

Acople modelos numéricos de tiempo (NWP) a modelos hidrológicos distribuidos. Sistema de predicciones hidrometeorológicas en tiempo real en las cuencas de Galicia Costa. El sistema ARTEMIS

Enrique Ortiz⁽¹⁾, Ezio Todini⁽²⁾

⁽¹⁾ HidroGaia, Avda. Juan de La Cierva 27, Parque Tecnológico 46980-Paterna Valencia, eortiz@hidrogaia.com

⁽²⁾ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Bologna, Ezio.Todini@unibo.it

1 Introducción

En esta comunicación se presenta el Sistema de Ayuda a la Decisión actualmente operativo en el ámbito territorial de las cuencas de Galicia Costa, dependientes del organismo Augas de Galicia de la Xunta de Galicia, para la previsión de crecidas en cuencas con riesgos de inundaciones. El Sistema se denomina ARTEMIS, acrónimo de ARchitecture for TELEprediction & Management of Information System.

El sistema ARTEMIS genera predicciones a corto plazo de caudal (12, 24, 48 y 72 horas) en tiempo real acoplando las predicciones cuantitativas de precipitación (QPF) realizadas por MeteoGalicia con el modelo WRF al modelo hidrológico distribuido y físicamente basado TOPKAPI. En la actualidad el sistema ARTEMIS se encuentra operativo para 17 cuencas de Galicia Costa, proporcionando predicciones hidrológicas en 55 puntos.

El Sistema ARTEMIS funciona en continuo gestionando los datos hidrometeorológicos y analiza en tiempo real el estado de humedad del suelo en las cuencas del ámbito de Galicia Costa e informa automáticamente si la predicción meteorológica es susceptible de convertirse en alerta hidrológica en cualquiera de los puntos de previsión, ejecutando automáticamente la predicción hidrológica mediante la simulación del modelo hidrológico TOPKAPI.

El Sistema ARTEMIS en la actualidad reside físicamente en Augas de Galicia como Sistema de Ayuda a la Decisión. El Sistema está abierto para introducir nuevas fuentes de datos hidrometeorológicos como por ejemplo las imágenes del Radar Meteorológico o los productos derivados de la teledetección; así como cualquier modelo ya sea hidráulico, hidrológico, de gestión de embalses o de gestión y explotación diaria.

2 Modelo de previsión numérica de tiempo

Los modelos numéricos de previsión de tiempo atmosféricos (NWP) globales proporcionan

información con una resolución del orden de 50 km debido a su alto coste computacional. Esta resolución resulta insuficiente para muchas aplicaciones, sobre todo para aquellas en las que se requiere valorar los impactos locales y regionales de las variables meteorológicas. Los valores representan promedios sobre extensas áreas y, por lo tanto, los extremos se atenúan. Además, la representación de características regionales como la orografía, las líneas de costa, la presencia de lagos, la distribución de los distintos tipos de vegetación, etc. resulta demasiado burda como para ser útil en la definición de la meteorología de una región concreta.

Una de las formas para intentar solventar estas limitaciones de los modelos globales son los modelos numéricos de área limitada (LMA). Éstos se anidan dentro de un modelo global sobre un área de interés y resuelven de nuevo las ecuaciones que gobiernan la atmósfera a una resolución mayor. El modelo global proporciona no sólo las condiciones iniciales, sino también condiciones de frontera a lo largo de todo el periodo simulado. Con estos modelos se pueden llegar a simular escalas de unos pocos kilómetros.

El modelo utilizado actualmente por MeteoGalicia es el WRF (Weather Research and Forecasting) el cual es un modelo atmosférico de área limitada de última generación desarrollado en NCAR (National Center for Atmospheric Research, E.E.U.U.). WRF es un sistema de predicción numérica de tiempo en un área limitada diseñado tanto para la predicción operativa como para tareas de investigación de la dinámica atmosférica. Dispone de dos módulos dinámicos para la resolución de las ecuaciones primitivas de la atmósfera, de una amplia variedad de parametrizaciones físicas y de un módulo de asimilación variacional (3DVar y 4DVar). Incorpora los últimos avances en la representación física de la atmósfera, en integración numérica y en asimilación de datos. Su arquitectura permite aprovechar diversas formas de paralelismo computacional. Está diseñado para ser un sistema de simulación

atmosférica de última generación, flexible, portable y eficiente. Esto hace que sea adecuado para un amplio rango de aplicaciones en diferentes escalas espaciales y temporales.

3 Enfoque Bayesiano

El enfoque Bayesiano permite dar un aviso previo de alerta para cada uno de los puntos de interés de las cuencas de Galicia Costa. Teniendo la predicción de la precipitación se puede estimar, con una cierta probabilidad, la superación de un caudal crítico a partir del cual la sección de un tramo de río se encuentre en estado de alerta (fig.1). Con estas curvas se generan avisos de la posible superación del caudal crítico en diferentes puntos de interés. Posteriormente analizando cada aviso se realiza la simulación hidrológica con el modelo distribuido TOPKAPI para determinar la situación real y poder definir las alarmas necesarias según sea el caso.

La metodología empleada para el establecimiento de los umbrales de precipitación acumulada está basada en las probabilidades de superación de un determinado caudal máximo en función del estado de humedad antecedente de la cuenca (Martina et al, 2006). En primer lugar se generan series sintéticas de precipitación y temperatura de forma que sirvan como inputs en un modelo de transformación lluvia-escorrentía, para, a partir de éste, obtener las series sintéticas de caudal en los puntos de previsión y humedad media de la cuenca. Con estos datos se determina la función de densidad de probabilidad bivariada (pdf) entre el volumen acumulado de precipitación para un intervalo de tiempo determinado y los caudales máximos correspondientes a éstos dado un estado inicial de humedad del suelo. Posteriormente se calcula la función de probabilidad del caudal máximo condicionado al volumen de lluvia acumulada. Fijando un caudal crítico (por ejemplo umbral a partir del cual comienzan los daños) se calculan las curvas de volumen acumulado en función del tiempo para diferentes probabilidades de igualar o superar ese caudal máximo.

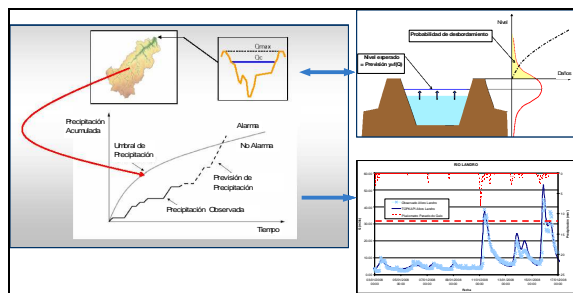


Fig. 1.- Curva que indican la probabilidad de que dado un cierto volumen acumulado de lluvia y un cierto tiempo el caudal sea mayor o igual al caudal crítico.

3.1 Generación de las series sintéticas de lluvia y temperatura

Como ya se ha comentado el primer paso fundamental para la generación de las curvas de aviso es la generación de series sintéticas de precipitación y temperatura, en el caso de Galicia se generaron 100 años a escala horaria correlacionando ambas variables meteorológicas.

La generación de la serie sintética de precipitación se ha obtenido utilizando el modelo modificado de Bartlett-Lewis de pulsos rectangulares a partir de los registros de las estaciones automáticas de MeteoGalicia con datos diezminutales. Dicho modelo pertenece a una familia de modelos estocásticos de lluvia temporal estimándose los parámetros por el método de los momentos.

Por otro lado la generación de temperatura se ha procesado en 4 fases: en primer lugar, para garantizar una buena reproducción de la estacionariedad anual, se han procesado los datos de las estaciones automáticas de MeteoGalicia separados mes a mes. Segundo se genera un modelo de media móvil para desagregar los datos diarios a horarios, y de esta manera mantener la periodicidad diaria. Tercero con la serie de temperaturas medias diarias se ajusta un modelo autorregresivo para la generación de las temperaturas sintéticas. Cuarto y último se desagregan las series diarias generadas a escala horaria y se juntan los datos mes a mes para obtener las series anuales, (Koutsoyiannis, D., 1994, 1996)

Generados los inputs del modelo hidrológico se ejecuta éste para obtener las series de caudal, humedad, celdas saturadas y evapotranspiración de la cuenca.

3.2 Separación de tormentas y análisis de datos

De los resultados del modelo hidrológico TOPKAPI se procede a la separación e identificación de las tormentas de los 100 años generados. Es muy difícil poder determinar mediante un algoritmo automático la separación de las tormentas ya que cada una de ellas varía según el estado inicial de la cuenca. A su vez para poder determinar el inicio y fin de una tormenta es necesario hacer un análisis detallado y elegir un parámetro que describa la mayoría de las tormentas y no genere vinculaciones falsas entre volumen acumulado y caudal máximo. Para esto se han tomado las siguientes consideraciones:

$d_{min} = 4$ horas. Duración mínima de lluvia mayor a p_{min} para que se considere una tormenta.

$p_{min} = 1$ mm. Precipitación mínima, la cual es anulada solo para determinar mejor la separación de las tormentas y que no se produzca uniones de tormentas por precipitaciones inferiores a un milímetro. Para el cálculo de del volumen

acumulado y de la humedad del suelo si es considerada.

$q_{min} = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Se consideran solo las tormentas con caudales mayores a q_{min} .

$Infin$ = Número de horas sin lluvia o con precipitación menor a p_{min} para considerar fin de una tormenta. Este es el parámetro fundamental para realizar la separación de las tormentas. Para esto se establece que para determinar el tiempo de separación entre dos tormentas ($infin$) el pico producido por la primera hora de la segunda tormenta no se superponga con la escorrentía superficial de la primera tormenta:

$$Infin = Tc - Tdp$$

Para esto se definen los siguientes tiempos:

Tdp : Tiempo de desfase de la punta. Es el tiempo que existe entre el centro de gravedad del hietograma neto y el tiempo en que se produce el máximo valor de caudal

Tc : Tiempo de concentración. Tiempo necesario para que, con una lluvia neta uniforme, la totalidad de la cuenca contribuya al hidrograma de escorrentía superficial. En este caso y debido a su sancionada práctica se ha utilizado la expresión de Témez.

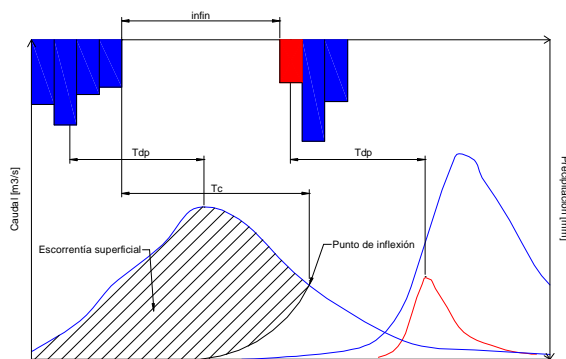


Fig. 2.- Determinación del tiempo mínimo para considerar la separación de dos tormentas

Con estos parámetros se identifican todas las tormentas y para cada tormenta se calculan los acumulados de lluvia para diferentes intervalos de tiempo Ti vinculando a éste el caudal máximo entre el inicio de la tormenta y $(Ti + Tc)$.

Por otro lado para poder determinar una relación entre la humedad del suelo al inicio de cada tormenta y el volumen acumulado de lluvia en un cierto tiempo antecedente, se lleva a cabo un análisis de correlación a escala mensual a partir de las series generadas. Con esta consideración adoptada se construye una serie de gráficos discretizados por meses donde se grafica la humedad del suelo al inicio de cada tormenta (AMC - Antecedent

Moisture Condition) en función del volumen acumulado de lluvia los 30 días antes del inicio de cada tormenta (Para Galicia el indicador más fiable obtenido de la humedad promedio del suelo de la cuenca en un instante dado es la lluvia acumulada en los últimos 30 días). Las tormentas se separan según el estado inicial de humedad de la cuenca, AMCI (0.8-0.9) y AMCII (0.9-1). Estos grupos se determinan calculando las curvas de umbral de precipitación para las diferentes humedades posibles y en intervalos de 0.1, luego se agrupan los estados de humedad cuyas curvas sean más próximas.

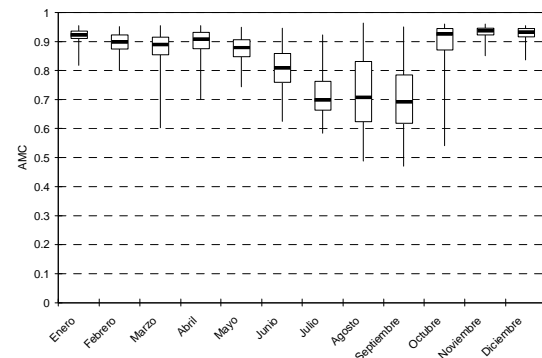
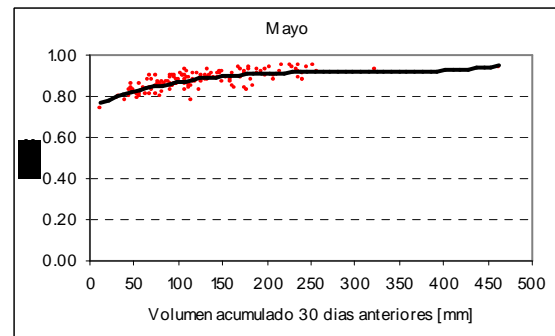


Fig. 3.- Condición inicial de humedad en función del volumen de lluvia acumulado durante los 30 días anteriores al inicio de una tormenta en el mes de Mayo y gráfico de cajas mensual para la humedad del suelo

3.3 Determinación de la función de probabilidad condicional

Para el cálculo de la distribución de los caudales condicionados a los volúmenes acumulados de lluvia se utiliza la distribución Meta Gaussiana [Kelly y Krzysztofowicz, 1997] en la cual dado un vector (X,Y) de variables aleatorias se definen las funciones de distribución marginales F de X y G de Y las cuales son arbitrarias, estrictamente crecientes y continuas, con funciones de densidad f y g respectivamente. La función distribución Meta-Gaussiana H y la densidad h de (X,Y) son,

$$H(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = B(Q^{-1}(F(x)), Q^{-1}(G(y)); \gamma)$$

$$h(x, y) = \frac{f(x)g(y)}{\sqrt{1-\gamma^2}} e^{\frac{-\gamma}{2(1-\gamma^2)}\gamma[e^{-1(F(x))}]^2 - 2[e^{-1(F(x))}]e^{-1(G(y))} + \gamma[e^{-1(G(y))}]^2}$$

Utilizando la ecuación anterior dado el caudal crítico (y) se busca el volumen acumulado (x) talque la probabilidad condicionada (1-K(y/x)) sea igual a 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.9, de esta forma se calculan para cada intervalo de tiempo el volumen de precipitación que define la igualdad o superación del caudal crítico con una cierta probabilidad asignada. Se hace lo mismo para cada AMC obteniendo un grupo de curvas para cada estado de humedad (ver Fig. 4).

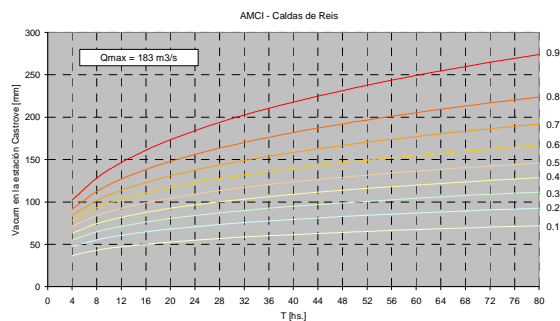


Fig. 4.- Curvas de umbral de precipitación para estado de humedad media de la cuenca entre 0.7 y 0.9. Para probabilidades entre 0.1 y 0.9.

4 Modelación Hidrológica

La predicción hidrológica se realiza mediante el uso de un modelo distribuido físicamente basado: el modelo TOPKAPI (TOPographic Kinematic APproximation and Integration) (Todini et al, 2005). La elección de este modelo deriva de un análisis atento sobre el estado de información del territorio y de instrumentación de las cuencas implementadas en el sistema. En primer lugar se eligió un modelo físicamente basado en cuanto no se dispone de medidas de aforo fiables y continuas para poder calibrar un modelo. Se ha preferido entonces hacer uso de un modelo que se base sobre pocos parámetros y que estos parámetros puedan ser deducibles de las características físicas del suelo: el perfil edafológico y el uso que se hace actualmente del suelo y la topografía (Modelo de Elevación del Terreno).

La elección del modelo TOPKAPI para realizar las previsiones de caudal en las cuencas del ámbito de Galicia Costa mediante un acople a los pronósticos meteorológicos de lluvia (QPF) elaborados por MeteGalicia se ha basado fundamentalmente, a parte de su calidad y rigurosidad en la representación de los fenómenos físicos involucrados en el proceso de transformación lluvia-escorrentía, en la facilidad de la obtención de los valores modales de los parámetros físicos, en la interpretación físicamente basada e inmediata de los

parámetros y en la aplicabilidad del modelo a diferentes escalas, conservando, al aumentar ésta, el significado físico de los parámetros. En la siguiente tabla se presentan los parámetros necesarios para establecer topológicamente el modelo hidrológico en cada cuenca indicando en que componente se utiliza y el significado físico del mismo.

El hecho que sea distribuido puede garantizar el máximo aprovechamiento distribuido espacialmente de la información física y meteorológica en entrada, todas las cuencas se han caracterizado con resoluciones espaciales que oscilan desde los 90 x 90 a 200 x 200 m, asegurándose así la representatividad del fenómeno físico.

Componente del modelo	Parámetro y significado	Símbolo
Suelo	Espesor del suelo	L
	Conductividad hidráulica saturada	Ks
	Contenido de agua residual del suelo	θ_r
	Contenido de agua a saturación	θ_s
Ladera	Coefficiente de Manning en ladera	Ns
Canal	Coefficiente de Manning en cauce	Nc

Tabla 1.- Parámetros del modelo TOPKAPI y su significado físico

Los parámetros pueden ser estimados a partir de coberturas GIS como el Modelo de Elevación Digital del Terreno, Textura y Litológica del suelo y/o Edafología, Usos del suelo.

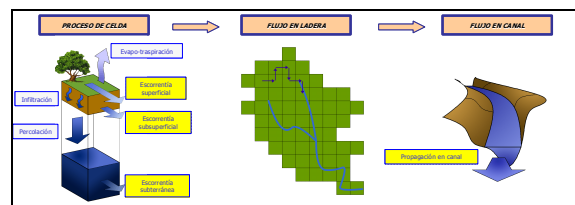


Fig. 4.- Esquema general del funcionamiento del modelo TOPKAPI

La elección de las cuencas y puntos de predicción se ha realizado atendiendo a las prioridades existentes en el Plan Hidrológico de Galicia Costa. En la actualidad son 55 puntos donde se obtienen predicciones de caudales repartidos en las siguientes 17 cuencas: Umia, Sar, Ulla, Tambre, Anllons,

Lerez, Eume, Xubia, Verdugo, Landro, Mero, Mandeo, Ouro, Masma, Xallas, Grande y Covo.

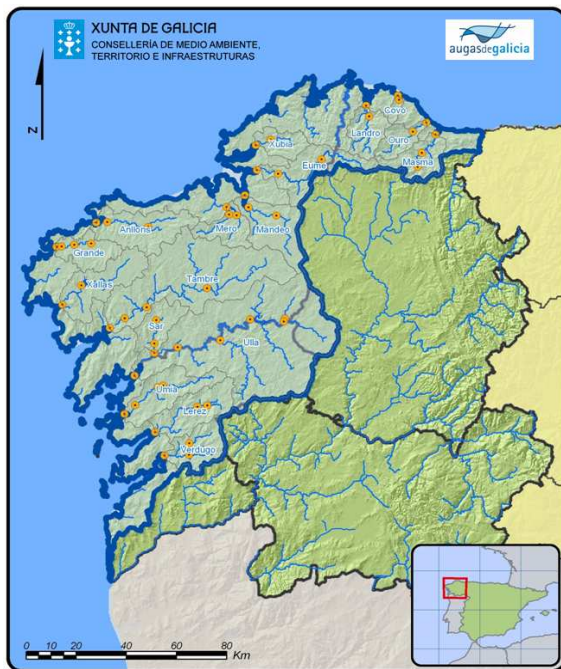


Fig. 5.- Puntos y cuencas de predicción en el ámbito territorial de Galicia-Costa

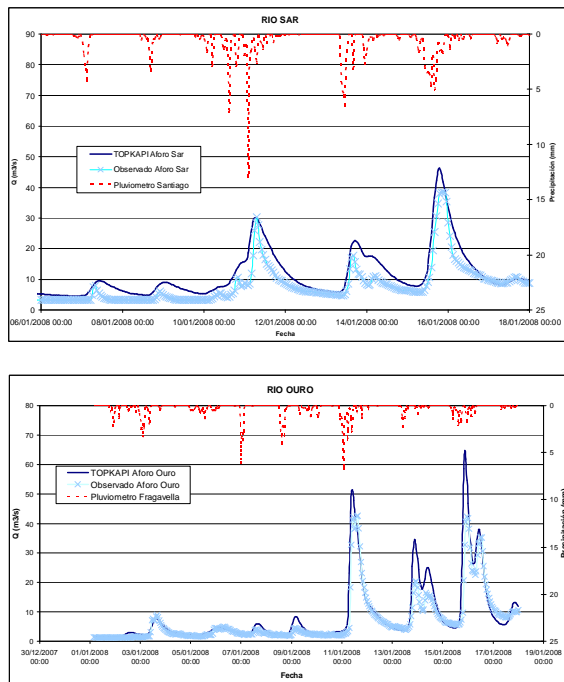


Fig. 6.- Resultados de simulaciones en dos puntos de predicción de los ríos Sar y Ouro y caudal observado en las estaciones de aforo correspondientes

5 Arquitectura del Sistema

Para la implementación del sistema ARTEMIS se han utilizado los siguientes elementos de software:

Servidor de aplicaciones Apache/Tomcat 5.5.9: Para poder acceder a la información, se ha optado por un servidor que albergue los archivos físicos. Para ello, se usa un servidor de aplicaciones Apache/Tomcat (Tomcat-5.5.9), con las siguientes características:

- Se trata de un servidor montado sobre la plataforma Linux, aunque este tipo de servidor puede ser instalado también en Windows.
- Es además un contenedor de Servlets con un entorno JSP.

RDBMS (Relational Database Management System): La base de datos a la que se accede para obtener la información necesaria es Oracle 10g. Se trata de un Sistema Gestor de Bases de Datos Relacional (RDBMS) que soporta acceso por SQL y por diversos lenguajes de programación. También posee un lenguaje de procedimientos llamado PL/SQL.

Scripts JSP (JAVASERVLET PAGES) Y SERVLETS: Para llevar a cabo la realización del estudio, se optó por el lenguaje JSP (JavaServlet Pages). Se trata de un lenguaje con una característica principal, permite generar páginas web de forma dinámica en el servidor. Las páginas JSP están compuestas de código HTML/XML mezclado con etiquetas especiales para programar scripts de servidor en sintaxis Java.

Scripts APPLETs: Se trata de pequeñas aplicaciones escritas en el lenguaje de programación JAVA y que se difunden a través de la red de Internet para ejecutarse en el visualizador cliente del usuario, es decir, son ejecutadas en la máquina cliente, con lo que no existen ralentizaciones por la saturación del módem o del ancho de banda. Permiten cargar a través de la red una aplicación portable que se ejecuta en el navegador. Para que esto ocurra tan sólo hace falta que el navegador sea capaz de interpretar Java.

Las applets no son exactamente aplicaciones Java, ya que presentan las siguientes diferencias respecto a las aplicaciones normales Java:

- Se cargan mediante un navegador, no siendo lanzados por el intérprete Java.
- Son cargados a través de la red por medio de páginas HTML y no residen en el disco duro de la máquina que los ejecuta.
- Poseen un ciclo de vida diferente; mientras que una aplicación se lanza una vez, una applet se arranca (inicia) cada vez que el usuario recarga la página en la que se encuentra la applet.

- Tienen menos derechos que una aplicación clásica, por razones de seguridad. De modo predeterminado en el puesto que los ejecuta no pueden ni leer ni escribir ficheros, ni lanzar programas, ni cargar DLLs. Sólo pueden comunicarse con el servidor Web en que se encuentra la página Web que las contiene

Este sistema consta pues, de diversas partes, cada una de ellas implementada bajo un lenguaje de script adecuado a la funcionalidad de cada proceso. Se trata pues de montar todo ello bajo un servidor web lo suficientemente versátil como para admitir interrelaciones con otros sistemas operativos, servidores de mapas y lenguajes de programación estándar.

El desarrollo de los trabajos, implica el establecimiento de un sistema de información que permita la gestión de los datos y resultados que se van obteniendo mediante consultas a una base de datos (ORACLE en este caso), que debe encontrarse relacionada con los fenómenos físicos que representa y organizados de forma espacialmente distribuida. Esto nos lleva a plantear un sistema de información de naturaleza geográfica; por esta razón, se pretende implementar un sistema de información geográfica orientado a la transmisión de los datos vía internet. Por este motivo, se decidió implementar un servidor de mapas a modo de Sistema de Información Geográfica descrito a continuación:

Servidor de Mapas UMN Mapserver: Un servidor de mapas es un software capaz de interactuar con fuentes de datos GIS (Geographic Information System) y presentarlos vía Internet gracias a un servidor web como el que se requiere para la implementación del sistema. Este servidor web, como se ha comentado, no es más que un software que habilita al equipo en que reside para la publicación de contenidos en Internet.

Mediante estos componentes, se posibilita que diversos equipos se conectan vía intranet/internet a un servidor web, que gracias a la conexión con el equipo que contienen el servidor de mapas, se conecta a una fuente de datos GIS -que puede estar en el propio equipo o residir en un servidor de cartografía específico, o incluso conectarse a fuentes de datos en internet- y obtiene o modifica dichos datos devolviendo al cliente/usuario contenidos que su navegador puede entender, es decir, documentos HTML, XML, gráficos, etc. Así, el cliente no necesita de ningún software sino tan sólo su navegador y como mucho, la máquina virtual JAVA, en caso de utilizar el servidor esta tecnología. Por otro lado, el administrador puede tener el software GIS instalado en otro terminal desde el que accede a los datos para su manipulación.

El UMN Mapserver constituye un proyecto de código abierto para la construcción de aplicaciones web con cartografía de la Universidad de Minnesota. Además de ser gratuito, código abierto y multiplataforma, su comunidad de usuarios es enorme y la cantidad de referencias considerable (<http://mapserver.gis.umn.edu>).

Una de las características más interesantes de UMN Mapserver es su escalabilidad. No sólo permite crear sitios sencillos sino que se puede aumentar sus funciones mediante el uso de lenguajes de programación web como Javascript y sobre todo es posible acceder al programa mediante lenguajes de programación de script (lenguaje de programación cuyo código no necesita ser compilado para ser ejecutado) como PHP, Perl, Python,...

Esto significa que podemos acceder al modelo de objetos y trabajar directamente con él pudiendo realizar aplicaciones web completamente personalizadas. Si además sumamos la característica de PHP para acceder a otro tipo de bases de datos alfanuméricas, es posible obtener un conjunto realmente potente. El acceso a UMN Mapserver mediante lenguajes de script se conoce como MapScript.

Su desarrollo es constante, apareciendo cada poco tiempo versiones nuevas en las que se van aumentando los formatos soportados y las funciones. Actualmente UMN Mapserver es capaz de conectarse con fuentes de datos:

- Vectoriales: shapes de ESRI, ArcSDE, Oracle, PostGreSQL/PostGis, ODBC y cualquier otro formato soportado por la biblioteca OGR.
- Raster: ArcINFO ASCII Grid, Arc/Info Binary Grid (.adf), TIFF/GeoTIFF, ERDAS Imagine, y cualquier otro formato soportado por la biblioteca GDAL.

Por último y como característica novedosa y a tener en cuenta es la posibilidad de hacer tanto de cliente como de servidor de datos en los nuevos formatos WMS y WFS, establecidos por el Open Geospatial Consortium (OGC). Es decir, permite añadir a nuestro sitio datos cartográficos contenidos en servidores web con tecnologías WMS/WFS, así como configurar nuestro sitio para que desde otros se puedan cargar los datos contenidos en el mismo.

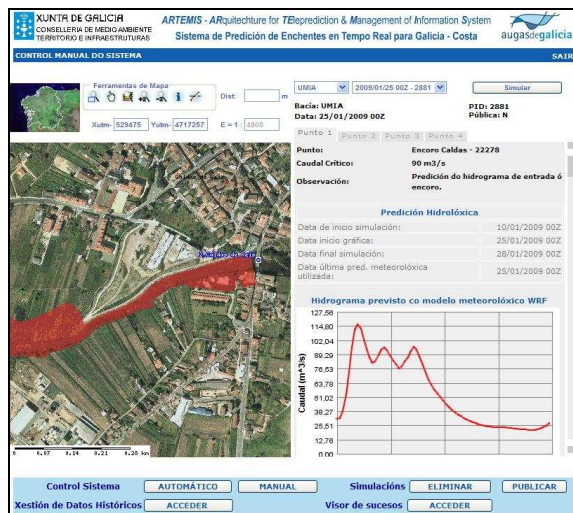


Fig. 7.- Pantalla operativa del Sistema ARTEMIS, funcionando en Augas de Galicia.

7 Operativa del Sistema

El sistema ARTEMIS genera predicciones a corto plazo de caudal en tiempo real acoplando las predicciones cuantitativas de precipitación del modelo numérico de predicción meteorológica WRF (Weather Research and Forecasting) anidado en el GFS (Global Forecast System) que está siendo ejecutado dos veces al día (00z y 12z) por MeteoGalicia en el superordenador Finisterrae del CESGA (Centro de Supercomputación de Galicia) al modelo hidrológico distribuido físicamente basado TOPKAPI (TOPographic Kinematic Approximation and Integration, Todini et al. 1995).

Las predicciones cuantitativas de precipitación (QPF) realizadas por MeteoGalicia con el modelo WRF poseen una resolución espacial de 4 x 4 km, con una escala temporal horaria y un horizonte de predicción a 72 horas. Por otro lado, el modelo hidrológico integrado en el sistema, TOPKAPI, es un modelo distribuido y físicamente basado cuyos parámetros son estimados a partir de las características físicas de la cuenca (usos del suelo, tipo de suelo, edafología, modelo digital del terreno). La escala temporal de trabajo de la predicción hidrológica, al igual que la meteorológica, es horaria, lo cual permite obtener caudales con la precisión necesaria para la óptima predicción de crecidas en las cuencas de Galicia y la escala espacial hidrológica varía entre resoluciones de 90 x 90 a 200 x 200 m en función de los tamaños de las cuencas. En la actualidad el sistema ARTEMIS se encuentra operativo para 17 cuencas de Galicia Costa, proporcionando predicciones hidrológicas en 55 puntos.

El Sistema ARTEMIS funciona en continuo gestionando los datos hidrometeorológicos y analiza en tiempo real el estado de humedad del suelo en las

cuencas del ámbito de Galicia Costa ya que no siempre que se produce una alerta de tipo meteorológico es previsible esperar una alerta de tipo hidrológico. Para ello se han establecido unos criterios que permitan evaluar a priori, dada una previsión meteorológica adversa, la conveniencia o no de activar una alerta hidrológica. El estado de humedad antecedente del suelo es el parámetro fundamental dentro de las condiciones iniciales del sistema hidrológico y en consecuencia la respuesta hidrológica puede variar notablemente. Por ello se ha incorporado al Sistema un análisis por cuenca con un enfoque bayesiano en el que en función de la lluvia antecedente se obtiene una familia de curvas de alerta de excedencia de un caudal crítico relacionando bivariadamente la cantidad de lluvia predicha (QPF) y el estado de humedad del suelo de la cuenca. Dada la predicción meteorológica (QPF) se compara la precipitación prevista con la curva de alerta correspondiente a cada punto de predicción, de esta manera el Sistema ARTEMIS informa automáticamente si la predicción meteorológica es susceptible de convertirse en alerta hidrológica en cualquiera de los puntos de previsión, ejecutando automáticamente la predicción hidrológica mediante la simulación del modelo hidrológico TOPKAPI.

Este proceso se realiza dos veces al día en función de las predicciones meteorológicas disponibles (00z y 12z). Los hidrogramas previstos son comparados con los caudales críticos establecidos previamente en función de los daños esperados en los puntos de previsión. Los niveles de alerta vienen definidos por la relación Q-V (caudal-vulnerabilidad) y han sido obtenidos a partir de las normas de explotación de presas y de la zonificación de áreas inundables disponibles en Augas de Galicia para cada uno de los puntos de predicción.

8 Referencias Bibliográficas

- Kelly K.S. y Krzysztofowicz R., 1997. A bivariate meta-Gaussian density for the use in hydrology. *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 11, 17-31.
- Koutsoyiannis, D., 1994. A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. *Journal of Hydrology* 156, 193-225.
- Koutsoyiannis, D., y A. Manetas, 1996. Simple disaggregation by accurate adjusting procedures. *Water Resources Research* 32(7), 2105-2117.
- Lui Zhiyu, Martina M.L.V. y Todini E., 2005. Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(4), 347-364.
- Martina M.L.V., Todini E. y Libraron A., 2006. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrology Earth System Sciences* 10, 1-14.