

MERLIN: Una nueva herramienta para la predicción del riesgo de inundaciones en la demarcación hidrográfica Galicia-Costa

MERLIN: A new tool for flood hazard forecasting at the Galicia-Costa Hydrographic Demarcation

Ignacio Fraga^{a1*}, Luis Cea^{a2}, Jerónimo Puertas^{a3}, Gonzalo Mosqueira^{b1}, Belén Quinteiro^{b2}, Sonia Botana^{b3}, Laura Fernández^{b4}, Santiago Salsón^{c1}, Guillermo Fernández-García^{c2}, Juan Taboada^{c3}

^a Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad de A Coruña. ETS Caminos, Canales y Puertos, Campus Elviña s/n. 15008 A Coruña, España.

^b Augas de Galicia. Consellería de Infraestructuras e Mobilidade. Praza de Camilo Díaz Balalío, 7, 9, 15704 Santiago de Compostela. España.

^c Meteogalicia. Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Vivenda. Rúa Roma, nº 6. 15707 Santiago de Compostela, España.

E-mail: ^{a1}ignacio.fraga@udc.es, ^{a2}luis.cea@udc.es, ^{a3}jeronimo.puertas@udc.es, ^{b1}gonzalo.mosqueira.martinez@xunta.gal, ^{b2}belen.quinteiro.seoane@xunta.gal, ^{b3}sonia.botana.soto@xunta.gal, ^{b4}tecnicoplanificacion.augas@xunta.gal, ^{c1}coordinador-clima.meteogalicia@xunta.gal, ^{c2}guillermo.fernandez.garcia@xunta.gal, ^{c3}jtaboadahidalgo@gmail.com

*Autor para correspondencia

Recibido: 05/05/2021

Aceptado: 08/07/2021

Publicado: 31/07/2021

Citar como: Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Mosqueira, G., Quinteiro, B., Botana, S., Fernández, L., Salsón, S., Fernández-García, G., Taboada, J. 2021. MERLIN: A new tool for flood hazard forecasting at the Galicia-Costa Hydrographic Demarcation. *Ingeniería del agua*, 25(3), 215-227. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15565>

RESUMEN

Este artículo presenta MERLIN, una nueva herramienta para estimar el riesgo de inundaciones a partir de predicciones de caudales y calados en Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundaciones (ARPSIS) de la demarcación hidrográfica Galicia-Costa. El sistema MERLIN opera en dos fases. Durante una primera fase de inicialización, modelos hidrológicos de las cuencas incluidas en el sistema asimilan datos hidro-meteorológicos para caracterizar la capacidad de infiltración del terreno. Durante la fase de predicción, los modelos hidrológicos previamente inicializados se alimentan con predicciones meteorológicas para determinar los caudales esperados durante los próximos días. Las predicciones de caudal alimentan a modelos hidráulicos de las ARPSIS que determinan los calados y la extensión de zonas inundadas. El funcionamiento de MERLIN se evaluó en 4 cuencas piloto a partir de los caudales registrados durante los temporales del invierno del 2019-2020, mostrando una buena capacidad de predecir los valores posteriormente observados.

Palabras clave | inundación, predicción, gestión de riesgo de inundación.

ABSTRACT

This article presents MERLIN, a tool for flood hazard evaluation, which forecasts discharges and water depths in flood prone areas of the Galicia Costa district. The warning system operates in two stages. During the hindcast stage, hydrological models of the basins included in the system assimilate hydro-meteorological data in order to characterize soil infiltration capacity. During the forecast stage, hydrological models are fed with meteorological predictions and discharge forecasts along the basins. Forecasted discharges define boundary conditions of hydraulic models, which compute the flood extent and the water depths over the upcoming days. The performance of MERLIN was evaluated in 4 areas using discharge data from the winter months of 2019-2020. Results proved MERLIN's ability of predicting the discharges observed afterwards.

Key words | floods, early warning system, forecasting, flood risk management.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas se observa un aumento de las inundaciones en todo el planeta (Berghuijs et al., 2017). Este incremento se explica por diferentes aspectos. Por una parte, el aumento de las superficies impermeables, debido a la creciente urbanización, incrementa los caudales punta en los cauces (Rosburg et al., 2017). Por otra parte, el cambio climático ha modificado los patrones de lluvia, aumentando su intensidad y disminuyendo su frecuencia (Arnell and Gosling, 2016). También ha aumentado el nivel medio del mar, elevando el riesgo de inundación en poblaciones costeras (IPCC, 2018). Además, la presión urbanística sobre los cauces acentúa el impacto negativo de las avenidas, tanto en términos económicos como humanos. En las últimas décadas, los daños provocados por las inundaciones ascendieron a más de 625 millones de dólares, según el *International Disaster Database* (Wallemarq et al., 2018).

Para hacer frente a esta situación, cada vez cobran más importancia las medidas no-estructurales. Estas medidas aumentan la resiliencia de los núcleos urbanos a base de políticas y medidas de protección que permiten reducir el riesgo de inundación. Dentro de las medidas no estructurales más extendidas, destacan los sistemas de alerta temprana frente a riesgo de inundación, encontrando ejemplos de sistemas a las escalas local (Hossain et al., 2014; Krajewski et al., 2017), nacional (Kellens et al., 2013; Weerts et al., 2011), y supra-nacional, como el sistema *European Flood Awareness System* (EFAS, Thielen et al., 2009).

Actualmente, la mayoría de sistemas de alerta temprana frente a riesgo de inundación presentan una estructura similar. El funcionamiento del sistema comienza con la adquisición de datos meteorológicos, que suelen corresponder a las predicciones obtenidas por modelos numéricos y las observaciones de redes de medida. Esta información meteorológica alimenta modelos hidrológicos que simulan la transformación lluvia-escorrentía para determinar el caudal esperado en los próximos días. Estos modelos pueden ser agregados (Alvarez-Garreton et al., 2015), semi-distribuidos (Mure-Ravaud et al., 2016) o distribuidos (Thiemig et al., 2015). También existen casos de sistemas de alerta que emplean técnicas de inteligencia artificial como redes neuronales (Kasiviswanathan et al., 2016) o programación genética (Kumar and Sahay, 2018) aunque su fiabilidad está condicionada por los eventos de lluvia empleados en la calibración, lo que muchas veces limita su aplicación en situaciones extremas. Independientemente del tipo de modelo utilizado para calcular la transformación lluvia-escorrentía, para predecir correctamente los caudales esperados es necesario caracterizar la humedad del suelo antecedente. Una misma avenida puede generarse a partir de precipitaciones intensas sobre un terreno relativamente seco, o a partir de precipitaciones moderadas sobre un terreno saturado. La mejoría en la simulación de la transformación lluvia-escorrentía cuando los modelos incorporan información de humedad ha sido destacada en numerosos estudios (Massari et al., 2015; Cea and Fraga, 2018). En ese sentido, Wanders et al. (2017) presentan un aumento en un orden de magnitud en la precisión de los caudales predichos por un sistema de alerta cuando los modelos hidrológicos pasan a asimilar información de la humedad del suelo.

La mayoría de los sistemas de alerta temprana evalúan el riesgo de inundación directamente a partir de los caudales calculados. Cuando los caudales superan unos umbrales determinados, se informa a los organismos correspondientes, quienes activan los protocolos necesarios. Algunos sistemas, sin embargo, incorporan un paso adicional, que consiste en predecir la distribución de los calados y velocidades a partir de las estimaciones de caudal. Para ello se utilizan modelos hidráulicos, que además permiten incorporar el efecto de la marea. Este aspecto es especialmente importante en áreas costeras, donde la extensión de la inundación está muchas veces condicionada por los caudales desaguados y el nivel del mar (Sopelana et al., 2018). Además, los fenómenos meteorológicos extremos, responsables de la mayoría de eventos de inundación, provocan muchas veces elevaciones del nivel del mar (mareas meteorológicas) que aumentan el riesgo de inundación. A pesar del notable avance que supone la predicción de niveles frente a únicamente la predicción de caudales, son muy pocos los sistemas de alerta que incorporan este último paso debido a su coste computacional (Nguyen et al., 2016; Sanz Ramos et al., 2018).

En los últimos años, se han producido varios avances que han contribuido a mejorar el funcionamiento de los sistemas de alerta temprana frente a riesgo de inundación. Por una parte, se ha generalizado la disponibilidad y el acceso a observaciones procedentes de radares y satélites meteorológicos. Estas observaciones, de elevadas resoluciones espacial y temporal, aportan un flujo continuo de datos hidro-meteorológicos de elevada calidad, lo que resulta fundamental para mejorar las predicciones de los modelos numéricos. Además, la generalización de estándares en los formatos de los archivos y los protocolos de transferencia facilita la integración de estas observaciones en sistemas operacionales. Por otra parte, los avances en computación de altas prestaciones (*High performance computing* o HPC en la literatura anglosajona), permiten hacer frente a demandas de cálculo hasta hace poco

imposibles. La paralelización de los modelos y el uso de tarjetas gráficas en el procesamiento permiten actualmente ejecutar en tiempos razonables modelos hidráulicos de detalle, abriendo así la puerta a su incorporación en sistemas operacionales (García-Feal et al., 2018; Xia et al., 2019).

En este artículo presentamos a MERLIN, una herramienta de predicción del riesgo de inundación que aprovecha los avances referidos para elaborar de manera operacional predicciones de caudal y extensión de zonas inundadas. Dicha herramienta es un elemento importante en el sistema de alerta frente a riesgo de inundación que está elaborando la Demarcación Hidrográfica Galicia-Costa. MERLIN (que es el acrónimo de Modelo de Evaluación del Riesgo Local de INundación) asimila observaciones hidrometeorológicas para caracterizar la capacidad de infiltración del terreno al comienzo de la predicción. La predicción de caudales a lo largo de las cuencas incluidas en el sistema se realiza empleando el modelo hidrológico semi-distribuido HEC-HMS, alimentado por predicciones meteorológicas. La predicción de la extensión de las zonas inundadas se realiza empleando el modelo 2D Iber+ (García-Feal et al., 2018), una versión paralelizada en GPU del modelo Iber (Bladé et al., 2014). El cálculo de calados y velocidades supone un avance notable en la predicción de inundaciones, ya que de esta manera se evalúa el riesgo de inundación mediante alertas basadas en criterios hidráulicos, en lugar de predicciones de caudal o precipitación. Son pocos los casos existentes en los que la gestión del riesgo de inundación se basa en alertas hidráulicas, y todavía menos los casos en que estas alertas se generan mediante un sistema operacional. Debido a ello, los avances presentados en este artículo pueden ser de gran interés para administraciones o investigadores interesados en la gestión del riesgo de inundación.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA

MERLIN predice los caudales y calados estimados en ARPSIS de diferentes cuencas a partir de observaciones y predicciones hidrometeorológicas. El funcionamiento del sistema se organiza en dos fases: una fase de inicialización y una fase de predicción (Figura 1). En cada fase, el sistema realiza una serie de procesos de forma paralela en cada cuenca incluida en el sistema. Durante la

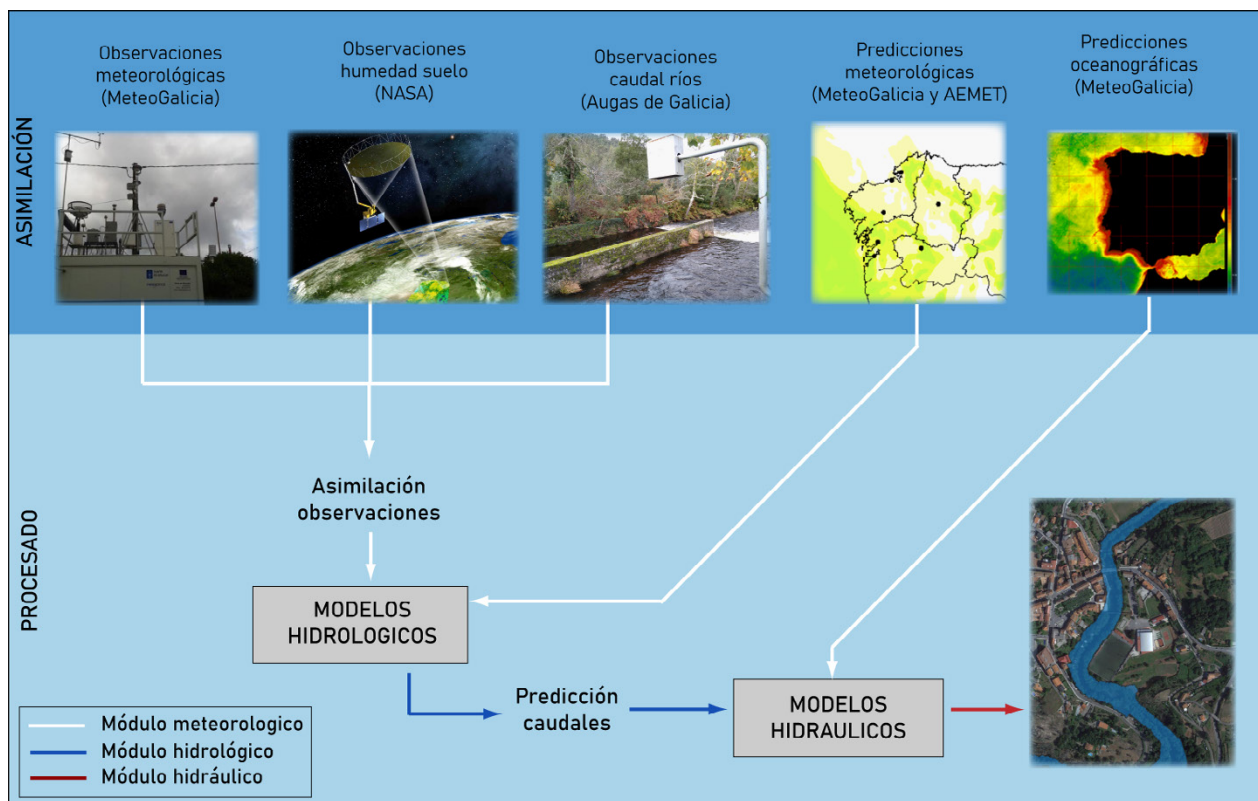


Figura 1 | Diagrama de procesos realizados por MERLIN, indicando los procesos realizados por cada módulo.

fase de inicialización, el sistema caracteriza el estado de la humedad del suelo en las cuencas al comienzo de la predicción. Para ello, el sistema alimenta un modelo hidrológico de cada cuenca con observaciones meteorológicas y de caudales de los últimos 30 días. Se seleccionó un periodo de tiempo de 30 días para la fase de inicialización por los resultados presentados en Cea y Fraga (2018), donde se observa una correlación entre la humedad del suelo y la precipitación de los 30 días anteriores en áreas del noroeste peninsular. Durante la fase de predicción, se determinan los caudales esperados durante los próximos 4 días a lo largo de las cuencas incluidas en el sistema. Para ello se utilizan predicciones meteorológicas y el modelo hidrológico de cada cuenca previamente inicializado. Los hidrogramas obtenidos se utilizan como condiciones de contorno de un modelo hidráulico de la ARPSIS de cada cuenca para evaluar el riesgo de inundación. Para realizar todas estas tareas, MERLIN se estructura en tres módulos (meteorológico, hidrológico e hidráulico), constituidos por una serie de librerías escritas en lenguaje Python. Estas librerías se coordinan mediante un *script*, escrito también en Python, que regula el funcionamiento del sistema y el intercambio de información entre módulos representado en la Figura 1.

Módulo meteorológico

El módulo meteorológico adquiere y procesa los datos meteorológicos utilizados por los modelos hidráulicos e hidrológicos. Asimismo, el módulo realiza la conversión de la información a los formatos requeridos por cada modelo.

Durante la fase de inicialización, la información meteorológica que asimilan los modelos hidrológicos son observaciones de la humedad del suelo, caudal, precipitación, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar. Los datos de precipitación, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar se obtienen de mapas meteorológicos que elabora diariamente Meteogalicia, la agencia meteorológica gallega. Estos mapas tienen resoluciones espacial y temporal de 250 metros y 1 hora respectivamente. Meteogalicia elabora estos mapas interpolando espacialmente los registros de su red de estaciones de medida. En el caso de la precipitación, la interpolación se realiza fusionando las observaciones del radar meteorológico y la red pluviométrica. De esta manera se obtiene una estimación muy precisa de la lluvia real, ya que se combina la capacidad del radar de capturar la distribución espacial de la lluvia y la precisión de los pluviómetros al medir la precipitación en superficie (Jewell and Gaussiat, 2015). La información de la humedad del suelo al comienzo de la fase de inicialización corresponde a uno de los productos de datos del satélite *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) que opera la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) del gobierno estadounidense. En concreto se utilizan los datos de humedad del subsuelo del modelo de nivel 4, que corrige las observaciones del satélite con re-análisis de modelos numéricos. Los datos de humedad tienen una resolución espacial de 9 km. Los datos de caudal empleados en la fase de inicialización corresponden a los registros de las estaciones de aforo que opera Augas de Galicia, la administración hidráulica de la comunidad gallega. Estas estaciones aportan información del caudal con frecuencia diezminutal y en tiempo real.

Durante la fase de predicción, el módulo meteorológico adquiere las predicciones correspondientes a los próximos 4 días de precipitación, temperatura y humedad del aire, radiación y velocidad del viento, obtenidas con el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF, Skamarock et al., 2005) que opera Meteogalicia. Estas predicciones tienen resoluciones espacial y temporal de 4 km y 1 hora respectivamente. MERLIN utiliza 3 productos de predicción obtenidos con el modelo WRF: dos predicciones deterministas y el llamado *ensemble* meteorológico. Las predicciones deterministas consisten en una única predicción para las próximas 96 horas. Estas predicciones se elaboran dos veces al día, una primera comenzando a las 00 horas (horario UTC) y otra comenzando a las 12 horas (horario UTC). La predicción *ensemble* consiste en una familia de 21 predicciones meteorológicas. Para obtener estos 21 miembros se introducen pequeñas variaciones en las condiciones iniciales del modelo meteorológico, por lo que suponen una representación de los escenarios meteorológicos esperables durante los próximos días. El *ensemble* meteorológico se elabora únicamente partiendo de las 00 horas. Todas las predicciones meteorológicas están disponibles públicamente a través del servidor Thredds de Meteogalicia. El módulo meteorológico adquiere los datos necesarios desde este servidor empleando el protocolo OpenDAP, que permite descargar únicamente la información de variables y áreas de estudio concretas. Esta capacidad reduce de manera importante el tiempo necesario para el procesado de datos meteorológicos, que suele ser uno de los cuellos de botella en los sistemas operacionales dado el volumen que suponen estos datos. Para adquirir y procesar la información necesaria, el módulo meteorológico cuenta con una familia de funciones escritas en Python. Estas funciones, además, exportan los datos en los formatos de entrada requeridos por los modelos hidrológicos e hidráulicos.

En la fase de predicción, el módulo meteorológico también adquiere las predicciones de nivel de marea en la desembocadura de los ríos incluidos en el sistema de alerta. Las predicciones se obtienen del modelo *Regional Ocean Modelling System* (ROMS) (Shchepetkin y McWilliams, 2005) que opera Meteorología de la margen atlántica ibérica (Carracedo, 2003; Venâncio et al., 2019). Este modelo incorpora los forzadores de marea astronómica y meteorológica, lo que permite incluir en el sistema de alerta las elevaciones del nivel del mar provocadas por fenómenos meteorológicos extremos (*storm surge*). Los niveles de marea predichos definen las condiciones de contorno de los modelos hidráulicos, como se detalla en las secciones siguientes.

Módulo hidrológico

El módulo hidrológico predice los caudales a lo largo de las cuencas incluidas en el sistema de alerta. Este módulo está compuesto por los modelos hidrológicos de las cuencas y una serie de funciones escritas en Python para construir los modelos, lanzar las simulaciones y procesar los resultados. El modelo hidrológico de cada cuenca se construyó empleando la versión 4.2.1 del software HEC-HMS (Scharffenberg y Fleming, 2006). HEC-HMS es uno de los programas más empleados en hidrología operacional debido a que se trata de una herramienta gratuita, con bajo coste computacional, una interfaz amigable y con aplicaciones que permiten adaptar una gran variedad de archivos a los formatos requeridos por el sistema. Sin embargo, dado el carácter modular del sistema MERLIN, el usuario puede reemplazar el software HEC-HMS por otro de su elección. HEC-HMS que discretiza una cuenca en tramos de río y sub-cuencas con características homogéneas. Las formulaciones empleadas para reproducir los procesos físicos que intervienen en la transformación de lluvia-escorrentía se indican en la Tabla 1, encontrando una descripción detallada de cada una de ellas en el manual de usuario del modelo (Scharffenberg y Fleming, 2006). El cálculo de los tiempos de concentración se realizó siguiendo la metodología propuesta por el *United States Department of Agriculture* (USDA, 2010). La geometría de los cauces se consideró rectangular en todos los tramos, con pendientes y anchuras extraídas de los modelos de elevación de 5 metros de resolución elaborados por el Instituto Geográfico Nacional.

Tabla 1 | Formulaciones empleadas para simular los diferentes procesos físicos.

Proceso Físico	Formulación	Parámetros de entrada
Interceptación de lluvia	Dynamic canopy	Capacidad de almacenamiento de cobertura vegetal ¹
Transformación escorrentía	Hidrograma unitario SCS (Cronshey, 1986)	Tiempo de concentración ¹
Infiltración	Soil Moisture Account (Bennet y Peters, 2000)	Porcentaje de contenido de humedad de las capas de suelo y subsuelo ²
		Máxima capacidad de infiltración, almacenamiento y percolación de la capa de suelo ³
		Coefficiente de almacenamiento, percolación y descarga de las dos capas de subsuelo ³
Flujo subterráneo	Modelo de embalse	Coefficiente de descarga ³
Propagación de avenida	Onda cinemática	Coefficiente de Manning ¹
Evapotranspiración	Penman-Montheit	-

Los parámetros indicados con ¹ se obtuvieron de estudios preliminares, los indicados con ² corresponden a datos de entrada y los indicados con ³ son parámetros ajustados durante la inicialización.

Durante la fase de inicialización, se ajustan una serie de parámetros, indicando cuáles en la Tabla 1. Para ello, se simula la transformación lluvia-escorrentía del periodo de inicialización con diferentes combinaciones de los parámetros a ajustar. El hidrograma calculado con cada una de estas combinaciones de parámetros se compara con los registros de caudal de la estación de aforo correspondiente empleando el índice *Peak Weighted Root Mean Square Error* (PWRMSE). Este índice mide el ajuste de una simulación a las observaciones disponibles, ponderando en mayor medida los valores punta. Por tanto, se trata de una métrica especialmente indicada para identificar los valores de parámetros que mejor reproducen las puntas de caudal (Razmkhah, 2016). Los rangos de muestreo de cada parámetro se obtuvieron a partir de estudios preliminares de cada cuenca y se almacenaron en unos archivos .csv, que el sistema lee cada vez que se ejecuta la inicialización. En cada cuenca, a partir de los rangos definidos, se toman 50 combinaciones de parámetros mediante un muestreo con la técnica *Latin Hypercube Sampling* (McKay et al., 1979).

Durante la fase de predicción, los modelos determinan los caudales a lo largo de las cuencas durante los próximos 4 días. Para ello, el modelo hidrológico de cada cuenca se alimenta con las predicciones meteorológicas descritas en el apartado anterior (predicciones deterministas y *ensembles*), y los valores de los parámetros obtenidos en la fase de inicialización.

Módulo hidráulico

El módulo hidráulico calcula los calados y velocidades esperados durante los próximos días en las ARPSIS de las cuencas incluidas en el sistema de alerta temprana, a partir de predicciones de caudal y niveles de marea. El sistema MERLIN emplea el modelo hidráulico Iber+ (García-Feal et al., 2018), una versión paralelizada en GPU del modelo Iber (Bladé et al., 2014). La versión paralelizada del modelo Iber reduce en dos órdenes de magnitud el tiempo de cálculo, lo que resulta especialmente importante para su aplicación en sistemas operacionales.

El ARPSI de cada cuenca se discretiza en un modelo hidráulico independiente, elaborado a partir de topografía de detalle de la zona. Los parámetros de entrada requeridos por cada modelo son los coeficientes de fricción, que se definen a partir de visitas a campo y fotografías aéreas. A diferencia de ciertos parámetros de los modelos hidrológicos, los coeficientes de fricción de los modelos hidráulicos no se calibran en cada ejecución del sistema MERLIN sino que se definen al implementar el modelo hidráulico en el sistema. Debido a ello, los modelos hidráulicos sólo se ejecutan durante la fase de predicción del sistema de alerta.

Para cada día del periodo de predicción, el modelo hidráulico del ARPSI de cada cuenca se ejecuta utilizando como condiciones de contorno los caudales predichos por el modelo hidrológico de la cuenca correspondiente. En el caso de ARPSIS situadas en zonas costeras, también se imponen los niveles de marea en los contornos correspondientes. Durante la predicción con los *ensembles* meteorológicos, cada día del periodo de predicción se simula considerando 3 hidrogramas en lugar de los 21 obtenidos de las diferentes predicciones meteorológicas. De esta manera se reduce el tiempo de cálculo necesario. Los 3 hidrogramas simulados corresponden al valor medio y a los límites superior e inferior del intervalo de confianza del 95% de los caudales predichos por los modelos hidrológicos. En cada ARPSI, a partir de los calados y velocidades máximas obtenidas para cada día se interpolan dos tipos de resultados. El primero de ellos corresponde a la máxima extensión de la zona inundada, que se obtiene delimitando mediante un polígono las áreas con un calado no nulo. El segundo de ellos consiste en una familia de polígonos con el riesgo hidráulico de las áreas anegadas, calculado el riesgo de acuerdo al criterio establecido en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Figura 2).

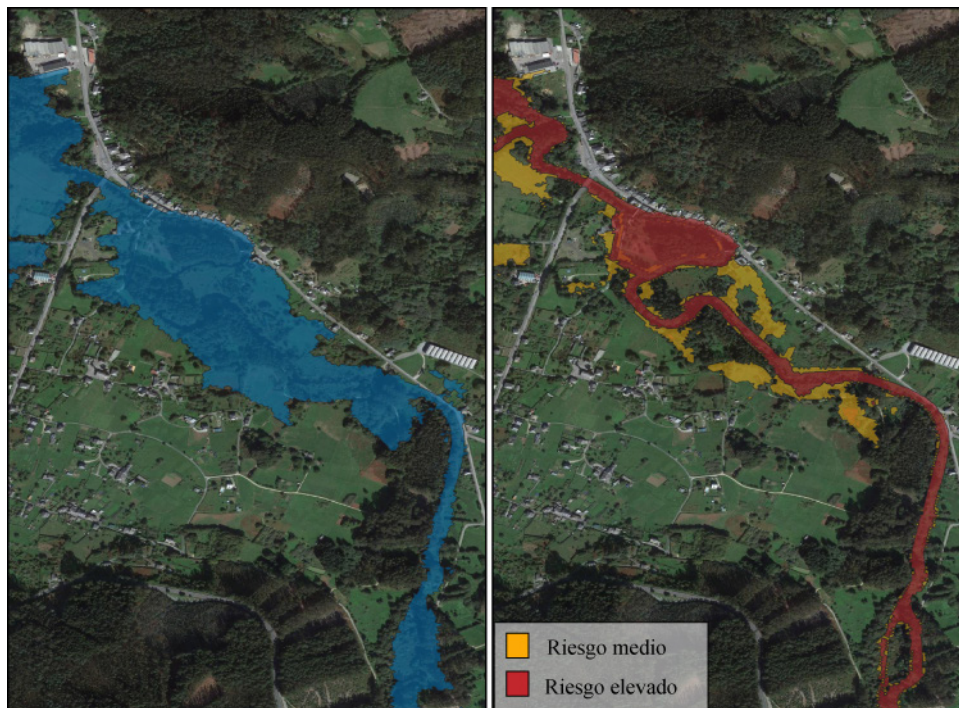


Figura 2 | Ejemplo de polígonos con la máxima extensión de la inundación (izquierda) y zonas de riesgo (derecha).

Aplicación web de visualización de resultados

Para facilitar la consulta de las predicciones elaboradas y simplificar la actuación ante sucesos de inundación de las administraciones competentes, el sistema MERLIN cuenta con una aplicación web de visualización (Figura 3). Esta aplicación se organiza en varios elementos. El visor hidrológico, situado en la esquina superior izquierda, representa las cuencas incluidas en el sistema con un código de colores según el riesgo de inundación de la cuenca. Este riesgo de inundación se evalúa a partir de los caudales predichos, delimitando previamente el caudal que corresponde a un nivel de riesgo bajo (verde), medio (amarillo) o grave (rojo). En el visor hidráulico, situado en la esquina inferior izquierda, se representan los polígonos de inundación y de riesgo hidráulico de cada ARPSI, obtenidos a partir de las predicciones de los modelos hidráulicos. En este visor también se disponen de capas GIS con información de la extensión del dominio público hidráulico y las zona inundables correspondientes a diferentes periodos de retorno. Los visores hidrológicos e hidráulicos cuentan con barras de animación para consultar los resultados correspondientes a diferentes días. En la esquina superior derecha se presenta una tabla-resumen con las predicciones de los modelos hidrológicos, mientras que en la esquina inferior derecha se representan series temporales de caudal y calado en puntos de control de las ARPSIS.

La aplicación web se desarrolló mediante Angular, una tecnología gratuita, que utiliza el lenguaje Java para extender el vocabulario HTML con directivas y atributos. Para generar los visores se utilizó la tecnología *leaflet*. Los resultados correspondientes a cada cuenca se almacenan en unos archivos geosjson, que se sobrescriben cada día.

Implementación en cuencas piloto

El sistema MERLIN está actualmente implementado en 4 cuencas de la demarcación hidrográfica Galicia-Costa. Se trata de las cuencas de los ríos Cee, Grova, Landro y Verdugo-Oitavén, cuya extensión y características se indican en la Figura 4 y Tabla 2 respectivamente. Salvo en el caso del Verdugo-Oitavén, el resto de ARPSIs asociadas a cada cuenca están situadas en la desembocadura de los ríos y por tanto el riesgo de inundación está condicionado también por el nivel de la marea. El sistema

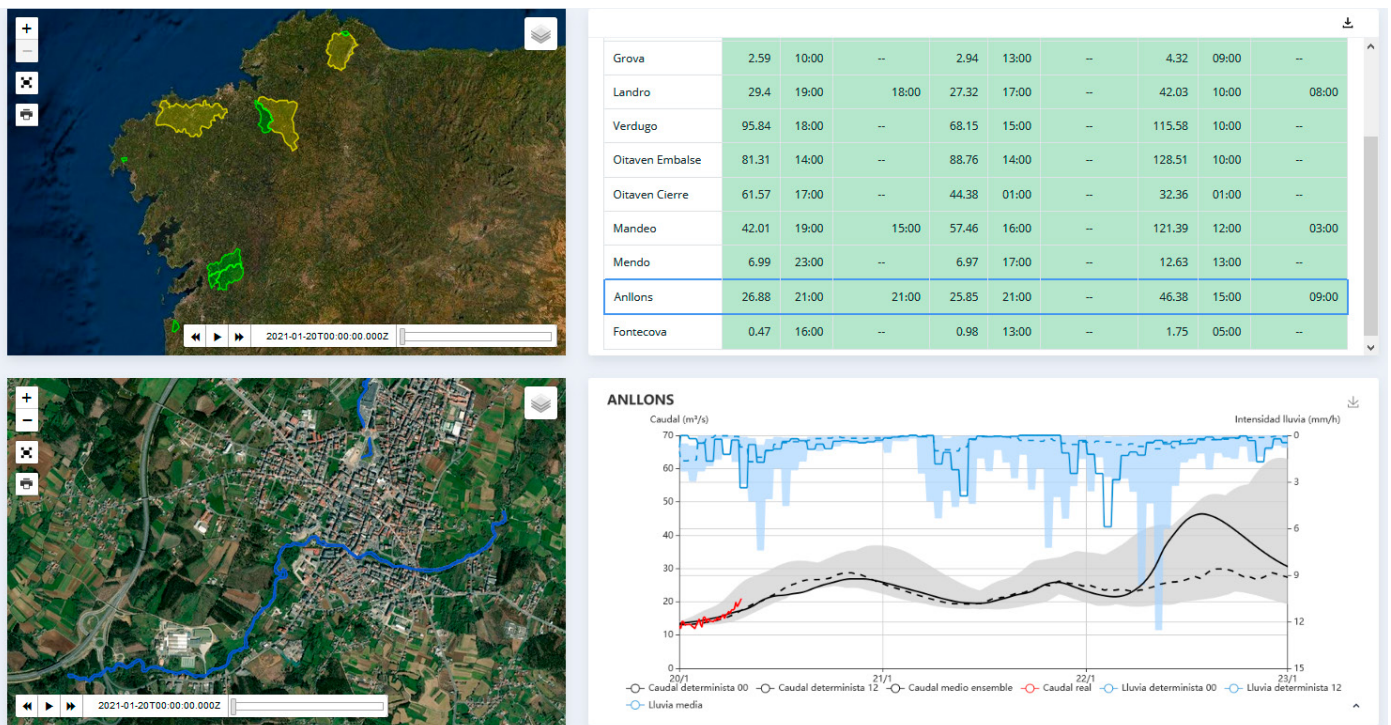


Figura 3 | Captura de la aplicación de visualización de resultados.

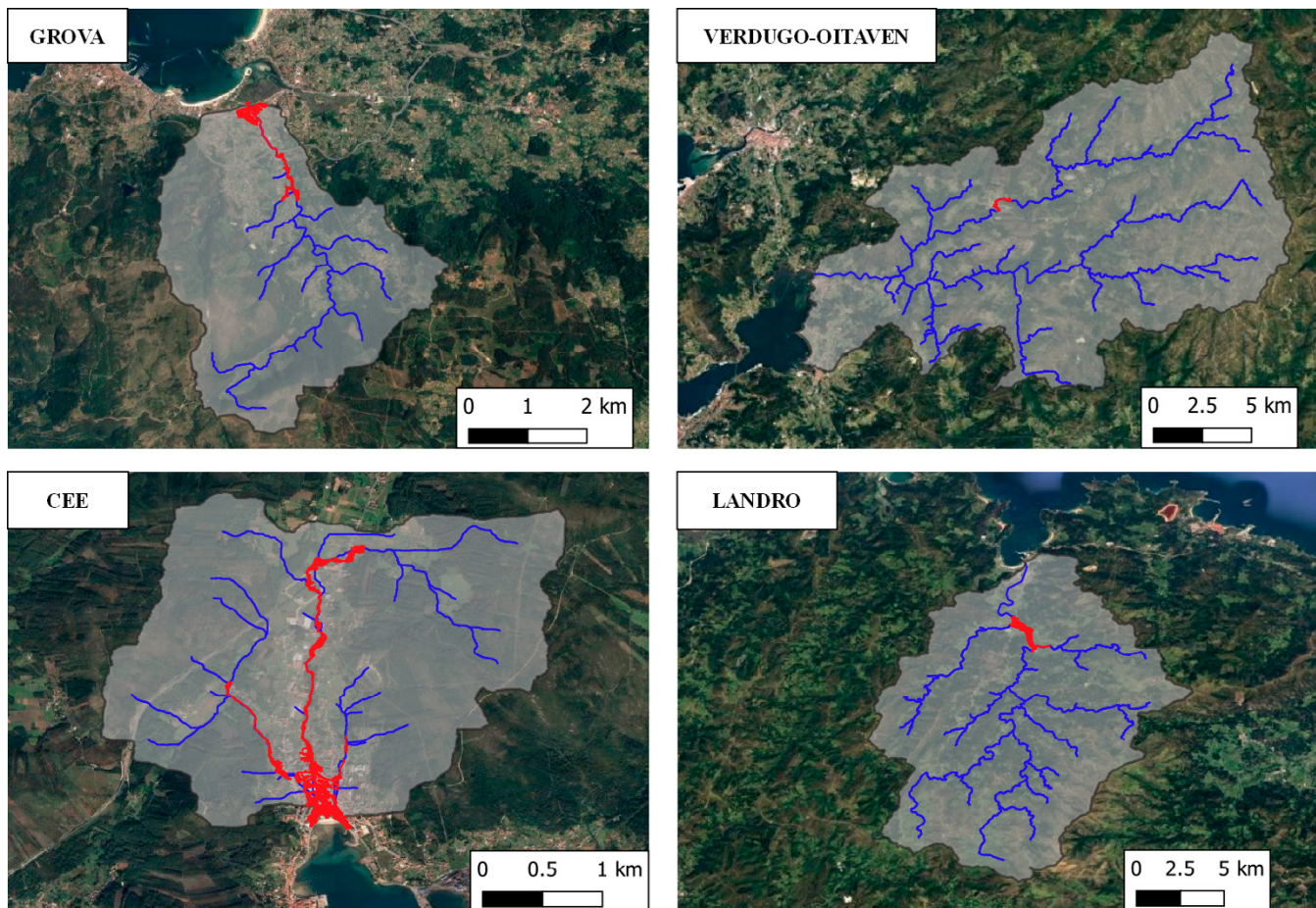


Figura 4 | Extensión de las cuencas incluidas en el sistema de alerta temprana, indicando en rojo las ARPSIS de las cuencas.

se ejecuta sobre una CPU Intel Core i7 9700 3.6 GHz con 8 núcleos y una tarjeta gráfica NVIDIA Gforce GTX1650. En ese equipo, durante la fase de inicialización, la adquisición y procesado de la información meteorológica requiere del orden de 5 minutos, mientras que los cálculos hidrológicos en torno a media hora. En la fase de predicción, el procesado de la información meteorológica es ligeramente superior al de la inicialización (del orden de 10 minutos), la predicción hidrológica requiere tiempos del orden de 10 minutos y la predicción hidráulica unos 20 minutos. Para la predicción con los ensembles meteorológicos son necesarios unos 60 minutos, entre el procesado meteorológico (10 minutos), la predicción hidrológica (20 minutos) y la predicción hidráulica (30 minutos). La generación y exportación de los archivos con los resultados hidráulicos e hidrológicos de cada cuenca, leídos por el visor web, requiere sólo unos pocos segundos. Es importante destacar que MERLIN es un sistema completamente paralelizado. El procesado meteorológico y las posteriores predicciones hidráulicas e hidrológicas se realiza mediante hilos de trabajo independientes. Debido a ello, el sistema es altamente escalable y puede ampliarse a más cuencas sin que esto incremente el tiempo necesario para elaborar las predicciones (siempre y cuando los recursos de cálculo sean suficientes).

Tabla 2 | Principales características de las cuencas incluidas en el sistema MERLIN.

Cuenca	Área (km ²)	Q ₁₀₀ ARPSI (m ³ /s)	T _c (min)	Longitud río (km)	Uso de suelo (%)		
					Bosque	Agrícola	Praderas y arbustos
Cee	10.3	13.7	50	5.6	28	42	30
Grova	21.7	32.0	80	8.2	27	27	46
Landro	277.0	301.5	225	31.8	40	10	50
Verdugo - Oitavén	343.6	253.8	300	28.6	50	10	40

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizó el funcionamiento de MERLIN durante el invierno 2019-2020, comparando las predicciones realizadas con las posteriores observaciones de caudal. Durante estos meses, y especialmente a lo largo de Diciembre, Galicia sufrió el paso de varias borrascas que dieron lugar a eventos de lluvia particularmente intensos. De manera global, los resultados obtenidos muestran una buena capacidad del sistema de predecir el nivel de riesgo en las 4 cuencas.

En la Figura 5 se muestran los resultados correspondientes a las cuencas de los ríos Cee y Verdugo, representativos de los obtenidos en las otras dos cuencas. La mayoría de los caudales máximos diarios predichos presentan diferencias inferiores al 25% con respecto a las posteriores observaciones. Dado que estas diferencias son el resultado de todas las incertidumbres de la predicción (errores en la predicción meteorológica, en los modelos hidrológicos, etc.), los resultados se consideran muy satisfactorios. El índice R^2 , que mide el ajuste de las predicciones a las posteriores observaciones, es más alto en las cuencas de mayor superficie ya que pequeñas desviaciones en la evolución de los frentes de lluvia tienen menor impacto en las predicciones de caudal. Por el contrario, en las cuencas más pequeñas (Cee y Grova) una ligera variación en la trayectoria del frente puede provocar importantes variaciones en la lluvia acumulada en la cuenca. Sin embargo, en cuencas pequeñas, el índice R^2 sigue siendo aceptable lo que confirma la aplicabilidad del sistema también a este tipo de cuencas. En todas las zonas estudiadas se observa una mejora en la precisión de las predicciones con el uso de los *ensembles* meteorológicos, confirmando la utilidad de estas predicciones en la gestión de inundaciones.

El tipo de frente de lluvia también influye en la incertidumbre de las predicciones de caudal. El día 12 de Diciembre se registró el paso de un extenso frente de lluvia que dejó precipitaciones en toda la comunidad. La evolución de este frente fue muy gradual y se pudo predecir adecuadamente con el modelo meteorológico. Debido a ello, la incertidumbre en las predicciones de caudal fue muy reducida, mostrando además un buen ajuste de los valores registrados (Figura 6 izquierda). Por el contrario, el día 18 se produjo la llegada de un frente muy explosivo, con una evolución difícil de estimar. Las predicciones meteorológicas mostraron una mayor incertidumbre, que se tradujo en mayores intervalos de confianza en las estimaciones de caudal (Figura 6 derecha).

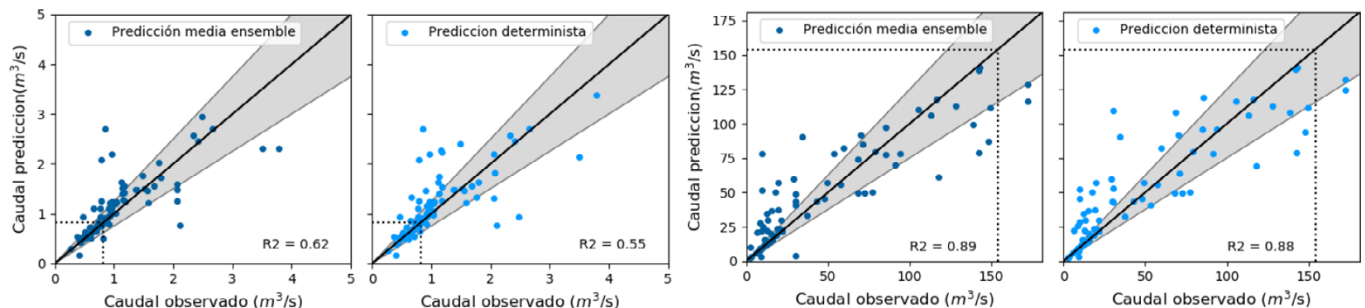


Figura 5 | Caudales máximos diarios predichos y observados en las cuencas del Cee (izquierda) y Verdugo(derecha). Las líneas punteadas corresponden a los máximos aforos disponibles en la estación. La línea continua indica un ajuste 1:1 y la zona sombreada desviaciones inferiores al 25%.

En todas las cuencas incluidas en el sistema de alerta se observa un descenso en la fiabilidad de las predicciones con el aumento del horizonte temporal. La Figura 7 muestra los resultados correspondientes a la cuenca del río Landro pero en el resto de cuencas se observa un comportamiento similar. Los coeficientes R^2 del caudal máximo predicho descienden del orden de un 50% al aumentar el horizonte temporal por encima de las 24 horas. Este descenso en la fiabilidad de las predicciones de caudal se explica por la variabilidad de las predicciones meteorológicas. Debido a su situación geográfica, Galicia se encuentra en la zona de llegada de los frentes generados en el océano Atlántico. La llegada, e incluso la posición de estos frentes, son difícilmente previsibles con días de antelación, debido a que su evolución está condicionada por una gran variedad de factores (vientos, radiación, etc.), difíciles de monitorizar y modelar en el medio plazo.

Durante la etapa de validación, se produjo el rebase del cauce en algunas de las ARPSIS incorporadas al sistema. A modo de ejemplo, se presenta la inundación predicha por el sistema en dos áreas el día 12 de Diciembre. Sin embargo, no se dispuso de datos

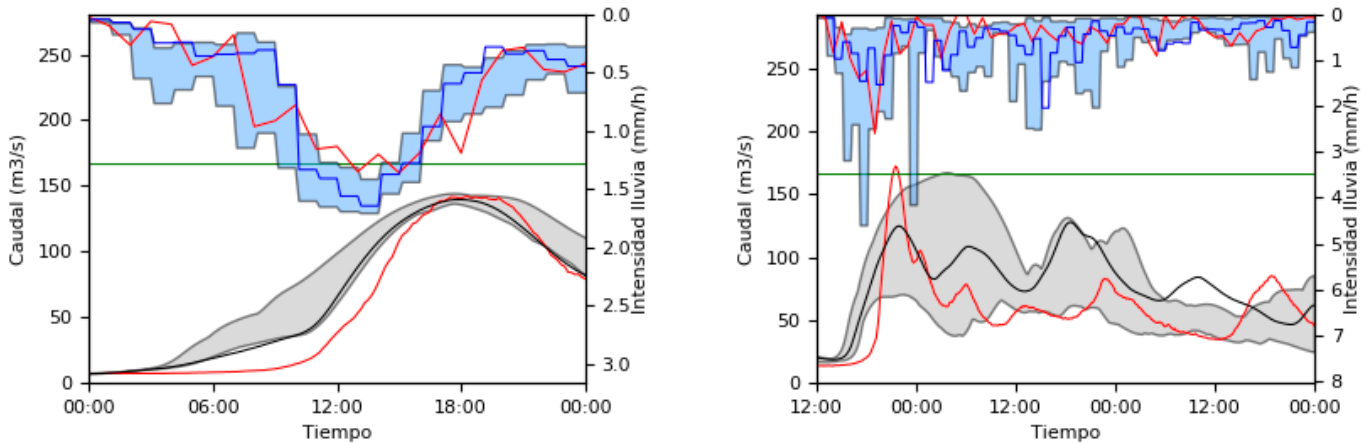


Figura 6 | Resultados de la predicción realizada en el río Verdugo durante los días 12 (izquierda) y 18 (derecha) de Diciembre. Las líneas sólidas negras y azules corresponden a las predicciones deterministas de caudal y lluvia respectivamente, los sombreados a los intervalos de confianza del 95% derivados de la predicción ensemble, las líneas rojas a las observaciones a posteriori y la línea verde al periodo de retorno de 10 años.

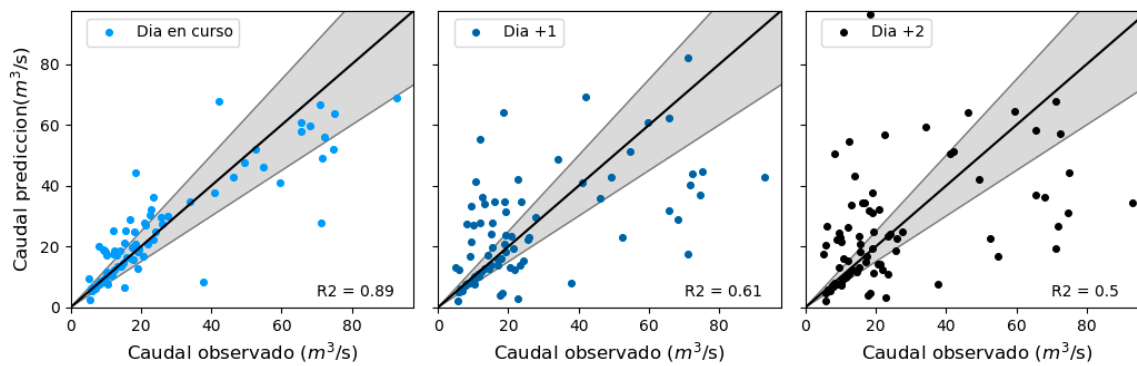


Figura 7 | Comparación de caudales predichos y observados por el sistema MERLIN en la cuenca del río Landro.



Figura 8 | Inundaciones predichas en la ARPSI del río Landro (izquierda) y Verdugo (derecha) durante el día 12 de Diciembre.

de campo acerca de la extensión de zonas inundadas durante el periodo de validación, que permitiesen evaluar la fiabilidad de las predicciones realizadas por los modelos hidráulicos. A corto plazo, sin embargo, se espera disponer de esta información en futuros episodios gracias al compromiso de colaboración por parte de Protección Civil.

Actualmente, MERLIN se está implementando en más cuencas de la demarcación hidrográfica Galicia Costa, incorporando así los principales ríos al sistema de alerta (Anllóns, Mandeo, Xallas, Tambre, Ulla y Sar, entre otros). Además, también se están aumentando las capacidades del sistema. Por una parte, se está trabajando en incorporar el efecto de los embalses en la propagación de las avenidas. A partir de las consignas de explotación de los embalses, se están desarrollando formulaciones que permitirán reproducir la operación del embalse y mejorar la predicción de caudales en cuencas con obras de regulación. La información generada también podrá ser utilizada por los gestores de los embalses para mejorar su explotación. Por otra parte, se está investigando en la incorporación al sistema de modelos duales de drenaje urbano. Esto permitirá predecir el riesgo de inundación pluvial, asociado a eventos de precipitación que superan la capacidad de evacuación de redes de drenaje.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó la herramienta MERLIN, que realiza predicciones de caudal y nivel de lámina a partir de observaciones y predicciones meteorológicas, apoyándose en modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulicos (Iber+). El uso de modelos hidráulicos supone un importante avance con respecto a herramientas parecidas actualmente disponibles, ya que permite delimitar la extensión de la inundación esperada e incorporar el efecto de la marea en la hidrodinámica de zonas costeras. El uso de tecnologías gratuitas y el componente modular del sistema facilita además su implementación y adaptación a las particularidades de cualquier zona.

El sistema desarrollado se implementó en 4 cuencas de la demarcación hidrográfica Galicia-costa y se analizó su funcionamiento durante los meses de invierno de la temporada 2019-2020. De manera global, el sistema ha demostrado su capacidad de predecir el riesgo de inundación, mostrando un mejor comportamiento en cuencas de mayor tamaño aunque resultados también aceptables en cuencas pequeñas. El análisis del comportamiento del sistema muestra claramente la importancia de una correcta predicción meteorológica a la hora de obtener predicciones fiables de caudal y nivel. En este sentido, las predicciones meteorológicas de episodios de lluvia más uniformes han demostrado ser más fiables y precisas que las de eventos más explosivos, en los cuales la incertidumbre de las predicciones puede llegar a ser excesiva.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del sistema MERLIN y el resto de trabajos presentados en este artículo fue posible gracias a la financiación aportada por Augas de Galicia dentro del *Convenio de colaboración entre Augas de Galicia e a Fundación de Enxeñería Civil de Galicia para a mellora do sistema de alerta temperá de risco de inundación na demarcación hidrográfica Galicia-costa*.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garretón, C., Ryu, D., Western, A.W., Su, C.H., Crow, W.T., Robertson, E., Leahy, C. 2015. Improving operational flood ensemble prediction by the assimilation of satellite soil moisture: Comparison between lumped and semi-distributed schemes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1659-1676. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1659-2015>
- Arnell, N.W., Gosling, S.N. 2016. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Bennett, T.H., Peters, J.C. 2000. Continuous soil moisture accounting in the hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). *Building partnerships*, 1-10.

- Berghuijs, W.R., Aalbers, E.E., Larsen, J.R., Trancoso, R., Woods, R.A. 2017. Recent changes in extreme floods across multiple continents. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8847>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Carracedo, P. 2003. Acoplamiento de un modelo hidrodinámico de escala global con uno de escala regional para Galicia. *Revista Real Academia Galega de Ciencias*, 22, 85.
- Cea, L., Fraga, I. 2018. Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 54, 8774-8791. <https://doi.org/10.1029/2018WR023194>
- Cronshey, R. 1986. Urban hydrology for small watersheds. US Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division.
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J., Formella, A. 2018. An accelerated tool for flood modelling based on Iber. *Water*, 10(10) 1459. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- Hossain, F., Siddique-E-Akbor, A.H.M., Yigzaw, W., Shah-Newaz, S., Hossain, M., Mazumder, L.C., Turk, F.J. 2014. Crossing the “valley of death”: lessons learned from implementing an operational satellite-based flood forecasting system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(8), 1201-1207. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00176.1>
- IPCC (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways in the context of strengthening the global response to the threat of climate change sustainable development and efforts to eradicate poverty. In Press.
- Jewell, S.A., Gaussiat, N. 2015. An assessment of kriging-based rain-gauge–radar merging techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(691), 2300-2313. <https://doi.org/10.1002/qj.2522>
- Kasiviswanathan, K.S., He, J., Sudheer, K.P., Tay, J.H. 2016. Potential application of wavelet neural network ensemble to forecast streamflow for flood management. *Journal of hydrology*, 536, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.044>
- Kellens, W., Vanneville, W., Verfaillie, E., Meire, E., Deckers, P., De Maeyer, P. 2013. Flood risk management in Flanders: past developments and future challenges. *Water Resources Management*, 27(10), 3585-3606. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0366-4>
- Krajewski, W.F., Ceynar, D., Demir, I., Goska, R., Kruger, A., Langel, C., Small, S.J. 2017. Real-time flood forecasting and information system for the state of Iowa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(3), 539-554. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00243.1>
- Kumar, M., Sahay, R.R. 2018. Wavelet-genetic programming conjunction model for flood forecasting in rivers. *Hydrology Research*, 49(6), 1880-1889. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.183>
- Massari, C., Brocca, L., Tarpanelli, A., Moramarco, T. 2015. Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoff modelling: A complex recipe?. *Remote Sensing*, 7(9), 11403-11433. <https://doi.org/10.3390/rs70911403>
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J. 1979 A Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2), 239-245.
- Mure-Ravaud, M., Binet, G., Bracq, M., Perarnaud, J.J., Fradin, A., Litrico, X. 2016. A web based tool for operational real-time flood forecasting using data assimilation to update hydraulic states. *Environmental Modelling and Software*, 84, 35-49. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.002>
- Naranjo, L., Taboada, J.J., Lage, A., Salsón, S., Montero, P., Souto, J.A., Pérez-Muñuzuri, V. 2001. Estudio de las anómalas condiciones meteorológicas sobre Galicia durante el otoño de los años 2000 y 2001. *Revista Real Academia Galega de Ciencias*, 20, 113-133

- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Sanders, B., Koren, V., Cui, Z., Smith, M. 2016. A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology*, 541, 401-420. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.047>
- Razmkhah, H. 2016. Comparing performance of different loss methods in rainfall-runoff modeling. *Water resources*, 43(1), 207-224. <https://doi.org/10.1134/S0097807816120058>
- Rosburg, T.T., Nelson, P.A., Bledsoe, B.P. 2017. Effects of urbanization on flow duration and stream flashiness: a case study of Puget Sound streams, western Washington, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(2), 493-507. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12511>
- Sanz-Ramos, M., Amengual, A., Bladé i Castellet, E., Romero, R., Roux, H. 2018. Flood forecasting using a coupled hydrological and hydraulic model (based on FVM) and highresolution meteorological model. *Proceedings of River Flow 2018-Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics* (pp. 1-8) Lyon France. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006028>
- Scharffenberg, W.A, Fleming, M.J. 2006. Hydrologic modeling system HEC-HMS: User’s manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit free-surface topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., Powers, J.G. 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3. *NCAR Technical note-475+ STR*.
- Sopelana, J., Cea, L., Ruano, S. 2018. A continuous simulation approach for the estimation of extreme flood inundation in coastal river reaches affected by meso and macro tides. *Natural Hazards*, 93(3) 1337-1358. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3360-6>
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M. H., & Roo, A. D. 2009. The European flood alert system–part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 125-140. <https://doi.org/10.5194/hess-13-125-2009>
- Thiemig, V., Bisselink, B., Pappenberger, F., Thielen, J. 2015. A pan-African medium-range ensemble flood forecast system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(8), 3365-3385. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3365-2015>
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2010. *National Engineering Handbook*, Washington, DC
- Venâncio, A., Montero, P., Costa, P., Regueiro, S., Brands, S., Taboada, J. 2019. An Integrated Perspective of the Operational Forecasting System in Rías Baixas (Galicia, Spain) with Observational Data and End-Users. In *International Conference on Computational Science* (pp. 229-239). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22747-0_18
- Wallemaq, P., Below, R., McLean, D. 2018. *UNISDR and CRED report: Economic Losses, Poverty & Disasters (1998–2017)*.
- Wanders, N., Karssenber, D., Roo, A.D., De Jong, S.M., Bierkens, M.F.P. 2014. The suitability of remotely sensed soil moisture for improving operational flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2343-2357. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2343-2014>
- Weerts, A.H., Winsemius, H.C., Verkade, J.S. 2011. Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression: examples from the National Flood Forecasting System (England and Wales). *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 255-265. <https://doi.org/10.5194/hess-15-255-2011>
- Xia, X., Liang, Q., Ming, X. 2019. A full-scale fluvial flood modelling framework based on a high-performance integrated hydrodynamic modelling system (HiPIMS). *Advances in Water Resources*, 132, 103392. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103392>