



## BOLETÍN TÉCNICO LanammeUCR

Volumen 1, N.º 6  
Septiembre, 2024

## Fundamentos de análisis de valor extremo y riesgo para hidrología vial

**Ing. Roberto Villalobos Herrera, Ph. D.**

roberto.villalobosherrera@ucr.ac.cr

Docente - Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniero - Programa de Infraestructura del Transporte



## Introducción

El análisis estadístico de eventos extremos es un componente fundamental de los análisis requeridos para la construcción de infraestructura segura ante los embates del clima. En el diseño de proyectos viales se requieren análisis estadísticos como paso intermedio para definir los caudales de diseño de obras como drenajes longitudinales, alcantarillas de alivio, alcantarillas de paso, y puentes.

Los métodos y teorías que se verán en esta serie de boletines están enfocados en los análisis de series de valor extremo de dos variables hidrológicas: caudal y precipitación; y en su aplicación en proyectos viales. En este primer boletín se discuten métodos de estimación de crecientes (Sección 2), conceptos de frecuencia de eventos extremos y riesgo (Sección 3), modelos de valor extremo (Sección 4), y finalmente se discuten ventajas, desventajas y cómo seleccionar distintos tipos de métodos de estimación de crecientes (Sección 5).

## 2. Métodos de estimación de crecientes

El objetivo de todo estudio hidrológico e hidráulico es determinar un caudal o hidrograma de diseño a partir del cual se pueden determinar niveles y velocidades de flujo. Estas variables son utilizadas en el diseño de obras hidráulicas. Existen múltiples métodos para obtener caudales o hidrogramas de diseño, pero en general se agrupan en dos categorías, métodos basados en información de caudal, y métodos de transformación de precipitación a escorrentía (caudal), ambas categorías tienen ventajas y desventajas que considerar y depende de la información disponible en la zona de estudio.

### 2.1 Estimación de crecientes mediante datos de caudal máximos instantáneos anuales

La ventaja principal de los métodos basados en medición de caudal es que proveen una estimación directa de la magnitud de crecientes. Las mediciones de caudal integran la respuesta hidrológica completa de una cuenca ante eventos de precipitación y no requieren del uso de ningún modelo de transformación de precipitación-escorrentía y los sesgos e incertidumbres asociadas. Una ventaja adicional es la facilidad de análisis y la habilidad de realizar estimaciones de incertidumbre de forma directa durante el análisis estadístico. Estas ventajas son sustanciales y son suficientes para recomendar la estimación directa de crecientes a partir de mediciones como la primera opción para determinar un caudal o hidrograma de diseño.

Existen desventajas prácticas evidentes a la aplicación de métodos de caudal, la más evidente es la ausencia de registros de caudal adecuados en el sitio de interés. Esto se puede deber a la ausencia de mediciones (un problema usual en áreas urbanas), a un periodo corto de medición, o que los registros existentes no reflejen las condiciones de diseño debido a cambios en el uso de suelo, urbanización, regulación de caudales, o efectos no-estacionarios como el cambio climático. Además, los registros de caudal, como toda medición de campo, tienen cierta incertidumbre asociada, sobre todo si son el resultado de aforos y el cálculo de una curva de descarga (la incertidumbre es menor cuando se realizan mediciones en vertederos u otra sección de control artificial). Finalmente, existe incertidumbre asociada al modelo estadístico utilizado para analizar los datos, sin embargo, esta limitación es inevitable y también se encuentra presente en los análisis de transformación precipitación-escorrentía.

### 2.2 Métodos de transformación precipitación-escorrentía

Al contrario de los métodos de caudales máximos instantáneos anuales – que solo generan un caudal pico – los métodos de transformación pueden generar hidrogramas completos, por lo tanto, son los métodos más empleados para cualquier aplicación que requiera cuantificar volumen de escorrentía además de caudal pico. La principal razón por la que se utiliza más este tipo de metodología es que hay una mayor disponibilidad de datos de precipitación, y que además la variabilidad espacial de la precipitación es menor y más predecible que la variabilidad en crecientes. Estas

ventajas suelen permitir la estimación de crecientes más extremas usando métodos de transformación de lo que se puede extrapolar utilizando métodos de caudales máximos instantáneos anuales (Ball *et al.*, 2019; Environment Agency, 2022).

La desventaja principal de los métodos de transformación es la necesidad de utilizar algún modelo para transformar (por ende, el nombre de la categoría) un valor de precipitación de diseño en un caudal o hidrograma de diseño.

El proceso de transformación de precipitación a escorrentía se puede realizar de forma directa (por ejemplo, mediante el Método Racional) o por etapas. La transformación por etapas requiere primero del cálculo de pérdidas de precipitación para obtener la precipitación efectiva (por ejemplo, mediante el método del Número de Curva o el método de Green y Ampt), y luego la transformación de precipitación efectiva en escorrentía (utilizando, por ejemplo, modelos de función de transferencia como hidrogramas unitarios). Existen además métodos que utilizan simulación continua, pero estos requieren la calibración de un modelo hidrológico para la cuenca.

Cualquier modelo que se utilice introduce incertidumbre y sesgos en los resultados, sobre todo en la frecuencia del caudal pico o hidrograma estimado. Una suposición usual al utilizar un método de transformación es que la creciente estimada tendrá la frecuencia correspondiente a la precipitación utilizada para generar la creciente, sin embargo, no existe garantía de que esto sea el caso en la mayoría de modelos (Nathan *et al.*, 2016; Singh, 2016). Por lo tanto, es necesario ser cuidadoso en la selección de parámetros y ser consciente de la incertidumbre presente en el proceso de modelado.

### 3. Frecuencia y riesgo de excedencia

#### 3.1 Probabilidad de excedencia anual

Una terminología clara es fundamental para la comunicación efectiva entre profesionales y otras partes interesadas. Históricamente se han utilizado términos como “periodo de retorno” para describir la frecuencia de eventos extremos, sin embargo, es común que este concepto se utilice de forma

ambigua o incorrecta, o sea malinterpretado (Ball *et al.*, 2019). Una fuente usual de confusión es la percepción errónea que un periodo de retorno implica que eventos de cierta magnitud solo se exceden luego de una cierta duración. Existen quienes creen que un evento con periodo de retorno de 25 años solo puede ocurrir una vez cada 25 años. Esto es una malinterpretación del concepto.

Para facilitar una discusión clara, esta serie de boletines utiliza el concepto de *probabilidad de excedencia anual* (PEA) para referirse a la frecuencia de eventos máximos anuales. La relación entre PEA y periodo de retorno (T) es dada por la ecuación 1. Un concepto asociado es el *del intervalo de recurrencia* (IR) utilizado en los métodos de picos sobre el umbral, el IR se presenta en la ecuación 2, también conocida como la ecuación de Langbein (Langbein, 1949). Para eventos muy frecuentes se puede utilizar el *número de ocurrencias anuales* (N) definido en la ecuación 3.

$$PEA (\%) = 100\% \times \frac{1}{T (\text{años})} \quad \text{Ec. 1}$$

$$IR (\text{años}) = \frac{1}{-\log_e(1 - PEA)} \quad \text{Ec. 2}$$

$$N \left( \frac{1}{\text{años}} \right) = \frac{1}{IR} \quad \text{Ec. 3}$$

La relación entre T, PEA, e IR se observa en la Tabla 1, junto con una indicación de la frecuencia relativa de los eventos asociados a distintos valores de estas variables. Los valores en negrita indican la nomenclatura recomendada para cada rango de frecuencia en función de la practicidad, precisión técnica, y claridad de lenguaje. Así, para eventos muy frecuentes, se recomienda utilizar su valor de N, el PEA se recomienda para eventos frecuentes, poco frecuentes y muy poco frecuentes. Se considera que el T se puede utilizar sin riesgo de malinterpretaciones para eventos muy o extremadamente poco frecuentes. Si el análisis de frecuencia se realiza mediante picos sobre el umbral se recomienda transformar el IR al valor de PEA o T correspondiente (Ball *et al.*, 2019; Nathan and Weinmann, 2019).

| Frecuencia relativa | Muyfrecuentes |       |       |       | Frecuentes |     |     | Poco frecuentes |      |      | Muy poco frecuentes |       |       | Extremadamente p. frec. |        |        |
|---------------------|---------------|-------|-------|-------|------------|-----|-----|-----------------|------|------|---------------------|-------|-------|-------------------------|--------|--------|
| PEA (%)             | 99.75         | 95.02 | 86.47 | 63.21 | 50         | 20  | 10  | 5               | 2    | 1    | 0.5                 | 0.2   | 0.1   | 0.05                    | 0.02   | 0.01   |
| T (años)            | 1.003         | 1.052 | 1.156 | 1.582 | 2          | 5   | 10  | 20              | 50   | 100  | 200                 | 500   | 1000  | 2000                    | 5000   | 10000  |
| IR (años)           | 0.17          | 0.33  | 0.5   | 1.0   | 1.4        | 4.5 | 9.5 | 19.5            | 49.5 | 99.5 | 199.5               | 499.5 | 999.5 | 1999.5                  | 4999.5 | 9999.5 |
| N (1/años)          | 6.0           | 3.0   | 2.0   | 1.0   |            |     |     |                 |      |      |                     |       |       |                         |        |        |

Tabla 1. Relación entre probabilidad de excedencia anual, periodo de retorno, intervalo de recurrencia, y número de ocurrencias anuales. Adaptada de Ball et al., 2019.

### 3.2 Riesgo de excedencia anual

Si los eventos extremos anuales se consideran independientes entonces la probabilidad de que un evento  $X$  con cierta PEA sea igualado o excedido en un periodo de  $n$  años es:

$$P(x \geq X) = 1 - (1 - PEA)^n \quad \text{Ec. 4}$$

Aplicando la ecuación 4 se puede observar que un para un periodo de 10 años un evento con PEA de 10% (0,1) tiene una probabilidad de ser igualado o excedido de 0,65 (65%). Se requiere de un periodo de 44 años para llegar a tener un 99% de probabilidad de observar un evento con PEA de 10%. Puesto de otra manera, se requiere de un periodo de observaciones de aproximadamente  $5 \times T$  para tener bastante certeza de haber observado un evento con  $T$  años de periodo de retorno.

### 3.3 Distribuciones empíricas

Una herramienta necesaria para el estudio de valores extremos es la función de distribución empírica  $\hat{F}$ . Esta es la estimación de la distribución de probabilidad real,  $F$ , asociada a un proceso que se obtiene mediante una muestra de valores observados.  $\hat{F}$  es de gran utilidad para comprobar la bondad de ajuste de un modelo estadístico a las observaciones. Conforme el tamaño de la muestra aumenta  $\hat{F}$  tiende a converger hacia  $F$  (Coles, 2001). Dada una muestra ordenada de observaciones independientes

$$x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$$

que fue tomada de una población con distribución de probabilidad  $F$ , la distribución empírica (probabilidad empírica de excedencia) es dada por

$$\hat{F}(x) = \frac{i}{n+1} \text{ para } x_{(1)} \leq x \leq \dots \leq x_{(i+1)}.$$

Esta distribución también es conocida como la posición de graficación de Weibull, esta se considera como un estimador no sesgado para cualquier familia de distribuciones (Gumbel, 1958; Coles, 2001; England et al., 2019). Alternativamente, se puede utilizar la posición de graficación de Gringorten cuando se comparan observaciones con la familia de distribución Gumbel (England et al., 2019):

$$\hat{F}(x) = \frac{i - 0,44}{n + 0,12}$$

## 4. Valores extremos y sus modelos

La teoría de valor extremo es el campo de la estadística que se dedica al estudio del comportamiento estocástico de un proceso cuando su magnitud es extremadamente grande o pequeña. Tiene aplicaciones en el diseño de infraestructura civil cuando se requiere cuantificar la magnitud de eventos extremos como sismos, ráfagas de viento, eventos de precipitación, o crecientes, además de aplicaciones en otros campos como las finanzas y los seguros. En todos estos campos las aplicaciones suelen responder a una de dos incógnitas: ¿de qué magnitud es un evento de cierta frecuencia? – donde la frecuencia se asocia a un criterio de diseño o evaluación que suele requerir cierto grado de extrapolación más allá de los datos observados – o, ¿cuál es la frecuencia de un evento extremo observado?

Un conocimiento de los fundamentos del análisis de valor extremo es necesario para estar al tanto de las limitaciones de este tipo de análisis. Suponga que denotamos como  $X_1, X_2, \dots$  a la secuencia de precipitación total diaria, entonces

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$$

es la precipitación diaria máxima observada en un periodo de duración  $n$ . Si se conoce el comportamiento exacto de  $X_i$  entonces se

conocería el comportamiento asociado de  $Mn$ , pero, como no tenemos conocimiento pleno del comportamiento de  $X_i$ , es imposible conocer el comportamiento exacto de  $Mn$ . Por esto el estudio de la variable  $Mn$  se realiza mediante una serie de supuestos que permiten determinar su comportamiento aproximado cuando el valor de  $n$  tiende a infinito. La primera limitación principal de este tipo de análisis es que, al depender de argumentos desarrollados para  $n \rightarrow \infty$ , se debe tener cuidado al considerar los resultados como exactos cuando se utiliza una muestra finita. Segundo, los modelos han sido derivados en condiciones idealizadas que pueden no ser razonables de acuerdo con el proceso bajo estudio. Finalmente, los modelos pueden llevar a un desperdicio de información sobre el proceso  $Mn$ , esto último se verá en más detalle a continuación.

## 4.1 Principios de modelado estadístico

Dadas las limitaciones generales de la teoría de valor extremo y sus modelos, se considera oportuno establecer una serie de principios para que su aplicación sea robusta y transparente:

### 4.1.1 Método de estimación

Existen múltiples métodos para asignar a distintos modelos estadísticos los parámetros necesarios para realizar un "ajuste" a una serie de datos observados. Entre ellos se encuentran los momentos lineales (*l-moments*), el método de máxima verosimilitud (MLE), y los factores de frecuencia (Hosking, 1990; Chow *et al.*, 1994; Coles, 2001). Se debe tener claridad sobre cuál método se utiliza en un análisis, y la selección se debe fundamentar en el conocimiento sobre las fortalezas y debilidades de cada método.

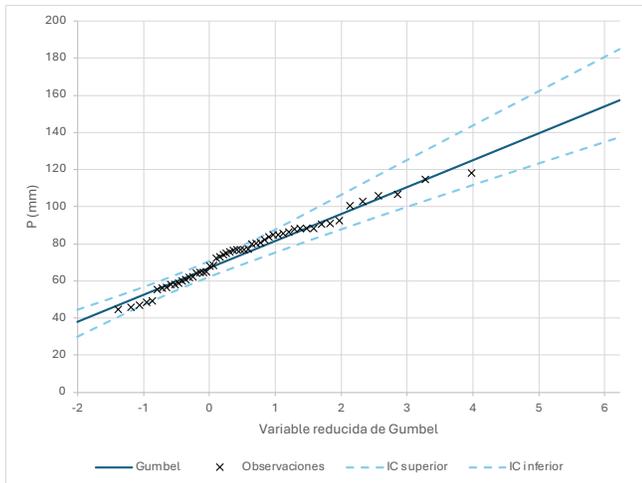
Se hace hincapié en que la determinación de los parámetros de ajuste a un modelo es una estimación. Por lo tanto, existe una incertidumbre en la determinación de cada valor que se debe considerar en el análisis de los resultados obtenidos.

### 4.1.2 Cuantificación de la incertidumbre

En todo análisis estadístico existe cierto grado de incertidumbre asociado a nuestra falta de conocimiento sobre el comportamiento exacto de variables como  $X_i$ , por lo tanto, también de variables como  $Mn$ . Esto usualmente se asocia a periodos de observación cortos, pero también se relaciona más fundamentalmente con incertidumbre sobre la naturaleza de los procesos físicos y las mediciones de estos. Por ello, los resultados obtenidos de todo análisis estadístico representan una aproximación o estimación del proceso, y es importante que todo resultado venga acompañado de una estimación del grado de incertidumbre asociado. Esto usualmente se representa utilizando intervalos de confianza, los cuales son importantes para evaluar la confiabilidad de los resultados – entre más amplio sea el intervalo, mayor es la incertidumbre asociada a la estimación, esto se ilustra en la Figura 1.

### 4.1.3 Diagnóstico de los modelos – bondad de ajuste

Toda extrapolación depende de obtener una reproducción satisfactoria, por parte del modelo, del comportamiento de los valores extremos observados. Por lo tanto, la verificación de la bondad de ajuste de los modelos es necesaria. Para esta verificación existen pruebas estadísticas como la Chi-cuadrado o Kolmogorov-Smirnov. Además, se recomienda el uso de una verificación gráfica que presente los valores observados utilizando posiciones de graficación, la estimación del modelo ajustado, y los intervalos de confianza. Un ejemplo de esta revisión se muestra en la Figura 1, el ajuste además se considera aceptable mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov.



**Figura 1. Ajuste de los datos de la serie de máximos anuales de precipitación diaria registrados en la estación 84001, San José entre 1960-2012 a la distribución Gumbel, los valores observados se graficaron mediante posiciones de graficación de Weibull y el intervalo de confianza es del 95%. Se recuerda al lector que la variable reducida de Gumbel,  $y = -\ln(-\ln\{1-\hat{F}(x)\})$ , donde  $\hat{F}(x)$  es la probabilidad empírica de excedencia de una observación  $x$ .**

#### 4.1.4 Maximizar el uso de la información

Un uso juicioso de la información disponible de un proceso puede ayudar a reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones estadísticas. Entre las opciones disponibles en la teoría de valor extremo que aprovechan más información que los análisis convencionales de series de máximos anuales se cuenta con: el uso de modelos de picos sobre umbral, el uso de covariantes, el uso de modelos multivariados, o el uso de métodos de análisis de frecuencia regional. Estos modelos se introducen a continuación.

## 4.2 Modelos de valor extremo

Existen varias categorías de modelos de valor extremo, y su clasificación depende de la cantidad de variables, del tipo de serie de datos, del número de sitios de donde se obtienen los datos, y de su manejo de la variabilidad en el tiempo.

### 4.2.1 Tipos de series de datos

Existen dos formas de obtener una muestra de valores extremos a partir de una serie temporal de datos hidrológicos. La más usual es establecer

una serie de bloques máximos (o mínimos), donde se extraen los eventos máximos (o mínimos) observados en un bloque de tiempo. Convencionalmente se utilizan bloques de un año de duración, por lo que este método genera una *serie de máximos anuales*. De acuerdo con el teorema de Fisher-Tippet-Gnedenko, una serie de bloques máximos converge a una de las tres distribuciones de valor extremo (Gumbel, Fréchet o Weibull) que componen la distribución General de Valor Extremo (GEV por sus siglas en inglés).

Una crítica importante al uso de modelos GEV es que las series de máximos anuales pueden omitir información valiosa sobre los extremos de un fenómeno al solo utilizar un valor por año. Es posible que, dentro de un mismo año, existan dos o más extremos con una magnitud mayor a los extremos registrados durante otros años del periodo. Al usar una serie de máximos anuales, los extremos que no sean el mayor del año son descartados, a pesar de que proveen información importante (Chow *et al.*, 1988; Coles, 2001).

Este problema se puede resolver utilizando *series de duración parcial* también conocidas como *series de picos sobre un umbral*. Estas series contienen todos los datos de una serie temporal que tengan una magnitud mayor a un umbral predefinido y se puede demostrar que la distribución una serie de duración parcial converge a la familia de la distribución Generalizada de Pareto (GP) (Coles, 2001). Si el umbral se define de tal manera que el número de valores sea igual al número de años en el registro entonces la serie se conoce como una *serie de excedencia anual* (Chow *et al.*, 1988). Una crítica usual a este tipo de modelos es la complicación adicional de tener que definir un umbral y tener que verificar que las observaciones de un mismo año sean independientes entre si (Chow *et al.*, 1988), sin embargo, esto se puede resolver mediante el uso de herramientas computacionales. Una limitación al uso de estos modelos es la falta de acceso a la información requerida, ya que los proveedores institucionales (ej. IMN, ICE) suelen trabajar con series de máximos anuales, por lo que se vuelve necesario obtener la serie de tiempo completa para poder obtener una serie parcial o serie de excedencia.

#### 4.2.2 Otras clasificaciones de modelos

Los dos modelos anteriores (modelos de máximos anuales o de series parciales) se pueden subclasificar de acuerdo con las siguientes propiedades:

- Estacionariedad – los modelos estacionarios suponen que la distribución de las observaciones es constante (estacionaria) en el tiempo. Los modelos no-estacionarios modelan procesos estadísticos que tienen características que varían con el tiempo, y permiten realizar modelos de variables que cuentan con tendencias a lo largo del tiempo. Debido a los efectos de intensificación de la lluvia causados por el cambio climático (Fowler *et al.*, 2021) se considera conveniente revisar si existen tendencias en los valores extremos que requieran el uso de modelos no estacionarios en su análisis.
- Modelos regionales – son aquellos que agregan datos de más de un sitio de medición para reducir la incertidumbre asociada a series temporales cortas mediante una sustitución de “espacio por tiempo” donde se busca que datos de distintos sitios (espacio) que funcionalmente se comporten como una única serie de larga duración (tiempo). Existen varias metodologías para el análisis de frecuencia regional (RFA), pero algunos principios fundamentales incluyen la definición de regiones *homogéneas*, formadas por sitios que comparten una misma distribución de valor extremo, y el uso de un parámetro de escala para poder agregar información de varios sitios (Hosking and Wallis, 1997; Claps *et al.*, 2022).
- Modelos multivariados – los análisis usuales de extremos en hidrología analizan una única variable, por ejemplo, los análisis de lluvia suelen considerar los totales diarios de precipitación. El uso de una duración fija para el análisis de precipitación ignora el hecho que la magnitud (profundidad, mm) de un evento o tormenta se correlaciona fuertemente con su duración (horas), además existen traslapes significativos entre los máximos registrados en diferentes duraciones (por ejemplo, las intensidades máximas en 5 minutos suelen coincidir en el tiempo con las intensidades máximas en 10 minutos) (Villalobos Herrera *et al.*, 2023a, 2023b).

Esto genera problemas al momento de determinar curvas de intensidad-duración-frecuencia que no han sido resueltos plenamente (Benestad *et al.*, 2021; Vesuviano and Hydrology, 2022).

### 5. Selección de método de estimación de crecientes

Dentro de las dos categorías generales de métodos de estimación de crecientes existen diferentes métodos estadísticos para estimar caudales o precipitación con diferentes frecuencias. Estos métodos incluyen los métodos de picos sobre umbral (series de excedencias o series parciales), los métodos de máximos anuales, los análisis de frecuencia regional, métodos de simulación continua, métodos de análisis de Monte Carlo, y modelos de precipitación/avenida máxima probable. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desventajas y diferentes rangos de aplicabilidad recomendada en función de la incertidumbre asociada a sus resultados.

Como regla general, los métodos de regionalización se consideran más robustos para eventos muy poco frecuentes que los métodos de extrapolación usando series de máximos anuales o picos sobre umbral que utilicen datos de una sola estación, ya sea de caudal o de precipitación. La justificación es sencilla, los métodos regionales permiten agregar datos de varias estaciones y de esa manera formar series de datos más extensas que permiten un mejor ajuste estadístico con incertidumbres menores. Para eventos extremadamente poco frecuentes se suelen utilizar métodos basados en razonamientos físicos como la precipitación máxima probable, mientras que para eventos muy frecuentes (con periodo de retorno menor a igual a 10 años) se sugiere utilizar una serie de picos sobre umbral (Hosking and Wallis, 1997; Faulkner, 1999; Svensson and Jones, 2010; Ball *et al.*, 2019; Wasko *et al.*, 2021).

Es importante recordar que, aunque estas recomendaciones son comunes a nivel internacional, en Costa Rica y la región todavía es poco usual que se utilicen métodos distintos al

análisis de series de máximos anuales en estaciones individuales. Existen múltiples factores detrás de este comportamiento, desde desconocimiento y falta de capacitación sobre diferentes métodos, hasta dificultad para acceder a los datos requeridos para otros métodos. Sin embargo, se considera importante

introducir estos temas en la discusión nacional para motivar la práctica profesional, institucional y privada, hacia la adopción paulatina de métodos más robustos. Para esto se requiere de acompañamiento, capacitación profesional, y un acceso mayor a datos de caudal y precipitación.

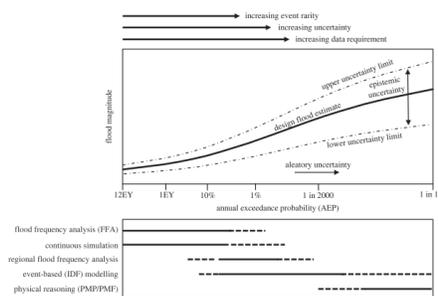
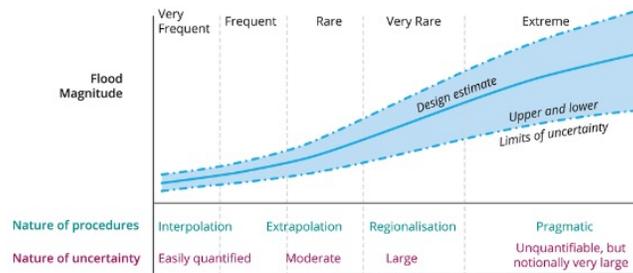


Figure 2. The relevance of different flood estimation approaches as a function of AEP and relative uncertainty of design flood estimation. The top panel presents a typical flood frequency curve where the flood magnitude increases with event rarity. The x-axis can be interpreted as the aleatory uncertainty and the confidence intervals as the epistemic uncertainty. The bottom panel shows the range of AEPs for which various flood estimation approaches show efficacy. Dashed lines represent the lower efficacy while solid lines represent the higher efficacy. Events more frequent than annual are presented as events per year (EY). Figure adapted from [77].

## 6. Conclusiones

Este boletín introduce conceptos fundamentales de análisis para el análisis de valor extremo y riesgo para hidrología vial, como introducción a una serie de boletines sobre estadística en hidrología aplicada a vías.

Se presentaron distintas terminologías para describir la frecuencia de eventos extremos, haciendo énfasis en la necesidad de relacionar periodos de retorno con probabilidades de excedencia anual para comunicar más claramente los riesgos asociados a eventos extremos con diferentes frecuencias.

Se introducen cuatro principios para un modelado estadístico responsable:

- Claridad sobre el modelo seleccionado y sus limitaciones

- Cuantificación de la incertidumbre de los resultados
- Comprobar la bondad de ajuste del modelo
- Maximizar el uso de la información disponible

Finalmente, se presentan distintos tipos de modelos estadísticos que se pueden utilizar para realizar estimaciones de precipitación y caudal extremo. Además, se presenta una discusión breve de recomendaciones internacionales sobre cuáles modelos utilizar en función de la frecuencia del evento extremo que se vaya a estimar.

En general con este boletín se busca, además de introducir algunos modelos y principios al entorno nacional, generar discusión dentro del gremio sobre la conveniencia y necesidad de adoptar mejores prácticas internacionales dentro del quehacer ingenieril nacional.

## 7. Bibliografía

- Ball J, Babister M, Nathan R, Weeks W, Weinmann E, Retallick M, Testoni I (eds). 2019. *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation*. Geoscience Australia: Commonwealth of Australia.
- Benestad RE, Lutz J, Dyrørdal AV, Haugen JE, Parding KM, Dobler A. 2021. Testing a simple formula for calculating approximate intensity-duration-frequency curves. *Environmental Research Letters*, 16(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd4ab>.
- Chow V Te, Maidment DR, Mays LW. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill: New York.
- Chow V, Maidment D, Mays L. 1994. Hidrología aplicada. *Hidrología aplicada*, 575 pp.
- Claps P, Ganora D, Mazzoglio P. 2022. Rainfall regionalization techniques. *Rainfall: Modeling, Measurement and Applications*. Elsevier Inc., 327–350. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822544-8.00013-5>.
- Coles S. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer: London.
- England JF, Cohn TA, Faber BA, Stedinger JR, Thomas WO, Veilleux AG, Kiang JE, Mason RR. 2019. *Guidelines for determining flood flow frequency-Bulletin 17C. Techniques and Methods, book 4, chap. B5*.
- Environment Agency. 2022. *Flood Estimation Guidelines. Instruction: LIT 11832*. England.
- Faulkner D. 1999. *Rainfall Frequency Estimation. Volume 2 of the Flood Estimation Handbook*. Centre for Ecology and Hydrology.
- Fowler HJ, Ali H, Allan RP, Ban N, Barbero R, Berg P, Blenkinsop S, Cabi NS, Chan S, Dale M, Dunn RJH, Ekström M, Evans JP, Fosser G, Golding B, Guerreiro SB, Hegerl GC, Kahraman A, Kendon EJ, Lenderink G, Lewis E, Li X, O’Gorman PA, Orr HG, Peat KL, Prein AF, Pritchard D, Schär C, Sharma A, Stott PA, Villalobos Herrera R, Villarini G, Wasko C, Wehner MF, Westra S, Whitford A. 2021. Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2195): 1–22. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0542>.
- Gumbel EJ. 1958. *Statistics of extremes*. Columbia University Press: New York.
- Hosking JRM. 1990. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics Author (s): J . R . M . *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 52(1): 105–124.
- Hosking JRM, Wallis JR. 1997. *Regional frequency analysis - An Approach Based on L-moments*. Cambridge University Press.
- JICA, COMITRAN, SIECA. 2021. Manual de consideraciones técnicas, hidrológicas e hidráulicas. , II Edición.
- Langbein WB. 1949. Annual floods and the partial-duration flood series. *Transactions American Geophysical Union*, 30(6): 879–881. <https://doi.org/10.1029/TR030i006p00879>.
- Nathan R, Stephens D, Smith M, Jordan P, Scoriah M, Shepherd D, Hill P, Syme B. 2016. Impact of natural variability on design flood flows and levels. 37th *Hydrology and Water Resources Symposium 2016: Water, Infrastructure and the Environment, HWRS 2016*, 2016-Novem: 1–11.

Nathan R, Weinmann PE. 2019. Estimation of Very Rare to Extreme Floods. In: Ball J, Babister M, Nathan R, Weeks W, Weinmann E, Retallick M and Testoni I (eds) *Australian Rainfall and Runoff - A Guide to Flood Estimation*. Commonwealth of Australia (Geoscience Australia).

Singh VP. 2016. *Handbook of Applied Hydrology*. .

Svensson C, Jones DA. 2010. Review of rainfall frequency estimation methods. *Journal of Flood Risk Management*, 3(4): 296–313. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01079.x>.

Vesuviano G, Hydrology UKC for E&. 2022. The FEH22 rainfall depth duration-frequency (DDF) model. .

Villalobos Herrera R, Blenkinsop S, Guerreiro SB, Dale M, Faulkner D, Fowler HJ. 2023a. Towards new design rainfall profiles for the United Kingdom. *Journal of Flood Risk Management*, (October): 1–16. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12958>.

Villalobos Herrera R, Blenkinsop S, Guerreiro SB, Fowler HJ. 2023b. The creation and climatology of a large independent rainfall event database for Great Britain. *International Journal of Climatology*, (July): 1–18. <https://doi.org/10.1002/joc.8187>.

Wasko C, Westra S, Nathan R, Orr HG, Villarini G, Villalobos Herrera R, Fowler HJ. 2021. Incorporating climate change in flood estimation guidance. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2195): 20190548. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0548>.

# LanammeUCR

Laboratorio Nacional de  
**Materiales y Modelos Estructurales**



## Revisor:

- Ing. Luis Paulino Rodríguez Solano  
**Auditor Técnico**  
**Unidad de Auditoría Técnica**

## CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

**Diagramación:** MSc. Daniela Martínez Ortiz. Cianny Solórzano Mayorga.

**Control de calidad:** Óscar Rodríguez Quintana.

Fundamentos de análisis de valor extremo y riesgo para hidrología vial

Palabras clave: Hidrología vial, estimación de crecientes, frecuencia y riesgo de excedencia, valores extremos, modelado estadístico.

☎ (506) 2511- 2500

✉ [direccion.lanamme@ucr.ac.cr](mailto:direccion.lanamme@ucr.ac.cr) • [www.lanamme.ucr.ac.cr](http://www.lanamme.ucr.ac.cr)