

Integración de nowcasting radar y modelización 1D/2D en un sistema de alerta temprana para inundaciones en medio urbano

Russo, B.^{a1,b}, Llord, X.^{c1}, Sánchez, P.^{a2}, Rodríguez A.^{c2}

^aAquatec (SUEZ Advanced Solutions). Paseo de la Zona Franca, 46-48, 08038, Barcelona, España. Email: ^{a1}brusso@aquatec.es;

^{a2}psanchez@aquatec.es

^bGrupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA). Escuela Politécnica de La Almunia (EUPLA), Universidad de Zaragoza. Calles Mayor s/n · 50100 La Almunia de Doña Godina (Zaragoza), España. Email: ^bbrusso@unizar.es

^cHidrometeorological Innovative Solutions, Jordi Girona 1-3 k2m-005, 08034, Barcelona. Email: xavi.llort@hyds.es ; alvaro.rodriquez@hyds.es

Línea temática C | Agua y ciudad

RESUMEN

Las inundaciones urbanas están entre los fenómenos naturales más devastadores debido a la alta concentración de personas, y bienes localizados en estas áreas. En casos de inundaciones producidas por eventos de lluvias extremos, los caudales de escorrentía pueden circular por las calles de nuestras ciudades de forma incontrolada si la capacidad del sistema de drenaje superficial o subterráneo se ve superada generando condiciones de inseguridad para la circulación vehicular y peatonal, así como ingentes daños económicos. En este trabajo se muestra el desarrollo de un sistema de alerta temprana (SAT) para inundaciones urbanas que enlaza estimaciones de lluvia a corto plazo en base a radar meteorológico (*nowcasting*), con un modelo numérico de drenaje dual que permite la simulación conjunta del flujo unidimensional en alcantarillado y del flujo en superficie en dos dimensiones (modelo acoplado 1D/2D) en tiempo real.

Las estimaciones de lluvia en base a radar son la manera más rápida de obtener estimaciones de lluvia a corto plazo que son cruciales en la previsión de inundaciones urbanas donde los tiempos de respuesta hidrológica de las cuencas son usualmente muy cortos. Este trabajo se centra también en cómo tratar la información y las alertas producidas durante un evento siendo esta parte fundamental en todo proceso de gestión de las inundaciones en tiempo real.

Palabras clave | SAT (Sistema de Alerta Temprana), Inundaciones, Radar Meteorológico, Nowcasting, Modelo hidráulico 1D/2D, mapas de peligrosidad.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, Europa ha padecido inundaciones severas que han producido daños significativos en muchos países, sobre todo en áreas urbanas debido a la alta concentración de personas y bienes, desde las inundaciones del río Elba en Alemania en 2002, hasta las inundaciones en la costa azul (Niza, Cannes, etc.) en octubre de 2015. Estas inundaciones, normalmente producidas por una combinación de inundaciones pluviales y fluviales, han resultado en un elevado número de víctimas e importantes daños económicos. Sin embargo, a pesar de la tendencia positiva que presentan el número de inundaciones y el impacto económico asociado, el número de víctimas humanas presenta una tendencia contraria según los datos sobre desastres del CRED (2013). Una posible explicación a este hecho, es sin duda la implementación siempre más difusa de SAT que previenen, o reducen drásticamente, el riesgo económico y social de las inundaciones.

Para explicar este concepto, hay que recordar que el riesgo hidráulico asociado a inundaciones es la combinación entre la peligrosidad y la vulnerabilidad, entendiendo el primer factor (peligrosidad o “*hazard*” en inglés) como aquel fenómeno con el potencial de producir un riesgo. La peligrosidad es una función de la intensidad (o severidad) del evento y su probabilidad de ocurrencia. En medio urbano, la peligrosidad hidráulica y, en particular, su severidad, suele expresarse a través de los parámetros del flujo calado, velocidad y tiempo de inundación, siendo éste último poco usado en las inundaciones urbana de

tipo pluvial caracterizadas por duraciones muy cortas. Por otro lado, la vulnerabilidad de un sistema debe ser entendida como la combinación de los siguientes factores:

Exposición de los elementos potencialmente en riesgo (entendiendo como elementos personas, bienes, especies, ecosistemas, servicios, etc.)

Sensibilidad (o susceptibilidad) del sistema que expresa las características intrínsecas de los elementos expuestos al riesgo

Resiliencia entendida como capacidad de resistir, adaptarse y recuperarse en el menor tiempo posible frente a cualquier tipo de perturbación (en este caso una inundación).

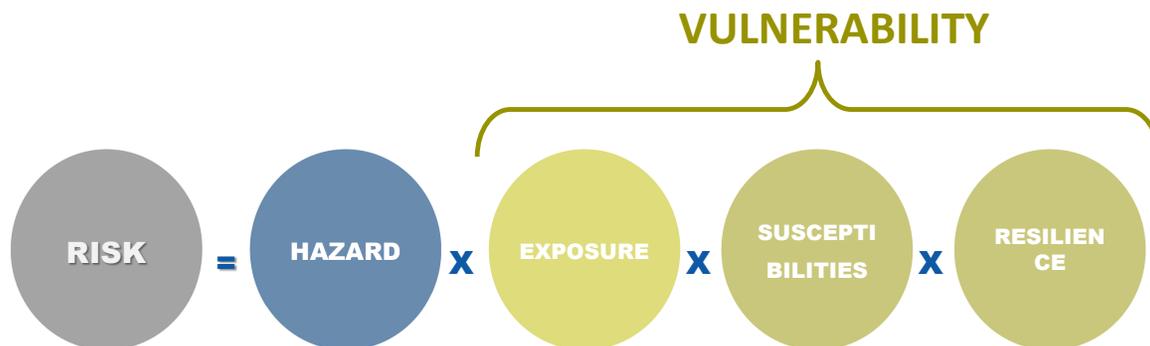


Figura 1 | Definición y componentes del riesgo.

En este marco, un SAT puede claramente limitar el riesgo de inundación pudiendo actuar sobre las dos componentes del mismo (peligrosidad y vulnerabilidad).

De hecho el control en tiempo real de los llamados sistemas activos (compuertas, depósitos, válvulas, bombas, etc.), en base a predicciones de precipitación en tiempo real, en zonas tanto rurales y sobretodo urbanas, pueden limitar las inundaciones tanto en extensión como en severidad reduciendo los parámetros del flujo en la red y en superficie que pueden generar elevadas peligrosidades hidráulicas. Por otro lado la implementación de un SAT puede reducir drásticamente la exposición de personas y bienes, y aumentar la resiliencia de los sistemas.

Tradicionalmente, los SAT para inundación se regían por las mediciones de pluviómetros, elementos puntuales en el territorio con unos registros muy fiables pero que no permiten una buena representación espacial de la lluvia ni predicciones fiables de precipitación. La predicción de precipitación por radar padece de diferentes fuentes de errores (Zawadzki, 1984), pero actualmente es la forma más rápida de obtener predicciones de las próximas horas gracias a las técnicas de *nowcasting*. Además, las mismas ofrecen una buena representación espacial del fenómeno de precipitación con una elevada resolución temporal y una rápida actualización de las predicciones (en general en torno a los 10 minutos). Estos argumentos hacen de esta metodología un instrumento clave para la predicción de inundaciones en zona urbana donde los tiempos de respuesta hidrológica de las cuencas son muy cortos.

En este trabajo, se muestra el desarrollo de un sistema de alerta temprana para inundaciones urbanas que enlaza estimaciones de lluvia en base a radar meteorológico con un modelo acoplado 1D/2D hidráulico e hidrológico, que permite la simulación conjunta del flujo unidimensional en alcantarillado y del flujo en superficie en dos dimensiones.

Este SAT se centra en la ciudad de Marbella elegida entre los casos de estudio del Proyecto PEARL (*Preparing for Extreme And Rare Events in Coastal Resions*) financiado por la unión europea a través del Séptimo Programa Marco.

MATERIAL Y MÉTODOS

Observaciones de radar y *nowcasting*

Si bien las predicciones de precipitación por radar resuelven los problemas de representación espacial de la lluvia, padecen de otras fuentes de error. A pesar de que las técnicas de *nowcasting* permiten pronósticos de elevada precisión y actualizaciones cada poco tiempo, antes de una utilización cuantitativa, los datos requieren un proceso de control de calidad (descrito, por ejemplo, en Sánchez-Diezma, 2001). Este proceso se rige por la corrección de ecos no meteorológicos, la corrección de la subestimación debida a los bloqueos del haz (interacción del proceso de medición del radar con la topografía), la conversión de la reflectividad a precipitación instantánea utilizando una relación climatológica Z-R y calibración para obtener estimaciones de lluvia no sesgadas.

Una vez realizado este control de calidad, se calcula la predicción a corto plazo usando el campo de movimiento de la precipitación obtenido mediante técnicas de correlación cruzada. Este campo de movimiento representa las direcciones (con la misma resolución que las estimaciones de radar) en las que se mueve la precipitación y se utiliza para extrapolar las últimas observaciones hacia el futuro con el fin de proporcionar previsiones de los campos de precipitación para las próximas horas (Berenguer *et al.*, 2005, 2011). La calidad de las predicciones en base a radar se deteriora rápidamente según la anticipación, pero es la mejor predicción de precipitación disponible para las próximas 1-6 horas (dependiendo de la situación y cobertura del radar) que se puede obtener. Esta técnica permite además mantener la previsión actualizada con la información de las últimas observaciones registradas cada 10 minutos.

Una vez que están disponibles tanto las observaciones de radar como la previsión a corto plazo, el sistema desarrollado calcula la acumulación de lluvia en 30 minutos (por su relación directa con el comportamiento hidráulico de muchos sistemas de alcantarillado en nuestras cuencas urbanas) en un esquema de ventana móvil, es decir, calcula la acumulación de los últimos 30 minutos cada vez que se dispone de nuevos datos. Para calcular la acumulación de lluvia a partir de las estimaciones de precipitación instantánea del radar (tanto observadas como previstas), se tiene en cuenta nuevamente el movimiento del campo de precipitación (Sánchez-Diezma, 2001) para proporcionar estimaciones realistas de la acumulación de lluvia. El sistema calcula además, para cada píxel (según la resolución de los datos del radar), el valor máximo en la hora siguiente y el valor máximo en las 2 horas siguientes. Este proceso genera campos con la acumulación máxima (en 30 minutos) previstos en las próximas 1 o 2 horas. De estos campos, y de acuerdo con los umbrales de acumulación predefinidos por el usuario en 30 minutos, se delimitan y se muestran las áreas que estarán afectadas por cantidades de lluvia acumulada por encima de dichos umbrales.

El sistema también monitoriza la evolución de la acumulación de precipitación de 30 min (observada y pronosticada) por 3 áreas de proximidad diferentes (5, 10 y 15 km), pero dado que el campo de movimiento de la precipitación ha sido calculado, con el fin de reducir falsas alarmas, sólo se calcula el máximo sobre un área inteligente. Esta área inteligente cambia dinámicamente con la dirección y velocidad de la precipitación y, en cada paso de tiempo, representa la precipitación que podría afectar el punto de interés (Llort *et al.*, 2014). En la 2 se muestra el esquema de procesado de los datos.

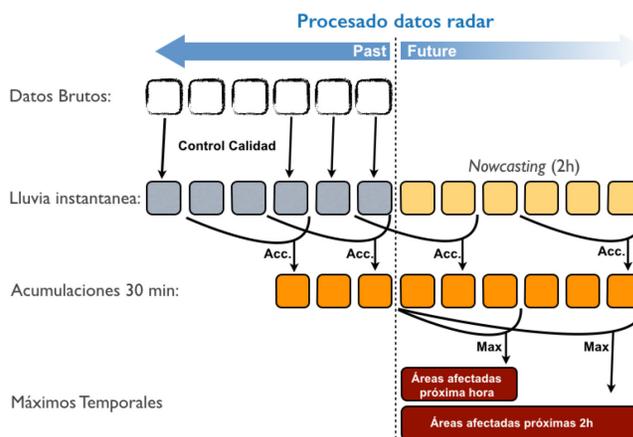


Figura 2 | Esquema del procesamiento de datos de radar del sistema de alcantarillado.

Integración de las técnicas de nowcasting en el modelo acoplado 1D/2D de drenaje urbano

Las predicciones de *nowcasting* pueden usarse para alimentar un modelo hidrodinámico acoplado 1D/2D detallado capaz de integrar el caudal del sistema de alcantarillado en 1D con la escorrentía superficial en 2D en superficie. Este tipo de modelos proporcionan información detallada del dominio superficial 2D, permitiendo la elaboración de mapas de peligrosidad para la evaluación de los impactos sobre las actividades de las personas (por ejemplo la circulación vehicular y peatonal) y sobre bienes y propiedades. Los avances en hardware permiten la creación de modelos hidrodinámicos capaces de utilizar al máximo GPU y CPU con un rendimiento muy prometedor en términos de tiempo computacional (Russo *et al.*, 2015). Estos modelos pueden hacer simulaciones automáticas, cada vez que se les proporcione como entrada precipitaciones de radar nowcasting, y proporcionar información de los parámetros del flujo (caudales, calados, velocidades, etc.) tanto en el alcantarillado como en el dominio 2D en pocos minutos.

Modelo hidráulico/hidrológico

En el marco del proyecto PEARL se ha desarrollado y calibrado un modelo 1D/2D acoplado para la cuenca del arroyo de la Represa y el río Huelo en la localidad de Marbella. Esta ciudad, con una población de casi 141.000 habitantes (INE, 2016) se encuentra en el litoral sur mediterráneo, en la provincia de Málaga, España. Su morfología se caracteriza por sus elevadas pendientes en las cuencas de cabecera y zonas muy planas al lado de la costa, características éstas, que hacen de Marbella una ciudad vulnerable a las inundaciones durante eventos de precipitación extremos.

El programa utilizado para desarrollar el citado modelo acoplado, ha sido InfoWorks ICM de Innowyze (2016). El modelo cubre una superficie de 10,6 km² (de la cuenca del arroyo de la Represa) y 68 km de red. El dominio de análisis 2D en superficie está dividido en 93.699 elementos (celdas triangulares) generados por la función de triangulación de Shewchuk (1998) sobre la base de un modelo digital del terreno (MDT) proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional y que ha sido obtenido a partir de un vuelo LIDAR (*Laser Imaging Detection And Ranging*). Éste MDT se caracteriza por una densidad mínima de 0,5 puntos por m² y una precisión de 20 cm en términos de altura (Figura 3).

El modelo acoplado 1D/2D ha sido calibrado a través de una serie de sensores instalados, en el marco del proyecto PEARL, en la zona de estudio que se muestra en la Figura 3. En particular, se instaló un pluviómetro en la parte superior del núcleo urbano, un sensor de nivel (38) aguas arriba del entronque del encauzamiento del río Huelo con el encauzamiento del arroyo de la Represa y otro sensor de nivel (39) aguas abajo de este mismo entronque. Los resultados de la calibración con los sensores de nivel a partir de algunos eventos de precipitaciones registrados recientemente por el pluviómetro se muestran en la Figura 4. También se ha realizado una calibración cualitativa a partir de observaciones en superficie durante los mismos eventos de inundación (Figura 5).

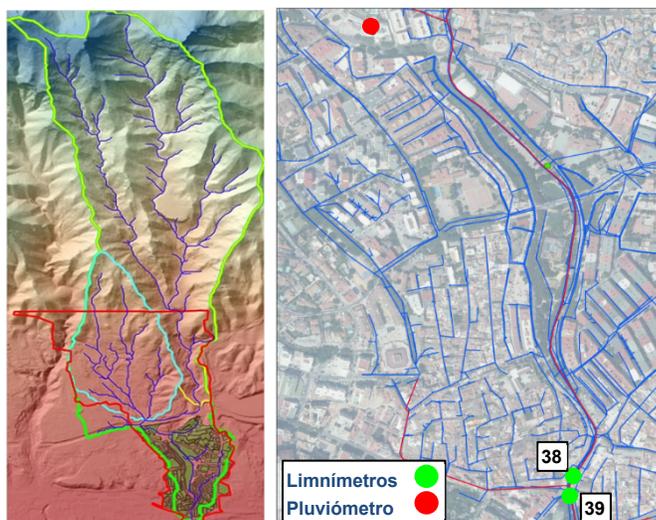


Figura 3 | Modelo digital del terreno (izda.) y esquema de la red alcantarillado (dcha.) de la cuenca de la Represa.

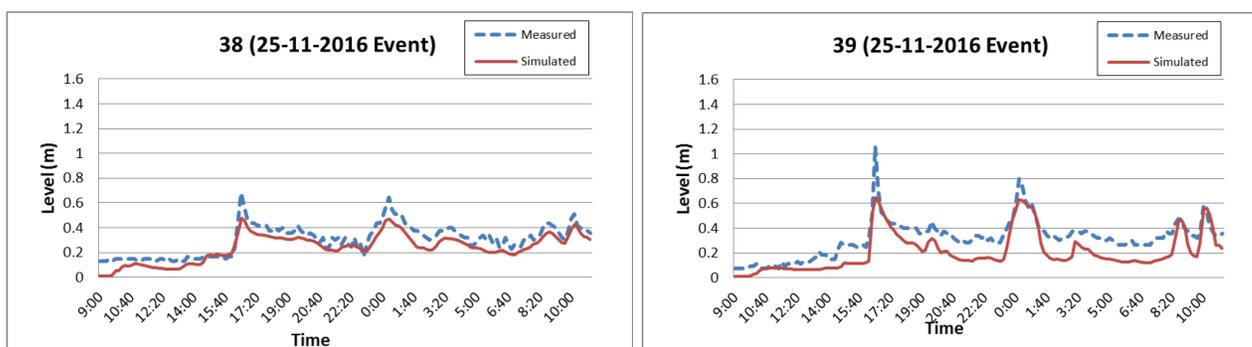


Figura 4 | Resultados de la calibración en dos puntos del colector de la Represa, aguas arriba y aguas debajo de su conexión con el colector del río Huelo en la parte sur de la ciudad para el evento del 25 de Noviembre de 2016.



Figura 5 | Calibración del modelo hidráulico de superficie a partir de observaciones de campo durante el evento del 25 de noviembre de 2016.

Finalmente, el modelo se ha utilizado para la elaboración de mapas de inundación y de peligrosidad para la circulación de peatones y vehículos (Figura 6) obtenidas a partir de las variables hidráulicas del flujo y criterios de peligrosidad asociados a peatones y vehículos propuestos recientemente por Martínez-Gomariz *et al.* (2016, 2017). En particular, fruto de estos estudios,

se han establecido nuevos umbrales para la definición de diferentes niveles de peligrosidad en función del calado (y), la velocidad (v) y el producto ($v \cdot y$). En concreto, se ha definido una zona de peligrosidad alta para valores del producto de la velocidad por el calado ($v \cdot y$) superiores a $0,22 \text{ m}^2/\text{s}$, calados superiores a $0,15 \text{ m}$ y velocidades superiores a $1,88 \text{ m/s}$. Por otro lado, para el caso de circulación vehicular, la peligrosidad alta tiene lugar cuando el producto ($v \cdot y$) es superior a $0,50 \text{ m/s}$ y el calado es superior a $0,28 \text{ m}$. Para este proyecto se han elaborado mapas de peligrosidad para episodios con períodos de retorno 1, 10, 20, 50 y 100 años.



Figura 6 | Mapa de inundación (izda.), mapa de peligrosidad para peatones (centro) y mapa de peligrosidad para vehículos (dcha.) para 100 años de período de retorno.

RESULTADOS

Los elementos que componen el SAT y descritos en el apartado anterior se han implementado a través de un sistema modular que se ejecuta en la nube. Esta implementación tiene claras ventajas en términos de coste y permite al usuario una mejor interacción, ya que puede acceder al sistema desde cualquier lugar mientras disponga de un dispositivo con acceso a Internet (sin necesidad de instalación alguna). Los principales módulos del sistema (ver esquema en la Figura 7) son:

1. Módulo de adquisición de datos: Adquiere los datos en tiempo real (radar, sensores, etc.) para su uso.
2. Procesado de los de datos brutos: Realiza el control de calidad, de las observaciones de precipitación por radar (ver apartado anterior) y procesado de las series temporales de datos.
3. Módulo de generación de productos avanzados: Calcula productos avanzados en base a datos de calidad controlados. Los dos productos principales utilizados en el SAT son las predicciones de radar a corto plazo (*nowcasting*) y los campos de precipitación acumulada del radar.
4. Módulo de simulación del modelo hidráulico/hidrológico: Integra el modelo 1D/2D desarrollado. El modelo se ha implementado a dos niveles:
 - i. Vinculado dinámicamente (por ejemplo, de acuerdo a un período de retorno): la información de precipitación en tiempo real observada y pronosticada se ha vinculado con mapas de peligrosidad precalculados de alta resolución. En este caso, los mapas son estáticos y corresponden a situaciones específicas precalculadas.
 - ii. Encapsulado en la nube y ejecutándose automáticamente bajo demanda cada vez que nuevos datos están disponibles (observaciones de radar, radar *nowcasting*, y observaciones de pluviómetros). El modelo se ha implementado en un servidor con altas prestaciones de tarjeta gráfica para permitir simulaciones rápidas, necesarias en aplicaciones en tiempo real, y vinculadas con el SAT a través de carpetas compartidas, traductores de formato y sistemas de lanzamiento automático (ver esquema en la Figura 8).

5. Módulo de cálculo de alertas: calcula las alertas específicas del usuario sobre los diferentes productos disponibles (datos de precipitación, elementos del sistema de alcantarillado, sensores, simulaciones del modelo (tanto para elementos 1D como 2D, etc.) utilizando las parametrizaciones del usuario (elementos críticos, umbrales, etc.).
6. Módulo de diseminación. Distribuye la información y las alertas por los canales definidos (visor web – ver apartado siguiente –, mensajes SMS, correos electrónicos, conexiones SCADA, etc.). El usuario puede definir diferentes acciones a realizar cuando se alcancen los diferentes umbrales, de acuerdo el perfil específico asignado.
7. Módulo de monitorización. Controla el funcionamiento del sistema en general.

Además, la aplicación almacena datos recientes, que pueden ser consultados por el usuario para poder analizar la información y las alertas del episodio, una vez éste haya terminado.

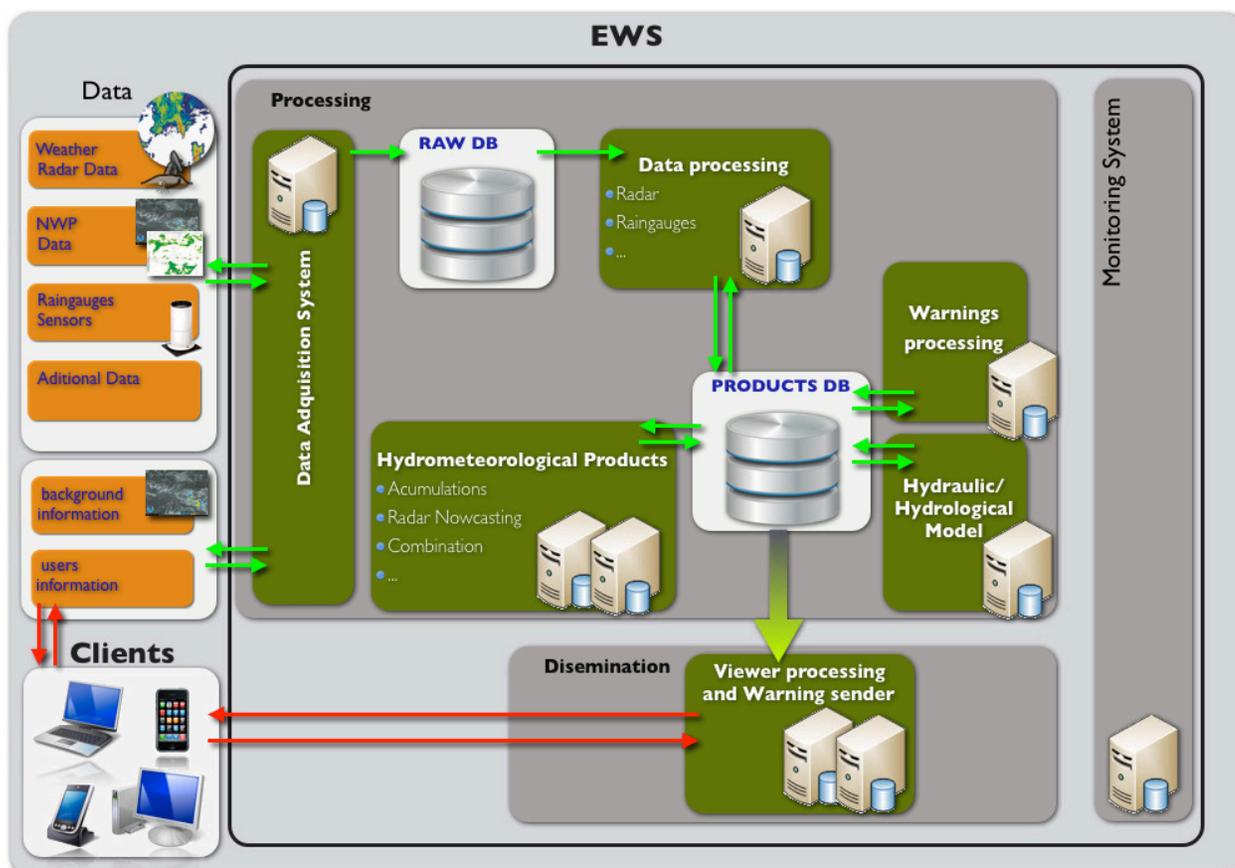


Figura 7 | Estructura modular del sistema desarrollado.

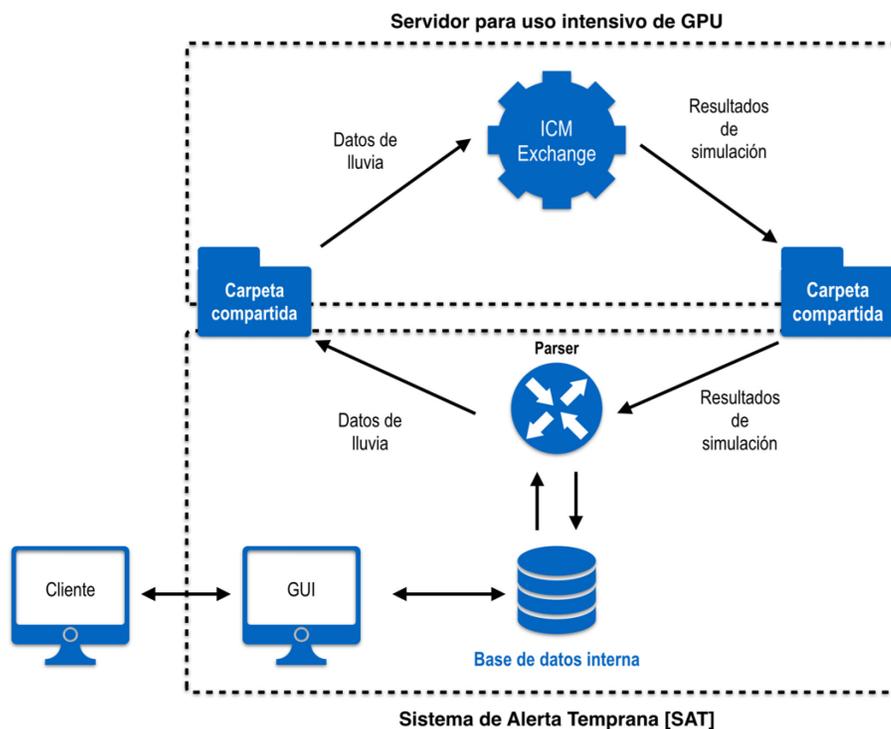


Figura 8 | Enlace del modelo hidráulico con el SAT en tiempo real.

Plataforma web

Como el sistema se ha desarrollado en la nube, para su utilización, el usuario accede a través de una plataforma web. En este soporte se muestra dinámicamente información georreferenciada (se puede ver un ejemplo de precipitación acumulada en 24 horas en la Figura 9), en todos los puntos de interés definidos por el usuario. Esta información incluye datos de precipitación observados y previstos, datos de sensores, resultados de las simulaciones del modelo y las alertas correspondientes generadas. El usuario también puede gestionar otros parámetros de información de la cuenta, perfiles de usuarios, umbrales individuales de diferentes productos en distintos lugares de interés en la misma plataforma.

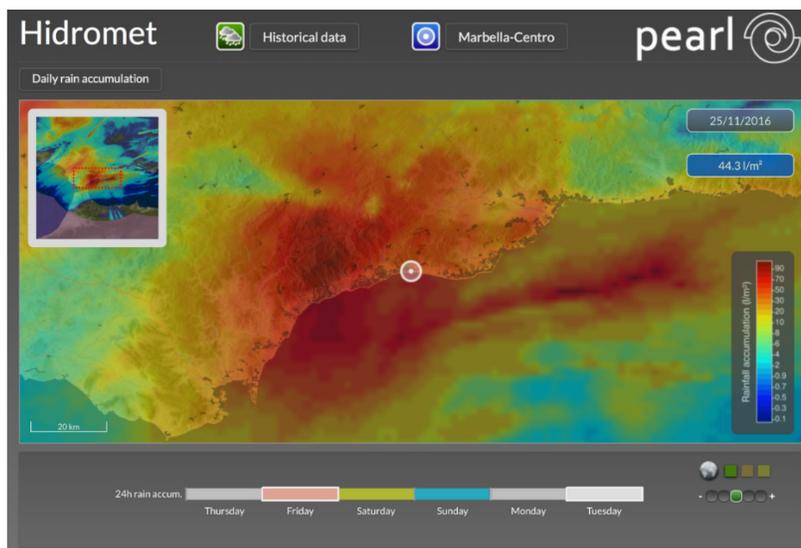


Figura 9 | Ejemplo del visor del SAT desarrollado.

Alertas

Una alerta se emite cuando los valores predichos exceden los umbrales configurados previamente por cada usuario. El sistema permite la definición de tres niveles (amarillo, naranja y rojo) configurables individualmente para cada variable en cada punto de interés. Ejemplos de alertas generadas son:

- Intensidad de lluvia o áreas que potencialmente se verán afectadas por acumulaciones de lluvia en 30 minutos: Se basan en *nowcasting* y se pueden hacer predicciones para las próximas 2 horas.
- Precipitación acumulada en 1 hora: se basa en modelos numéricos meteorológicos de predicción y se pueden hacer predicciones de hasta 6 días. También están disponibles otras variables meteorológicas.
- Datos de sensores: En base a registros de datos de sensores.
- Simulaciones del modelo acoplado 1D/2D: Se pueden definir alertas para elementos definidos específicos del modelo (pozos de registro, colectores, depósitos, celdas de superficie, etc.).

Distribución de la información

El sistema integra un módulo de difusión flexible para diseminar la información y las alertas generadas. Permite configurar distintos dispositivos (correos electrónicos, SMS, servidores FTP, EDXL-CAP, etc.) bajo diferentes perfiles (por ejemplo, estándar, 24h, fines de semana, emergencia, etc.) y las acciones a realizar al alcanzarse los distintos niveles de alerta de forma individualizada por perfil. En la se muestra un ejemplo de alerta por superación de umbral de intensidad de lluvia enviado por correo electrónico.

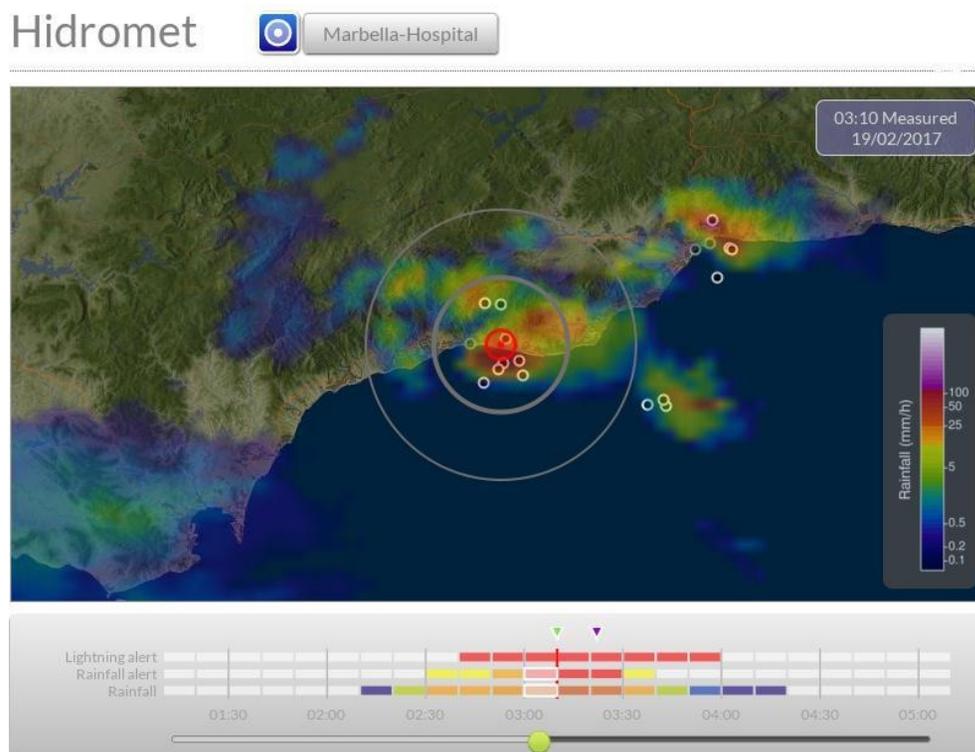


Figura 10 | Ejemplo de alerta por intensidad de lluvia enviada por correo electrónico.

CONCLUSIONES

Un SAT se rige por diferentes componentes. Durante un evento de lluvia, estas componentes comienzan en la detección de las precipitaciones y la predicción de inundaciones, hasta la oportuna, confiable y entendible distribución de alertas a las autoridades y otras personas en situación de riesgo.

Una alta resolución espacial y temporal de la lluvia es un elemento esencial para llevar a cabo simulaciones realistas de inundaciones en medio urbano. Las técnicas de predicción a corto plazo en base a radar meteorológico (*nowcasting*), representan una valiosa herramienta para la gestión en tiempo real de alertas asociadas a inundaciones en el campo del drenaje urbano, permitiendo disminuir el tiempo de detección de riesgos potenciales, o incluso reducir los propios riesgos para personas y bienes materiales.

En el marco del proyecto europeo PEARL (centrado en la cuenca del arroyo de la Represa en Marbella), se han enlazado técnicas de *nowcasting* con un modelo numérico de drenaje dual calibrado. Las altas capacidades de los servidores y el uso de potentes GPU han permitido que se estas componentes vinculadas se puedan ejecutar conjuntamente en tiempo real. El sistema modular, desarrollado en un sistema de tipo nube, se puede integrar a dos niveles:

1. Vinculando dinámicamente la información de precipitación en tiempo real con mapas de peligrosidad pre-calculados.
2. A través de un encapsulado en la nube y mediante el uso de un servidor y GPU de altas prestaciones que han abierto la puerta a ejecutar en tiempo real un modelo 1D-2D, realizando una nueva simulación cada vez que se dispone de datos observados o de radar. De esta forma, el modelo puede generar, automáticamente, mapas de peligrosidad en tiempo real para la circulación vehicular y peatonal que pueden utilizarse para difusión y activación de protocolos de alerta.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados en este artículo se han realizado en el marco del proyecto PEARL (Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions; FP7-ENV-2013-603663) financiado por la Unión Europea dentro del Séptimo Programa Marco.

REFERENCIAS

Berenguer, M., C. Corral, R. Sánchez-Diezma, y D. Sempere-Torres, 2005: Hydrological Validation of a Radar-Based Nowcasting Technique. *Journal of Hydrometeorology*, 6, 532–549.

Berenguer, D. Sempere-Torres y G.G.S Pegram, 2011: SBMcast—An ensemble nowcasting technique to assess the uncertainty in rainfall forecasts by Lagrangian extrapolation. *Journal of Hydrology*, 404, 226-240.

Innovyze, 2016. InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modeling) v.7.5. User manual references. http://www.innovyze.com/products/infoworks_icm

Instituto Nacional de Estadística. 2016. <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2882>

Llort X., R. Sánchez-Diezma, A. Rodríguez, D. Sancho, M. Berenguer y D. Sempere-Torres, 2014: FloodAlert: A simplified radar-based EWS for urban flood warning. *Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics HIC 2014*, New York City, USA. ISBN: 978-0-692-28129-1.

Martínez-Gomariz, E, Gómez, M. Russo, B. 2016. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Natural Hazards*, 82(2), 1259-1278.

Martínez-Gomariz, E, Gómez, M. Russo, B. 2017. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding. *Urban Water Journal*, 1-10.

Russo B., Sunyer D., Velasco M., Djordjević S. 2015. Analysis of extreme flooding events through a calibrated 1D/2D coupled model: the case of Barcelona (Spain). *Journal of Hydroinformatics*. IWA publishing, 17(3), 473-491.

Sánchez-Diezma, R., 2001: Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica., *Tesis doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, 313 pp.

Shewchuk, J., 1998. Quake project. A Two Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. <https://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>

The international disaster database, 2013. Centre for Research on the Epidemiology of disasters (CRED), “EM-DAT”.2013. <http://www.emdat.be/>

Zawadzki, I., 1984: Factors affecting the precision of radar measurement of rain. Preprints, 22th Conference on Radar Meteorology, Zurich, Switzerland, 251-256.