

9CFE-1503



Diseño de modelos predictivos de eventos climatológicos e hidrológicos extremos en las cuencas del Almanzora y Segura

MOLINA GONZÁLEZ, JL. (1), ESPEJO ALMODÓVAR, F. (1), ZAZO SANTIAGO (1), BARRERA DEL AMO, C. (2), y ÁGUEDA HERNÁNDEZ, B. (3).

(1) IGA Grupo de Investigación, Escuela Politécnica Superior de Ávila. Av. de los Hornos Caleros, 50, 05003 Ávila, España

(2) Fora Forest Technologies S.LL.

(3) iuFOR - Universidad de Valladolid

Resumen

El diseño de modelos predictivos de eventos hidrológicos extremos es fundamental para la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres en infraestructuras vulnerables. El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño y validación de modelos predictivos para eventos hidrológicos extremos, aplicados a las cuencas del Almanzora y Segura, mediante un enfoque de causalidad bayesiana. Para ello, se propone una metodología que integra datos reales de precipitación con técnicas de machine learning para el pretratamiento hidrológico, facilitando la clasificación de hietogramas y la generación de tormentas sintéticas a través de herramientas como HydroPredicT_Extreme y un generador estocástico de lluvia (SRG). Posteriormente, se implementa una simulación hidráulica 2D que combina la formulación de las ecuaciones de aguas someras (SWE) con efectos adicionales derivados de la formulación completa de las ecuaciones RANS, lo cual mejora la precisión del sistema de alerta temprana (SAT). Los resultados muestran una mayor fiabilidad en la representación del tránsito de caudales y una mejor delimitación de zonas de riesgo, contribuyendo a una planificación hidrológica más eficaz y a la mitigación de los efectos del cambio climático.

Palabras clave

Simulación, predicción, riesgo, inundabilidad, probabilidad.

1. Introducción

El cambio climático está alterando los patrones hidrológicos tradicionales en el sentido de intensificar los eventos y procesos extremos. De esta forma, tenemos que estar cada vez más preparados para enfrentarnos a episodios de sequía cada vez más frecuentes e intensos, así como, por otro lado, a inundaciones cada vez más recurrentes y de mayor magnitud. Estos fenómenos meteorológicos extremos suceden por todo el planeta. Teniendo en cuenta únicamente los más recientes, podemos destacar la tormenta Daniel que arrasó la costa de Libia en septiembre de 2023. La ciudad de Derna fue gravemente dañada con 4.000 fallecidos y 10.000 desaparecidos. Barrios enteros desaparecieron en el mar cuando un torrente de agua parecido a un tsunami atravesó toda la ciudad, después de que colapsaran dos presas aguas arriba. En ese mismo mes dos tifones afectaron gravemente a Asia, concretamente a Taiwan y Hong Kong. En Sudamérica, los efectos de El Niño se manifestaron en forma de fuertes lluvias en Colombia, Argentina y con mayor incidencia en Brasil, donde hubo 200 fallecidos en Rio Grande Do Sul. En Europa, Austria e Italia fueron seriamente afectadas por la tormenta Boris, con récords de lluvia que causaron innumerables daños y numerosos evacuados. Desde el punto



de vista meteorológico e hidrológico, el caso de la cuenca mediterránea es el que nos afecta más de cerca. Por último, la reciente DANA en Valencia, que de acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA), utilizando imágenes de satélite, ha afectado a 4.100 hectáreas. De esta forma, más de 3.900 edificios y más de 60.000 personas han sido afectadas. Por otro lado, han sido arrasadas cerca de 15 km de línea de ferrocarril de cercanías y 530 km de carreteras y, lo más grave, más de 200 fallecidos y miles de personas desplazadas. Según el Servicio de Cambio Climático Copernicus de la Unión Europea, cerca del 30% de ríos excedieron sus límites de inundación en 2023, mientras se han declarado estados de emergencia en 2024 en algunas zonas de Bélgica, Países Bajos, Francia, España y Alemania. Todos estos datos demuestran la mayor incidencia de los eventos meteorológicos e hidrológicos extremos en el territorio y en el día a día de la sociedad actual.

A pesar de los avances en la modelización hidrológica, los sistemas tradicionales resultan insuficientes para capturar la complejidad de los eventos extremos bajo condiciones cambiantes. La integración de un enfoque de causalidad bayesiana, junto con un riguroso pretratamiento de los datos de precipitación, se presenta como una solución innovadora para superar estas limitaciones, permitiendo una simulación más realista y robusta de la respuesta hidráulica en cuencas vulnerables

2. Objetivos

El objetivo de esta comunicación es describir el proceso de diseño de modelos predictivos de eventos hidrológicos, basados en un enfoque de causalidad bayesiana. Para ello, se describe la metodología de construcción de herramientas como por ejemplo HydroPredicT_Extreme, fundamentada en inteligencia artificial (IA), y más concretamente machine learning. Además, como objetivo secundario se muestra su potencial en el acople con modelos numéricos de simulación hidráulica 2D.

3. Metodología

El presente trabajo fue aplicado a las cuencas de la Rambla del Albujón, en su desembocadura en el Mar Menor, y el río Almanzora en su tramo bajo hasta el Mar Mediterráneo, ambas cuencas situadas en el sureste de la Península Ibérica (Figura 1). La primera de ellas gestionada por la Confederación Hidrográfica del Segura, y la segunda, por la Junta de Andalucía.

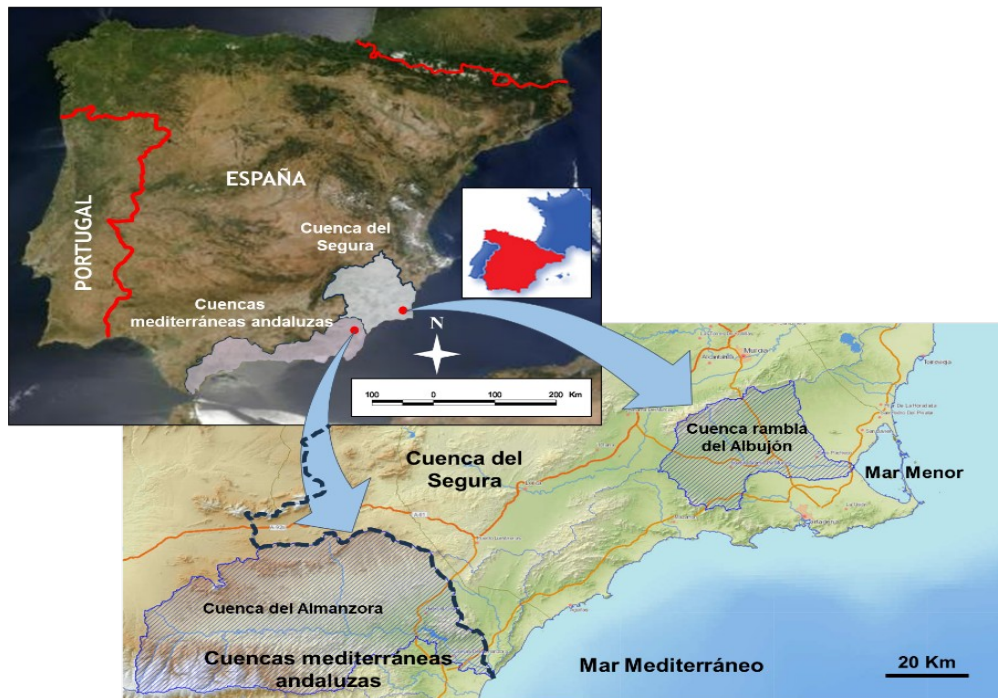


Figura 1. Localización de las cuencas de estudio

El Mar Menor constituye la mayor laguna costera hipersalina de Europa (García-Galiano et al., 2022), con una superficie de 135 km², situada en la Región de Murcia (España; MITECO, 2024). Su cuenca vertiente, con una superficie de 1.316 km², está compuesta por una red de drenaje con múltiples cauces efímeros, denominadas ramblas (Castejón-Porcel et al., 2018; García-Ayllon y Radke, 2021), que pueden presentar un comportamiento torrencial de forma ocasional (Castejón-Porcel et al., 2018). De ellas, la principal es la rambla del Albuñón (Stefanova et al., 2015), cuya subcuenca representa aproximadamente el 52% de la cuenca drenante del Mar Menor (MITECO, 2024).

En particular, la rambla del Albuñón, con una cuenca hidrográfica de 694 km², pertenece a la Cuenca del Segura (Cutillas et al., 2016). Esta zona presenta un clima semiárido, caracterizado por veranos calurosos y secos e inviernos cálidos, con una temperatura media anual en torno a los 18 °C (Stefanova et al., 2015), y una precipitación anual escasa (< 300 mm), concentrada, principalmente, en otoño e invierno, con eventos ocasionales de intensidad torrencial. Además, esta zona presenta una alta variabilidad interanual, con largos periodos de sequía, seguidos de episodios de lluvia cortos e intensos que dan lugar a inundaciones con graves consecuencias (Castejón-Porcel et al., 2018). Estos efectos negativos van en aumento debido al fenómeno del cambio climático (García-Ayllón y Radke, 2021; MITECO, 2024). El paisaje está dominado por montañas costeras y llanuras litorales, donde los usos del suelo son predominantemente mixtos urbano-rurales (Castejón-Porcel et al., 2018). A pesar de estas características, su temperatura, radiación solar y condiciones edáficas han permitido el desarrollo de una actividad agrícola importante y altamente productiva. De hecho, esta zona es una de las más



importantes productoras de productos agrícolas para Europa Central (Castejón-Porcel et al., 2018). Sin embargo, en los últimos 50-60 años esta intensa actividad ha transformado significativamente el medio natural, a pesar del importante valor ambiental del Mar Menor (García-Ayllón, 2018).

Por su parte, la cuenca del río Almanzora, con una extensión aproximada de 2.600 km² y una longitud de su curso principal de unos 100 km, se localiza en la parte oriental de Andalucía, provincia de Almería (Pedrera et al., 2009). El clima se caracteriza por ser semiárido, de hecho, esta zona está considerada como la región más árida y seca de Europa (Hooke y Mant, 2000; Sánchez-García et al., 2016). El bloqueo a las masas de aire húmedo debido a los sistemas montañosos próximos da lugar a un régimen de precipitaciones inferior a 300 mm/año, mientras que en la parte alta de la cuenca este valor puede aumentar hasta 700 mm/año (Sánchez-García et al., 2016). En general, el régimen pluviométrico es claramente mediterráneo, concentrándose las precipitaciones en los meses de otoño, invierno y primavera; aunque también se producen eventos torrenciales, debido principalmente a las condiciones sinópticas de gota fría (Llasat et al., 2005). Las temperaturas oscilan entre los 15 °C de enero y los 32 °C de agosto (Sánchez-García y Schulte, 2023). El clima seco y las altas temperaturas definen un comportamiento de los caudales eminentemente efímero (Pedrera et al., 2009; Sánchez-García et al., 2019). Además, el paisaje, típico del sureste español, está dominado por bosques abiertos semidesérticos y matorrales con zonas de terrenos agrícolas en los fondos de valle. En las últimas décadas del siglo XX, la parte baja de la cuenca ha evolucionado progresivamente hacia un modelo agrícola basado en cultivos intensivos de regadío, aunque en la cuenca alta se ha mantenido el modelo agrícola extensivo tradicional (Sánchez-García et al., 2019).

La metodología propuesta comprende dos grandes bloques (Figura 2). El primero es un pretratamiento hidrológico basado en una técnica de machine learning, perteneciente a la IA. El segundo bloque implica una simulación hidráulica 2D basada en el tratamiento previo llevada a cabo con el apoyo del software IBER, versión 3.3.1 (Bladé et al., 2014).

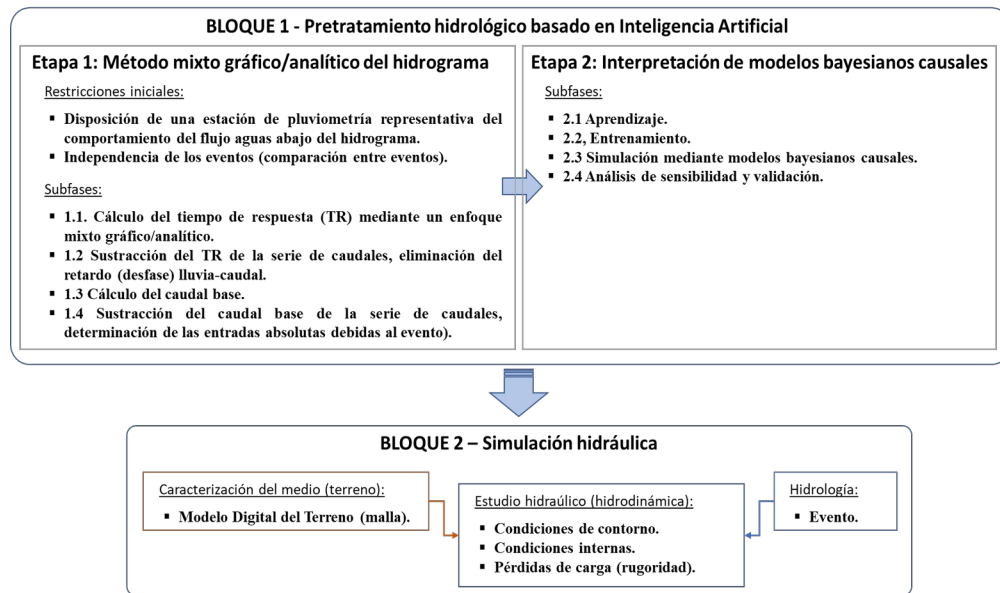


Figura 2. Esquema metodológico propuesto

3.1 Pretratamiento hidrológico:

El desarrollo de este tipo de modelización puede mejorar la capacidad de predicción de eventos extremos de lluvia-escorrentía y sigue una metodología iterativa que comprende dos etapas principales. La primera comprende un método mixto gráfico/analítico del hidrograma basado en la investigación Molina et al., (2022). Esta etapa está condicionada por dos restricciones iniciales que son, por un lado, a) la estación pluviométrica representativa del comportamiento hidrológico de la cuenca; por otro lado, b) debe haber independencia de los eventos para que sean igualmente comparables en términos de condiciones de contorno. Esta primera etapa comprende subfases como como: 1.1. Cálculo del tiempo de respuesta (TR) mediante un enfoque mixto gráfico/analítico; entendido este tiempo como un indicador que representa el tiempo transcurrido desde que empieza el evento de precipitación hasta que se produce la escorrentía asociada. 1.2 Sustracción del TR de la serie de caudales para eliminar el retardo lluvia-caudal; 1.3 Cálculo del caudal base; 1.4 Sustracción del caudal base de la serie de caudales para trabajar sobre las entradas absolutas debidas al evento. La segunda etapa principal se denomina Interpretación de modelos causales bayesianos (Bayesian Causal Modelling Translation; BCMT) que comprende el 2.1 Aprendizaje, 2.2, Entrenamiento, 2.3 Simulación mediante modelos bayesianos causales, 2.4 Análisis de sensibilidad y validación.

3.2 Simulación hidráulica:

La finalidad de este segundo bloque es el estudio del tránsito de caudales por la red natural de drenaje de un sistema físico. La dinámica fluvial es el objetivo por cubrir, entendiendo ésta como el estudio de la variación de las principales variables hidráulicas que representan su evolución: calados y velocidades.

El problema así planteado ha sido resuelto hasta la fecha mediante la aplicación de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas en profundidad por Reynolds,



conocidas por RANS y como ecuaciones de aguas someras. La variación de la velocidad en cota se promedia obteniendo una representación de dichas variables en un entorno bidimensional, 2D, suficiente para el alcance de los estudios de inundabilidad que no requieran de un análisis exhaustivo de fenómenos localizados.

El procedimiento de construcción del modelo comienza por el preproceso del modelo digital de elevación obtenido a partir de vuelos LiDAR, que condicionará los resultados finales de la simulación al conformar la base sobre la que se evaluará la evolución de las variables hidráulicas. Tanto la resolución espacial como la precisión altimétrica son determinantes para acotar el alcance del modelo. Tras generar esta geometría inicial, se procede a su discretización mediante el método de volúmenes finitos, lo que permite abordar la simulación de la dinámica del flujo mediante un enfoque híbrido. En este sentido, se utiliza la formulación de ecuaciones de aguas someras (SWE) para representar la distribución global de caudales y velocidades en un dominio bidimensional, integrando de forma adicional efectos característicos de la formulación completa de las ecuaciones RANS. Concretamente, estos efectos correctivos permiten incorporar la influencia de la turbulencia y las variaciones verticales del flujo, elementos que enriquecen la aproximación SWE al ajustar parámetros como la rugosidad y los gradientes de presión. Para garantizar un acoplamiento preciso entre la topografía y el modelo numérico, se establece un error máximo permitido entre el modelo de elevación y la malla representativa del gradiente altitudinal, la cual se define a partir de tamaños máximos y mínimos determinados por el software durante el encaje definitivo de los volúmenes. Finalmente, a esta estructura se le incorpora la información básica asociada a la alimentación del caudal, la rugosidad y las condiciones de contorno, ya sean iniciales o internas, adaptadas según las singularidades existentes en cada tramo del dominio simulado.

Culminado este proceso se puede proceder al cálculo que permitirá tras un proceso iterativo comprobar la sensibilidad del modelo a la variación de la rugosidad con la idea de acotar la incertidumbre observada en los resultados obtenidos.

4. Resultados

Los resultados de esta investigación se materializan en la cartografía de variables hidráulicas obtenidas en la simulación de los dos casos de estudio donde se ha aplicado, Cuencas del Albuñón y del Almanzora (Figuras 3 y 4). Para evaluar el impacto del pretratamiento hidrológico, se realizaron simulaciones comparativas: una serie de ensayos se ejecutó sin aplicar el pretratamiento previo, mientras que otra serie incorporó el procedimiento descrito. En comparación, las simulaciones que utilizaron el pretratamiento mostraron una reducción significativa en la dispersión de los valores de caudal y una mayor correspondencia con los datos observados en campo. Por ejemplo, se observó que la caracterización más precisa de los eventos extremos permitió ajustar los picos de caudal y definir con mayor exactitud las zonas de riesgo, evidenciando una reducción del error de predicción y una mejora en la coherencia espacial de las variables hidráulicas. Estos resultados avalan la robustez del modelo matemático al incorporar el

pretratamiento, en consonancia con lo reportado por Wang et al. (2018).

En relación con la rambla del Albujón (Figura 3), diferentes factores como el elevado coeficiente de rugosidad de Manning debido a la masiva existencia de vegetación en el cauce, o a la topografía artificialmente plana y modificada debido a la importante parcelación del territorio provoca un aumento de la peligrosidad al actuar negativamente frente al calado. Esta circunstancia se ve agravada en la zona de la desembocadura donde la existencia de diversas infraestructuras lineales provoca remansos con largos tiempos de permanencia. En ese sentido, el desvío artificial del cauce para la construcción de la urbanización Bahía-Bella abunda en la alteración de dicha dinámica provocando un aumento de la peligrosidad en esa zona.

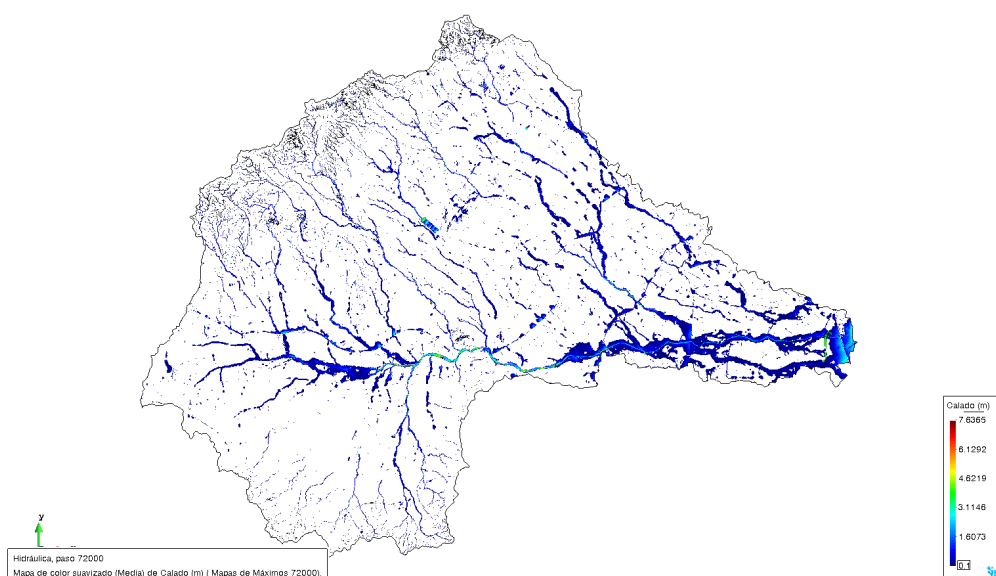


Figura 3. Simulaciones hidráulicas. Rambla del Albujón

Con respecto al río Almanzora (Figura 4), se observa como la zona más próxima a la confluencia de la rambla de Canalejas es la que presenta mayores calados, energía y velocidad y, por tanto, peligrosidad. Esta zona está precisamente muy cerca de la ubicación de la desaladora del Bajo Almazora.

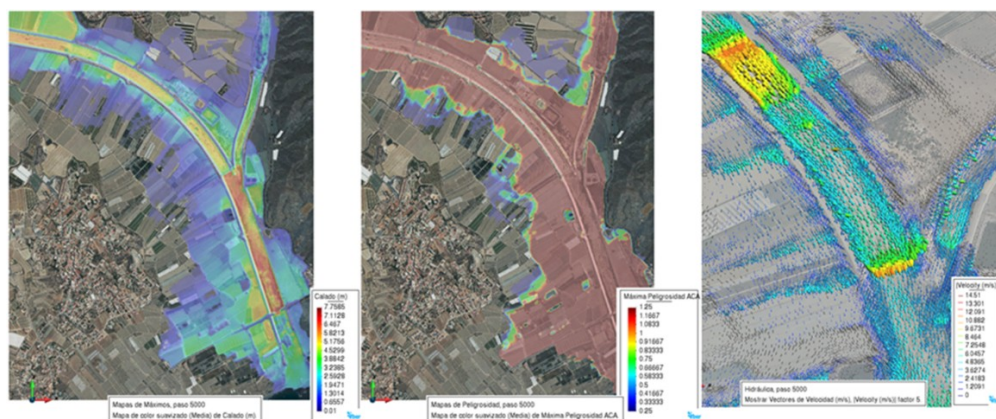


Figura 4. Simulaciones hidráulicas. Cuenca baja del río Almanzora

5. Discusión

La integración de una caracterización detallada de eventos de precipitación extremos mediante el pretratamiento hidrológico ha permitido superar limitaciones del enfoque tradicional, que se basaba en series de datos menos precisos y resultaba insuficiente para capturar la complejidad del proceso de escorrentía. Al obtener directamente el hidrograma de caudales a partir del decalaje (delay) entre la lluvia y el caudal, el modelo incorpora la influencia de la historia previa del evento, permitiendo una simulación hidráulica más robusta y precisa.

Los resultados obtenidos en las cuencas del Albujón y del Almanzora evidencian una mejora significativa en la fidelidad de la cartografía de variables hidráulicas, reflejada en una reducción de la dispersión de los valores simulados y en una mejor correspondencia con los datos observados. En este sentido, el proceso de diseño metodológico propuesto no solo cumple con los objetivos planteados, sino que además reduce los errores de predicción y optimiza la identificación de zonas de riesgo, lo que respalda su aplicación en la planificación y gestión hidrológica.

Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Wang et al. (2018) y refuerzan la necesidad de integrar técnicas avanzadas de modelización con un pretratamiento riguroso de datos para afrontar los desafíos derivados de la variabilidad climática en territorios vulnerables.

6. Conclusiones

Se aprecia claramente una mayor importancia del evento hidrológico, debido a la incidencia del cambio climático en los sistemas hídricos. Por tanto, se debe contar con un tratamiento hidrológico mucho más intensivo y preciso de dichos eventos para alimentar los modelos hidráulicos. Éstos deben tener una integración mucho más eficaz con los modelos hidrológicos basados en IA. Por tanto, es necesario el desarrollo de rutinas dentro de los códigos de estos softwares para la alimentación automática de información hidrológica de precisión. Además de incorporar una retroalimentación continua procedente de esos módulos hidrológicos inteligentes. Todas estas mejoras redundarán en una mayor eficacia y precisión de la planificación hidrológica y territorial, ayudando a paliar los efectos catastróficos que se producen en la actualidad en todo el planeta.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida del proyecto SOS AGUA XXI, financiada en el programa CDTI de 2021.

8. Bibliografía

BLADÉ, E.; CEA, L.; CORESTEIN, G.; ESCOLANO, E.; PUERTAS, J.; VÁZQUEZ-CENDÓN, E.; ... COLL, A.; 2014. IBER: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 30(1), 1-10.

CASTEJÓN-PORCEL, G.; ESPÍN-SÁNCHEZ, D.; RUIZ-ÁLVAREZ, V.; GARCÍA-MARÍN, R.; MORENO-MUÑOZ, D.; 2018. Runoff water as a resource in the Campo de Cartagena



(Region of Murcia): current possibilities for use and benefits. *Water*, 10(4), 456.

CUTILLAS, F.M.; MARTÍN, M.D.M.; ELSITDIÉ, L.G.C.; 2016. Estudio del transporte de sedimentos en la Rambla del Albuñón. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, (9), 74-77.

GARCIA-AYLLON, S.; RADKE, J.; 2021. Geostatistical analysis of the spatial correlation between territorial anthropization and flooding vulnerability: Application to the DANA phenomenon in a Mediterranean watershed. *Applied Sciences*, 11(2), 809.

GARCIA-AYLLON, S.; 2018. Long-term GIS analysis of seaside impacts associated to infrastructures and urbanization and spatial correlation with coastal vulnerability in a mediterranean area. *Water*, 10(11), 1642.

GARCIA-GALIANO, S.; TAVÁREZ-POLONIA, C.; CÁNOVAS-GARCÍA, F.; Erena-Arrabal, M.; 2022. Assessment of Extreme Flash Floods in a Semiarid Basin: Case Study of Albuñón Basin in South East of Spain. *Proceedings of the IAHR World Congress*, 7196-7200.

HOOKE, J.M.; MANT, J.M.; 2000. Geomorphological impacts of a flood event on ephemeral channels in SE Spain. *Geomorphology*, 34(3-4), 163-180.

LLASAT, M.C.; BARRIENDOS, M.; BARRERA, A.; RIGO, T.; 2005. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of hydrology*, 313(1-2), 32-47.

MITECO; 2024. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Marco actualizado de actuaciones prioritarias para recuperar el Mar Menor. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/marco-actuaciones-prioritarias/MAR%20MAR%20MENOR%20ACT%20DIGITAL19_04_2024.pdf (09/09/2024).

MOLINA, J.L.; ESPEJO, F.; ZAZO, S.; MOLINA, M.C.; HAMITOUCHE, M.; GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L.; 2022. HydroPredicT_Extreme: A probabilistic method for the prediction of extremal high-flow hydrological events. *Journal of Hydrology*, 610, 127929.

PEDRERA, A.; PÉREZ-PEÑA, J.V.; GALINDO-ZALDÍVAR, J.; AZAÑÓN, J.M.; AZOR, A.; 2009. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). *Geomorphology*, 105(3-4), 218-231.



SÁNCHEZ GARCÍA, C.; SCHULTE, L.; PEÑA, J.C.; CARVALHO, F.; BREMBILLA, C.; 2016. A 500-year history of floods in the semi arid basins of south-eastern Spain. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EPSC2016-8255).

SÁNCHEZ-GARCÍA, C.; SCHULTE, L.; CARVALHO, F.; PEÑA, J.C.; 2019. A 500-year flood history of the arid environments of southeastern Spain. The case of the Almanzora River. *Global and Planetary Change*, 181, 102987.

SÁNCHEZ-GARCÍA, C.; SCHULTE, L.; 2023. Historical floods in the southeastern Iberian Peninsula since the 16th century: Trends and regional analysis of extreme flood events. *Global and Planetary Change*, 231, 104317.

STEFANOVA, A.; HESSE, C.; KRYSAANOVA, V.; 2015. Combined impacts of medium term socio-economic changes and climate change on water resources in a managed Mediterranean catchment. *Water*, 7(4), 1538-1567.

WANG, S.; ANCELL, B. C.; HUANG, G.H.; BAETZ, B.W.; 2018. Improving robustness of hydrologic ensemble predictions through probabilistic pre and post processing in sequential data assimilation. *Water Resources Research*, 54(3), 2129-2151.