



¿Podemos predecir las inundaciones en tiempo real?

Can we predict floods in real time?



Félix Francés García

Catedrático de ingeniería hidráulica de la Universitat Politècnica de València, presidente de la Plataforma Tecnológica Española del Agua | Professor of Hydraulic Engineering at the Universitat Politècnica de València and president of the Spanish Water Technology Platform (PTEA)

La reciente DANA otoñal mediterránea del 28 de octubre ha dejado una huella devastadora en el sur del área metropolitana de Valencia, revelando de manera contundente nuestras carencias como país para enfrentar este tipo de desastres. Entre las múltiples deficiencias expuestas, destaca la ausencia de un Sistema de Predicción de Inundaciones en tiempo real (SPI) en la región afectada. Este sistema proporciona información precisa y oportuna, esencial para la implementación anticipada de planes de emergencia municipales y la adopción de medidas de autoprotección por parte de los ciudadanos. Así, no solo se pueden mitigar los daños económicos, sino, lo más importante, salvar vidas humanas.

The recent autumnal Isolated Depression at High Levels (DANA, Spanish acronym) weather episode in the Mediterranean region on October 28th left a devastating mark on the south of the metropolitan area of Valencia, forcefully revealing the country's shortcomings in the face of disasters of this type. The absence of a real-time Flood Prediction System (FPS) in the affected region stands out among the many limitations exposed. An FPS provides accurate and timely information, which is essential for the early implementation of municipal emergency plans and the adoption of self-protection measures by citizens. This enables not only the mitigation of economic damage but, more importantly, allows human lives to be saved.



La DANA otoñal mediterránea del 28 de octubre ha sido catastrófica en el sur del área metropolitana de Valencia y claramente ha mostrado nuestras debilidades como país para afrontar este tipo de situaciones. En demasiados aspectos. Y uno de ellos ha sido la inexistencia en la zona de un completo Sistema de Predicción de Inundaciones en tiempo real (SPI).

Un SPI es una infraestructura tecnológica diseñada para monitorear y prever la ocurrencia de inundaciones, con base en datos hidrometeorológicos recopilados constantemente, una predicción meteorológica y una cascada de modelos matemáticos. De esta forma se puede ofrecer información oportuna y precisa que permita con antelación desplegar los planes de emergencia planificados y adoptar las medidas individuales de autoprotección. La consecuencia es una mejora en la gestión de la inundación, con una reducción de los daños económicos producidos y, sobre todo, de víctimas.

Veamos estos elementos y otros también necesarios que constituyen un SPI con un poco más de detalle.

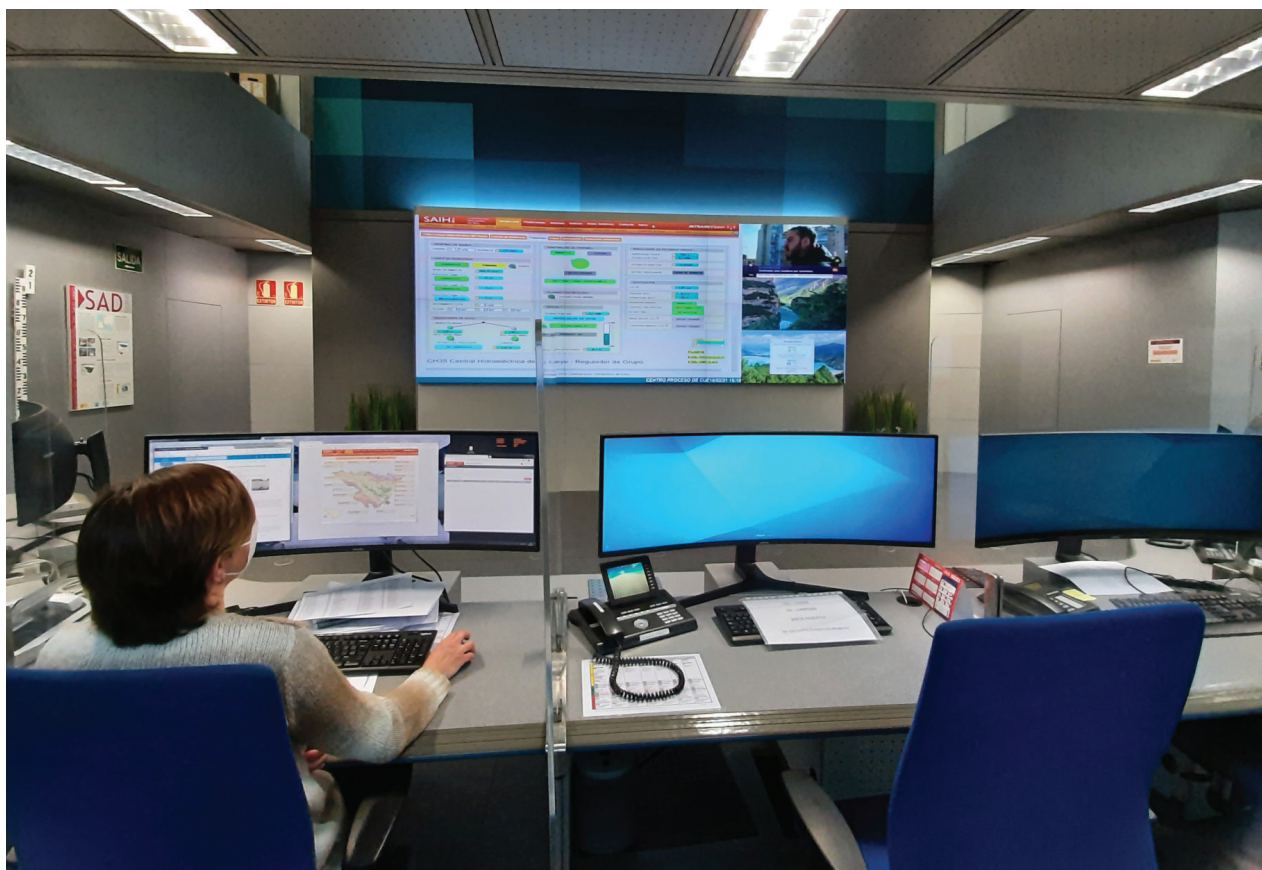
El primer elemento necesario es un sistema de monitoreo e integrador de información hidrometeorológica en tiempo real, basado en sensores en tierra de precipitación y caudal y del campo de precipitación proveniente de radares meteorológicos. Este

The autumnal DANA of October 28th in the Mediterranean area has had a catastrophic impact on the south of the metropolitan area of Valencia and has clearly shown our weaknesses as a country to deal with this type of situation. Too many weaknesses, amongst them, the lack of a comprehensive real-time Flood Prediction System (FPS) in the area.

An FPS is a technological infrastructure designed to monitor and forecast the occurrence of floods, based on constantly collected hydrometeorological data, a weather forecast and a cascade of mathematical models. Its function is to provide timely, precise information to enable early deployment of municipal emergency plans and individual self-protection measures. The consequence is an improvement in flood management, with a reduction in economic damage and, above all, a reduction in victims.

Let us look at these and the other necessary elements that form part of an FPS in a little more detail.

The first element required is a system for monitoring and integrating hydro-meteorological information in real time, based on ground sensors for precipitation and flow and the precipitation field from weather radars. This function is performed very well by the automatic Hydrological Information Systems (HIS) used by Spanish river basin management authorities and would act as a SCADA system. But this in itself is



Sala de operaciones del SAIH de la Confederación Hidrográfica del Ebro
(Fuente: página web de la CHE)

*Ebro River Basin Management Authority automatic HIS operations room
(Source: Authority website)*

papel lo juegan muy bien los SAIHs de las confederaciones hidrográficas españolas.

Pero esto no es suficiente, aunque se pueda contar con la experiencia de los operadores. Las estaciones de aforo nos dan sólo la situación actual en los puntos donde se encuentran, pero no sabemos nada de lo que está ocurriendo en otros lugares de la cuenca. Y con sólo la precipitación observada, sólo podemos tener una idea aproximada del complejo proceso de su conversión en escorrentía.

El segundo elemento es contar con una predicción meteorológica cuantitativa, que en España, se centraliza en la AEMET. Pero lanzar las alertas basándose sólo en la predicción meteorológica es insuficiente: la predicción meteorológica no tiene en cuenta cuándo, cuánto y dónde se produce la escorrentía o la inundación.

Para resolver estos dos problemas son necesarios un modelo hidrológico y un modelo hidráulico. O al menos el primero.

La simulación con un modelo hidrológico utilizando como input la información observada hasta el momento actual nos permita tener una visión completa de lo que está ocurriendo en la red hidrográfica. O, si el modelo es de tipo distribuido espacialmente, en cualquier punto del territorio.

Ejemplos de modelos hidrológicos que se puedan utilizar hay muchos, pero destacan HEC-HMS, SWAT, o el español TETIS. En realidad es deseable utilizar más de un modelo, para aprovechar sus diferentes capacidades y obtener una mejor predicción. Un aspecto que hay que considerar en el modelo es la inclusión de los efectos antropogénicos significativos para una inundación, como son los embalses (laminación de la crecida) y el riego (modificación de la condición inicial de humedad del suelo). En avenidas relámpago, se debe añadir la modelación del ciclo de sedimentos, ya que pueden suponer un porcentaje significativo del caudal total. En la inundación del sur de Valencia hemos estimado que los sedimentos transportados hasta la estación de aforos de rambla del Poyo fueron un 30% del volumen total del evento.

Sin embargo, con sólo la información del pasado, la capacidad de antelación de la predicción hidrológica es del orden de un tercio del tiempo de respuesta de la cuenca. Esto puede ser suficiente para grandes cuencas (por encima de los 10.000 km² de extensión), pero no para las medianas o las más pequeñas, en las que podemos tener eventos en los que podemos contar con una antelación de sólo una o dos horas.

Para ganar tiempo de antelación y focalizar las zonas que se puedan inundar es necesario procesar con el modelo hidrológico la predicción meteorológica. En la figura adjunta se puede comprobar que la combinación de una buena predicción meteorológica con un buen modelo hidrológico consigue predicciones excelentes con 48 horas de antelación, tanto en la predicción del pico antes del inicio de la crecida (panel de la izquierda) como del final de la

insuficiente, even if we can depend on the experience of the operators. The gauging stations only provide the current situation at the points where they are located, but we know nothing about what is happening elsewhere in the basin. And with precipitation alone, we can only obtain an approximate idea of the complex process of its conversion into runoff.

Sala de operaciones del SAIH de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Fuente: página web de la CHE) Operations hall Operations.

The second element needed is a quantitative weather forecast, which in Spain is provided by the State Meteorological Agency (AEMET). But issuing warnings based on the weather forecast alone is insufficient: the weather forecast does not take into account when, how much and where runoff or flooding occurs.

Overcoming these two problems requires a hydrological model and a hydraulic model. Or at least the former.

Ebro River Basin Management Authority automatic HIS operations room (Source: Authority website)

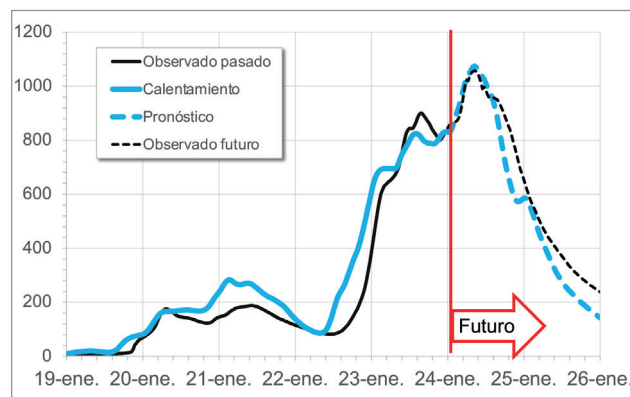
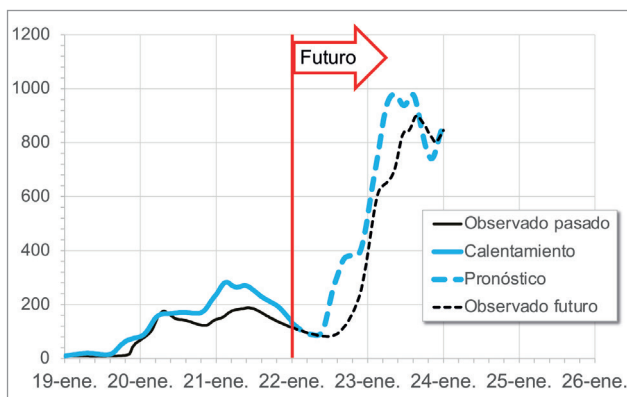
Simulation with a hydrological model, using the information observed up to the present moment in time as input, enables a complete vision of what is happening in the hydrographic network, and, if the model is spatially distributed, at any point in the area.

There are many examples of hydrological modelling systems that can be used, but HEC-HMS, SWAT, or the Spanish system TETIS stand out. In reality, it is desirable to use more than one model so that their different capabilities can be availed of to obtain a better prediction. One aspect to consider in the model is the inclusion of significant anthropogenic effects on floods, such as reservoirs (flood attenuation) and irrigation (alteration of the initial soil moisture condition). In flash floods, the modelling of the sediment cycle must be added, as sediment accounts for a significant percentage of the total flow. In the case of the flood in southern Valencia, we estimate that the sediment conveyed to the Rambla del Poyo gauging station accounted for 30% of the total volume of the event.

However, with historical information alone, the lead time for hydrological prediction is approximately one third of the response time of the basin. This may be sufficient for large river basins (greater than 10,000 km²), but not for medium-sized or smaller basins, where flash flooding events provide a lead time of just one or two hours.

To gain lead time and improve accuracy, the weather forecast must be integrated with the hydrological model. The figure below demonstrates that combining a reliable weather forecast with an accurate hydrological model yields excellent predictions 48 hours in advance. This applies to both the prediction of the peak before the onset of the flood (left panel) and the conclusion of the flood during the rising limb of the hydrograph (right panel)

Predicciones del modelo hidrológico TETIS v9 con 48 horas de antelación de la crecida del río Sella



Predicciones del modelo hidrológico TETIS v9 con 48 horas de antelación de la crecida del río Sella (1,180 km²) de enero de 2019 utilizando datos SAIH y predicción Harmonie (fuente: elaboración propia).

Predictions provided by the TETIS v9 hydrological model 48 hours in advance of flooding of the River Sella (1,180 km²) in January 2019 using HIS data and Harmonie forecasting (source: own elaboration).

crecida durante la rama ascendente del hidrograma (panel de la derecha).

Lo que tienen pocos SIP operativos en el mundo es una predicción añadida de la inundación. Una opción simple es mediante la interpolación de mapas ya predefinidos o, mejor aún, lanzando un modelo hidráulico bidimensional. Entre los modelos hidráulicos, cabe destacar HEC-RAS, Infoworks y el español Iber. Con la predicción de la inundación, se puede definir mejor la magnitud del evento desde el punto de vista de los calados y velocidades que se pueden alcanzar y su extensión. De esta forma se facilitaría el despliegue del plan de emergencia en la zona inundable.

En realidad, por encima de la información y de los modelos matemáticos, se necesita de un Sistema de Ayuda a la Decisión (o SAD) que proporcione soporte técnico y estratégico para tomar decisiones informadas y eficientes en situaciones complejas, especialmente bajo condiciones de incertidumbre y emergencia. El SAD tiene que estar orientado a la predicción; por ejemplo, resolviendo el problema de la condición inicial de la predicción hidrológica o planteando escenarios meteorológicos diferentes al predicho. Aunque se puede desarrollar dentro de los SAIH, las especificidades de lo que se necesita hace recomendable utilizar SAD ya desarrollados y con una historia de implementación, entre los que destaca el SAD FEWS.

Por último, los aspectos sociales no deben subestimarse. La efectividad de las alertas depende de que las comunidades confíen en el sistema y sepan cómo reaccionar. Esto requiere campañas educativas y esfuerzos para garantizar que la tecnología esté alineada con las realidades locales.

Pero no se parte de cero. En el ámbito de los SPI regionales, destaca el *European Flood Awareness System (EFAS)* del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus. Este sistema es fundamental para la gestión del riesgo hídrico a escala regional. Sin embargo, al trabajar a gran escala, su resolución espacial puede no ser suficiente para capturar deta-

(1,180 km²) de enero de 2019 utilizando datos SAIH y predicción Harmonie (fuente: elaboración propia).

Predictions provided by the TETIS v9 hydrological model 48 hours in advance of flooding of the River Sella (1,180 km²) in January 2019 using HIS data and Harmonie forecasting (source: own elaboration).

Few operational FPSs in the world have an additional flood prediction component. A simple option is the interpolation of pre-defined maps, or an even better alternative is to launch a two-dimensional hydraulic model. Notable hydraulic modelling systems include HEC-RAS, Infoworks, and the Spanish system Iber. With flood prediction, it is possible to better define the magnitude of the event in terms of water depths, velocities, and the extent of flooding. This would facilitate the deployment of the emergency plan in the flood-prone area

In reality, over and above information and mathematical models, a Decision Support System (or DSS) is needed to provide technical and strategic support to make informed and efficient decisions in complex situations, especially in conditions of uncertainty and emergency. The Decision Support System must be geared towards prediction; for example, addressing the issue of the initial condition in hydrological prediction or proposing meteorological scenarios different from those predicted. Although the DSS can be developed within an HIS, the specific requirements make it advisable to use a DSS that has already been developed and has a history of implementation. An outstanding example is the Flood Early warning System (FEWS).

Finally, social aspects should not be underestimated. The effectiveness of alerts depends on communities having confidence in the system and knowing how to respond. This requires educational campaigns and efforts to ensure that the technology is aligned with local realities.

But we are not starting from scratch. The Copernicus Emergency Management Service's European Flood Awareness System (EFAS) stands out as an example of a regional FPS and is essential for water risk

lles específicos en áreas más pequeñas y difícilmente pueden incluir una modelación hidráulica.

En contraste, un sistema a escala de cuenca se centra en un área geográfica más delimitada. Este enfoque permite un análisis más detallado y preciso de las condiciones locales, integrando modelización hidrológica e hidráulica específica para anticipar caudales y optimizar la gestión de embalses. Aunque no tiene la capacidad de cubrir vastas áreas, su ventaja es la precisión en la toma de decisiones locales. Y existen en España casos de éxito en algunas de nuestras confederaciones, como son los SPI de la Confederación Hidrográfica del Ebro, de la Agencia Vasca del Agua y de la Confederación Hidrográfica Galicia-Costa, entre otros. Pero no en todas.

Como investigador no me resisto a avanzar cuáles deben ser las mejoras de un SPI ya implantado y que deberían ser objeto de investigación:

- Para introducir una aproximación a la incertidumbre de las predicciones es fundamental contar con un *ensemble* de predicciones meteorológicas, cosa que no ocurre con la predicción actual Harmonie de AEMET y sí con otros sistemas de predicción europeos.
- A partir de las imágenes de radar es posible realizar predicciones a muy corto plazo (del orden de 2 horas) de mucha mayor precisión que las basadas en modelos numéricos de la atmósfera. Es lo que se denomina *nowcasting*.
- Lidiar adecuadamente con el error de localización espacial de las tormentas, especialmente las de tipo convectivo.
- Adaptar los modelos hidrológicos calibrados con observaciones históricas a las diferentes características de las predicciones meteorológicas. Por ejemplo, la existencia de infra o sobreestimaciones de la lluvia.
- Añadir procesos de asimilación de la información para mejorar los modelos hidrológicos en tiempo real.
- Incluir un modelo de error para corregir las predicciones, basado en modelos estocásticos o en la IA.
- Mejorar la velocidad de computación de los modelos hidráulicos incluso con modelos surrogados de IA.
- Resolver el problema de optimización de la gestión de embalses durante una crecida, para lo que es imprescindible la inclusión de la incertidumbre en la predicción hidrológica.

Es cierto que la inundación de octubre ha sido altamente extraordinaria (estimamos entre 2000 y 5000 años su período de retorno), y es imposible frente a ese grado de improbabilidad y magnitud impedir cualquier víctima, pero los ciudadanos españoles nos merecemos que la administración pública haga lo posible para no repetir cifras tan elevadas de fallecidos, tanto en el sur de Valencia como en cualquier otra zona inundable de España. 🍌

management at regional level. However, because it operates on a large scale, the spatial resolution of the EFAS may not be sufficient to capture specific details in smaller areas and the inclusion of hydraulic modelling is difficult.

In contrast, a river basin-scale system focuses on a more delimited geographical area. This approach allows a more detailed and accurate analysis of local conditions, integrating specific hydrological and hydraulic modelling to anticipate flows and optimise reservoir management. Although it does not have the capacity to cover vast areas, the advantage of such a system is precision in local decision-making. And there are successful cases of FPS implementation in a number of Spanish river basin management authorities, such as the Ebro River Basin Management Authority, the Basque Water Agency and the Galicia-Costa River Basin Management Authority, among others. But this is not the case of all river basin management authorities.

As a researcher, I am not reluctant to suggest the improvements that should be made to currently implemented FPSs, which should be the subject of investigation:

- To incorporate an approach to uncertainty in predictions, it is essential to have an ensemble of weather forecasts, which is not the case with AEMET's current Harmonie forecasting system but is the case with other European forecasting systems.
- From radar images, it is possible to make very short-term predictions (in the order of 2 hours) of much higher accuracy than those based on numerical models of the atmosphere. This is known as *nowcasting*.
- The spatial location error of storms must be dealt with adequately, especially in the case of convective storms.
- Adapt hydrological models calibrated with historical observations to the different characteristics of weather forecasts. For example, the existence of underestimates or overestimates of rainfall.
- Incorporate information assimilation processes to improve real-time hydrological models.
- Incorporate an error model to correct predictions, based on stochastic models or AI.
- Improve the computational speed of hydraulic models, even using surrogate AI models.
- Address the problem of optimising reservoir management during a flood, for which it is essential to include uncertainty in hydrological prediction.

It is true that the flooding in October was particularly extraordinary (we estimate its return period to be between 2000 and 5000 years), and it is impossible to prevent any casualties given this degree of improbability and magnitude. However, Spanish citizens deserve public authorities that do their utmost to prevent a repetition of such high numbers of deaths, be it in the south of Valencia or any other flood-prone area of Spain. 🍌