

Aplicación de una nueva metodología para mejorar la estimación de las frecuencias de inundación en Calle 30 (Madrid)

Application of a new methodology to improve the estimation of flood frequencies in Calle 30 (Madrid)

Salvador Navas ^{a1*}, Manuel del Jesus ^{a2}, Jaime Martín ^{b1}, Pablo Sánchez ^{b2}

^a IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, España.

^b Ferrovial. Calle Ribera del Loira, 42, 28042, Madrid, España.

E-mail: ^{a1*} salvador.navas@unican.es, ^{a2} manuel.deljesus@unican.es, ^{b1} jmalfageme@ferrovial.com, ^{b2} p.sanchezgomez@ferrovial.com

*Autor para correspondencia

Recibido: 21/08/2024

Aceptado: 11/10/2024

Publicado: 31/10/2024

Citar como: Navas, S., del Jesus, M., Martín, J., Sánchez, P. 2024. Application of a new methodology to improve the estimation of flood frequencies in Calle 30 (Madrid). *Ingeniería del agua*, 28(4), 263-279. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.22293>

RESUMEN

Las inundaciones son una de las catástrofes naturales más comunes a nivel mundial, y acarrearán impactos socioeconómicos severos, incluyendo la pérdida de vidas humanas. Este estudio evalúa la respuesta hidráulica del entorno de la autopista M-30 de Madrid contra eventos de inundación extremos del río Manzanares mediante el uso de una metodología de análisis multivariante. La comparación de los resultados obtenidos a través de esta nueva metodología con los derivados del enfoque tradicional, basado en estadística univariada y sin usar generación sintética, resalta la limitación de los métodos convencionales para estimar periodos de retorno. Esto enfatiza la necesidad de integrar nuevos enfoques en el diseño de infraestructuras para gestionar de manera más efectiva su respuesta frente a inundaciones.

Palabras clave | geoestadística; minería de datos; regresión probabilística; diseño de infraestructuras; simulación sintética; inundación.

ABSTRACT

Floods are among the most common natural disasters globally, causing severe socioeconomic impacts, including the loss of human life. This study evaluates the hydraulic response of the M-30 highway surroundings in Madrid to extreme flood events from the Manzanares River using a multivariate analysis methodology. The results obtained from this new methodology are compared with those derived from traditional approaches, which rely on univariate statistics and do not employ synthetic event generation. The comparison reveals significant limitations of conventional methods in accurately estimating return periods, particularly for extreme flooding events. This emphasizes the importance of incorporating advanced techniques, such as synthetic event generation, into the design of infrastructures to enhance resilience and ensure more effective flood management. The study highlights the need for a shift in flood risk assessment practices to better account for increasing variability and intensity of flood events due to climate change and evolving environmental conditions.

Key words | data mining; probabilistic regression; infrastructure design, synthetic simulation; floods.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son el desastre natural que se manifiesta con mayor frecuencia en España, dando lugar a graves situaciones de riesgo colectivo incluyendo la pérdida de vidas humanas. Según el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, los daños por inundaciones a nivel nacional se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales (Barredo *et al.*, 2012; Martínez-Gomariz *et al.*, 2020). Además, se calcula que, en los últimos veinte años, aproximadamente 1500 personas perdieron la vida debido a inundaciones (Cortès *et al.*, 2018). Para hacer frente a estos efectos devastadores, es esencial llevar a cabo estudios preventivos que integren mapas de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.

La metodología tradicional empleada para caracterizar el riesgo de inundación de una zona tiene como objetivo calcular la magnitud de una inundación tomando como datos de partida los hietogramas asociados a distintos períodos de retorno. Estos períodos de retorno son obtenidos a partir de la estadística de extremos de la precipitación máxima, asociando el mismo período de retorno al caudal máximo resultante (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). Como ya han indicado varios autores, el problema de utilizar esta metodología surge al no incluir en los análisis variables que pueden afectar a la respuesta de la cuenca (Castellarin *et al.*, 2001; de Lima y Singh, 2002; Brunner *et al.*, 2020; Viglione *et al.*, 2013; Kimura *et al.*, 2020). Factores como la saturación del suelo en diferentes áreas, la distribución espacial de la precipitación o la forma del hidrograma resultante, no se tienen en cuenta adecuadamente. Esta falta de consideración de variables clave puede llevar a una subestimación del riesgo real de inundación y consecuentemente del diseño de las infraestructuras, poniendo en peligro su respuesta frente a eventos extremos.

Al integrar estos factores en la evaluación mediante técnicas de generación sintética de eventos y estableciendo relaciones probabilísticas, se logra proporcionar una visión más holística y precisa del riesgo de inundación, fundamental para la planificación urbana y el diseño de infraestructuras. En esta línea, y basándose en la metodología de análisis multivariante desarrollada por IH Cantabria (Navas *et al.*, 2017, 2018), este estudio presenta un caso práctico que mejora la estimación de los períodos de retorno de inundaciones de dos zonas de la autopista M-30 de Madrid (España), en su tramo que discurre paralelo al río Manzanares. La M-30 es una de las vías más concurridas de la capital de España y una de sus principales vías de comunicación. Se estima que existen más 1.5 millones de trayectos al día (Emesa M-30, 2024; Ferrovial, 2024) y cualquier interrupción de la vía debido a inundaciones tendría resultados catastróficos para la ciudad y su economía. Un claro ejemplo de ello ocurrió en 2015, cuando las fuertes lluvias provocaron la inundación de varios túneles de la M-30, lo que llevó a cortes prolongados de tráfico. Esta interrupción no solo afectó la movilidad urbana, sino que también causó pérdidas económicas debido a la reducción del acceso a servicios, retrasos en la distribución de mercancías y el impacto en la productividad diaria. Por ello, es esencial comprender con precisión su respuesta a eventos de inundación de baja frecuencia adoptando métodos más avanzados y precisos.

OBJETIVOS

Los objetivos perseguidos en este estudio son:

- Estudio hidro-climatológico de la cuenca del río Manzanares.
- Estudio hidráulico del río Manzanares en su tramo paralelo a la M30.
- Generación sintética de eventos de precipitación en las distintas estaciones pluviométricas a partir de métodos de clasificación y regresión probabilística.
- Selección de eventos sintéticos para la simulación hidrológica e hidráulica.
- Reconstrucción de los niveles de inundación producidos por los eventos sintéticos generados.
- Comparativa de las inundaciones producidas con la metodología tradicional actualizando la serie de datos meteorológicos.
- Comparativa de las inundaciones producidas con la metodología tradicional y la metodología propuesta.

ÁREA DE ESTUDIO Y FUENTES DE DATOS

Área de estudio

El caso de estudio se centra en el análisis de la respuesta de la autopista M-30 de Madrid frente a las crecidas del río Manzanares. Más concretamente, en el tramo del anillo de circunvalación que discurre paralelo al río, comenzando en el “Puente del Rey” y finalizando 700 m aguas abajo del “Puente de La Princesa”. Tramo que fue afectado por las obras de soterramiento realizadas en 2007. De acuerdo con los estudios del proyecto de soterramiento, en este tramo existen dos puntos vulnerables frente eventos extremos de inundación: la canalización en la zona del Puente de Toledo y la sección aguas arriba de la represa N° 9. La respuesta de la infraestructura en estas dos zonas es donde se ha centrado el estudio. En la Figura 1 se muestra la localización de los principales puntos de interés del estudio.

La M-30 es una de las carreteras más concurridas de Madrid, con niveles de tráfico que alcanzan los 430 millones de vehículos al año (Emesa M-30, 2024). Una auténtica vía de peregrinación para todo trabajador o turista que quiere atravesar la capital de España. Desde 2007, la autopista cuenta con un sistema de dos túneles que discurren paralelos al río Manzanares, en lo que actualmente se conoce por el nombre de “Calle 30”. Si se observa la configuración del túnel incluida en la Figura 1, se puede apreciar como cualquier desbordamiento del río produciría una inundación de los túneles a través de sus respiraderos.

Para evitar que eventos de baja frecuencia afectaran a los túneles, un complicado sistema de bombas, muros de contención, instalaciones de aguas pluviales y defensas contra inundaciones fue implementado en el diseño original de las obras de soterramiento. Calle 30 es segura frente a la tormenta de 500 años asumiendo un análisis tradicional con caudal máximo de 550 m³/s y asumiendo que el sistema de embalses Santillana-El Pardo no laminan ni protegen a Madrid en caso de eventos extremos. Tras más de 15 años desde su inauguración y 20 años desde la finalización del diseño, este estudio pretende analizar nuevamente la respuesta de la infraestructura contra eventos de baja frecuencia, ¿qué pasaría si introducimos 20 años más de datos en el análisis? ¿qué pasaría si le incluimos más variables al estudio inicial? ¿se puede asegurar que los túneles siguen siendo seguros para tormentas de 500 años de período de retorno?

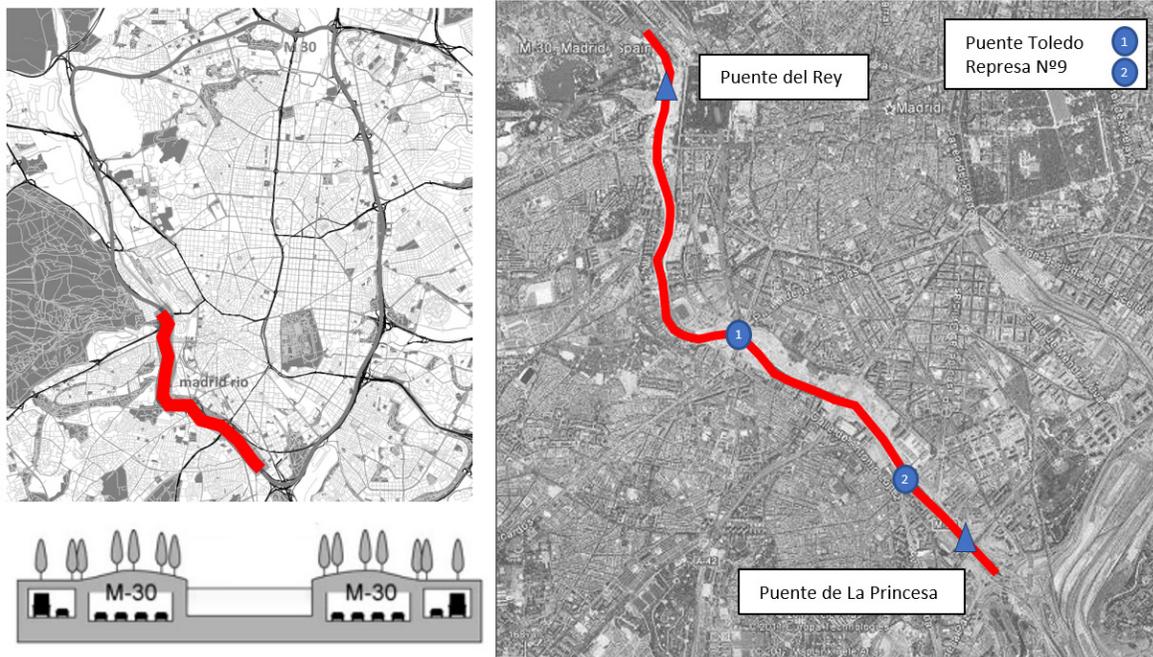


Figura 1 | Localización del estudio. Calle 30 (Madrid).

Información disponible

Para el desarrollo del estudio se ha hecho uso de:

- Modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del río Manzanares correspondiente al proyecto de diseño del soterramiento de la M-30 proporcionado por MADRID CALLE 30 S.A.
- Modelo hidráulico HEC-RAS 1D del río Manzanares correspondiente al proyecto de diseño del soterramiento de la M-30 proporcionados por MADRID CALLE 30 S.A.
- Datos pluviométricos quince-minutales de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) y datos pluviométricos horarios del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).

METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio se basa en la propuesta de Navas *et al.* (2017, 2018), adaptada para utilizar series de precipitación horarias provenientes de las estaciones meteorológicas de la cuenca. La disponibilidad de esta información horaria permite caracterizar de manera detallada los hietogramas de los eventos de tormenta registrados en cada pluviómetro, lo que es fundamental para comprender la dinámica de los eventos de precipitación y su impacto en la cuenca. Además, el hecho de contar con datos simultáneos de todas las estaciones permite analizar las dependencias entre los diferentes eventos registrados, lo cual es clave para la calibración del generador estocástico empleado en este estudio.

Un generador estocástico es una herramienta matemática que genera series sintéticas de eventos basándose en distribuciones de probabilidad y patrones observados en los datos reales. En este caso, el generador estocástico se implementó utilizando cópulas gaussianas a través de la librería OpenTURNS (Baudin *et al.*, 2016). Para el uso del generador sintético, se transformaron los estadísticos de cada evento de precipitación, tales como la precipitación media, la precipitación máxima, la duración del evento y el tipo de hidrograma. Estos estadísticos fueron ajustados a distribuciones marginales, permitiendo su transformación en probabilidades (valores entre 0 y 1) para su uso en la cópula. La cópula modela las dependencias entre estos estadísticos transformados de los eventos de precipitación, y no entre los valores originales de las series., lo que asegura la creación de eventos sintéticos realistas.

Una vez que la cópula genera valores aleatorios (probabilidades) para los estadísticos de cada evento de precipitación, estos se convierten a sus respectivas distribuciones marginales originales. Esto permite que los eventos sintéticos mantengan las características estadísticas observadas en los datos reales, tales como la precipitación media, máxima, duración del evento y el tipo de hidrograma. De esta manera, los eventos generados reflejan tanto las dependencias modeladas por la cópula como las características individuales de cada evento.

Finalmente, tras la generación de los eventos sintéticos, se seleccionan los eventos más representativos para ser simulados dinámicamente en modelos hidrológicos e hidráulicos. El modelo hidrológico utilizado es el HEC-HMS, que transforma los eventos de precipitación en caudales. Posteriormente, se emplea el modelo hidráulico HEC-RAS para calcular las cotas de inundación asociadas a los eventos seleccionados.

Para los eventos no simulados directamente, se utilizan técnicas de aprendizaje automático que permiten estimar las cotas de inundación y caudales a partir de los eventos simulados. Finalmente, se lleva a cabo un análisis de extremos sobre las series temporales de las cotas de inundación para estimar los valores asociados a diferentes periodos de retorno.

La Figura 2 proporciona un esquema detallado de la metodología seguida en este estudio. En ella se pueden observar los distintos pasos del proceso, desde la separación de eventos de precipitación hasta el cálculo final de las cotas de inundación para diferentes periodos de retorno, lo que facilita una mejor comprensión del enfoque metodológico desarrollado.

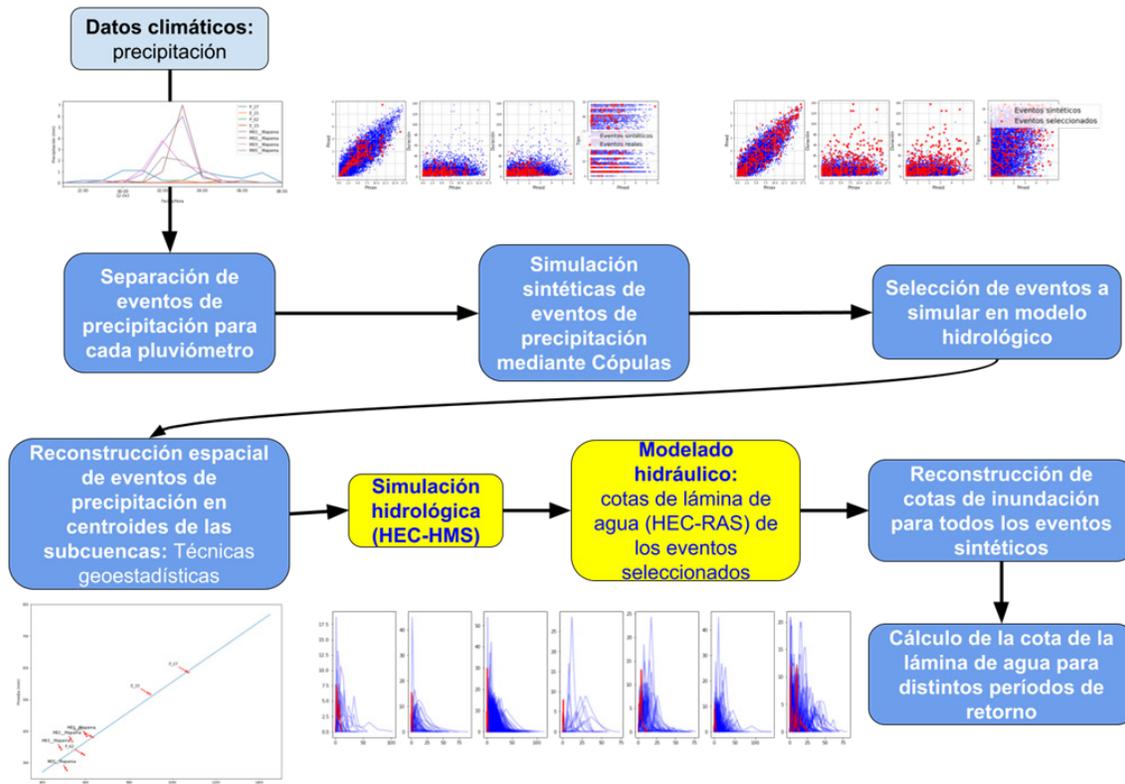


Figura 2 | Esquema de la metodología aplicada.

Análisis de la precipitación

En este estudio el análisis principal se realiza sobre la precipitación, ya que es la variable meteorológica que mayor influencia tiene sobre los episodios de inundación.

Tal como se describe en el apartado *Información disponible*, los datos de precipitación proporcionados cuentan con una resolución temporal adecuada para este estudio, lo que permite un análisis detallado de los eventos de lluvia en la cuenca.

En cuanto a la disponibilidad y calidad de los datos, los pluviómetros utilizados en este estudio cubren principalmente el periodo entre 2002 y 2021, con algunos registros adicionales desde 2003 o 2005 hasta 2020. En total, las estaciones analizadas ofrecen entre 16 y 20 años de datos completos, con un porcentaje de huecos mínimo, inferior al 6.5% en los casos más desfavorable. Con esta resolución temporal es posible aplicar una metodología como la que se propone en este estudio ya que permite identificar de forma detallada cómo son los eventos de lluvia en el tiempo.

En la Figura 3 se muestra la localización de los pluviómetros disponibles para este estudio.

Para el análisis de la precipitación se han utilizado los datos de 17 estaciones meteorológicas. El criterio de selección es por localización cercana a la cuenca de estudio, disponer de un porcentaje de huecos bajo y tener una longitud temporal de más de 15 años. Además, se incluyeron estaciones ubicadas fuera de la cuenca con el fin de complementar la representatividad espacial de los datos, especialmente en áreas con baja densidad de estaciones internas. Estas estaciones externas, al compartir condiciones topográficas y meteorológicas similares, permiten una mejor caracterización de los patrones de precipitación. Los datos obtenidos de estas estaciones serán utilizados para la reconstrucción espacial de la precipitación mediante métodos geoestadísticos, como kriging (Wackernagel, 1995), que permiten estimar la distribución de la precipitación en áreas no instrumentadas con base en la correlación espacial entre los puntos de medición. Este enfoque no solo mejora la precisión del análisis hidrológico, sino que

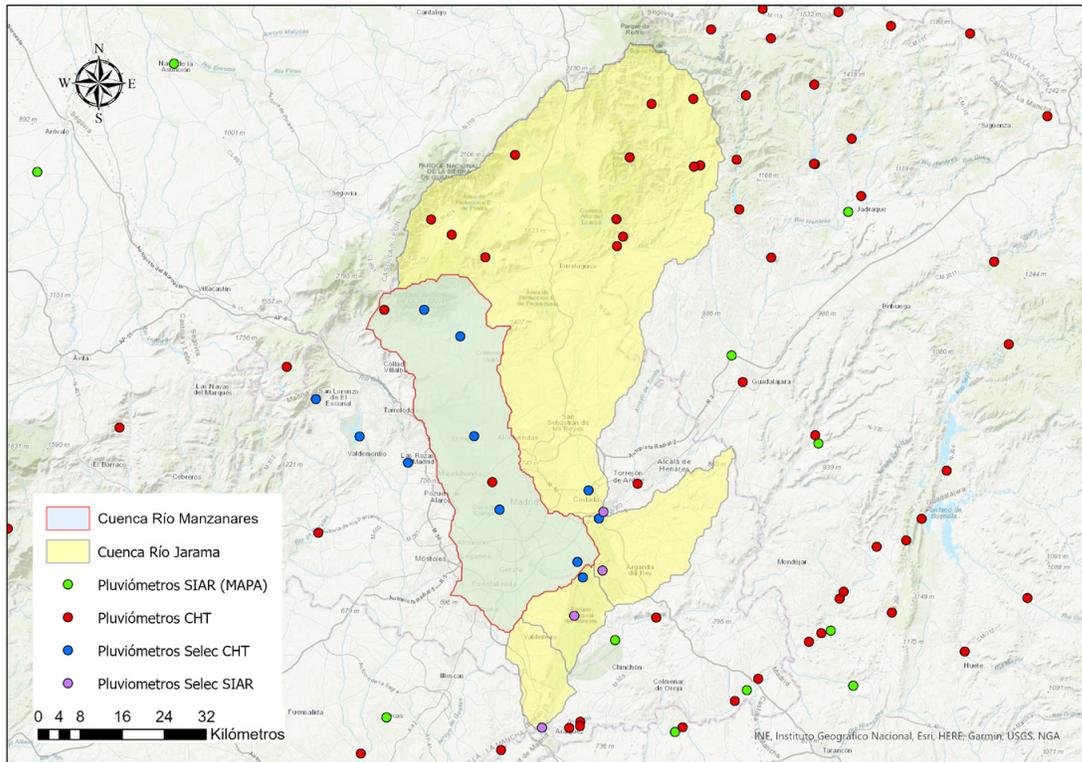


Figura 3 | Pluviómetros utilizados.

también optimiza la interpretación de los datos, brindando una cobertura más homogénea en toda la cuenca (Leach *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015).

Antes de realizar cualquier tipo de uso de los datos de precipitación, se ha llevado a cabo un control de calidad homogenización de los datos de partida. El objetivo de dicho proceso es el de garantizar que las series de tiempo de las distintas estaciones efectivamente representen señales asociadas al sistema climático en la zona correspondiente, y no a otros factores (p.ej. errores del sensor, humanos, desplazamiento de la estación, cambio del medio circundante a la estación, etc.).

El proceso es el siguiente:

1. Eliminación de *outliers*: los *outliers* son observaciones que se desvían mucho de otros registros, lo que despierta sospechas de constituir errores en la toma de los datos. Para definir estos puntos atípicos, se ha tomado como criterio aquellos que superan 5 veces la varianza de la muestra (Parra-Plazas *et al.*, 2023; Golkhatmi y Farzandi, 2024).

$$\text{Si } X_i > 5 \sigma_n^2 \text{ es un outlier} \quad (1)$$

Siendo $\sigma_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$, X_i cada uno de los datos, n el número de datos y \bar{X} la media de los datos.

2. Eliminación de datos consecutivos repetidos: este control intenta detectar secuencias de valores repetidos a lo largo de varios días consecutivos. La persistencia del mismo valor puede sugerir errores de transcripción o problemas en el caso de instrumentos con registro electrónico de datos, por ejemplo, en estaciones meteorológicas automáticas (Estévez *et al.*, 2011).

En la metodología que se desarrolla en este trabajo es necesario reconstruir espacialmente los eventos de precipitación en puntos donde no se tiene dato por esta razón se evalúa cual es la relación existente entre la altitud a la que se encuentra las estaciones meteorológicas y la precipitación media anual, para determinar si es posible utilizar técnicas geoestadísticas de interpolación, en los que una covariable como la altitud pueda añadir información de cómo se distribuye la precipitación de forma espacial. En la Figura 4 se observa que en esta zona existe una relación significativa entre la precipitación y la altitud por lo que se podrá utilizar esta variable para la interpolación espacial de la precipitación.

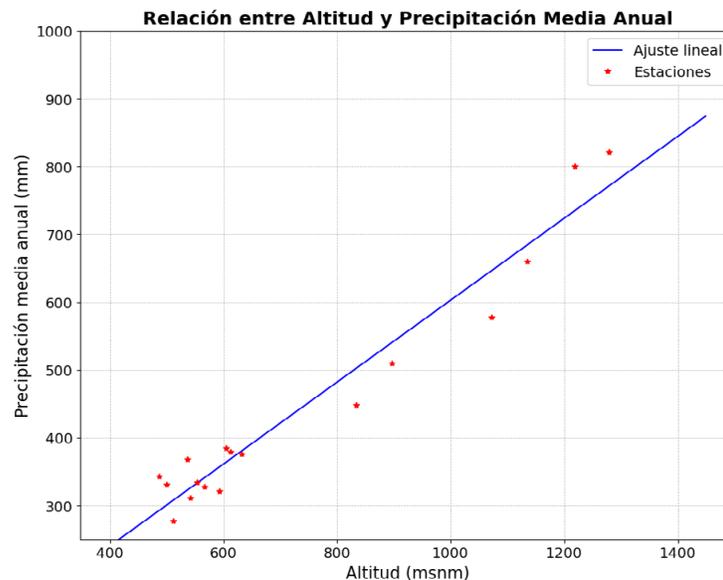


Figura 4 | Relación entre la precipitación media anual y la altitud.

Separación de eventos de precipitación

Después de haber realizado el análisis de calidad de las estaciones pluviométricas seleccionadas se procede a realizar la separación de las series en eventos de precipitación. Para ello es necesario definir un umbral a partir del cual se considera un evento de precipitación, en este estudio se ha considerado como umbral 5 mm de precipitación máxima, cantidad que pueden ser significativos en ciertos contextos, como en la generación de eventos de inundación o en la identificación de eventos de precipitación extrema (González-Rouco *et al.*, 2001). Establecido el umbral, es necesario recurrir a operaciones matemáticas sencillas y de técnicas de lenguaje de programación basadas en bucles condicionales. En este proceso de cálculo son obtenidos los instantes iniciales y finales de cada uno de los eventos que cumplen que la precipitación máxima se encuentra por encima del umbral establecido. Debido a que la precipitación se comporta espacialmente de forma desigual, una vez identificado el evento en un pluviómetro es necesario extraer que ocurre en las demás estaciones en ese período de tiempo. Como el pico de precipitación no se produce de forma simultánea en todas las estaciones es necesario identificar el inicio y final del paso de la tormenta por todos ellos. En total se obtienen 1761 eventos.

Para poder generar eventos sintéticos a partir de datos reales, es necesario clasificar los eventos reales en grupos atendiendo a varios parámetros descriptivos como son:

- Precipitación Máxima (Pmax).
- Precipitación media (Pmed).
- Duración (T).
- Tipo o forma del hietograma (Tipe).

Para identificar qué tipo de hietograma es necesario realizar una clasificación inicial por tipos de hidrograma según su forma. Cada uno de los hidrogramas que definen los eventos obtenidos de la separación, se discretizan en 100 partes y se aplican los siguientes algoritmos:

- Método de las componentes principales (PCA): permite reducir el número de dimensiones de la matriz capturando la varianza inicial de la serie de datos (Smith, 2002).
- Algoritmo K-Means: clasifica los eventos en un determinado número de grupos que se considere representativo, en este caso 100 (Camus *et al.*, 2011).

El proceso de clasificación es el siguiente, una vez realizado la dimensionalización por el método de la PCA (Tipping y Bishop, 1999), se ejecuta el algoritmo de *K - Means* (Lloyd, 1982) implementado en el paquete *Sklearn* de Python para obtener la clasificación por tipos de hietograma. En la Figura 5 se muestra la clasificación realizada.

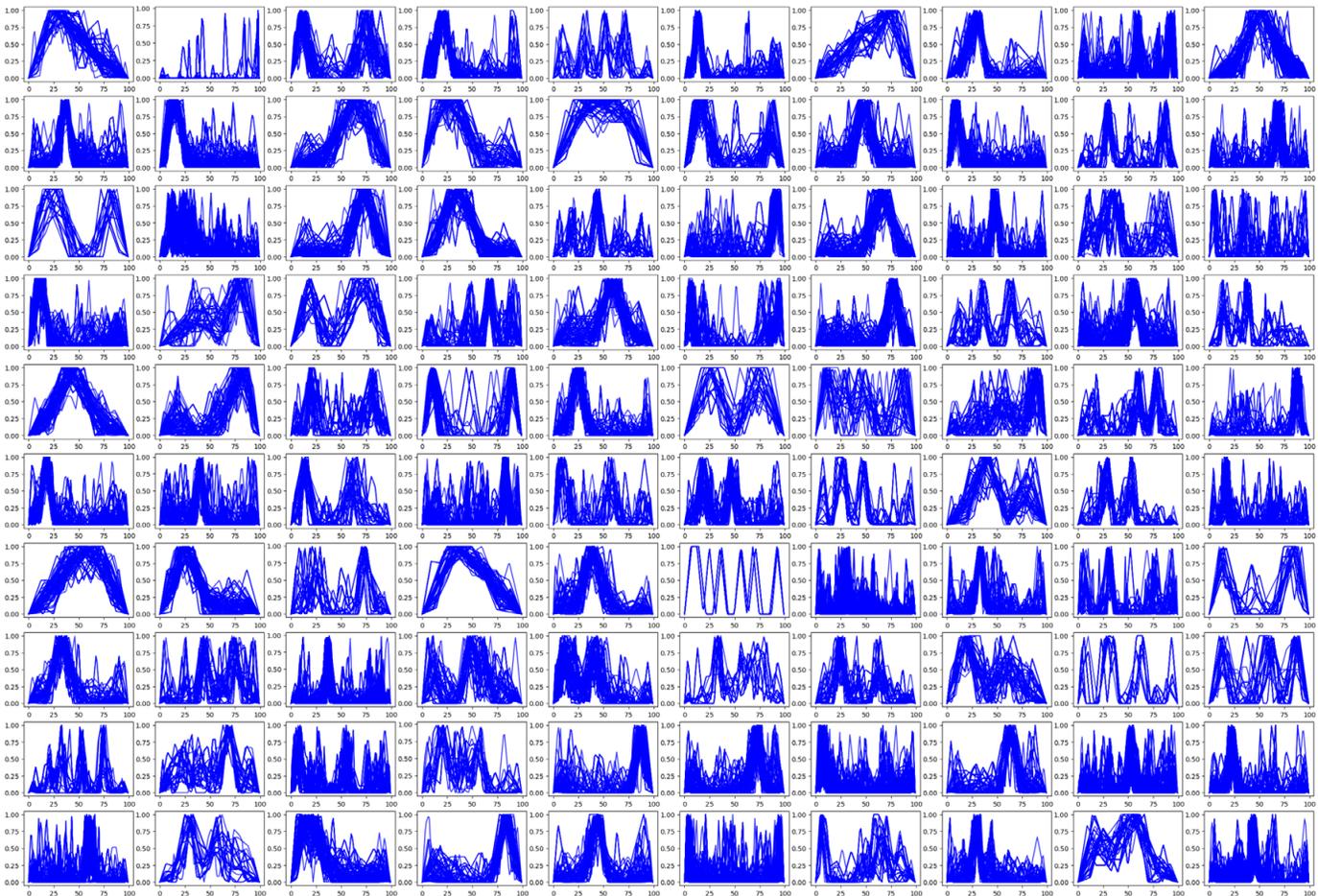


Figura 5 | Clasificación de hietogramas según su forma.

Para poder generar eventos sintéticos a partir de los datos de precipitación reales, primero es necesario agrupar los eventos observados en función de sus características principales. En este caso, se han identificado un total de 1761 eventos de precipitación, los cuales se describen utilizando los cuatro parámetros descritos anteriormente. Estos 1761 eventos se agrupan en 100 categorías representativas, obtenidas mediante la aplicación del algoritmo *K-Means* después de la reducción dimensional realizada con PCA. La agrupación de los eventos en 100 tipos se justifica por la necesidad de equilibrar la representatividad

de los eventos con la simplificación del análisis. Este número de categorías es lo suficientemente grande como para capturar la variabilidad en términos de intensidad, duración y distribución de la precipitación, sin perder información importante, pero también es lo suficientemente pequeño como para facilitar el manejo computacional y el análisis posterior. Además, agrupar en 100 tipos permite preservar las relaciones espaciales y temporales de los eventos de precipitación, asegurando una representación adecuada para su uso en simulaciones y modelos hidrológicos complejos, como los basados en cópulas gaussianas.

Es importante destacar que la clasificación se realiza teniendo en cuenta los 4 parámetros de cada uno de los 17 pluviómetros, en total 68, generando así una matriz de dimensión 1761×68 . Esta matriz, que agrupa los eventos en función de sus características y similitudes, se utiliza en la siguiente fase del análisis para representar de manera eficaz los tipos de eventos de precipitación observados en el estudio.

Simulación sintética de eventos de precipitación

Una vez separados los eventos de la serie de precipitación y clasificados según su forma, es necesario generar eventos sintéticos. Esto, va a permitir obtener toda una serie de eventos probables simultáneos en los 17 pluviómetros caracterizados por los 4 parámetros definidos anteriormente. La generación de eventos sintéticos se realiza a través del método de regresión probabilística mediante cópulas Gaussianas que son capaces de guardar la correlación existente entre los cuatro parámetros seleccionados y la correlación espacial entre los pluviómetros seleccionados (Ben Alaya *et al.*, 2014).

Las funciones de distribución marginal se utilizan como entradas a la cópula y éstas pueden ser cualquier conjunto de distribuciones dispares. En este trabajo se ha analizado cual es la función de distribución que mejor define cada una de las variables.

Una vez introducidas en la cópula las diferentes probabilidades obtenidas a partir de la función de distribución, es necesario establecer el número de eventos sintéticos que se quieren generar. En este estudio se simulan 1 millón de eventos para poder tener bien representada la distribución de eventos para los 17 pluviómetros. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de los eventos generados mediante cópulas de uno de los 17 pluviómetros analizados.

Puesto que el número de eventos sintéticos generados es grande y no pueden simularse mediante el modelado hidrológico e hidráulico cada uno de los eventos, es necesario seleccionar un número más reducido asegurando que el conjunto de eventos sintéticos seleccionados recoge una muestra representativa del conjunto de datos probables. Esta selección se lleva a cabo mediante el método MaxDiss (Camus *et al.*, 2011). En total se seleccionan 625 eventos sintéticos para realizar la simulaciones hidrológicas e hidráulicas. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de los eventos seleccionados en el pluviómetro P27.

Reconstrucción espacio temporal de los eventos sintéticos seleccionados

Una vez seleccionados los eventos sintéticos, es necesario reconstruir los hidrogramas en función de los cuatro parámetros que lo definen (P_{max} , P_{med} , T y Tipo de hietograma). El primer objetivo es dar la forma del hidrograma tipo al evento sintético. Para reconstruir los hidrogramas de cada evento atendiendo a su forma y que los parámetros P_{med} , P_{max} y T sigan caracterizando a cada uno de ellos, se recurre a técnicas de ajuste mediante polinomios de grado 2 definido en (Navas *et al.*, 2017). En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la reconstrucción de hietogramas sintéticos según su tipo.

Simulación de los eventos seleccionados

Una vez han sido seleccionados los eventos sintéticos más disimilares y reconstruido el hietograma asociado, se procede a realizar la simulación hidrológica e hidráulica partiendo de los modelos del proyecto original del soterramiento de la M-30. Para esta modelización se seleccionan 625 hietogramas diferentes que resultan en 625 caudales máximos y sus correspondientes 625 cotas de agua para cada una de las dos zonas de estudio - aguas arriba del “Puente de Toledo” y aguas arriba de la “represa N°9”. La Figura 9, nos muestra un esquema básico del flujo de trabajo seguido para la simulación de eventos.

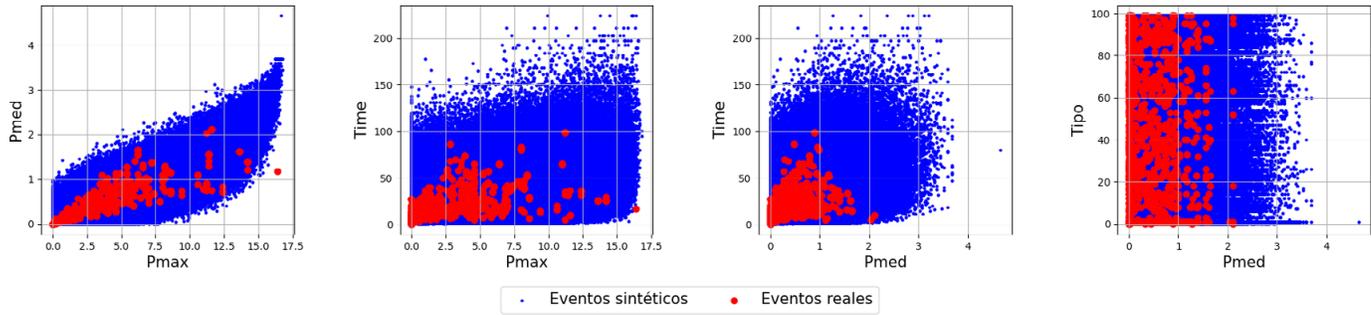


Figura 6 | Eventos sintéticos generados.

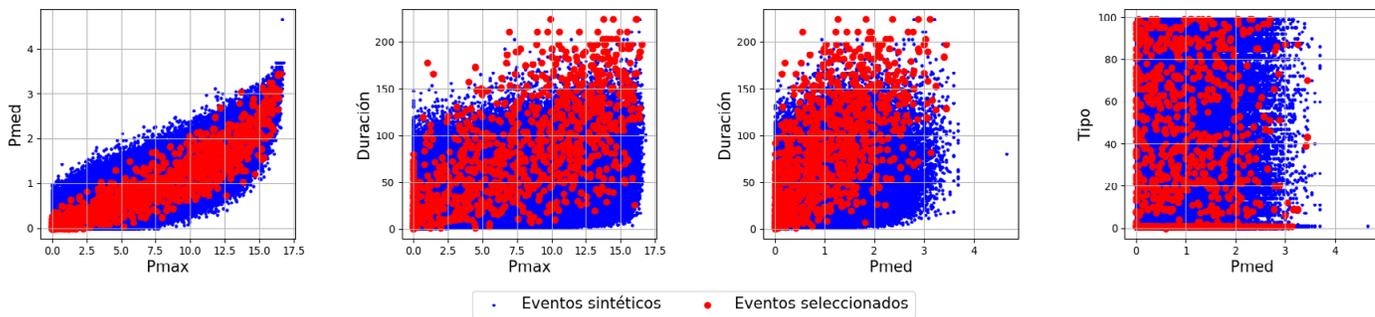


Figura 7 | Selección de eventos sintéticos.

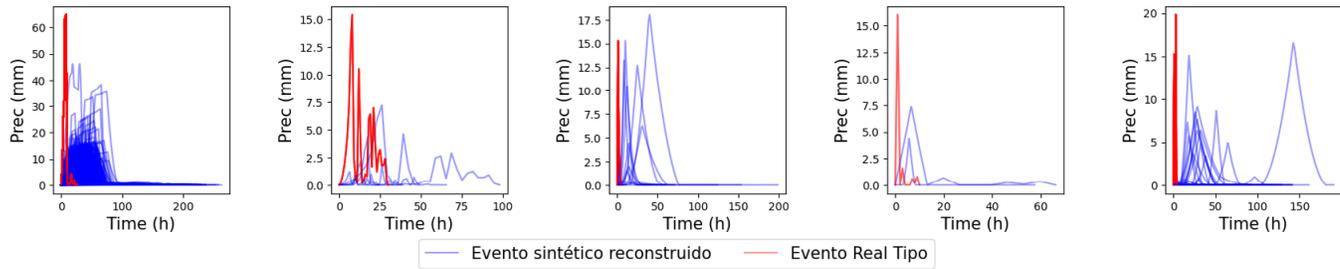


Figura 8 | Ejemplo reconstrucción de hietogramas sintéticos según su tipo.

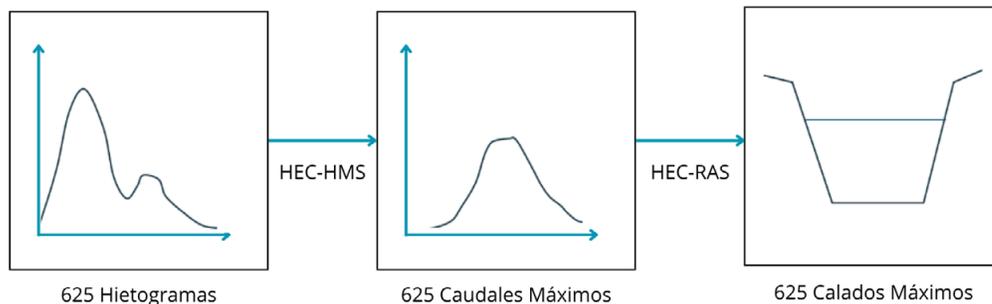


Figura 9 | Esquema de simulación de eventos.

Para poder hacer una comparativa de resultados entre la metodología tradicional y la metodología descrita en este trabajo, se asumen los mismos parámetros hidrológicos que el modelo original del proyecto de diseño de los túneles. La hidrología de este estudio, por tanto, no captura ninguno de los desarrollos que han ocurrido a lo largo de la cuenca del Río Manzanares en los últimos 20 años. De la misma forma, siguiendo el planteamiento original, se suprime la capacidad laminadora del sistema de embalses Santillana-El Pardo. Es decir, se asume que las elevaciones de la superficie del agua en ambas presas se encuentran en la elevación del aliviadero cuando llega la tormenta. Esto nos da una idea conservadora de los caudales que puede llevar el Río Manzanares a lo largo de la zona de estudio.

Para poder simular la hidrología de la cuenca del Manzanares, es necesario realizar primero una reconstrucción espacial de los eventos en los centroides de las subcuencas del modelo original. Para ello se utiliza la técnica geostatística Ordinary Kriging (Wackernagel, 1995). Una vez reconstruidos los eventos de precipitación se realizan las simulaciones hidrológicas mediante el modelo HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2018), obteniéndose como resultado las series de caudal correspondiente a cada uno de los eventos.

Tras simular todos los eventos se procede a realizar la simulación hidráulica a través del modelo HEC-RAS 1D (Brunner *et al.*, 2023) manteniendo caudal uniforme equivalente al caudal máximo. Nuevamente, para poder llevar a cabo una comparativa de ambas metodologías, se parte de la geometría del modelo proyecto de diseño original.

Es importante aclarar que, aunque se dispone de una curva de caudales de avenida completa, para la simulación hidráulica en HEC-RAS se ha utilizado únicamente el caudal máximo bajo la premisa de un flujo constante (“steady flow”). Esta decisión se ha tomado debido a que el modelo HEC-RAS 1D, sin áreas de almacenamiento definidas, no producirá laminación de caudales, y por lo tanto la simulación del caudal máximo proporciona una aproximación conservadora para evaluar los niveles de agua en las secciones de interés. Este enfoque es coherente con el objetivo del estudio, que busca comparar los resultados de la metodología tradicional con la descrita en este trabajo, utilizando los mismos parámetros hidrológicos y condiciones geométricas que el modelo original de diseño de los túneles.

Una vez simulados todos los eventos seleccionados, se obtienen los calados correspondientes a cada una de las secciones de interés: aguas arriba del “Puente de Toledo” y aguas arriba de la “represa N°9”. Se adquieren, por tanto, 625 calados en cada una de las secciones.

Reconstrucción de los calados

Para estimar la respuesta de Calle 30 frente a crecidas del Río Manzanares, se reconstruyen el resto de los eventos sintéticos generados a partir de los calados obtenidos mediante el modelo hidráulico. Esto nos permite generar miles de caudales y sus respectivas cotas de agua en las dos zonas de estudio, y consecuentemente, estimar un periodo de retorno específico para cada nivel de agua en el río. Dado que solo se han simulado directamente 625 eventos, tanto sus caudales como sus calados, pero disponemos de miles de eventos sintéticos adicionales para los cuales no se ha simulado el caudal, es necesario utilizar una técnica de interpolación para estimar los calados de esos eventos no simulados. Para este propósito, se utiliza la interpolación de distancia inversa de los k vecinos más próximos (Larose, 2004). Esta interpolación se realiza en función de los cuatro parámetros que caracterizan cada evento en cada pluviómetro: precipitación máxima (P_{max}), precipitación media (P_{med}), duración (T), y tipo o forma del hietograma ($Tipe$). Estos cuatro parámetros definen cada evento, y son utilizados para encontrar los dentro del conjunto de 625 eventos con datos conocidos (simulados) más cercanos a cada uno de los eventos sintético generado mediante cópulas. Según lo establecido en (Navas *et al.*, 2018) el número óptimo de vecinos cercanos se establece en 6.

Además, para cada sección, se aplica estadística de extremos utilizando la función de distribución empírica para estimar el calado y el caudal asociados a un periodo de retorno determinado. La probabilidad acumulada de excedencia para un valor $X < x_i$ se calcula como:

$$Prob(X < x_i) = \frac{i}{N + 1} \quad (2)$$

Donde i representa el número de orden que ocupa el valor x en la serie de datos ordenada en orden creciente y N el número total de datos. La posición asociada a un periodo de retorno determinado es calculada a través de la siguiente expresión:

$$i \cong N\left(1 - \frac{1}{\lambda T}\right) \quad (3)$$

Siendo λ el número de eventos por año que se producen, obtenido a partir de la separación de eventos.

RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, es esencial comprender con precisión la frecuencia a la que se desborda el cauce del río Manzanares ya que será esta la cota a la que empiecen a producirse las inundaciones de los túneles a través de los respiraderos. Como parte del proyecto de soterramiento de la M-30, se realizó una recanalización en el río para mitigar los efectos de eventos extremos y su afección a los túneles. Este perfilamiento del Manzanares permite evacuar un caudal de 550 m³/s correspondiente a lo que se estimó en el diseño como una avenida de 500 años de periodo de retorno.

Siguiendo las bases de diseño originales, las Tabla 1 y Tabla 2 muestran los caudales y calados obtenidos utilizando el caudal asociado al período de retorno de 500 años con la metodología tradicional y datos de precipitación actualizados, y los caudales y calados obtenidos utilizando la metodología desarrollada. La Figura 10, nos muestra gráficamente las diferencias de calado obtenidas justo aguas arriba del Puente de Toledo.

Tabla 1 | Resultados de calado y caudal para un periodo de retorno de 500 años en la sección de aguas arriba del Puente de Toledo.

	Proyecto Original	Metodología Tradicional	Metodología Desarrollada
Caudal (m ³ /s)	550.0	576.1	739.0
Calado aguas arriba (m)	6.6	6.8	9.1

Tabla 2 | Resultados de calado y caudal para un periodo de retorno de 500 años en la sección de aguas arriba de la represa N° 9.

	Proyecto Original	Metodología Tradicional	Metodología Desarrollada
Caudal (m ³ /s)	550.0	576.1	739.0
Calado aguas arriba (m)	6.2	6.6	8.9

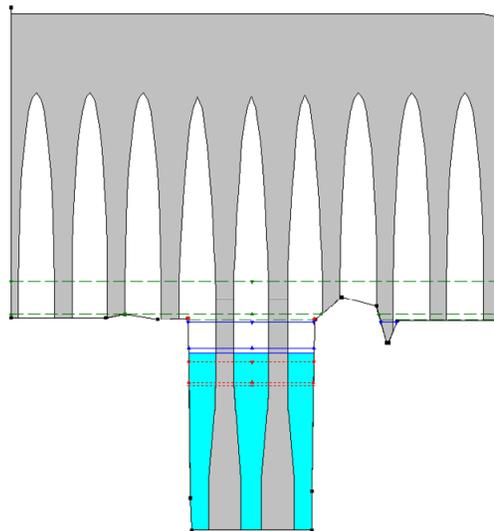


Figura 10 | Ejemplo del resultado unidimensional obtenido en una de las secciones de estudio.

Como se puede observar, en ambas zonas vulnerables existen diferencias importantes de hasta un 35% entre los calados obtenidos aplicando ambas metodologías. Una disparidad que se acentúa hasta un 44% aguas arriba de la Represa N°9 cuando las comparaciones se hacen con los calados establecidos en el diseño original. También se puede apreciar cómo las diferencias porcentuales no son iguales en cada sección y que cuando se comparan caudales, esas diferencias se reducen a un 28% y un 34% respectivamente.

Aunque el diseño original es técnicamente correcto y cumple la normativa española para el diseño de infraestructuras, subestima tanto los caudales como los calados de diseño.

Cuando se comparan los resultados obtenidos mediante la metodología tradicional con los datos originales de diseño, se percibe el efecto real que tiene el alargamiento de la serie de datos meteorológicos a la hora de diseñar. Al incorporarse 20 años más de datos pluviométricos al análisis original del Río Manzanares, los caudales se ven incrementados en un 4.7% pasando de 550 m³/s a 576.1 m³/s. Este ligero aumento nos revela una imagen distinta de la vulnerabilidad de la infraestructura ya que zonas que en el proyecto original se consideraban seguras a 500 años, ya no lo serían. La Tabla 3 y Tabla 4 muestran como ese ligero aumento es suficiente para aumentar la probabilidad de inundación de los túneles de la M-30.

Tabla 3 | Resultados de los calados revisados para un periodo de retorno de 500 años y el desbordamiento aguas arriba del Puente de Toledo.

	Cota de Inundación (m)	Calado Revisado (m)	Desbordamiento (m)
Aguas arriba	575.39	575.67	0.28
20 m Aguas arriba	575.46	575.67	0.21
70 m Aguas arriba	575.53	575.67	0.14
120 m Aguas arriba	575.64	575.68	0.04
140 m Aguas arriba	575.68	575.69	0.01

Tabla 4 | Resultados de los calados revisados para un periodo de retorno de 500 años y el desbordamiento aguas arriba de la represa N° 9.

	Cota de Inundación (m)	Calado Revisado (m)	Desbordamiento (m)
Aguas arriba	570.74	571.11	0.37
20 m Aguas arriba	570.91	571.13	0.22

Al aumentar la serie de datos meteorológicos del estudio original, la margen del río se ve sobrepasada en las secciones aguas arriba de ambos puntos de estudio para tormentas de 500 años de periodo de retorno. Un aumento que oscila entre el 3 y el 7% con tan solo 20 años más de datos.

Para identificar la probabilidad de inundación de la carretera con la metodología desarrollada en este estudio, se establece un periodo de retorno para cada cota de la margen del río y no mediante una relación directa entre precipitación, caudal y calado máximos. Tabla 5 y Tabla 6 muestran las respectivas cotas de inundación consideradas y sus correspondientes periodos de retorno para las localizaciones estudiadas.

Tabla 5 | Resultados de la frecuencia de inundación aguas arriba del Puente de Toledo.

	Cota de Inundación (m)	Periodo de Retorno (años)
Aguas arriba del Puente	575.39	168
650 m aguas arriba del Puente	576.64	463

Tabla 6 | Resultados de la frecuencia de inundación aguas arriba de la Represa N°9.

	Cota de Inundación (m)	Periodo de Retorno (años)
Aguas arriba del Puente	570.74	170
320 m aguas arriba del Puente	571.74	403

Bajo las simplificaciones tomadas para la realización de este caso práctico, se observa que la respuesta de la M-30 frente a las crecidas del río Manzanares, es decir, la probabilidad de que los túneles sufran inundaciones debido a las crecidas del cauce sería significativamente mayor a lo estimado en el proyecto original. Desde la construcción del proyecto original motas de protección se alzaron a ambos márgenes del Manzanares, algo que no se ha visto reflejado en este estudio. Pese a ello, se pone en evidencia como las metodologías tradicionales recomendadas por las normativas de diseño de infraestructuras pueden estar infravalorando los riesgos reales de inundación.

DISCUSIÓN

¿Es correcto considerar que un caudal de diseño sigue siendo válido durante toda la vida útil de una infraestructura? ¿Deberían estar reguladas las revisiones de los calados de diseño a medida que la serie de datos meteorológicos aumenta durante la vida útil de una infraestructura? ¿Es correcto asumir una relación directa entre los periodos de retorno de una lluvia y una cota de inundación para el diseño de infraestructuras? Estas son algunas de las preguntas que se plantean tras analizar los resultados obtenidos en este caso práctico.

Este estudio refleja la importancia de revisar no solo las metodologías recomendadas por las guías técnicas de diseño de infraestructuras, sino también revisar y actualizar las series de datos meteorológicos durante la vida útil de un proyecto. Es esencial comprender con precisión la respuesta de una infraestructura como la autopista M-30 de Madrid a eventos de inundación de baja frecuencia mediante métodos más avanzados y precisos.

La metodología utilizada en este estudio es conceptualmente más robusta que la metodología tradicional, debido a que el periodo de retorno se calcula sobre la variable de interés - la cota de inundación - sin necesidad de realizar la hipótesis de que los periodos de retorno de la lluvia y la inundación está directamente relacionados. El hecho de que con la metodología propuesta resulten láminas de agua con un calado mayor para un mismo periodo de retorno, pone de manifiesto que la metodología tradicional podría estar infravalorando el riesgo de inundación y que las medidas de protección asumidas en diseño no son adecuadas.

Al incluir la generación sintética de eventos, se puede explorar de forma más exhaustiva el espacio de las posibilidades. La limitada duración de las series de observaciones climáticas condiciona los mayores eventos observados. Debido a la baja probabilidad de ocurrencia de los eventos de mayor periodo de retorno, es muy probable que estos no hayan sido capturados en la serie observada. Con este caso práctico se ha puesto de manifiesto cómo al alargar la base de datos de partida un diseño que se consideraba válido ya puede no serlo.

La generación sintética permite extrapolar las observaciones y obtener valores plausibles para los eventos de mayor periodo de retorno. Si bien no existe manera de verificar que estos eventos pueden ocurrir, la generación sintética, mediante la simulación estocástica, limita su influencia debido a su baja probabilidad de ocurrencia. Por lo tanto, se llega a un equilibrio donde, cuanto menor es la probabilidad del evento, menor será su influencia sobre el resultado final.

Si bien la metodología desarrollada requiere de más medios informáticos y tiempo computacional que la metodología habitual, un estudio de inundaciones preciso y detallado puede evitar afecciones graves en una población durante episodios de inundación al realizar diseños de infraestructuras más precisos estadísticamente. Cuando se amplíen las series de precipitación ambas metodologías deberían de aproximarse más de lo que ha resultado de este caso de estudio. En futuras líneas de investigación se estudiará este tipo de casos verificando el ajuste entre ambas metodologías.

CONCLUSIONES

1. *Incremento de la vulnerabilidad frente a inundaciones:* Los resultados obtenidos en este estudio indican que la probabilidad de que los túneles de la M-30 sufran inundaciones debido a crecidas del río Manzanares es significativamente mayor a lo estimado en el proyecto original. Este hecho resulta de la combinación de dos efectos: la disponibilidad de series de observaciones más largas y la utilización de la generación estocástica para explorar de forma exhaustiva el espacio de

los extremos plausibles. Este aumento en los caudales máximos resalta la necesidad de revisar los estudios de diseño originales utilizando las nuevas series y técnicas estadísticas más avanzadas.

2. *Importancia de series largas y datos de alta resolución*: Los resultados muestran que la longitud y la resolución espacial de las series de precipitación son factores clave para realizar estimaciones precisas de los caudales máximos. La utilización de series cortas y un número limitado de estaciones puede subestimar los picos de caudal en hasta un 50%-60%, como se ha demostrado en estudios previos. En el caso de la M-30, la extensión de las series de precipitación y la inclusión de eventos sintéticos proporcionan una mejor estimación de los caudales extremos.
3. *Relevancia de los eventos sintéticos*: La generación de eventos sintéticos ha demostrado ser una herramienta esencial para modelar escenarios extremos que pueden no estar bien representados en los datos históricos. Esta técnica permite cubrir un rango más amplio de posibles caudales, lo que es crucial para reducir la incertidumbre en el diseño de infraestructuras.
4. *Actualización continua de los modelos hidrológicos*: Es fundamental que las infraestructuras se revisen y actualicen periódicamente utilizando datos meteorológicos más recientes. Este enfoque reduce las incertidumbres asociadas a los diseños originales y mejora la capacidad de las infraestructuras para enfrentar eventos de mayor frecuencia e intensidad, que están cada vez más asociados al cambio climático.
5. *Necesidad de revisar las prácticas de diseño*: Las metodologías tradicionales utilizadas en el diseño de infraestructuras pueden estar subestimando los riesgos reales de inundación debido a su limitada capacidad para incorporar eventos extremos. Es imprescindible adoptar enfoques que integren datos actualizados y eventos sintéticos para garantizar la seguridad de las infraestructuras a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa European Union's Horizon 2020 research and innovation la financiación aportada a través del proyecto FORESEE. Además, los autores agradecen a MADRID CALLE 30 S.A. y a la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) por los datos aportados para la realización del estudio.

REFERENCIAS

- Barredo, J.I., Saurí, D., Llasat, M.C. 2012. Assessing trends in insured losses from floods in Spain 1971–2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), 1723–1729. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1723-2012>
- Baudin, M., Dutfoy, A., Iooss, B., Popelin, AL. 2016. OpenTURNS: An Industrial Software for Uncertainty Quantification in Simulation. In: Ghanem, R., Higdon, D., Owhadi, H. (eds). *Handbook of Uncertainty Quantification*, (pp. 1–38). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11259-6_64-1
- Ben Alaya, M.A., Chebana, F., Ouarda, T. 2014. Probabilistic Gaussian Copula Regression Model for Multisite and Multivariable Downscaling. *Journal of Climate*, 27, 3331–3347. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00333.1>
- Brunner, G.W., United States Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources (U.S.), Hydrologic Engineering Center (U.S.). 2023. *HEC-RAS river analysis system : hydraulic reference manual (Version 6.4.1)*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%20Hydraulic%20Reference%20Manual-v6.4.1.pdf>
- Brunner, M.I., Gilleland, E., Wood, A., Swain, D.L., Clark, M. 2020. Spatial Dependence of Floods Shaped by Spatiotemporal Variations in Meteorological and Land-Surface Processes. *Geophysical Research Letters*, 47(13), e2020GL088000. <https://doi.org/10.1029/2020GL088000>
- Camus, P., Mendez, F., Medina, R., Cofiño, A. 2011. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>

- Castellarin, A., Burn, D.H., Brath, A. 2001. Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 241(3), 270–285. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00383-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00383-8)
- Cortès, M., Turco, M., Llasat-Botija, M., Llasat, M.C. 2018. The relationship between precipitation and insurance data for floods in a Mediterranean region (northeast Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 857–868. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-857-2018>
- de Lima, J.L.M.P., Singh, V.P. 2002. The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. *Advances in Water Resources*, 25(7), 817–828. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00067-2)
- Emesa M-30. 2024. *Traffic M-30 Condition*.
- Estévez, J., Gavilán, P., Giráldez, J.V. 2011. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology*, 402(1–2), 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.031>
- Ferrovial. 2024. *The M30 Tunnel, Madrid (Spain)*.
- Golkhatmi, N.S. N., Farzandi, M. 2024. Enhancing Rainfall Data Consistency and Completeness: A Spatiotemporal Quality Control Approach and Missing Data Reconstruction Using MICE on Large Precipitation Datasets. *Water Resources Management*, 38(3), 815–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03567-0>
- González-Rouco, J.F., Jiménez, J.L., Quesada, V., Valero, F. 2001. Quality Control and Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe. *Journal of Climate*, 14(5), 964–978. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0964:QCAHOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0964:QCAHOP>2.0.CO;2)
- Kimura, N., Yoshinaga, I., Sekijima, K., Azechi, I., Baba, D. 2020. Convolutional Neural Network Coupled with a Transfer-Learning Approach for Time-Series Flood Predictions. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010096>
- Larose, D.T. 2004. k-Nearest Neighbor Algorithm. In *Discovering Knowledge in Data*, D.T. Larose (Ed.). <https://doi.org/10.1002/0471687545.ch5>
- Leach, J.M., Kornelsen, K.C., Samuel, J., Coulibaly, P. 2015. Hydrometric network design using streamflow signatures and indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 529(3), 1350–1359. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.048>
- Lloyd, S. 1982. Least Squares Quantization in PCM. In *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2), 129–137. <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>
- Martínez-Gomariz, E., Forero-Ortiz, E., Guerrero-Hidalga, M., Castán, S., Gómez, M. 2020. Flood Depth–Damage Curves for Spanish Urban Areas. *Sustainability*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/su12072666>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2011. *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Navas, S., del Jesus, M., Sanchez Espeso, J. 2017. *Evaluación y análisis del riesgo de inundación del Río Besaya a su paso por Los Corrales de Buelna, Cantabria*. <http://hdl.handle.net/10902/10636>
- Navas, S., del Jesus, M., Sánchez, J.M. 2018. Evaluación y análisis del riesgo de inundación del Río Besaya a su paso por Los Corrales de Buelna, Cantabria. *Revista de Obras Públicas*, 3598, 61–72. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6476731>
- Parra-Plazas, J., Gaona-García, P., Plazas-Nossa, L. 2023. Time series outlier removal and imputing methods based on Colombian weather stations data. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 72319–72335. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27176-x>
- Smith, L.I. 2002. *A tutorial on Principal Components Analysis*. <https://hdl.handle.net/10523/7534>
- Tipping, M.E., Bishop, C.M. 1999. *Mixtures of Probabilistic Principal Component Analyzers*. <https://doi.org/10.1162/089976699300016728>

US Army Corps of Engineers. 2018. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual. Version 4.3. Hydrologic Engineering Centre. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.3.pdf

Viglione, A., Merz, R., Salinas, J.L., Blöschl, G. 2013. Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis. *Water Resources Research*, 49(2), 675–692. <https://doi.org/10.1029/2011WR010782>

Wackernagel, H. 1995. Ordinary Kriging. In *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications* (pp. 74–81). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03098-1_11

Wang, K., Chen, N., Tong, D., Wang, K., Gong, J. 2015. Optimizing the configuration of streamflow stations based on coverage maximization: A case study of the Jinsha River Basin. *Journal of Hydrology*, 527, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.054>