

Comunicación Técnica

Análisis de riesgo por inundación y sequía en una cuenca del Sur de Europa

Autor principal: M^a José Polo Gómez

Institución: Departamento de Hidrología e Hidráulica Agrícola, Universidad de Córdoba
Teléfono: 958 24 10 00 (ext. 31163)
E-mail: yelharchi@ugr.es

Otros autores: Losada, M.A., Losada, R. y Vega, C.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Directiva Marco del Agua es la norma reguladora en la UE de la gestión del recurso agua orientada a materializar desarrollos socioeconómico y ambiental simultáneos y compatibles. En este sentido, el artículo 1 de la Directiva 2000/60/CE, Directiva Marco de Aguas (DMA) en la Unión Europea, establece que el objeto de la misma es crear un marco de protección de las aguas “que

- a) *prevenga todo deterioro adicional y proteja y mejore el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos;*
- b) *promueva un uso sostenible del agua basado en la protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles;*
- c) *tenga por objeto una mayor protección y mejora del medio acuático, entre otras formas mediante medidas específicas de reducción progresiva de los vertidos, las emisiones y las pérdidas de sustancias prioritarias, y mediante la interrupción o la supresión gradual de los vertidos, las emisiones y las pérdidas de sustancias peligrosas prioritarias;*
- d) *garantice la reducción progresiva de la contaminación del agua subterránea y evite nuevas contaminaciones; y*
- e) *contribuya a paliar los efectos de las inundaciones y sequías, y que contribuya de esta forma a:*
 - *garantizar el suministro suficiente de agua superficial o subterránea en buen estado, tal como requiere un uso del agua sostenible, equilibrado y equitativo;*
 - *reducir de forma significativa la contaminación de las aguas subterráneas;*
 - *proteger las aguas territoriales y marinas; y....”*

A su estela, se están redactando nuevas Directivas, entre ellas una dedicada a evaluar los riesgos por inundación motivada, inicialmente, por las inundaciones sufridas en Europa central durante los últimos años (CCE, 2006). En su borrador, la utilización del término riesgo no se ajusta a la definición clásica (ver p.e., Gouldy y Samuels, 2005), por lo que los mapas denominados de riesgo por inundación son de hecho mapas de niveles de inundación. Si bien estos mapas son estrictamente necesarios, éstos no son los que se deben aplicar en la ordenación y planificación del territorio a corto, medio y largo plazo.

Por otra parte, en España, a diferencia de los países del norte de Europa, la inundación no se puede desvincular de la sequía y de la gestión del recurso. Para planificar esta gestión en un horizonte temporal determinado, se requieren herramientas que permitan pronosticar la secuencia de años meteorológicos y, apoyadas en modelos de cuenca adecuados a la escala espacial del estudio, simular la respuesta hidrológica del sistema, sus valores de exceso y déficit y sus valores extremos.

Este matiz es consustancial a las regiones mediterráneas, donde la no ocurrencia de lluvia es un suceso habitual a diferentes escalas temporales: años con precipitación nula durante todo el periodo estival (estación seca), años con precipitación anual muy inferior al valor medio (años secos), grupos de años secos sucesivos (sequía). Cuando esta sequía coincide con una demanda de agua superior a la precipitación recibida, se produce la escasez. Puesto que las estructuras de almacenamiento de agua (los embalses) que garantizan la no escasez, es decir, el suministro continuo de la demanda, son las mismas que garantizan el control de avenidas cuando la precipitación se produce de manera intensa y/o prolongada, la gestión del agua debe incluir la gestión de sequías, integrando ambas funcionalidades del sistema.

El riesgo se define como el producto de la probabilidad de presentación del agente o causa por el daño que ocasiona. La probabilidad de ocurrencia se obtiene a partir de un modelo de probabilidad definido en un intervalo de tiempo y en un ámbito espacial. En el concepto daño se deben cuantificar tanto los materiales como los de reposición, oportunidad, etc.

Un atlas de riesgo en general tiene como objetivo obtener para una comarca, una cuenca o una región, la acotación distribuida en el espacio del riesgo por la presentación, en plazos de tiempo bien establecidos, de diferentes sucesos naturales o artificiales con el resultado de daños de diferente naturaleza, pérdida de vidas humanas, ambientales, socioeconómicos, históricos, del patrimonio, etc., p.ej. la inundación de las riberas de los ríos o del mar, un incendio, la rotura de una presa, etc.

Para realizar estas evaluaciones es conveniente considerar los diferentes ámbitos de influencia del agente y los daños, y dividir el territorio en tramos, que satisfagan las condiciones de estacionariedad y homogeneidad estadística. Es decir, las unidades territoriales y los intervalos de tiempo en los que el modelo de probabilidad sea representativo del conjunto muestral. Dado que el territorio cambia con el paso de los años, por la construcción de infraestructuras, modificación de usos, etc. es conveniente acotar el horizonte temporal del atlas de riesgo. A estos efectos se puede definir un atlas de riesgo a corto plazo, 5 años, a medio plazo, 25 años, y a largo plazo, 50 años.

De esta manera se obtiene una información que permite identificar de forma comparada, p.ej en el atlas de riesgo por inundación, los tramos potencialmente inundables, valorar aproximadamente el estado del territorio en esas condiciones y, en consecuencia, definir estrategias de ayuda y protección, para, finalmente, cuantificar de forma comparada las consecuencias del suceso inundación en toda la cuenca o en una comarca, o en una región. La incertidumbre de la información recogida en el atlas es creciente con el paso de los años.

Por último, cabe señalar la posibilidad de contemplar sucesos simultáneos que potencien los efectos de la inundación. En este sentido, los atlas de riesgo pueden ser de sucesos o modos de fallo individualizados, o de un grupo de ellos concurrentes. En este caso es necesario disponer de los modelos de probabilidad conjuntos de los sucesos considerados. Cuando los sucesos son independientes, p.ej terremoto e inundación, la probabilidad conjunta de excedencia es el producto de probabilidades de excedencia individuales, por lo que la obtención del atlas de riesgo conjunto es inmediata.

Este trabajo tiene como objetivo establecer una metodología para elaborar atlas de riesgo por inundación en una cuenca, que tenga en cuenta los puntos expuestos. Se ha dividido en dos partes: en la primera, se expone la metodología propuesta, tras efectuar la definición de una serie de conceptos previos y se describe la metodología propuesta, para proceder a la evaluación de las principales fuentes de incertidumbre en zonas mediterráneas. En la segunda, se describe un modelo de simulación climática para planificación hidrológica y se presentan los resultados obtenidos para la caracterización de la cuenca del río Guadalefeo al sur de la provincia de Granada.

ELABORACIÓN DE ATLAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN

1. Definiciones

Apoyados en la Directiva Marco del Agua y en otros documentos científicos, tecnológicos, legales y administrativos, para la realización de un atlas de riesgo se pueden adoptar las siguientes definiciones y conceptos:

Demarcación hidrográfica

La zona terrestre y marina compuesta por una o varias cuencas hidrográficas vecinas y las aguas de transición, subterráneas y costeras asociadas a dichas cuencas.

Son aguas de transición, las masas de agua superficial próximas a la desembocadura de los ríos que son parcialmente salinas como consecuencia de su proximidad a las aguas costeras, pero que reciben una notable influencia de flujos de agua dulce.

Son aguas costeras, las aguas superficiales situadas hacia tierra desde una línea cuya totalidad de puntos se encuentra a una distancia de una milla náutica mar adentro desde el punto más próximo a la línea de base que sirve para medir la anchura de las aguas territoriales y que se extiende, en su caso, hasta el límite exterior de las aguas de transición.

Cuenca hidrográfica

Cuenca hidrográfica: es la totalidad del área drenada por una red fluvial o sistema interconectado de cauces, principal y tributarios, tales que toda la escorrentía originada en tal área es descargada a través de una única salida.

Cuenca: es el área que contribuye a la escorrentía vertiente a un punto dado, que cierra una parte o todo de la corriente principal y sus tributarios.

Riesgo

Se define riesgo como el producto de la probabilidad de excedencia del suceso en un intervalo de tiempo dado, por el coste total de reposición y de las consecuencias directas e indirectas que el suceso ocasiona.

El intervalo de tiempo es la duración para la cual se realiza el análisis de riesgo, que, en general, en el caso de las infraestructuras hidráulicas es su vida útil. Por analogía con otros casos, se recomienda adoptar tres duraciones del intervalo de tiempo, $V = 5, 25 \text{ y } 50 \text{ años}$ (vida útil).

El riesgo se analiza sobre sucesos con consecuencias socioeconómicas y ambientales, que se materializan mediante modos de fallo en el intervalo de tiempo analizado. Estos modos pueden estar producidos por los agentes naturales o por las actividades socioeconómicas de uso y explotación de la ribera del río o mar, de la cuenca. En ambos casos las condiciones pueden ser presentarse durante el uso normal del territorio, en situaciones extremas o, en situaciones de excepcionalidad, tanto fortuitas como accidentales.

Con este planteamiento es posible distinguir tres situaciones o condiciones en las que pueden producirse sucesos que ocasionan daños en el territorio, en el entorno ambiental y en las personas:

Condiciones normales de uso del territorio.

Condiciones extremas relacionadas con la ocurrencia de fenómenos naturales extremos: inundación de riberas, deslizamiento de laderas, etc. o fenómenos asociados a la actividad humana extremos: incendios, etc.

Condiciones excepcionales relacionadas con hechos excepcionales: terremotos, maremotos, o hechos fortuitos o accidentales: rotura de una presa, rotura de una pila de puente, accidente nuclear, etc.

La probabilidad de ocurrencia o fallo por presentación (excedencia) de un suceso o conjunto de sucesos extremos de origen natural se determina a partir del régimen extremal del agente o agentes, que para el caso concreto de las riberas fluviales y llanuras de inundación es el régimen conjunto de avenidas y sus duraciones, y en el caso de las riberas litorales es el régimen conjunto de niveles del mar (incluyendo las mareas astronómica y meteorológica, y en su caso la avenida) y estados de oleaje.

El coste o afecciones por el suceso, debe incluir tanto el valor total de los daños ocasionados, como la restauración de las infraestructuras y el territorio, el cese y reposición de las actividades socioeconómicas, los daños ambientales, coste de oportunidad y otros costes relacionados con la damnificación de vidas humanas y sus atenciones sociales y sanitarias. En muchos casos no es posible evaluar este coste, pero se puede “cualificar” el territorio mediante un baremo o una matriz de daños. Esta matriz debe ser objeto de una rigurosa determinación y debe ser revisada anualmente para incluir los cambios sociales y de uso del territorio.

Tramos

Ámbito del medio físico con características y propiedades espacialmente uniformes en un sentido estadístico. Dependiendo del modo de fallo se puede tramificar el territorio por diferentes criterios, entre otros, (p.ej para un atlas de riesgo por inundación),

Tramo hidrográfico.

Se define por la uniformidad geológica y geomorfológica de las riberas y llanuras de inundación, morfodinámica del río, e infraestructuras existentes de convergencia, divergencia, acumulación y retención longitudinal y frontal.

Tramo hidrológico.

Se define por la magnitud de los caudales máximos y los tiempos de retención de los mismos, representados principalmente por el régimen de avenidas y sus duraciones.

Tramo socioeconómico y urbano.

Se define por el uso del suelo desde el punto de vista de las unidades industriales, agrícolas y urbanas, y su importancia en la economía local y regional y, en su caso, nacional o global.

Tramo ambiental y patrimonial.

Se define por la singularidad ambiental de sus unidades, tanto si está recogida en la legislación vigente como si a resultas de este u otros estudios se prevé su catalogación como espacio natural a proteger, o cumple funciones de unidad ambiental significativa. Análogamente, se puede incluir en este tramo o definir uno independiente en el que se

incluyan las singularidades del patrimonio cultural e histórico de especial relevancia que merecen especial protección.

Tramos en el estudio del riesgo de inundación:

Se definen por la intersección de los tramos hidrográfico-hidrológico con los socioeconómicos y urbanos y con los ambientales-patrimoniales, definiendo las correspondientes unidades de caracterización combinada.

Atlas de riesgo

La información calculada del riesgo por tramos se puede representar espacialmente, configurando un atlas de riesgo para los diferentes modos de fallo. Las isolíneas de riesgo representan las zonas del territorio, que tienen el mismo riesgo frente al agente o agentes estudiados, p.ej. inundación. Este atlas puede confeccionarse para diversos años horizonte (o vida útil), p.ej. 5, 25 ó 50 años.

Gestión integral de la cuenca basada en análisis de riesgos

El objetivo de la gestión integral de una cuenca es establecer estrategias de uso y explotación de la misma a corto, medio, y largo plazo, optimizando los recursos hídricos desde el punto de vista socioeconómico y ambiental bajo restricciones locales y regionales en los ámbitos político, económico, social y ambiental, con repercusiones en la ordenación territorial. El atlas de riesgo es un complemento y una ayuda en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca.

2. Bases de cálculo y método de trabajo

El método de trabajo para la realización del atlas del riesgo (por ejemplo por inundación) consiste en: (1) definir los ámbitos hidrográfico, hidrológico, socioeconómico y ambiental-patrimonial de la cuenca, (2) definir sus tramos, (3) seleccionar un modelo para el cálculo del riesgo en un intervalo de tiempo que incluya los aspectos 4 y 5, (4) valorar la probabilidad de ocurrencia de inundación y (5) cuantificar sus consecuencias.

Organización espacial y tramos

Es recomendable considerar en cuencas hidrográficas al menos tres espacios geográficos diferenciados: montaña, vega y, en su caso, litoral.

El primero de ellos se caracteriza, en general, por torrenteras, tramos de fuerte pendiente y escasa actividad socioeconómica. El segundo se caracteriza por tener amplias llanuras de inundación con importante implantación de núcleos urbanos y otras actividades humanas, tales como asentamientos poblacionales e industriales y uso agrícola. El litoral se corresponde con la zona de interacción hidráulica de las dinámicas marina y fluvial, con existencia de marismas y uso intensivo de la franja litoral y amplia edificabilidad.

En cada uno de estos espacios se deben definir los correspondientes tramos. La complejidad del cálculo del riesgo es creciente en el sentido “montaña – litoral”.

Modelo de valoración del riesgo (ejemplo por inundación)

Por la variabilidad hidrológica espacial de la cuenca y por la variabilidad socioeconómica y ambiental-patrimonial, el atlas del riesgo por inundación debe representar el riesgo en la intersección de los tramos hidrológicos (término de probabilidad de ocurrencia) y de los tramos socioeconómicos y ambientales-patrimoniales (término de coste total).

RIESGO del tramo = $P_f * \text{Coste Total}$

Donde, P_f , es la probabilidad de fallo en V años que se puede calcular por

$$P_f = 1 - (1-p)^V; p = 1/T_R$$

Donde p, probabilidad de excedencia o de ocurrencia del suceso (sea el suceso que el agente supere cierto valor umbral en un año cualquiera del intervalo V)

T_R = periodo de retorno

V, vida útil del sistema en el que se construye el atlas, 5, 25 o 50 años.

Modos de fallo y sucesos relacionados (ejemplo por inundación)

Considerando que el modo de fallo es la inundación, se define ésta por la excedencia de la lámina de agua por encima de un umbral topográfico especificado a priori que, en la mayoría de los casos, será una cota de la rasante del terreno. Además, en algunos tramos, al objeto de valorar los costes de inundación, es importante considerar la duración de la inundación definida como el tiempo durante el que el nivel de las aguas excede la cota umbral de forma continua.

En zonas industriales o urbanas el simple hecho de la inundación puede ser daño mayor, mientras que en otros tramos, por ejemplo un tramo ambiental de marisma o llanura de inundación, los daños se producen en función de la duración de la inundación así como de la intensidad de la corriente, independientemente de la cota. Los daños pueden provenir del arrastre de la vegetación, cobertura del terreno, etc.

En consecuencia en un atlas de riesgo por inundación en cada uno de los tramos, según sea significativo o no en la generación de daños, se deben contemplar las siguientes combinaciones de sucesos, relacionados con el modo de fallo inundación:

1. inundación, hc
2. inundación y duración, hc y τ
3. inundación y velocidad del agua, hc y u
4. inundación, duración y velocidad del agua, hc, τ y u

En general, para estos cálculos se aplicarán modelos numéricos debidamente contrastados que deben resolver los valores de las tres variables en cada uno de los tramos a lo largo del tiempo. Para ello es necesario especificar en cada tramo las condiciones iniciales y condiciones de contorno apropiadas, y los valores de los parámetros hidráulicos del terreno, etc. En algunas ocasiones es posible resolver los tramos individualmente, en otros es necesario resolver dos o más tramos conjuntamente, y en otros, el río completo. En estos cálculos los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden ser de amplia ayuda.

Probabilidad de ocurrencia (P_f). Método clásico y avanzado

En el cálculo de la probabilidad de fallo en la vida útil intervienen dos variables, p y V. V es la vida útil o año horizonte para el cual se construye el atlas de riesgo; p es la probabilidad de excedencia en un año obtenida a partir del régimen extremal del agente causante del suceso, en este caso la avenida. Esta probabilidad incluye tanto la intensidad o caudal como la duración del mismo, es por tanto una probabilidad conjunta. En ausencia de mejor información se puede adoptar la hipótesis de independencia

estadística de los años. La probabilidad p se puede aproximar de dos maneras, una simple y rápida, y otra compleja y lenta.

La primera consiste en analizar el régimen de descarga de los diferentes tramos del río para el estado de caudales máximos de la avenida obtenido a partir del régimen de avenidas. El resultado es el régimen de inundaciones en los diferentes tramos del río y la probabilidad de excedencia se corresponde con la de la avenida, es decir la del agente causante. Todos los parámetros hidráulicos del cálculo, condiciones iniciales y de contorno, se especifican mediante valores nominales. A partir de este cálculo se pueden obtener asimismo las velocidades máximas en cada punto del tramo. Este método se puede adscribir a los llamados métodos de Nivel I de verificación.

El método complejo supone analizar el ciclo completo de la avenida, es decir la evolución temporal de los estados de caudales, a partir de unas condiciones iniciales y con condiciones de contorno y parámetros hidráulicos que también evolucionan con el tiempo. El resultado de este cálculo es la evolución temporal en cada punto del tramo del nivel y de la velocidad del agua, a partir de los cuales se obtiene la duración de la excedencia de unos umbrales especificados. La probabilidad de que ocurra el fallo es la probabilidad de excedencia del conjunto de agentes y parámetros que intervienen en el cálculo, y su evaluación requiere la aplicación de técnicas avanzadas de simulación estadística, por ejemplo métodos de Nivel III (Monte Carlo). Este método tiene menos incertidumbre asociada a la fuente inicial de datos, puesto que incluye más información. La construcción de la muestra de partida requiere definir un umbral de excedencia del régimen de caudales a partir del cual es posible que se produzcan daños por inundación en alguno de los tramos de la cuenca.

Este método complejo es el aconsejable para las riberas litorales y zonas urbanas e industriales o zonas de especial relevancia ambiental-patrimonial. El método rápido es adecuado para los tramos del río sin obstáculos y sin zonas urbanas o industriales en general, relacionado con la montaña.

Hipótesis y limitaciones del cálculo de Pf

La ecuación de riesgo se fundamenta en la hipótesis de independencia estadística de los sucesos máximos en cada año meteorológico (sucesos de Bernoulli) y en la hipótesis de independencia espacial de los tramos, que constituyen un conjunto completo y exhaustivo del medio físico, socioeconómico, hidrológico y ambiental-patrimonial, y temporal.

Ninguna de estas condiciones se satisface plenamente; no obstante, de esta manera se obtiene una información que permite identificar de forma comparada los tramos potencialmente inundables, valorar aproximadamente el estado del territorio en esas condiciones y, en consecuencia, definir estrategias de ayuda y protección, y finalmente cuantificar de forma comparada y en valor monetario o en otras formas de valoración, las consecuencias del suceso inundación.

Condicionantes de los costes totales debidas a la inundación

La valoración del riesgo en los años horizonte de 5, 25 y 50 años requiere establecer estrategias de uso del territorio y de construcción de infraestructuras y cuantificar, en ese intervalo de tiempo, los costes totales debidos al suceso analizado, p.ej. inundación, entendiendo por tales los costes de primera instalación de infraestructuras, costes de conservación, reparación y restauración, costes por cese de actividades y lucro cesante, costes de oportunidad y por alarma social. Todos estos costes son difícilmente

evaluables y más sin tener definida la estrategia de ordenación territorial. En los casos en los que el valor monetario no sea suficiente, se recomienda establecer indicadores que definen comparativamente las consecuencias de la avenida. Estos indicadores deben ser objeto de una rigurosa definición y determinación. Hay experiencia y conocimiento amplio sobre el que se puede cimentar la elaboración para una cuenca, una comarca o Andalucía, de una matriz comparativa de consecuencias.

Evolución espacio-temporal del riesgo

En consecuencia un atlas del riesgo (por ejemplo por inundación) se calcula suponiendo que no se construyen nuevas obras de infraestructura más que las previstas y que el desarrollo territorial sigue las pautas de crecimiento de los últimos años. En este contexto, este atlas representa “la foto Cero” en el caso de hacer sólo lo previsto para el año horizonte considerado, 5, 25 ó 50 años. Cualquier cambio de estrategia de ordenación territorial y de construcción de nuevas infraestructuras debe llevar asociada una revisión del atlas de riesgo que, comparado con el anterior, permite cuantificar la bondad socioeconómica y ambiental de dicha estrategia frente a los sucesos de inundación. De esta forma el atlas se convierte en una herramienta para la optimización del desarrollo regional y de ayuda para la gestión integral de los recursos hídricos de la cuenca o cuencas.

Incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre en el cálculo de riesgos son varias: origen de los datos, modelos estadísticos, modelos de cálculo y la naturaleza aleatoria de los fenómenos naturales.

Para reducir la incertidumbre sólo es posible actuar sobre las tres primeras fuentes mediante: la instrumentación en campo, la realización de ensayos en modelo físico, el desarrollo de modelos numéricos debidamente contrastados, y la actualización permanente de los modelos de probabilidad utilizados.

Por ello, cuando se inicie un plan de elaboración de atlas de riesgo es conveniente iniciar asimismo un plan de trabajo de reducción de la incertidumbre asociada a cada una de la fuentes, priorizando aquellas donde el riesgo sea mayor (que no la probabilidad de ocurrencia).

Incertidumbre asociada a la naturaleza aleatoria de los fenómenos naturales.

Aun controlando la incertidumbre asociada a la calidad de los datos disponibles y la elección de modelos adecuados, mediante la minimización de los errores en el proceso, existen tres fuentes primarias de incertidumbre de los resultados generados por cualquier modelo, en este caso, de riesgo por inundación. Estas fuentes son:

Aleatoriedad de la ocurrencia de eventos: La ocurrencia o no de un evento y las características de la precipitación asociada a lo largo de la zona estudiada constituyen la primera fuente de incertidumbre en los resultados perseguidos. Para caracterizarla, se define la función de probabilidad de las variables aleatorias que determinan el evento (cantidad y duración de la precipitación en cada punto de registro, por ejemplo), a partir de la muestra de eventos disponible.

Aleatoriedad de la distribución espacial de los parámetros de cada tramo: Las características espaciales, aun cuando pudieran considerarse estacionarias localmente, presentan una variabilidad espacial intrínseca al medio que describen, con una componente claramente aleatoria. Dicha variabilidad puede ser descrita

por diferentes vías, incorporando en su caso cierta variabilidad temporal. En esta primera fase del modelo, dichos parámetros se consideran estacionarios, y su aportación a la incertidumbre total del resultado se incluirá en una segunda fase. Formulación matemática de la respuesta correspondiente de la cuenca: Si la respuesta de la cuenca y se obtiene a partir de la variable aleatoria x , con función de probabilidad $f(x)$, mediante la transformación $y=g(x)$, la función de probabilidad de y se obtiene como,

$$f(y) = \left(\frac{dy}{dx} \right)^{-1} f(x)$$

Por tanto, la expresión matemática contenida en $g(x)$ determina en gran medida la incertidumbre final asociada al valor de y .

3. Resumen y esquema final en el análisis de riesgos

En el año horizonte y en la cuenca (para cada una de las condiciones de trabajo contempladas), se define riesgo como:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de ocurrencia} \times \text{Costes asociados}$$

La probabilidad de ocurrencia es la probabilidad CONJUNTA de ocurrencia de los modos de fallo y beneficio en el año horizonte o VIDA ÚTIL en las condiciones de trabajo consideradas. Los costes asociados son los costes totales asociados a la ocurrencia del o los modos de fallo y beneficio, es decir, la suma de los costes financieros (costes "clásicos"), los costes del recurso (los costes de oportunidad) y los costes ambientales (los costes de las consecuencias sobre los ecosistemas y su conservación)

El contenido del atlas de riesgo por inundación son mapas de la cuenca con las isolíneas de riesgo constante debido a los diferentes modos de fallo en el año horizonte. Sólo de este modo, los resultados de mapas son comparables. La definición de este año horizonte es importante pues determina las funciones de probabilidad a obtener para caracterizar la probabilidad de ocurrencia. Dado que es imposible obtener estos mapas a escala instantánea y de forma continua en el espacio, se aproxima con la definición de los modelos de probabilidad de los agentes (precipitación, rotura de presa, deslizamiento de ladera en el embalse, etc.) y de sus acciones, que son la base del cálculo del riesgo, a escala de ESTADO (tiempo) y de TRAMO (espacio).

En el caso de las inundaciones, especialmente en condiciones mediterráneas, la mayor fuente de incertidumbre viene dada por la ocurrencia de precipitación y por las características de esta. De esta forma, la cuenca es una secuencia de tramos definidos en función de sus características geomorfológicas, hidrológicas, de uso y desarrollo socioeconómico, ambientales, etc. El modelo de probabilidad de una o varias variables aleatorias de tramo es representativo de lo que ocurre en este. Por último, en el tramo los procesos son homogéneos en sentido estadístico.

Por otra parte, la vida útil definida por el año horizonte se compone de un conjunto de años, cada uno de los cuales presenta una secuencia temporal de presentación del o de los agentes (aleatorios) o eventos (para el caso de la precipitación), con intervalos de no presentación de los mismos (no eventos). Así, la vida útil es una secuencia de estados, agrupados en sucesos evento-no evento, alternantes, con una duración del estado que depende de la variabilidad temporal exhibida. El modelo de probabilidad en un estado

cuantifica la aleatoriedad de las variables en él. Por último, en el estado los procesos son estacionarios en sentido estadístico.

Dejando aparte el modo clásico de obtención de la probabilidad de ocurrencia basado en los valores del periodo de retorno para los agentes considerados, la alternativa más adecuada pasa la aplicación de técnicas avanzadas de simulación estadística, por ejemplo métodos de Nivel III (Monte Carlo). De esta forma, se genera una mayor muestra de partida de la que obtener las funciones de probabilidad que intervienen en el cálculo de la probabilidad de ocurrencia. Las series de medidas disponibles para los caudales horarios en un tramo constituyen el registro de la respuesta de la cuenca agregada en ese punto a lo largo de los V años que componen la serie. Dicha respuesta fue el resultado de la manifestación concreta y conjunta de todas las variables que inciden en el valor final del caudal registrado durante una hora (estado) en un punto de aforo (tramo). Es decir, disponemos sólo de una realización del experimento llevado a cabo por la naturaleza (un solo grupo de V años) y, por tanto, irrepetible bajo las mismas condiciones que, además, son aleatorias. Ahora bien, supongamos que fijamos diferentes umbralales de caudal en función del nivel de daño que llevan, si simulamos N grupos de V años y su secuencia de agentes, y disponemos de un modelo que relacione suficientemente la manifestación del agente con el caudal en el tramo en el estado considerado, podemos generar la función de probabilidad de excedencia cada umbral fijado previamente a partir de la frecuencia con que dicho umbral se superó en cada uno de los N grupos de V años simulados. La figura 1 muestra un esquema del proceso:

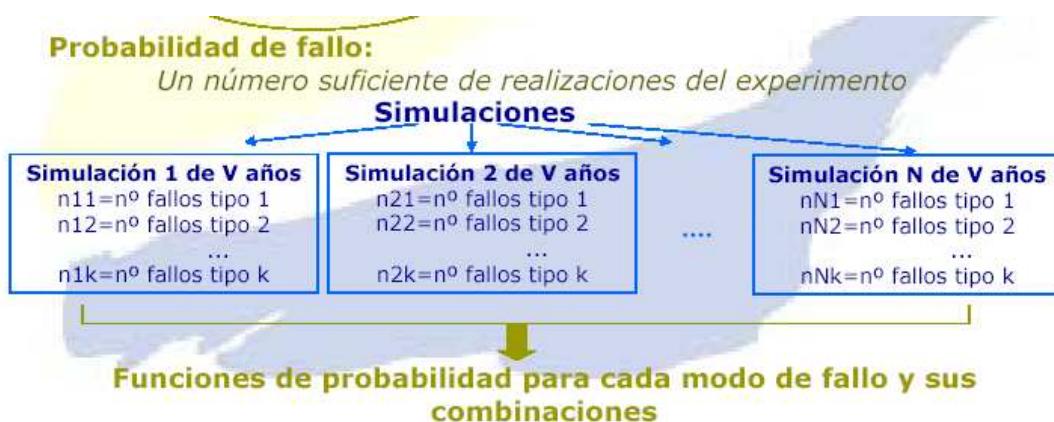


Figura 1. Esquema de la generación de una muestra representativa para el análisis de riesgo.

En definitiva, la secuencia para elaborar los mapas de riesgo por inundación en una cuenca serían:

- 1.Serie meteorológica de precipitación
- 2.Seleccionar las condiciones de trabajo y año horizonte
- 3.Tramos de río y definición de eventos/no eventos
- 4.Modos de fallo y beneficio
- 5.Simulación de Montecarlo de “vida útil”
- 6.Cálculo de la probabilidad conjunta
- 7.Evaluación de los costes totales
- 8.Mapas de riesgo en el año horizonte en la cuenca

Admitiendo que la mayor aleatoriedad en la respuesta de la cuenca viene dada por la secuencia climática para la vida útil del análisis, en la parte 2 de este trabajo se expone el

modelo de simulación de dicha secuencia para un horizonte temporal de V años, aplicado a la cuenca del río Guadalefeo, al sur de la provincia de Granada (ver figura 2). Este modelo se ha desarrollado en el marco de un proyecto para el desarrollo de un modelo de gestión integral de cuenca, el “Estudio Piloto para la Gestión Integral de la Cuenca Hidrográfica del río Guadalefeo” financiado por el Instituto del Agua de la Junta de Andalucía a través de un convenio de colaboración con el Grupo de Ríos y Embalses de la Universidad de Granada en el que participa el Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola de la Universidad de Córdoba.



Figura 2. Representación de la cuenca del río Guadalefeo (Granada) al sur de Sierra Nevada.

SIMULACIÓN CLIMÁTICA EN CUENCAS MEDITERRÁNEAS PARA PRONÓSTICO DE INUNDACIÓN

La caracterización de la precipitación incluye su ocurrencia, su volumen y su distribución espacial, a cada escala temporal evaluada. Como se ha resumido en el apartado previo, las funciones de probabilidad asociadas a cada una de estas variables se obtienen a partir de la serie histórica de datos disponible en cada caso, que no es otra cosa sino una realización del experimento llevado a cabo por la naturaleza. Pero dado que es sólo esa realización la que podemos observar, la que de hecho hemos observado para todas y cada una de las variables, en función de la secuencia correspondiente de precipitación, para que la muestra sobre la que desarrollamos la función de probabilidad sea más amplia y representativa, el uso de técnicas de simulación se convierte en una herramienta muy potente que, no sólo permite estimar el estado final del sistema, sino también incrementar el número de repeticiones del experimento. Es decir, volver atrás y adelante en el tiempo, una y otra vez, hasta disponer de un conjunto suficientemente significativo de realizaciones hipotéticas de la naturaleza del que derivar las funciones de probabilidad correspondientes y, así, no sólo proporcionar un estado final/parcial más probable sino establecer todo un abanico de estados posibles cuantificando para cada uno de ellos la probabilidad asociada (el más probable, entre ellos).

En las cuencas mediterráneas, la ocurrencia de precipitación está asociada al paso de un frente húmedo ligado a una borrasca. Definiendo este proceso como el agente físico último que ocasiona precipitación se define el evento como unidad básica que configura la secuencia climática a lo largo de V años, y el no evento como la situación antagónica.

1. Definición de estados: construcción de la serie de eventos/no eventos

En general, se consideran dos situaciones diferenciadas atmosféricas frente a las cuales la cuenca genera una respuesta, dos tipos de agentes: forzamiento intenso o rápido (aporte de agua en forma de precipitación asociada a una borrasca), y forzamiento continuo o lento (aporte de energía asociada al campo de temperaturas en la capa próxima a la superficie). Frente a la primera, la cuenca produce una respuesta rápida que se traduce en el aumento del agua contenida en el suelo y la generación de escorrentía directa superficial, entre otros, que se concentra en cada tramo de la red fluvial originando la variación de caudal en cada estado considerado; frente a la segunda, la cuenca produce una respuesta lenta que se traduce en cierta pérdida del agua contenida en el suelo y en su superficie por evaporación y consumo de la cubierta vegetal, y la generación de escorrentía superficial (e infiltración) procedente del deshielo. Ambas situaciones quedan definidas en el ámbito de este modelo como evento (de precipitación) y no evento (o periodo entre eventos), respectivamente.

Situación de evento: Se define como evento un periodo de tiempo durante el cual se registra precipitación de forma “continua” en alguna zona de la cuenca. La distribución espacial del evento en esta varía, por tanto, en el tiempo, de forma que cada punto de la cuenca comienza a sufrir el evento en un momento diferente. El evento tiene, pues, una duración dependiente del punto que se considere, y dejará una cantidad total de precipitación asimismo dependiente de dicho punto. Ambas variables definen el evento en la cuenca.

Con esta definición, el evento se asocia al concepto de borrasca (aunque en esta hay, además, periodos sin precipitación) y no al registro diario de precipitación existente en las

estaciones meteorológicas. Nieto et al. (2004; 2005) presentan la relación entre la manifestación atmosférica y en la superficie de la cuenca de la borrasca, estableciendo los cinco tipos de borrasca principales que afectan a esta cuenca y caracterizándolos para el periodo estudiado en este trabajo.

Situación de periodo entre eventos o no evento: Se adopta como tal aquel periodo durante el cual no se registra precipitación significativa en ningún punto de la cuenca. Se caracteriza fundamentalmente por la distribución espacial de la temperatura y su variación temporal. A partir de esta variable, se obtiene la demanda atmosférica de agua y la capacidad de fusión de nieve, las cuales, en función del almacenamiento al inicio del no evento en los depósitos del sistema (suelo y capa de nieve) y de su duración, se transforman en la cantidad de agua evapotranspirada desde la superficie y la cantidad de nieve fundida, respectivamente. Estas dos variables junto con la duración definen el no evento (que, como se deduce, está condicionado a las características del evento previo).

Con estos criterios, se ha construido para la cuenca del río Guadalefeo la serie de eventos a partir de las series de precipitación diaria disponibles en 30 estaciones meteorológicas desde 1967 a 2002. En cada estación se agregaron los datos diarios para cada evento identificado según los criterios expuestos y, posteriormente, se promedió espacialmente la precipitación a escala de cuenca para cada evento. Cada evento se caracteriza por:
 Duración, fecha de inicio y fecha de final
 Duración del periodo de no evento siguiente
 Precipitación total del evento promediada a escala de cuenca
 Tipo de borrasca que lo origina

Asimismo, se considera la ocurrencia de un evento a lo largo de un año como un suceso de Poisson, con diferente parámetro según la época del año. Se han considerado tras el análisis de la serie de eventos las siguientes hipótesis:

- a) el año comienza el 1 de septiembre y acaba el 31 de agosto
- b) el año se divide en cuanto a la ocurrencia de eventos en periodo húmedo (1 de septiembre a 31 de mayo) y periodo seco (1 de junio a 31 de agosto)

2. Hipótesis para la simulación de un grupo de V años

A la vista de las funciones de densidad de probabilidad empíricas (observadas) para la serie histórica de eventos en la cuenca, se admiten las siguientes hipótesis:

- Estacionariedad y homogeneidad de los descriptores de las funciones de probabilidad de las variables de estado en la estructura propuesta.
- La secuencia anual de eventos es independiente de un año a otro dentro del grupo
- La secuencia anual de ocurrencia de eventos puede describirse como una serie de sucesos de Poisson (y sus duraciones y el intervalo entre eventos quedan, pues, caracterizados también)
- El número de eventos (sucesos) a lo largo de un año se distribuye de manera diferente durante la “estación húmeda” (1 de septiembre a 31 de mayo) y durante la “estación seca” (1 de junio a 31 de agosto)
- El tipo de borrasca al que corresponde un evento es independiente del tipo de borrasca correspondiente al evento anterior
- El volumen de precipitación asociado a un evento y su duración no son independientes en ninguna época del año.

- El volumen de precipitación del evento depende del tipo de borrasca durante la estación húmeda
- El volumen de precipitación del evento no depende del tipo de borrasca durante la estación seca

3. Obtención de las funciones de probabilidad para las variables en cada caso

En cada categoría, por ejemplo, eventos de estación húmeda asociados a borrasca tipo I con precipitación menor o igual a A mm, se asigna igual probabilidad a cada uno de los valores individuales obtenidos (sea el volumen de precipitación o la duración, la variable considerada), siguiendo el procedimiento habitual para series de valores extremos: se ordenan de menor a mayor y se calcula una frecuencia relativa igual al número de posición dividido por el número total de datos (no sé si este o el número total de datos más uno). La función de distribución así obtenida se ajusta en principio a una lognormal, con cola superior (Gumbel de máximos) y cola inferior (Weibull de mínimos), aunque según los casos se elimina la cola inferior, o se elimina la zona central de la lognormal y se usan las dos colas para todo el dominio. Las figuras 3 y 4 muestran dos ejemplos de las funciones de probabilidad obtenidas para la precipitación de un evento asociado a la borrasca tipo I (noratlántica) durante la estación húmeda, y la duración del mismo para un valor de precipitación inferior a un umbral dado.

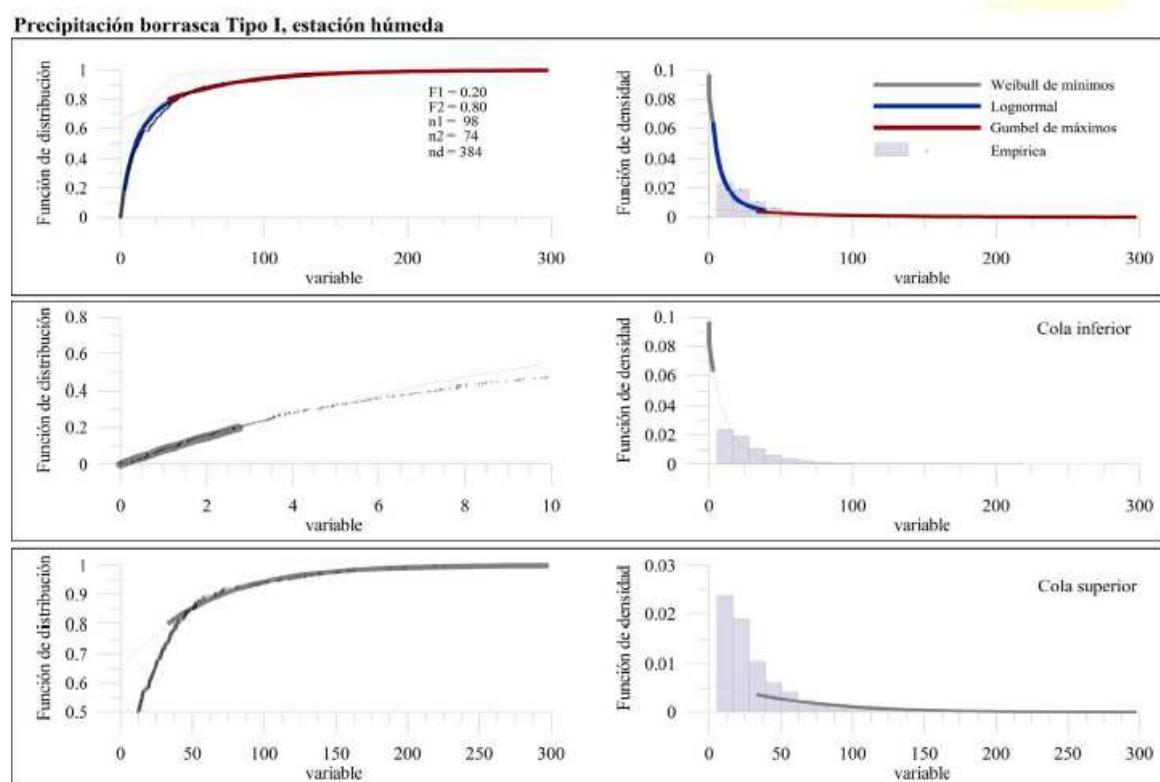


Figura 3. Función de probabilidad ajustada para la precipitación de un evento asociado a una borrasca tipo I durante la estación húmeda.

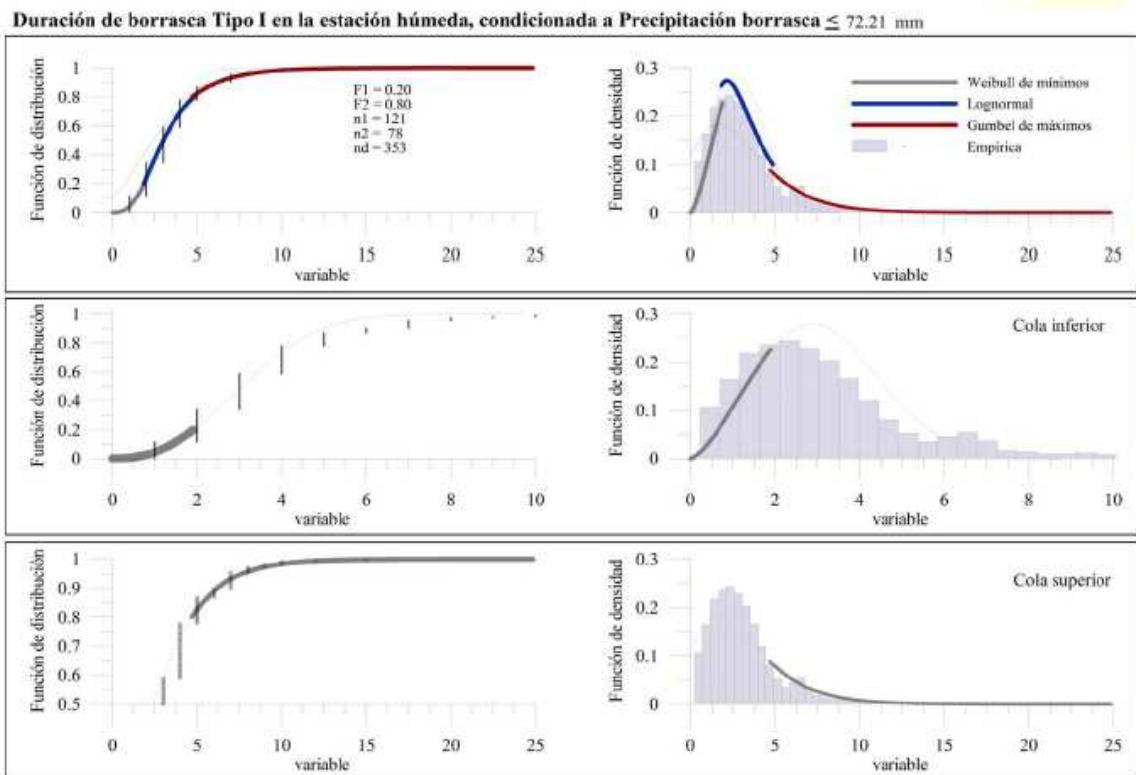


Figura 4. Función de probabilidad ajustada para la duración de un evento asociado a una borrasca tipo I durante la estación húmeda, condicionada a un valor de precipitación inferior a cierto umbral.

4. Secuencia para la simulación de un grupo de V años

Con todo esto, se construye la secuencia de simulación de un grupo de V años,

- condicionando la duración de un evento al volumen de precipitación correspondiente y este, a su vez, al tipo de borrasca que origina el evento, y
- imponiendo restricciones de carácter global (estacional y anual) a las variables por tipo de borrasca y estación, es decir, que los descriptores estacionales y anuales por tipo de borrasca de la serie simulada deben cumplir la función de probabilidad a esas escalas temporales de la serie observada.

La secuencia de simulación consta de los siguientes pasos:

GENERACIÓN DE VARIABLES ANUALES Y ESTACIONALES

- Se genera aleatoriamente el número total (=anual) de eventos de cada uno de los V años del grupo, la precipitación total anual y el número de días con lluvia; el número de días sin lluvia sale por diferencia.
- Se genera aleatoriamente el número total (=incluyendo todos los tipos de borrasca) de eventos para la estación húmeda de cada año, la precipitación total de dicha estación y el

número de días con lluvia de dicha estación; el número de días sin lluvia sale por diferencia.

3. Restricción 1, el número total de eventos de la estación seca de cada año se calcula como la diferencia entre el número anual y el de la estación húmeda, así como la precipitación total y el número de días con lluvia de dicha estación, y el número de días sin lluvia sale por diferencia.

GENERACIÓN DE VARIABLES ASOCIADAS A TIPOS DE BORRasca

4. Se genera aleatoriamente el orden en que se van a generar el número de eventos asociados a cada tipo de borrasca

5. Restricción 2, se genera para el tipo que ha salido primero, el número de eventos de la estación húmeda sometido a la restricción de que sea inferior al número total de la estación (generado en 29; para el tipo que ha salido segundo, el número de eventos de la estación húmeda sometido a la restricción de que sea inferior al resto de eventos de la estación; así hasta el tipo que ha salido quinto, cuyo número de eventos se calcula por diferencia, es decir, es el resto final.

6. Se genera el intervalo de tiempo hasta que se produce el primer evento de la estación húmeda

7. Se genera el tipo de borrasca del primer evento

8. Restricción 3, se genera el volumen de precipitación asociado al primer evento utilizando una función de distribución como la recogida en la figura 3. Se genera la duración del evento condicionada al volumen de precipitación previo para el mismo, utilizando una función de distribución del tipo de la recogida en la figura 4.

GENERACIÓN DE LA SECUENCIA DE VARIABLES PARA LOS N GRUPOS DE V AÑOS A SIMULAR

9. Se repite ocho para toda la secuencia de eventos generada previamente para el año de cálculo

10. Se repite todo hasta cerrar los V años de un grupo

11. Se repita el proceso de cálculo para cada uno de los N grupos de V años.

La figura 5 muestra un ejemplo de la secuencia de eventos/no eventos para uno de los 250 grupos de 35 años generados en una simulación de la cuenca del río Guadaleo, en azul la estación húmeda, en rojo la estación seca para cada año.

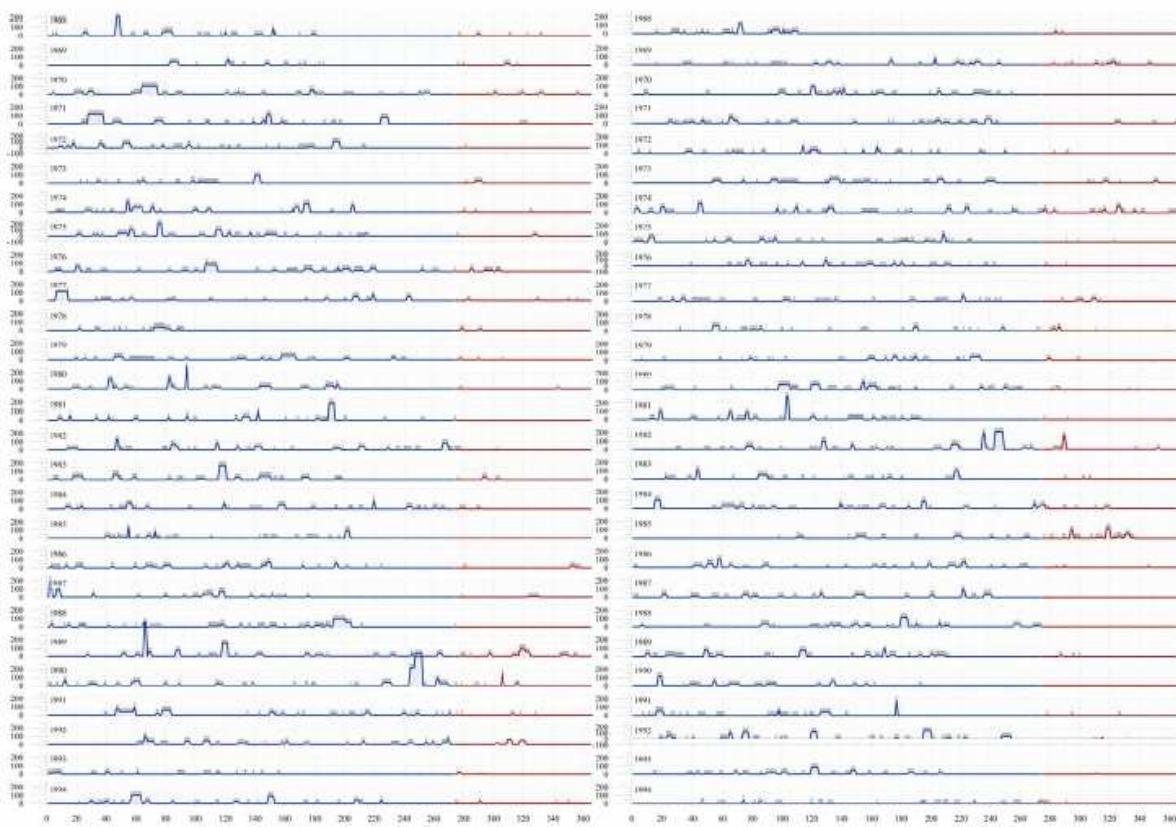


Figura 5. Ejemplo de un grupo de 35 años entre 250 simulaciones efectuadas.

A partir de esta muestra generada se pueden obtener las funciones de probabilidad de otras variables. Así, por ejemplo, la figura 6 muestra la función de distribución de la precipitación máxima asociada a un evento en un grupo de 35 años.

Precipitación máxima de evento en grupos de 35 años

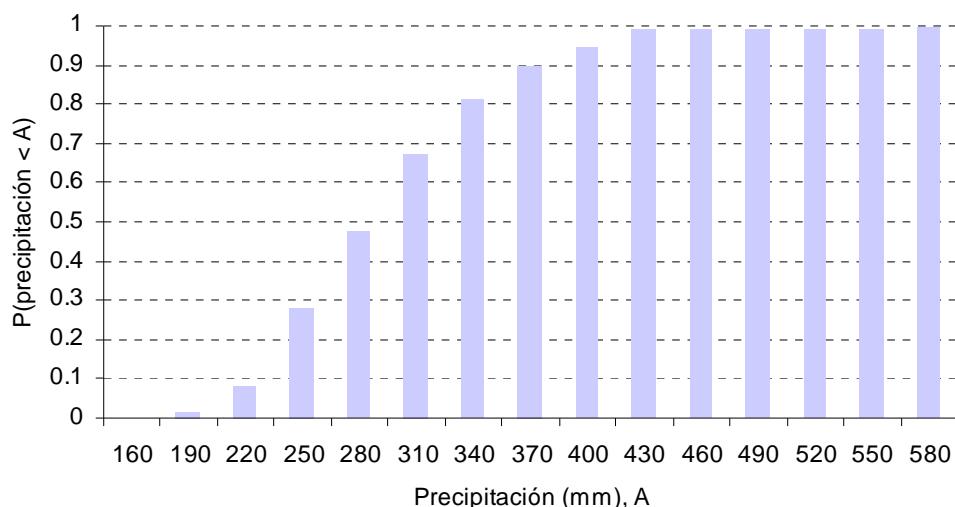


Figura 6. Ejemplo de función de probabilidad derivada de la simulación de 250 grupos de 35 años cada uno.

5. Respuesta de la cuenca en un tramo frente a un evento

a) Planteamiento simplificado:

A continuación vamos a describir un ejemplo de cálculo de la respuesta en un tramo frente a un evento. Si en el tramo se dispone de una estación de aforo se puede calcular la relación existente entre la precipitación del evento y el caudal máximo registrado en el hidrograma de escorrentía directa correspondiente. Para un número suficiente de datos, se puede obtener el ajuste de una función paramétrica a esa relación, por ejemplo, una exponencial creciente o la suma de una exponencial creciente y una recta, de manera que, para cada evento m de los M eventos de cada año v de los V años de cada grupo n de los N grupos simulados, se calcula el caudal máximo correspondiente a ese tramo, es decir, se generan N grupos de V años de M caudales máximos debidos a un evento en el tramo estudiado. Con esta muestra generada se pueden obtener las funciones de probabilidad de las variables asociadas, por ejemplo, del caudal máximo anual, del máximo caudal en el grupo de V años, etc..

Con la curva de gasto obtenida en la estación de aforo, dichas variables relacionadas con el caudal en el tramo se transforman en altura de agua y a partir de la topografía se estima la zona inundable cuando se produce dicho caudal, que lleva asociada una probabilidad.

Repitiendo este proceso se obtendrían las isolíneas de probabilidad, primero, y valorando los daños asociados, las isolíneas de riesgo finales. La extensión del método a todos los tramos definidos en la cuenca genera el mapa de riesgo correspondiente al año horizonte definido.

b) Planteamiento complejo:

La secuencia de cálculo es la misma que en el caso anterior, pero se sustituye el modelo paramétrico para la respuesta de la cuenca en el tramo frente al evento, por un modelo físico de más detalle de la cuenca. El beneficio en la reproducción del comportamiento de la cuenca se consigue a costa de un significativo incremento del tiempo de cálculo, que hace inviable esta opción para cuencas de gran tamaño, o valores elevados de V, o número elevado de simulaciones N (Yu et al., 2001).

CONCLUSIONES

- Se ha propuesto y definido la metodología para obtener atlas de riesgo por inundación, atendiendo a la definición técnica de riesgo y utilizando métodos de nivel III para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia.
- Se ha establecido la estructura de un modelo de simulación climática con fines de planificación hidrológica de aplicación en cuencas mediterráneas cuya salida permite la simulación de variables derivadas a escala de evento, como el caudal máximo registrado en cada tramo de la red fluvial en estudio.
- El modelo climático propuesto se ha desarrollado para la cuenca del río Guadalete, mostrando su potencial como herramienta de simulación.

En la actualidad se está incorporando la caracterización de los períodos secos, no eventos, en el modelo de simulación climática con el fin de realizar una evaluación conjunta de las situaciones de inundación-sequía que permita un pronóstico probabilístico para cada año horizonte considerado en la planificación de la cuenca, y con ello, la simulación dinámica de las zonas de inundación en la cuenca, el estado de los embalses, las situaciones de escasez, etc., es decir, disponer de una herramienta de gestión integral basada en el análisis de riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

Comisión de las Comunidades Europeas. 2006. Propuesta de DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJOrelativa a la evaluación y gestión de las inundaciones. CCE. Bruselas.

Gouldby, B., Samuels, P. 2005. Language of risk-Project definitions. Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies. www.floodsite.net , febrero 2006

Nieto, S., Nanía, L., Moñino, A., Herrero, J. 2004. Modelos de precipitación por eventos. IV Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, Tortosa, 8-12 diciembre 2004.

Nieto., S., Polo, M.J., Losada, M.A. 2005. Elaboración de una base de datos y caracterización de Borrascas. Informe Técnico IT.II.4v2, Estudio Piloto para la Gestión Integrada del Río Guadalfeo. Grupo de Ríos y Embalses, UGR.

Yu, P.S., Yang, T.C., Chen, S.J. 2001. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model. *J. Hydrol.* 244: 43-59.

AGRADECIMIENTOS

En los resultados presentados en este trabajo han participado los miembros del Grupo de Ríos y Embalses, Leonardo Nanía y Sergio Nieto, con la colaboración de Asunción Baquerizo del Grupo de Puertos y Costas, ambos de la Universidad de Granada.