

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA
DE INUNDACIONES FEWS
EN LA CUENCA DEL RÍO TAJO, ESPAÑA**

Guillermo Collazos, Peter Godiksen

*Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la cuenca del Tajo, España
gcollazos@ssd-h2o.com.ar, pgodiksen@ofiteco.es*

RESUMEN:

Este artículo describe los trabajos realizados para la implantación del sistema Delft-FEWS (Flood Early Warning System) en el ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Tajo (España), dentro del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica).

FEWS es un sistema informático que permite manejar de forma integrada la información hidrometeorológica de una cuenca en tiempo real, y ejecutar múltiples modelos matemáticos de forma automática con datos meteorológicos pronosticados, con el objeto de realizar la alerta temprana ante inundaciones.

La configuración de FEWS y el acoplamiento y calibración de los distintos modelos lleva desarrollándose desde aproximadamente dos años. Como parte de los trabajos se calibraron 76 modelos hidrológicos NAM para igual número de subcuencas, y más de 1200 km de cauces se modelaron con el modelo hidráulico Mike 11, para luego incorporarlos en FEWS.

Actualmente están operativos en FEWS los modelos más sencillos, y en proceso de implantación otros más sofisticados; a la vez que se continúa con el mantenimiento y la mejora de los modelos con los datos de nuevos episodios.

ABSTRACT:

This article describes the works carried out for the installation of the system Delft-FEWS (Flood Early Warning System) in the territory of the Confederation Hidrográfica del Tajo (Spain), in the SAIH (Automatic System of Hydrological Information).

FEWS is a computer system that allows to manage in an integrated way the information weather and hydrological of the basin in real time, and to execute multiple mathematical models in an automatic way with forecast weather data, in order to carrying out the floods early warning.

The configuration of FEWS and the joining and calibration of the different models takes being developed from approximately two years. As part of the works, 76 hydrological models NAM were calibrated for different subcuencas, and more than 1200 km of rivers were modeled with Mike 11, for incorporated it inside FEWS.

At the moment they are operative in FEWS the simplest models, and in installation process other more sophisticated ones; at the same time that continues with the maintenance and the improvement of the models with the new data.

PALABRAS CLAVES: FEWS, alerta temprana, inundaciones.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Tajo está ubicada en la parte central de la península ibérica, tal como se muestra en la Figura 1. La autoridad de cuenca es la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT), dentro de la cual se encuentra el SAIH.



Figura 1.- Ubicación de la parte española de la cuenca del río Tajo.

El río Tajo nace en los Montes Universales, y viaja hacia el Oeste a verter sus aguas en el océano Atlántico, tras cruzar la frontera portuguesa. La parte española de dicha cuenca abarca aproximadamente 55870 km², siendo una de las singularidades destacables la presencia de Madrid dentro de su territorio. La margen derecha recibe las mayores precipitaciones, y sobre ésta se encuentran los afluentes más importantes, como los ríos Alagón, Tiétar, Alberche, Jarama, Henares, etc. Es una cuenca muy regulada, con 47 embalses sensorizados por la red SAIH, los cuales tienen finalidades hidroeléctricas, de regadío, de abastecimiento y turísticas-recreativas.

En el SAIH del Tajo, FEWS se implantó de forma inicial en el año 2008 merced a un convenio con la Dirección General del Agua (DGA), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente de España. La selección de este software lo aconsejó un comité de expertos y la implantación inicial se realizó por parte de una empresa externa. Esta implantación inicial comprendió la configuración básica del sistema, el modelo RainMusic (Provea, 2007) para combinación de datos pluviométricos con datos radar, y algunos modelos operativos para la subcuenca piloto del río Alberche. Éste fue el punto de partida de los trabajos descritos en este artículo.

Esta segunda fase, que es la que aquí se describe, consistió en hacer plenamente operativo FEWS en el SAIH del Tajo a partir de la implantación inicial: en extender los modelos hidrológicos a la totalidad de las subcuencas, en completar la configuración del sistema, en mejorar y añadir nuevas funcionalidades a FEWS, etc. de manera que el sistema respondiera completamente a las necesidades de los gestores de la cuenca. Esto es fundamental para que éstos gestores confíen –y por ende adopten y hagan suyo– el uso de esta herramienta para la toma de decisiones ante situaciones de avenida.

En este artículo se prefiere mantener el nombre de FEWS y no usar el más extendido de Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD), por considerar que el primer nombre es más específico y descriptivo.

Este artículo se compone de las siguientes partes: primero se describen la creación y calibración de modelos; luego le sigue una breve descripción de FEWS, de su configuración y la forma en que se integran los modelos; y por último las líneas de evolución actuales y futuras.

TRABAJOS PREVIOS Y MODELOS

Inicialmente se realizaron visitas de campo a las subcuencas y puntos de control, para comprobar y auditar el estado de las estaciones de aforo, pluviómetros, pluviométricos, etc.; y al mismo tiempo adquirir conocimiento básico sobre el territorio y los cauces que se quería modelar. También se realizó la recopilación de datos que estaban dispersos: eventos de avenidas, información topográfico-batimétrica, normas de explotación de presas, registros diarios previos al funcionamiento del SAIH, registros de precipitaciones diarias de distinto origen, etc.

Se realizaron multitud de análisis estadísticos de los datos de frecuencia 15 minutal almacenados en el SAIH desde el año 2000 en adelante, con el fin de detectar y eliminar datos espurios y erróneos, y de conocer la confiabilidad de la información de partida. También se compararon y correlacionaron los datos SAIH con datos de otro origen (fundamentalmente AEMET y de Comisaría de Aguas), en este caso con frecuencia diaria.

Por otra parte se definieron las subcuencas a modelar con el modelo lluvia-escorrentía agregado NAM (DHI, 2008) correspondientes a las estaciones de aforo y a las entradas a los embalses de cabecera, resultando así 76 modelos a calibrar y validar. Se utilizó la calibración automática que provee el propio programa, la cual respondió satisfactoriamente para casi todas las cuencas. Esta tarea se realizó independientemente del entorno FEWS.

Los cauces aguas abajo de los embalses se modelaron con el modelo hidrodinámico Mike11 (DHI). En una primera fase se realizó una calibración expeditiva, empleando secciones espaciadas, con la intención de aumentar la cantidad de secciones en posteriores etapas de refinamiento de los modelos si esto se veía necesario, ya que se estimó conveniente mantener los tiempos de cálculo bajos para hacer factible el uso en tiempo real. Se modelaron más de 1200 km de ríos principales, tal como se muestra en la Figura 2.

Los modelos NAM-Mike se agruparon en 7 grupos c/u de los cuales se puede ejecutar independientemente en FEWS sin necesitar excesivo tiempo de cálculo. Esta división se hizo en base la experiencia de los gestores de la cuenca.

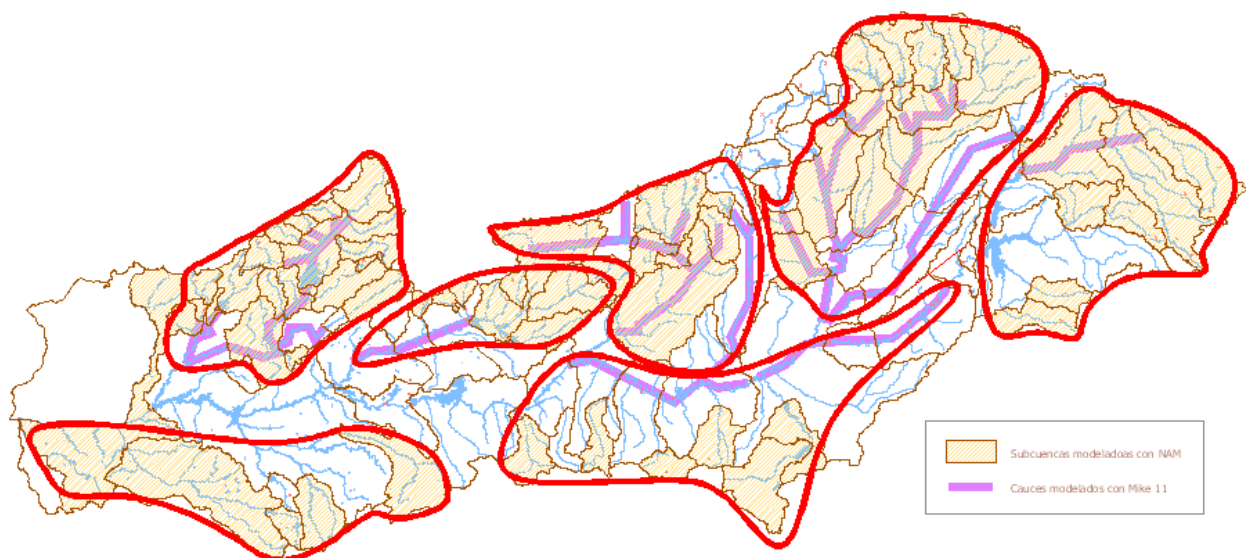


Figura 2.- Subcuencas modeladas mediante NAM (rayadas), cauces modelados con Mike 11 (trazo grueso violeta) y agrupación de modelos en 7 workflows (contornos cerrados rojos).

Posteriormente, los modelos NAM se validaron con eventos elegidos al azar, mostrando un mejor ajuste los modelos de las cuencas más húmedas y con caudales permanentes, que están ubicadas en la zona NO del territorio. En la Figura 3 se presentan los hidrogramas de validación de dos subcuencas húmedas.

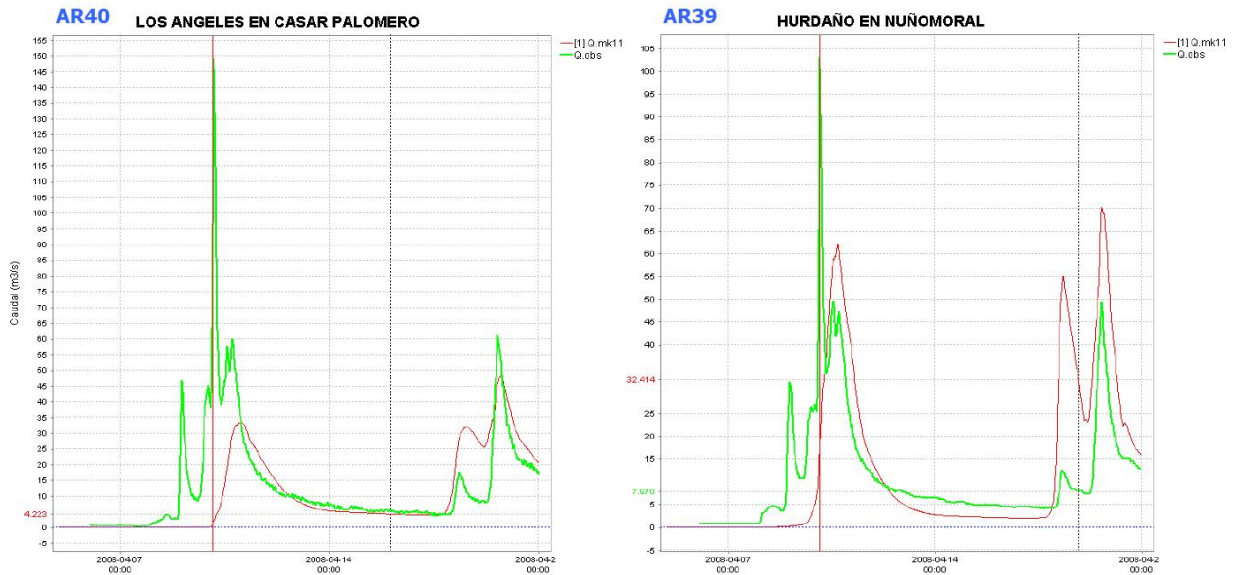


Figura 3.- Validación de modelos NAM en sendas subcuencas de 188 km² y de 108 km² respectivamente.

En las figuras anteriores se puede observar que la primera parte del hidrograma no resulta bien representada debido a que el estado de humedad inicial de los modelos no es adecuado. Sin embargo este problema se minimizará cuando el modelo se ejecute en modo continuo en el servidor.

FEWS E INTEGRACIÓN DE MODELOS

Como se mencionó en el resumen, Delft-FEWS (Reggiani et. al. 2003; Werner et. al. 2004) es un sistema informático que permite manejar de forma integrada la información hidro-meteorológica de una cuenca y ejecutar múltiples modelos matemáticos de forma automática y en tiempo real para realizar la alerta temprana ante inundaciones.

FEWS presenta al usuario una pantalla inicial que se reproduce en la Figura 4, con la representación del mapa de la cuenca con los puntos de control (puntos donde se dispone de información hidrológica o meteorológica). En la parte inferior de esa ventana se muestran los mensajes de aviso del sistema, donde se informan de anomalías en la ejecución procesos. A la izquierda están los árboles que permiten elegir los puntos de control y las variables disponibles en cada uno.

En la parte superior están los menú y los íconos de acceso directo a las principales funciones, como el Visualizador de Series Temporales, el Gestor de Predicciones, la Monitorización del Sistema, etc. que pueden configurarse a voluntad.

Dicha ventana tiene las funcionalidades básicas de un SIG: se pueden activar las capas auxiliares de referencia (ciudades, MDT, carreteras, etc.) que el usuario elija, hacer zoom con mayor o menor detalle, activar etiquetas, etc.

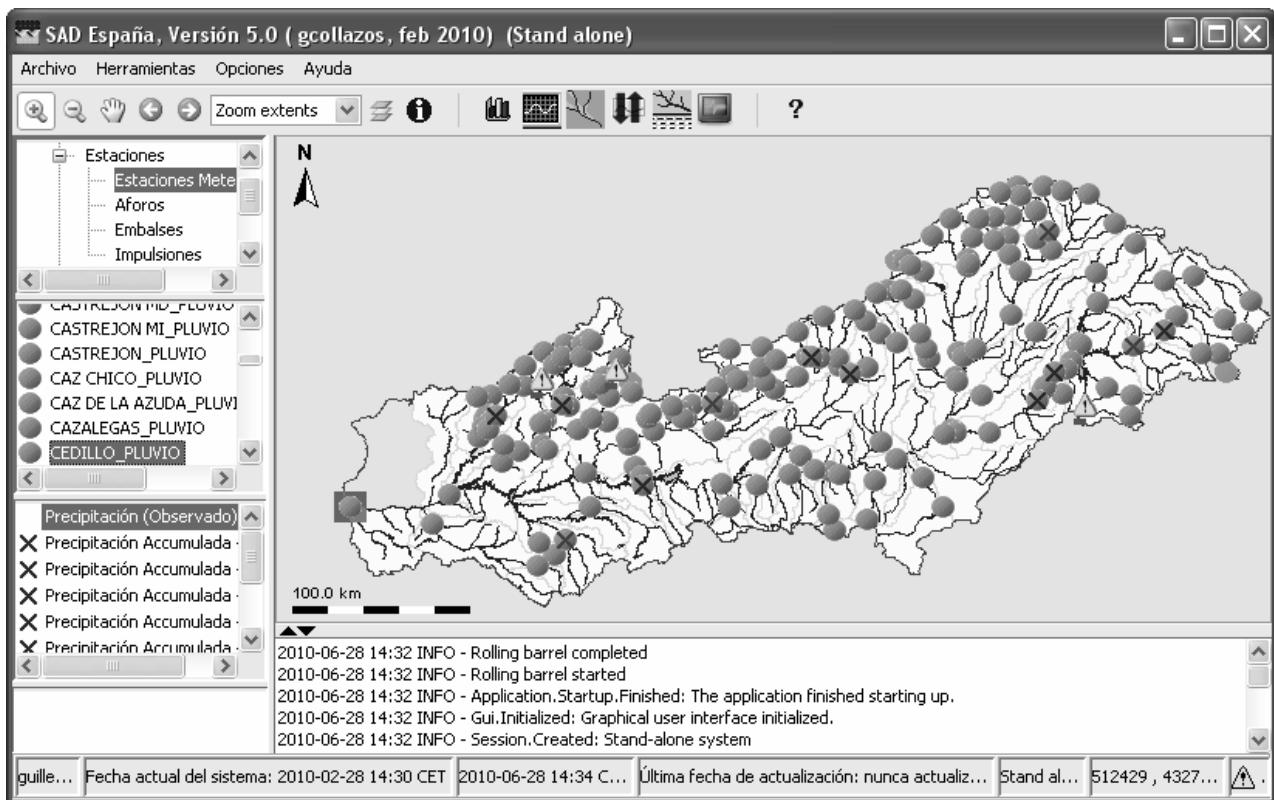


Figura 4.- Pantalla principal del FEWS en el SAIH del Tajo.

FEWS puede funcionar de dos modos: Stand-Alone u Operador-Cliente. El primer modo se utiliza para configurar y testar el sistema, y en este caso los procesos (workflows) se ejecutan a petición. El segundo modo se utiliza cuando el sistema está implantado de forma definitiva, lo que se realiza en servidores con gran capacidad de procesamiento. En este último modo los workflows se ejecutan automáticamente con intervalos preestablecidos o a petición por los clientes, que luego pueden visualizar los resultados obtenidos.

FEWS se configura mediante archivos *.xml que controlan distintos aspectos de la visualización y de las funcionalidades. Estos archivos pueden editarse con programas comerciales o con un editor de texto. Los desarrollos y cambios en la configuración se realizan en el sistema en la modalidad Stand-Alone; y una vez testados suficientemente se incorporan en la modalidad Operador-Cliente, que es donde el sistema funciona de forma continuada y automática, alimentándose de datos en tiempo real, ejecutando las previsiones y poniéndolas a disposición de los usuarios (cliente).

Las tareas en el sistema se indican en archivos *.xml denominados workflows, que son pequeños programas secuenciales que FEWS interpreta y ejecuta. Por ejemplo hay un workflow que importa los datos de los archivos a la base de datos propia de FEWS, habrá un workflow para cada modelo que se quiera ejecutar dentro del entorno FEWS, etc.

FEWS puede ser alimentado con datos en múltiples formatos los cuales una vez leídos se almacenan en la BD local, y pueden ser visualizados, tanto en forma de series temporales (Figura 5) como de grilla en el caso de datos raster (Figura 6). Para las series temporales el sistema dispone de funciones de agregación interactivas (media móvil, suma, etc.), en las que se puede escoger el intervalo de agregación. A su vez el visor de datos raster permite obtener la serie temporal en una celda, o a lo largo de una línea dibujada por el usuario y otras funciones que resultan útiles a los operadores.

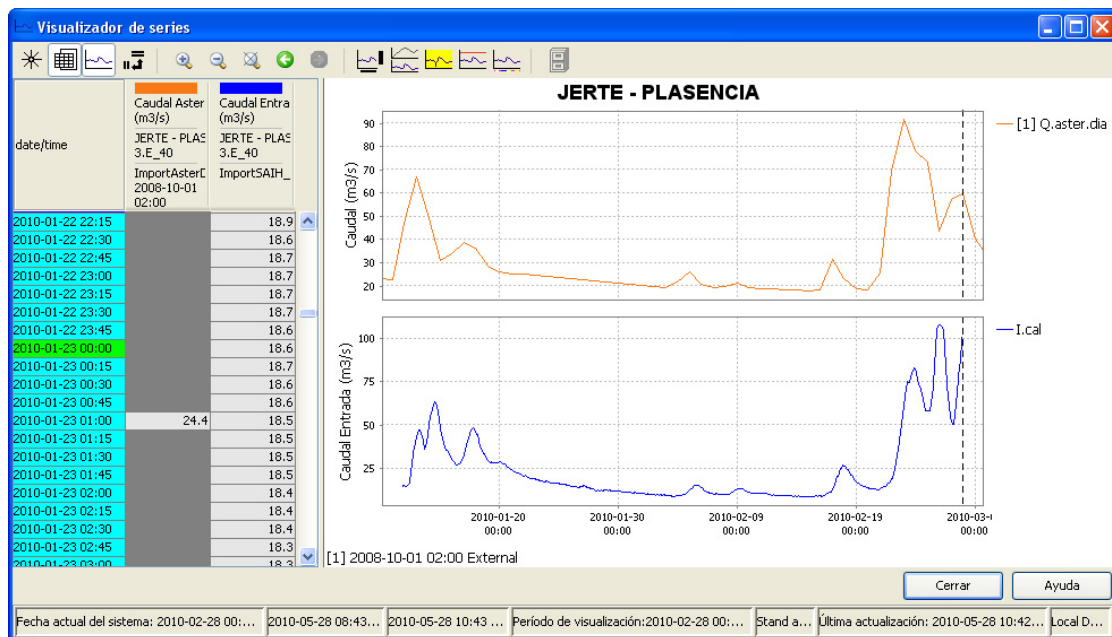


Figura 5.- Visualización de dos series temporales (con distinta frecuencia) en el punto AR42: Jerte-Plasencia.

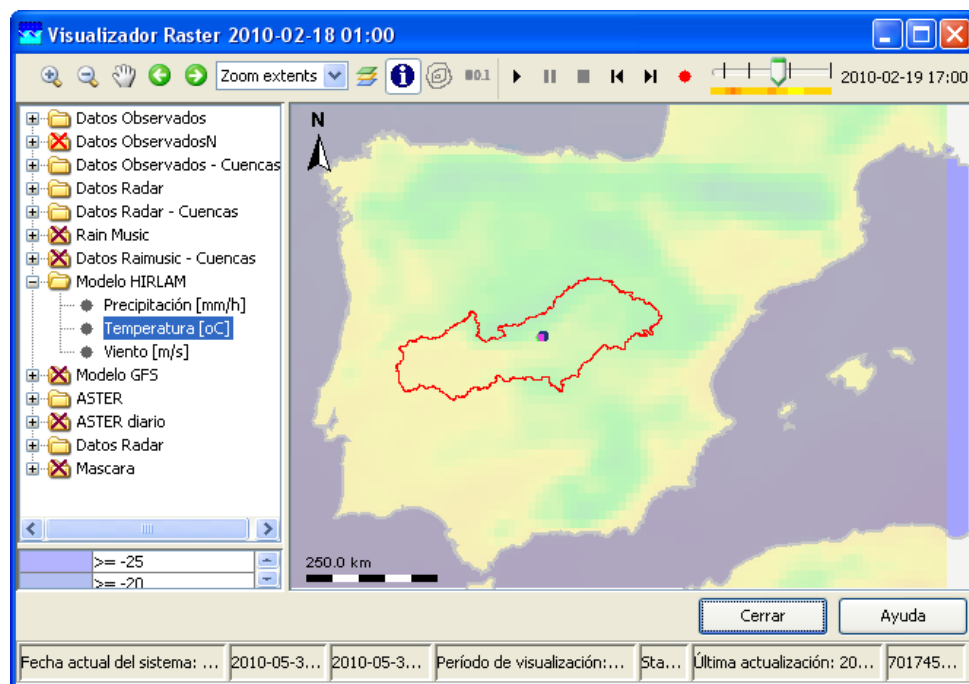


Figura 6.- Visualización de datos raster, predicciones de temperatura del modelo meteorológico HIRLAM (AEMET).

El uso de los modelos con finalidad predictiva es la razón de ser de FEWS. Los programas se ejecutan en modo “batch” por FEWS, en la secuencia que el configurador lo haya establecido, mediante el módulo General Adaptor. Para ello se debe tener (o crear) los adaptadores del modelo, que “traduzcan” datos y resultados entre el formato *.xml y el propio de cada modelo a utilizar. Los modelos comerciales más difundidos ya disponen de su adaptador, y sólo hay que configurarlo adecuadamente. También se puede programar adaptadores para los modelos propios o específicos

que se estén usando actualmente y así continuar usándolos dentro de este entorno. El esquema de la integración de los modelos hidrológicos-hidráulicos dentro de FEWS indica en la Figura 7.

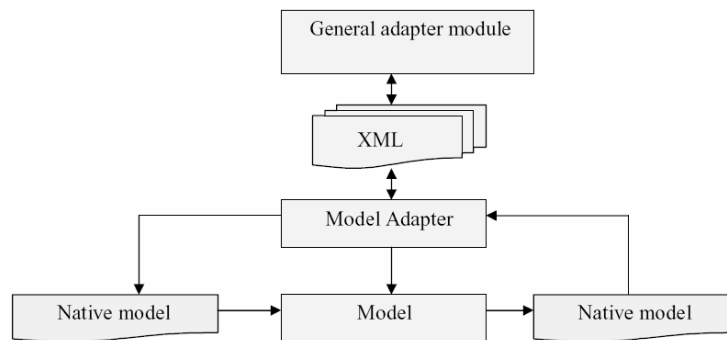


Figura 7.- Esquema de la integración de cualquier modelo en el entorno FEWS.

El mismo modelo NAM-Mike11 se ejecuta con distintos datos mediante dos workflows diferentes: con los datos históricos registrados por el SAIH y con las predicciones futuras de la AEMET (Agencia Española de METeorología). El workflow histórico permite la ejecución enlazada del modelo para conseguir resultados de períodos largos y tener así un buen estado inicial de humedad para realizar las predicciones.

Para los modelos NAM-Mike11 resultó primordial establecer correctamente en la configuración el estado previo del modelo, de forma que en ejecuciones sucesivas y encadenadas el estado final de una simulación sea utilizado por FEWS como estado inicial de la siguiente.

FEWS dispone de muchas herramientas o plugs-in que pueden configurarse y hacerse operativos: correlaciones gráficas entre variables, cálculo de tiempos que falta para alcanzar volúmenes objetivos (tendencias), creación de reportes webs con resultados de los modelos, agregación temporal de series temporales, visualización de variables en tiempo real en la ventana del mapa, base de datos de episodios históricos, visualización de perfiles longitudinales de los ríos, etc. Todas estas herramientas se han configurado para el FEWS del Tajo, extendiendo sus capacidades.

DESARROLLOS ACTUALES Y FUTUROS

Actualmente se está avanzando en cuatro líneas de mejora de modelación que se integrarán dentro del entorno FEWS:

- Modelos de gestión de embalses: este punto comprende la puesta en funcionamiento de los modelos provistos por la DGA (Cuevas et. al. 2009) y la creación de modelos propios de gestión de embalses para capturar las particularidades de gestión en la CHT. Estos módulos deben sugerir a los gestores de los embalses las maniobras de los órganos de desagüe para minimizar los caudales punta ante un hidrograma de crecida pronosticado con los modelos de lluvia-escorrentía. Este es un aspecto clave a abordar, ya que la cuenca se encuentra altamente regulada, con varios embalses en cascada que sueltan sus aguas a Portugal, país en el que también hay presas de uso fundamentalmente hidroeléctrico.
- Desarrollo de modelos bidimensionales de flujo en ciertas zonas de la cuenca. Se han preparado los modelos digitales del terreno para la ejecución de los mismos en modo off-line

(motivado por el tiempo de cálculo elevado). Estos modelos permitirán definir mejor que con los modelos unidimensionales las zonas afectadas por caudales elevados. Se está trabajando actualmente con la cuenca del río Jerte.

- Integración del modelo lluvia-escorrentía TETIS (Vélez, 2003) dentro del entorno FEWS, con disminución del tamaño de celda actualmente utilizado y re-calibración de parámetros. La incorporación de este modelo distribuido permitirá aprovechar los trabajos previos que ya se han realizado en el SAIH, a la vez que poder capturar los efectos de la variabilidad espacial de la precipitación y de las cuencas vertientes. Una integración similar ya se ha realizado en el SAIH del Júcar por Múnera y Francés (2009).

- Uso de ensambles meteorológicos de precipitaciones futuras. De forma pionera en España se está implementando en las subcuencas piloto de Jerte y Navalunga, el uso de múltiples futuros de precipitaciones. Una empresa externa provee al SAIH diariamente de un “ensemble” con 51 series temporales de precipitación media en las subcuencas, con alcance de 7 días y paso temporal de 6 hs. Estos 51 posibles futuros son equiprobables, y se han configurado los workflows para utilizarlos en realizar 51 ejecuciones de los modelos NAM-Mike11. Así se puede trasladar a los caudales futuros la incertidumbre consecuencia de la incertidumbre en el input de los modelos.

En la Figura 8 se presenta la gráfica obtenida en FEWS para los ensambles: en la parte superior está el ensemble de precipitación con 51 elementos (dato para el modelo NAM), el valor medio de los mismos en rojo y el valor medido por el SAIH (a posteriori). En la parte inferior el correspondiente conjunto de caudales resultantes del modelo NAM: aquí el sombreado rosa encierra la banda de probabilidades de 25-75%, en color rojo es nuevamente el valor medio de las predicciones de caudal y en color azul el valor medido por el SAIH (a posteriori).

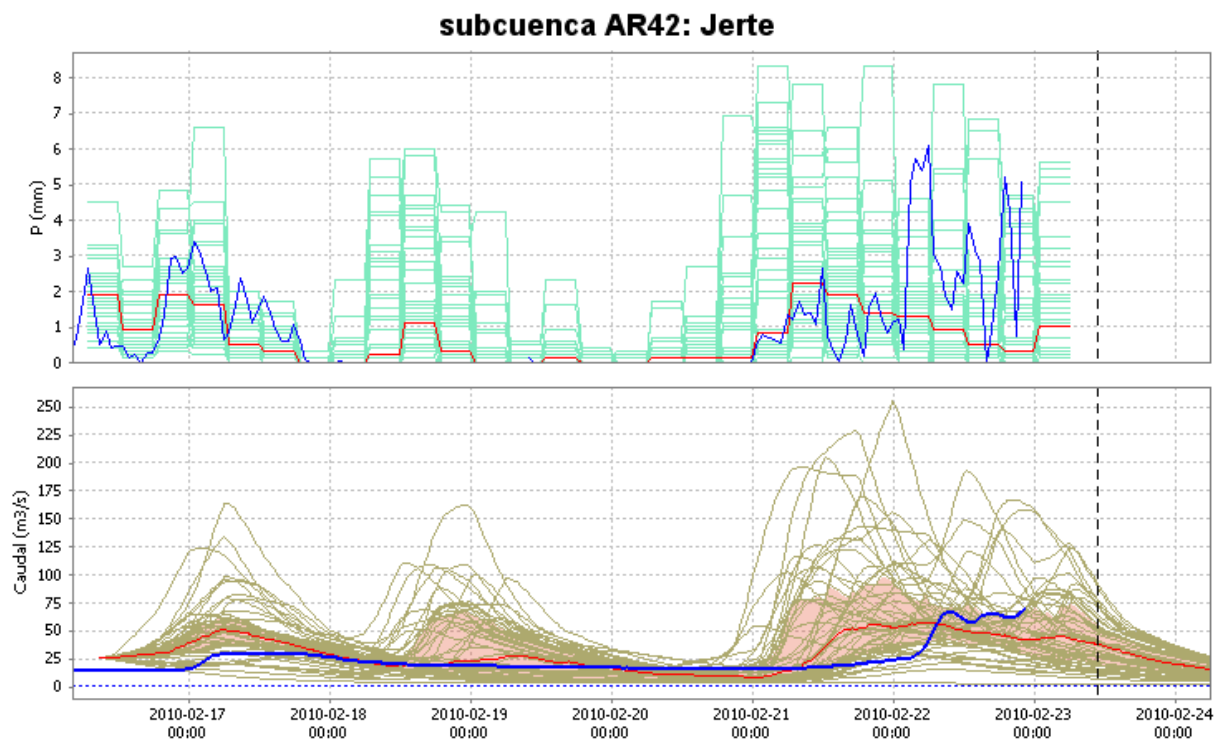


Figura 8.- Ensemble de precipitación y correspondiente ensemble de caudales resultantes del modelo NAM para la subcuenca del río Jerte. Ensamblés con fecha 17-feb y alcance de 7 días.

COMENTARIOS FINALES

El sistema FEWS está implantado en muchos países y cuencas en todos los continentes. Nuestra experiencia en la configuración es que tiene versatilidad para adaptarlo a las necesidades específicas de cada cuenca, aunque esto no es una tarea simple. La mejora permanente del programa por parte de Deltares, y la posibilidad de incorporar en nuestra cuenca las herramientas desarrolladas en otras latitudes es una ventaja importante que merece ser destacada. La posibilidad de adaptar los modelos actualmente utilizados a este entorno es también una condición muy ventajosa.

En el FEWS del SAIH del Tajo actualmente están operativos el modelo de fusión nival ASTER, los modelos NAM-Mike 11, los modelos TETIS y TOPKAPI en la cuenca piloto del río Alberche, el modelo RainMusic de combinación de datos de pluviometría y radar, y buena parte de los productos meteorológicos que provee la AEMET.

Cuando estén más desarrolladas las líneas actuales de trabajo, los gestores de la cuenca dispondrán de una potente herramienta para gestionar más eficientemente la prevención de avenidas, para cumplir con unos de sus objetivos en beneficio de los pobladores de la cuenca y sus actividades económicas.

REFERENCIAS

AEMET (Agencia Española de Meteorología) <http://www.aemet.es>

Delft-FEWS (FLOOD EARLY WARNING SYSTEM): <http://www.wldelft.nl/soft/fews/int/index.html>

DHI, Danish Hydraulic Institute (2008). “Mike 11: A Modelling System for Rivers and Channels, Reference Manual”

Cuevas Velásquez, Víctor et. al. (2009). “Modelo de Simulación de la Operación de un Embalse en Avenida y su Integración al Sistema FEWS”. *Jornadas de Agua 2009- CEDEX -IAHR*, Madrid, España. ISBN: 978-90-78046-09-7.

Múnera, Juan Camilo y Francés, Félix (2009). “Integración del modelo TETIS en el sistema de alarma temprana DELFT FEWS para predicción de avenidas en tiempo real en algunas cuencas de la C.H. del Júcar”. *Jornadas de Agua 2009- CEDEX -IAHR*, Madrid, España. ISBN: 978-90-78046-09-7.

Progea (2007). “RAINMUSIC (Multi-sensors Bayesian combinations software): User manual and references”.

Reggiani, P., Kwadijk, J.C.J., Werner, M.G.F., van Dijk, M.J, Schellekens, J., van Kappel, R.R. and Sprokkereef, E. (2003). “DELFT FEWS: AN OPEN SHELL FLOOD FORECASTING PLATFORM”. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 03494, 2003. *European Geophysical Society*.

Vélez, J. I. (2003). “Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas”, *Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente*

Werner, M.G.F., van Dijk, M., Schellekens J. (2004). “DELFT-FEWS: An open shell flood forecasting system”. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Hydroinformatics, Liong, Phoon and Babovic (Eds.), World Scientific Publishing Company, Singapore*, pp. 1205–1212.