 2017. Análisis integral del impacto del Cambio Climático en los regímenes de agua, crecidas y sedimentos de una rambla mediterránea. *Ingeniería del agua*, 21, 263-272. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.8775>
- Montes, J., Álvarez, M., Pertierra, L., Moralo, J., Baztán, J. 2018. Análisis regional de frecuencia de avenidas en la vertiente cantábrica y noratlántica de España. *Ingeniería del agua*, 22, 93-107. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8782>
- Nicks, A.D., Gander, L.J. 1995. Weather generator. En: In *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. West Lafayette.
- Nicks, A.D., Williams, R.D., Gander, G.A. 1994. Estimating the impacts of global change on erosion with stochastically generated climate data and erosion models.
- Racsko, P., Szeidl, L., Semenov, M. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57, 27-41. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90053-4)
- Richardson, C.W. 1981. Stochastic modelling of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research*, 17, 182-190. <https://doi.org/10.1029/WR017i001p00182>
- Richardson, C.W., Wright, D.A. 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. *U.S. Department of Agriculture Research and Service, ARS*, 8, 235.

- Sangal, B.P. 1983. Practical Method of Estimating Peak Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109, 549-563. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:4\(549\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:4(549))
- Semenov, M. 2002. LARS-WG: A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Manual: Hertfordshire, ...* 28.
- Semenov, M.A., Barrow, E.M. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35, 397-414. <https://doi.org/10.1023/A:1005342632279>
- Singh, V.P., Strupczewski, W.G. 2002. On the status of flood frequency analysis. *Hydrological Processes*, 16, 3737-3740. <https://doi.org/10.1002/hyp.5083>
- Sordo-Ward, A., Garrote, L., Bejarano, M.D., Castillo, L.G. 2013. Extreme flood abatement in large dams with gate-controlled spillways. *Journal of Hydrology*, 498, 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.010>
- Stöckle, C.O., Campbell, G.S., Nelson, R. 1999. *Climgen Manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Taguas, E.V., Ayuso, J.L., Pena, A., Yuan, Y., Sanchez, M.C., Giraldez, J.V., Pérez, R. 2008. Testing the relationship between instantaneous peak flow and mean daily flow in a Mediterranean Area Southeast Spain. *CATENA*, 75, 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.04.015>
- Taylor, R.H., Wilson, P.R. 1990. Recent increase and southern expansion of Adelie Penguin populations in the Ross Sea, Antarctica, related to climatic warming. *New Zealand Journal of Ecology*, 14, 25-29.
- Tucci, C., Silva, E. 2016. Relação entre vazões máximas diária e instantânea. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3, 133-151. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v3n1.p133-151>
- Vašková, I., Francés, F., Vélez, J.J. 2004. Empleo de la modelación distribuida en el estudio de los recursos hídricos del País Vasco. En: 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Da Foz, Portugal.
- Vélez, J.J., López Unzu, F., Puricelli, M., Francés, F. 2007. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4, 909-956. <https://doi.org/10.5194/hessd-4-909-2007>
- Verdin, A., Rajagopalan, B., Kleiber, W., Katz, R.W. 2015. Coupled stochastic weather generation using spatial and generalized linear models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 347-356. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0911-6>
- Wallis, J.R., Heights, Y. 1986. The Value of Historical Data in Flood Frequency Analysis. *Water Resources Research*, 22, 1606-1612. <https://doi.org/10.1029/WR022i011p01606>
- Wilks, D.S., Wilby, R.L. 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23, 329-357. <https://doi.org/10.1191/030913399666525256>
- Wilson, L.L., Foufoula-Georgiou, E. 2007. Regional Rainfall Frequency Analysis via Stochastic Storm Transposition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116, 859-880. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:7\(859\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:7(859))