

MODELACIÓN CON FINES DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS DE LOS NIVELES DIARIOS EN PERÍODO DE ESTIAJE EN LOS SITIOS DE CALAMAR, EL BANCO Y PUERTO BERRIO DEL RÍO MAGDALENA

Hebert Gonzalo Rivera, Eduardo Zamudio y Henry Romero
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)
Dirección de Hidrología, Bogotá, Colombia.
heberth@mail.ru; ezamudio@ideam.gov.co; hromero@ideam.gov.co

Recibido para evaluación: 24 de Julio de 2004 / Aceptación: 03 de Septiembre de 2004 / Recibida versión final: 13 de Septiembre de 2004

RESUMEN

Los resultados del trabajo se soportan en los esfuerzos de: 1) acuerdo administrativo entre el Gobierno de Colombia y el de los Países Bajos de 1970, 2) adelantos en pronósticos hidrológicos cualitativos y cuantitativos de la Subdirección de Hidrología y del Servicio de Pronósticos y Alertas del IDEAM de 1995-2002, 3) convenio 202 IDEAM-CORMAGDALENA de 2002.). El trabajo centra la atención en la generación teórica del modelo de pronóstico de la ley de distribución de probabilidades de los niveles diarios del agua en período de estiaje a partir de la transición de una Ecuación Diferencial Determinista (EDD) a la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov. Se desarrolla, valida y aplica una EDD que simula la variación de los niveles diarios del agua en Calamar, El Banco y Puerto Berrio y se demuestra el beneficio de los pronósticos hidrológicos para la navegación sobre el río Magdalena. El modelo validado se soporta en los pronósticos meteorológicos a 72 horas del IDEAM, los pronósticos del clima y las características hidrológicas y de relieve del bajo Magdalena. El modelo se valida mediante diferentes criterios de evaluación de la calidad de su funcionamiento.

PALABRAS CLAVES: Navegación, Ecuación Prospectiva de Kolmogorov, Pronóstico Hidrológico.

ABSTRACT

This work focuses in a theoretical model to forecast the daily water levels probability distribution function in critical periods, based in the transition of a Deterministic Differential Equation (DDE) to the Kolmogorov Prospective Equation. A DDE is developed, validated and applied to simulate the daily water levels variation in the Magdalena River at Calamar, El Banco and Puerto Berrio, and the benefits of the hydrologic forecasts for the Magdalena River navigation are presented. The validated model is based on the IDEAM's 72 hour methodological forecasts, climate prediction and the hydrological and geomorphological characteristics of the Magdalena River. The model is validated using different evaluation criteria

KEY WORDS: Navegation, Kolmogorov Prospective Equation, Hydrologic Forecast.

1. INTRODUCCIÓN

Por el río Magdalena se transportan insumos para la producción nacional e importantes productos hacia mercados internacionales como azúcar, café, carbón, cemento, cereales, hidrocarburos, ganado en pie, madera, hierro y acero. Por ello, una herramienta soporte para la toma de decisiones sobre la navegación por el río, son los pronósticos de los niveles diarios y los pronósticos de la amenaza en términos de su probabilidad.

La metodología desarrollada para emitir los pronósticos hidrológicos de los niveles diarios en períodos de estiaje para los sitios de Calamar, El Banco y Puerto Berrio sobre el río Magdalena, es el resultado de esfuerzos mancomunados entre instituciones del Estado que a lo largo de los últimos 30 años han requerido mejorar la navegación sobre el río.

El trabajo contempla una reseña de la importancia de la emisión de pronósticos hidrológicos de los niveles diarios para el sector navegable del río Magdalena, un desarrollo teórico en el cual se genera el modelo que simula la amenaza en términos de probabilidad a partir del modelo determinista de la dinámica del nivel del agua, un desarrollo práctico que muestra la adopción y validación de un modelo determinista para modelar la dinámica de los niveles diarios del agua en el período de estiaje para los sitios de Calamar, El Banco y Puerto Berrio y unas recomendaciones.

2. RESEÑA

Ya en los años 70, mediante el Acuerdo administrativo entre el Gobierno de Colombia y el de los Países Bajos firmado el 5 de octubre de 1970, el Ministerio de Obras Públicas se propuso tener un mejor conocimiento y comprensión del régimen hidrológico y morfológico de los ríos para hallar las soluciones satisfactorias de los problemas de congestión del tráfico relacionado con la navegación fluvial.

Atendiendo la anterior necesidad, la Comisión de Expertos del Reino de los Países Bajos presentó consideraciones precisas de ingeniería para mejorar la navegación sobre el río Magdalena. Entre éstas, figuraron los defectos del río con relación a la navegación: a) profundidad y anchuras insuficientes, b) curvas demasiadas agudas, c) alta sinuosidad, d) inestabilidad

en los canales navegables, e) rápidas y altas velocidades locales y f) presencia de materiales flotantes. Igualmente, se presentaron algunas recomendaciones: a) mantener las estaciones fluviométricas en los sitios Arrancaplumas, Puerto Salgar, Puerto Berrio, Barrancabermeja, Puerto Wilches, Calamar y Gambote; b) montar estaciones en Puerto Triunfo, Puerto Inmarco, Gamarra, El Banco, Bahía de Cartagena, Las Varas en el río Cauca; c) hacer la conexión de las cotas cero de las estaciones con la red de benchmarks del IGAC; d) adoptar el nivel de reducción como nivel de referencia para todos los fines de navegación; e) continuar con las mediciones de los sedimentos a lo largo del río; f) ejecutar sondeos longitudinales y locales regularmente; etc.

En ese entonces, una recomendación importante resultó ser la predicción de los niveles del agua, dado que durante la temporada de estiaje los operadores de río requerían conocer con ciertos días de anterioridad el nivel del agua que se presentaría para poder cargar las embarcaciones con el máximo calado permisible. Así por ejemplo, en ese entonces se razonaba de la siguiente manera “cuando hay que transportar cargamentos desde Barrancabermeja a Puerto Salgar y se conoce la profundidad mínima disponible en este trayecto del río Magdalena, la posibilidad de predecir de antemano los niveles del agua en Puerto Berrio (un día) y en Puerto Salgar (tres días) le permitirá al operador cargar sus planchones con un calado tal que ya no deberá considerar demora innecesaria alguna en los cruces para esperar niveles de aguas altas. Sin embargo, en el párrafo 2.5 se ha descrito la imposibilidad de establecer las curvas de relación para el río Magdalena con cierto grado de exactitud. Por esta razón debe resultar claro que también es imposible predecir los niveles del agua. Una vez establecida una red más densa de fluviómetros a lo largo del río Magdalena para cierto número de años y tomando asimismo en cuenta las lecturas de los fluviómetros en la zona alta del río Magdalena, deberá estudiarse con mayor detalle la posibilidad de predecir los niveles de agua. Con la información actualmente disponible (1973) hay que considerar como imposible predecir los niveles de agua” (Ministerio de Obras Públicas, 1974).

A pesar de las restricciones señaladas, los expertos recomendaron un modelo como primera tentativa, estudiando el descenso del nivel del agua en Calamar (dado en el hidrograma) y teniendo en cuenta los caudales y la cantidad de precipitación efectiva en algunos sitios.

El modelo propuesto tiene la siguiente expresión:

$$Rc_t = Rc_{t_0} e^{(-\alpha t) + R_{LV}^* (t - \Delta t_1) + \gamma R_G^* (t - \Delta t_2)} \quad (1)$$

en donde:

Rc_t	descarga del río Magdalena en Calamar, tiempo futuro,
Rc_{t_0}	descarga del río Magdalena en Calamar, tiempo inicial,
R_{LV}^*	descarga relativa del río Cauca en Las Varas,
R_G^*	descarga relativa del río Magdalena en Gamarra,
α, γ, β	coeficientes a determinar a partir de las curvas de depleción respectivas,
t	tiempo,
$\Delta t_1, \Delta t_2$	periodos de retraso debidos a la translación.

Por medio de la ecuación (1) se proponía calcular la descarga en Calamar y transformarla en nivel del agua en Calamar a partir de la curva de calibración de caudales. Una vez finalizada la comisión de expertos extranjeros, y a pesar del interés estatal en sus recomendaciones y conclusiones para mejorar la navegación sobre el río Magdalena, en las entidades responsables no se logró ni aplicar el modelo propuesto ni desarrollar otro cualquiera.

En la década de los 80 y 90 el tema de mejorar la navegación sobre el río Magdalena con soporte en los pronósticos hidrológicos de los niveles diarios pasó a un nivel de importancia mucho menor para los gobiernos y por ello tanto las recomendaciones y conclusiones de los expertos extranjeros fueron olvidadas temporalmente. Al inicio de los 90, se creó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) a partir de la reestructuración del Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), tomando auge nuevamente la necesidad de implementar un mejor sistema de alertas de los eventos hidrológicos extremos (inundaciones y estiaje). Aunque al sector naviero en especial no se dio atención especial alguna, los desarrollos tecnológicos del IDEAM en materia de pronósticos hidrológicos cualitativos de los niveles del

agua, se convirtieron en una herramienta valiosa para los operarios de la navegación.

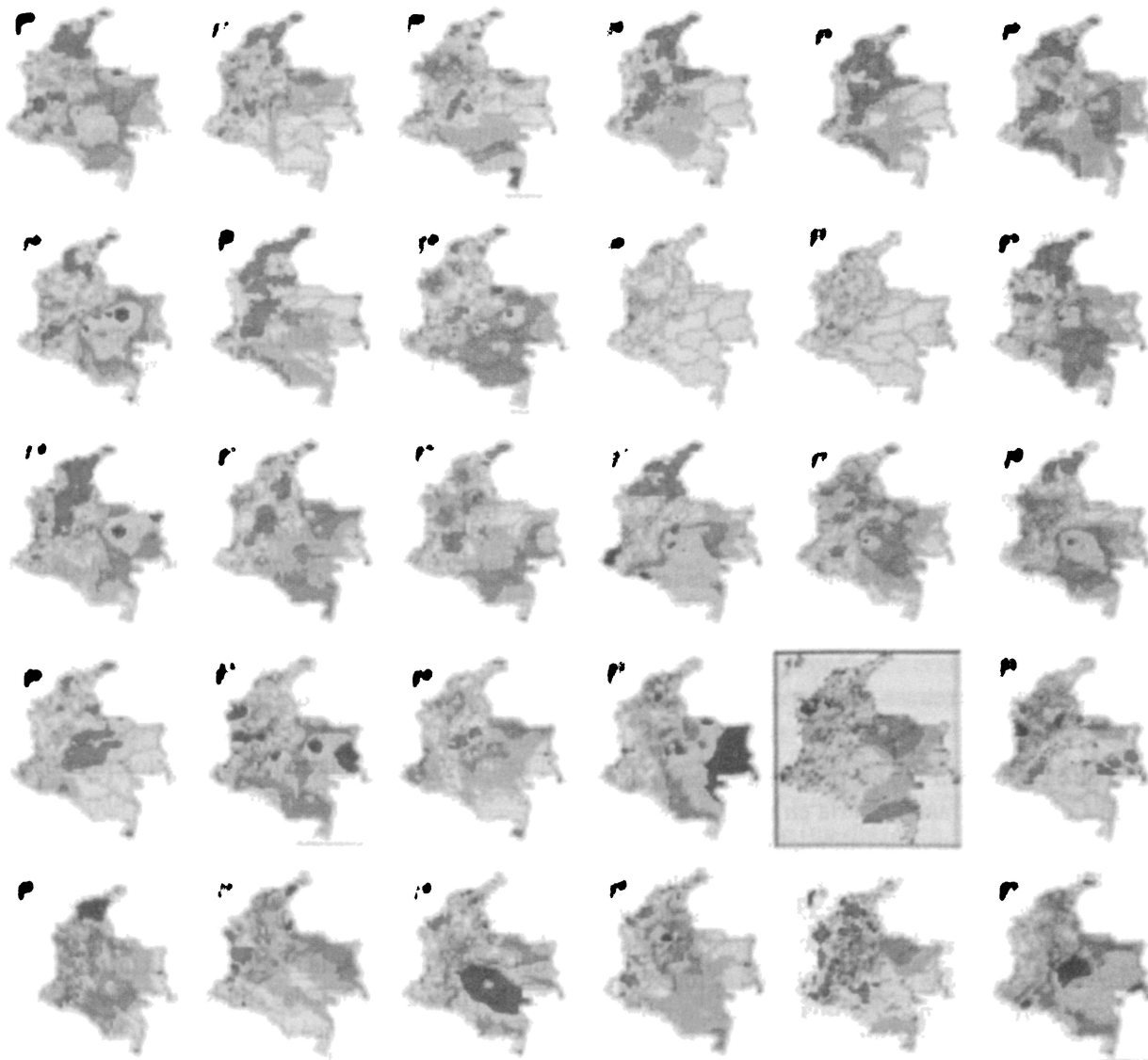
Iniciando la década del 2010, el IDEAM ya contaba con transmisión en tiempo real de información de niveles del agua para los sitios de Calamar, El Banco, Puerto Berrio y Puerto Salgar. Igualmente se había fortalecido el sistema cualitativo de alertas hidrológicas en el Servicio de Información Ambiental, el cual consistía en lo siguiente.

En la mañana de cada día, se daban a conocer la dinámica de las lluvias de los últimos días y también los pronósticos meteorológicos de variables como la precipitación, nubosidad, temperatura del aire a partir de la interpretación de los resultados de modelos foráneos; igualmente se entregaban los resultados del seguimiento de la dinámica de la humedad en el territorio nacional. En las Figuras 1 y 2 se muestra el ejemplo para el día 4 de junio de 2002.

Esta información junto con la obtenida sobre la dinámica de los niveles del agua en la madrugada y en los días anteriores, permitía elaborar ciertas proyecciones cualitativas sobre la tendencia de los niveles para los próximos días (ver Figuras 3a, 3b y 3c).

Es así como para el día 04 de Junio de 2002 se dieron los siguientes pronósticos: “En la zona andina habrá cielo parcialmente nublado y lluvias en Antioquia y sectores del Eje Cafetero en la mañana. En la tarde y horas de la noche, lluvias moderadas en los Santanderes, Antioquia, el Eje Cafetero, Boyacá y Valle; precipitaciones en general de menor intensidad en el altiplano Cundiboyacense y la región montañosa sur. Para el caribe, se espera cielo semicubierto y lluvias en gran parte de la región, especialmente en horas de la tarde, con mayor intensidad en Magdalena, Atlántico y norte de Cesar en la tarde y al sur de Bolívar, Córdoba y Cesar en la noche. De acuerdo con la información recibida de las estaciones automáticas y de radio, el siguiente es el estado de niveles para los principales ríos del país. Cuenca del río Magdalena- Parte Baja: De acuerdo con la información de la estación El Banco, la tendencia es a estabilizarse, los niveles se encuentran con valores por encima del promedio del mes de junio, alcanzando la cota crítica para la localidad de Belén, en la Ciénaga de Zapatosa, y Pinto en Magdalena y san Martín de Loba en Bolívar. La estación de Calamar presenta ascenso de niveles en valores altos”.

Mayo 1, 2002



Junio 3, 2002

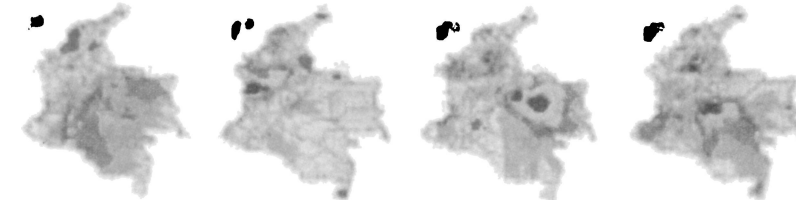


FIGURA 1. Variación espacio-temporal de las lluvias diarias antecesoras al pronóstico para el 4 de junio de 2002

Fuente: www.ideam.gov.co; Servicio de Información Ambiental, IDEAM, 2002

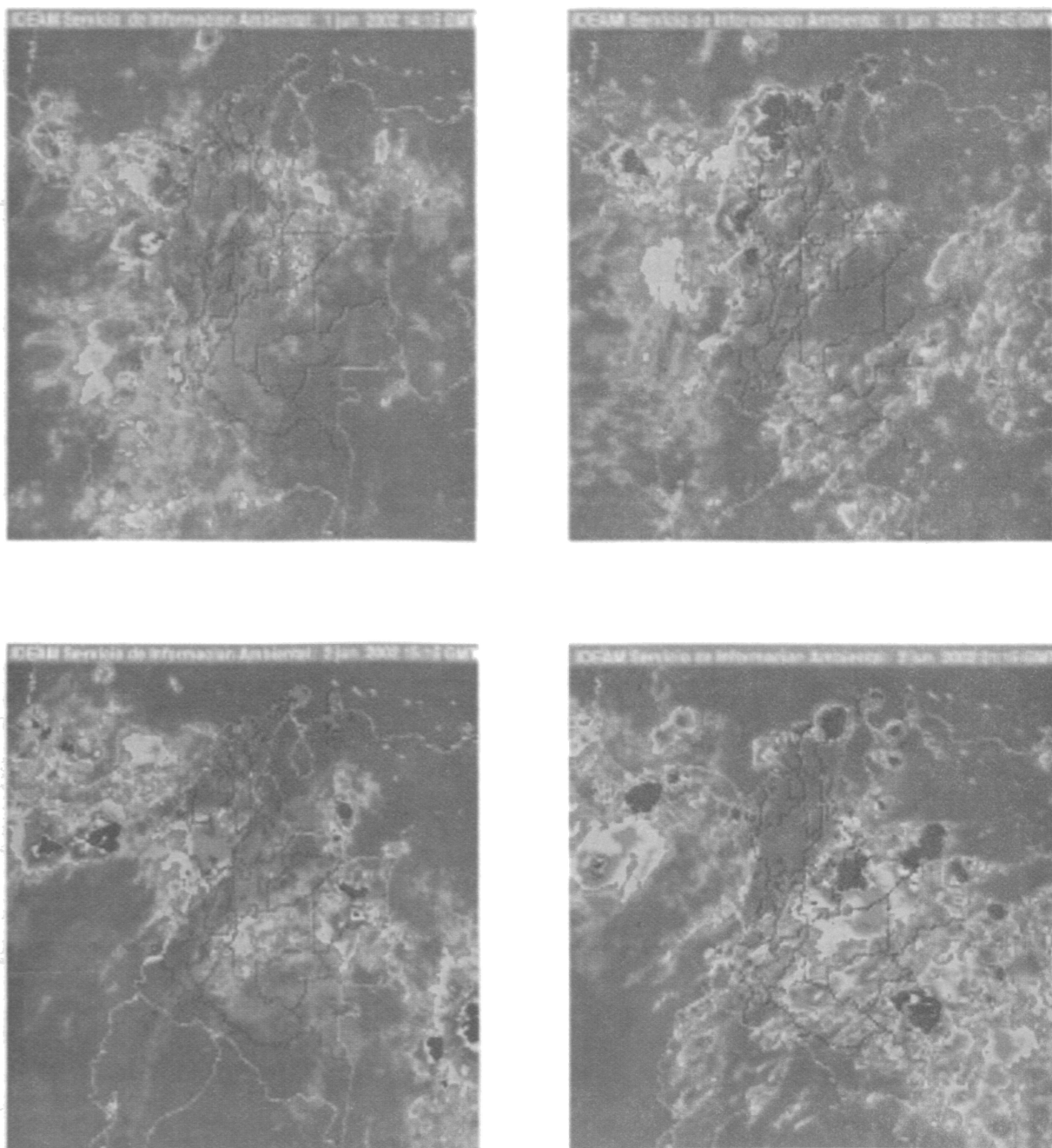


FIGURA 2. Imágenes de satélite de días anteriores al 4 de junio y analizadas para el pronóstico meteorológico

Fuente: www.ideam.gov.co Servicio de Información Ambiental, IDEAM, 2002

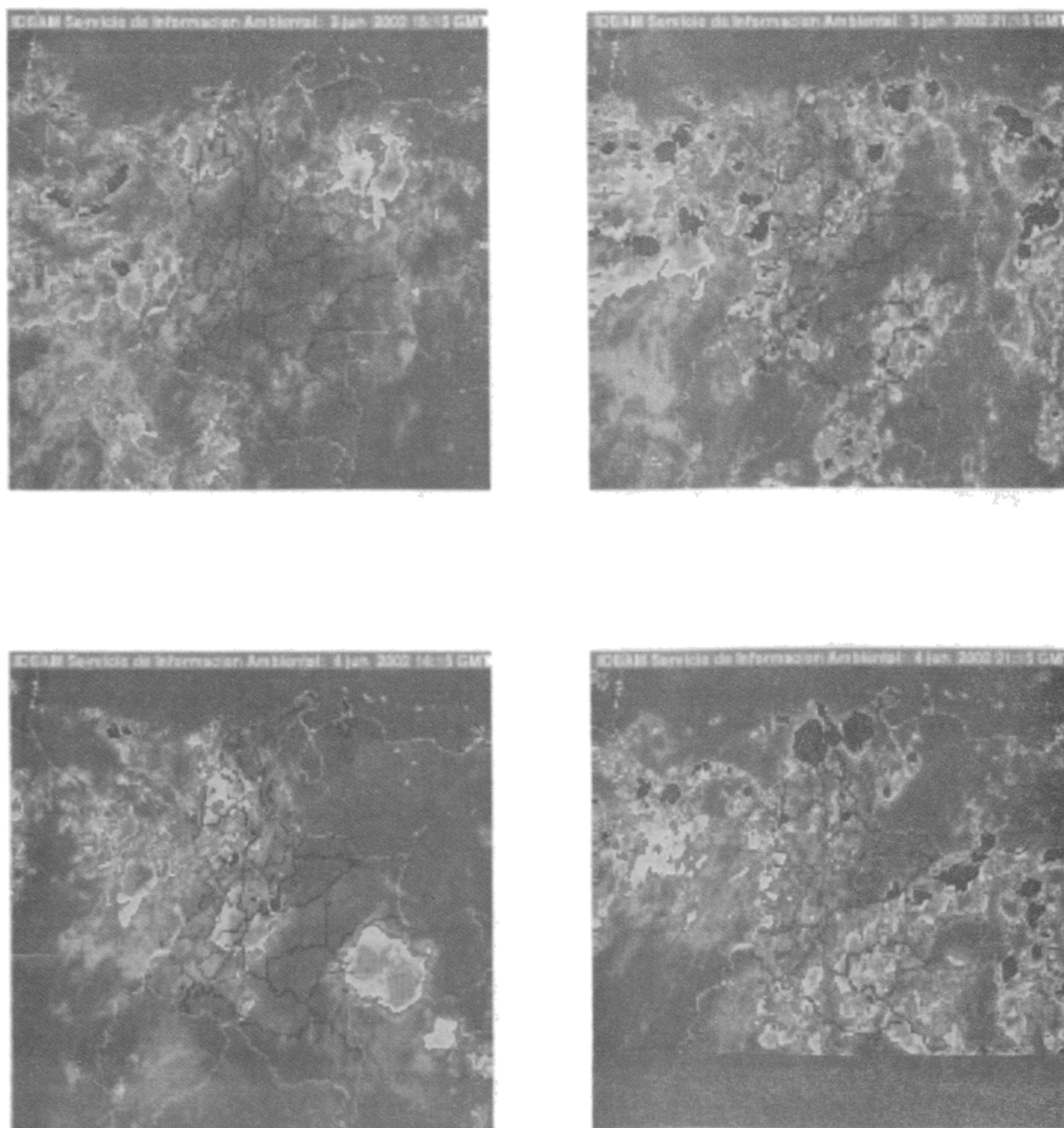


FIGURA 2 Continuación. Imágenes de satélite de días anteriores al 4 de junio y analizadas para el pronóstico meteorológico

Fuente: www.ideam.gov.co Servicio de Información Ambiental, IDEAM, 2002

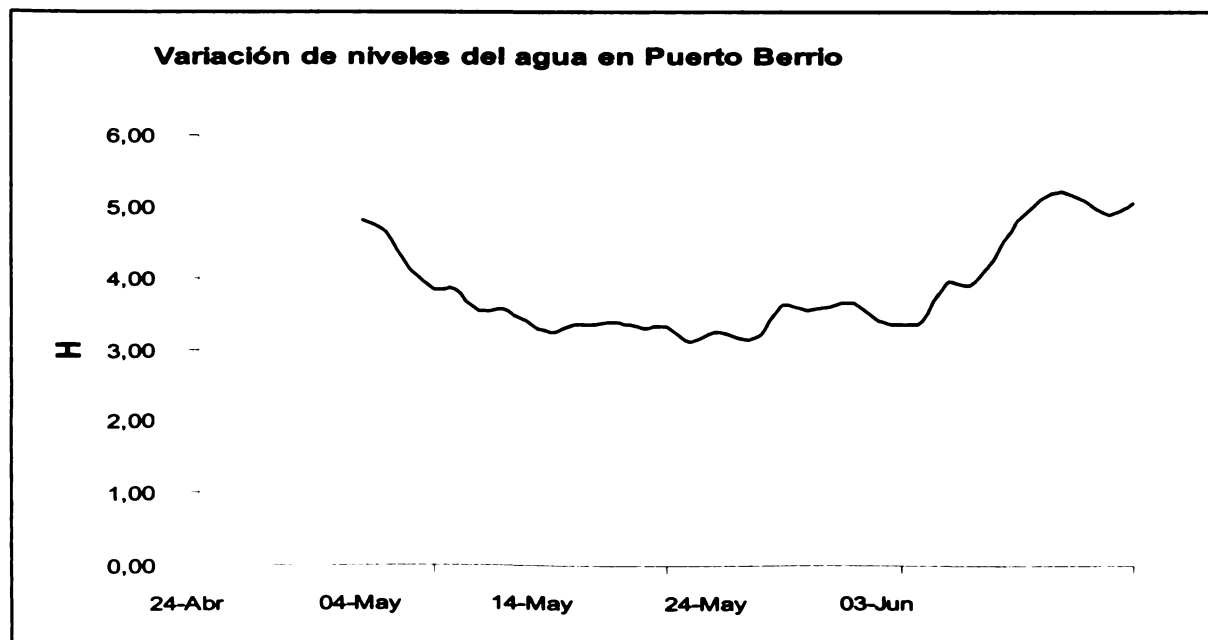


FIGURA 3a. Ilustración de la variación de los niveles del agua en los días anteriores al pronóstico. Estación Puerto Berrio.
Fuente: www.ideam.gov.co Subdirección de Hidrología, IDEAM, 2002.

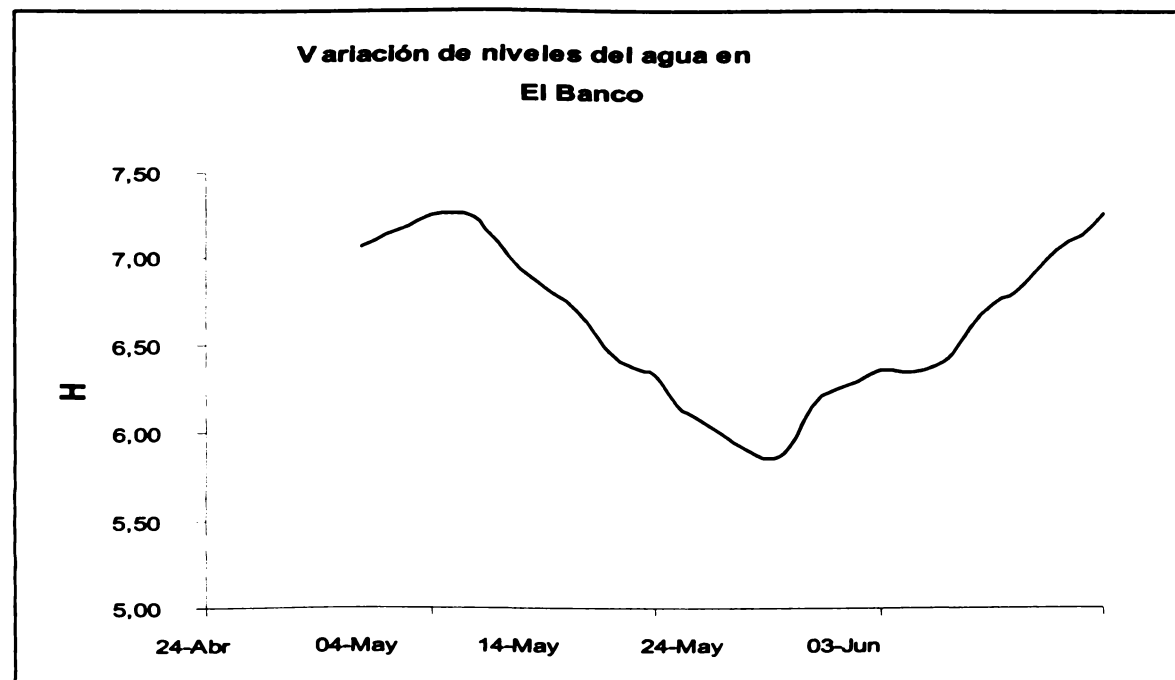


FIGURA 3b. Ilustración de la variación de los niveles del agua en los días anteriores al pronóstico. Estación El Banco.
Fuente: www.ideam.gov.co Subdirección de Hidrología, IDEAM, 2002

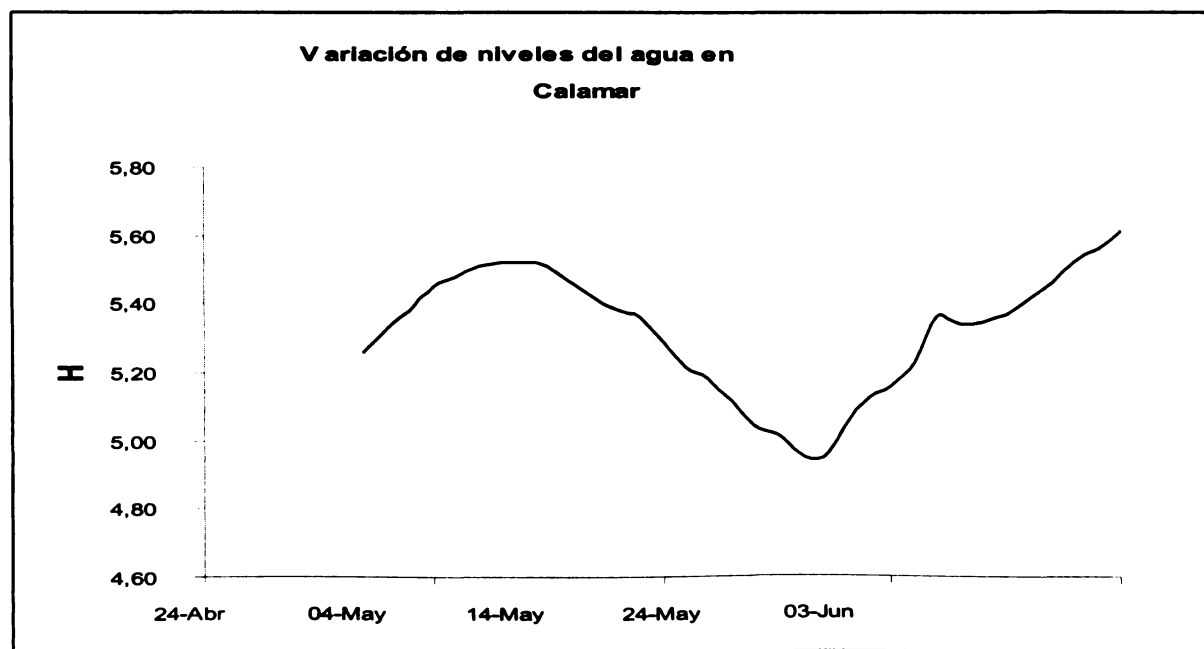


FIGURA 3c. Ilustración de la variación de los niveles del agua en los días anteriores al pronóstico. Estación Calamar.
Fuente: www.ideam.gov.co Subdirección de Hidrología, IDEAM, 2002

Estos pronósticos cualitativos fueron posibles gracias al seguimiento de la dinámica de la nubosidad, de las lluvias sobre el territorio nacional y de niveles presentados en días anteriores, así como también a la experiencia de los expertos en la interpretación de los resultados de los modelos aplicados.

Aunque ya existía experiencia grande en la emisión de este tipo de pronósticos, el operario de navegación que recibía esta información aún sentía la necesidad de que los pronósticos fuesen más precisos en el sentido de que se requería conocer con días de anterioridad el valor cuantitativo que los niveles alcanzarían en los sitios a lo largo del río Magdalena; ya que los pronósticos del IDEAM sólo ofrecían una tendencia y en términos cualitativos.

Para finales del 2002, toma auge pleno el proyecto del gobierno nacional "YUMA", que pretendía reactivar la navegación sobre el río Magdalena. Dado el renacimiento del interés en mejorar las condiciones de navegabilidad sobre el río, entidades diversas emprendieron una campaña fuerte para invertir recursos económicos en la iniciativa presidencial.

En este mismo año, surgen propuestas tecnológicas diversas para apoyar al proyecto YUMA; entre ellas,

una propuesta borrador que se laboró en el Ministerio de Transporte entre expertos de entidades diversas (CORMAGDALENA, AERONAUTICA, IDEAM, y otras) y la cual consideraba que el desarrollo fluvial del río Magdalena "es una estrategia de ordenamiento territorial del gobierno colombiano, para lograrlo se requiere estructurar un sistema multimodal de transporte seguro y a bajo costo. El proyecto de un Sistema de Navegación Fluvial Autónoma para el río Magdalena, contribuiría a esta estrategia porque aumentaría la certidumbre de la navegación por el río con sus respectivos beneficios para los agentes que participan en esta actividad". El sistema propuesto consideró inicialmente cuatro subsistemas: a) información de ruta, b) navegación, c) vigilancia, y d) comunicaciones.

De acuerdo a esta propuesta borrador, el subsistema de Información de Ruta, suministraría el mapa del canal navegable, la alerta sobre eventos que afectan la normal navegación por el río Magdalena tales como cerramiento de tramos, problemas de seguridad, problemas climatológicos, brindaría información en el sitio de la embarcación como ubicación, profundidad, nivel del río, coordenadas X, Y y Z y predicciones de nivel entregada por parte del IDEAM; el subsistema de Navegación, contemplaría la instalación de estaciones diferenciales a lo largo del río asociadas con sistemas de navegación de

abordo; el subsistema de Vigilancia, facilitaría la transmisión de posición a un centro de control en intervalos de tres horas; reportaría emergencias por algunas embarcaciones, transmitiría señales de alarma activadas automáticamente (en caso de accidente) o de manera voluntaria por parte de la tripulación, alertaría al centro de control y éste a su vez a los barcos comprometidos sobre acercamiento riesgoso de dos embarcaciones o de acercamiento riesgoso de una embarcación contra un obstáculo identificado en los sistemas GIS; el subsistema de Comunicaciones, envía información al centro de control para su respectivo procesamiento y análisis y a la vez suministra la visualización de abordaje para Información de ruta, presenta el canal navegable actualizado, informa sobre pronósticos y alertas hidrológicas.

Aunque el Sistema de Navegación Fluvial Autónomo propuesto para el río Magdalena despertó expectativas amplias entre los expertos, la limitación en los recursos económicos disponibles puso punto temporal en su aprobación y ejecución.

Hacia finales del 2002, CORMAGDALENA y el IDEAM firman el Convenio Interadministrativo No. 202 (numeración IDEAM) 00043 (numeración CORMAGDALENA) cuyo objetivo plantea “Desarrollar herramientas que permitan tomar decisiones concernientes a las actividades de navegación sobre el río Magdalena, con énfasis en el desarrollo, aplicación y calibración de un modelo de predicción diaria de los niveles del agua del río Magdalena para fines de navegación”.

El Convenio 202 de 2002 contempló el montaje, mantenimiento y operación de estaciones hidrológicas, así como también el desarrollo y aplicación de un modelo para pronosticar los niveles diarios del agua en el período de estiaje desde Puerto Salgar hasta Calamar. Para lograr el objetivo planteado las estaciones hidrológicas en Puerto Salgar, Puerto Berrio, El Banco y Calamar fueron mejoradas en su funcionamiento y se adaptó el sistema experto del IDEAM de alertas para los pronósticos de niveles en período de estiaje.

A continuación se presenta el marco teórico y práctico del modelo hidrológico desarrollado y aplicado para emitir los pronósticos requeridos en los sitios Puerto Berrio, El Banco y Calamar.

3. DESARROLLO TEÓRICO

Por el río Magdalena se transportan insumos para la producción nacional e importantes productos hacia mercados internacionales como azúcar, café, carbón, cemento, cereales, hidrocarburos, ganado en pie, madera, hierro y acero.

Las variaciones en la profundidad del río; los cambios en su nivel y el estado del canal frecuentemente afectan la navegación debido al cierre de algunos tramos y al encallamiento de embarcaciones que al final generan altos costos para los agentes económicos que participan en las diversas actividades como productores, comercializadores de bienes para el mercado nacional e internacional, empresas de transporte fluvial, compañías aseguradoras - el encallamiento de barcos, es uno de los motivos por los cuales se pagan altos seguros -. Estas circunstancias adversas, tienen un impacto negativo en variables macroeconómicas del Producto Interno Bruto PIB y la Balanza de Pagos.

En este sentido, la base fundamental para la toma de decisiones del operario en navegación es el denominado riesgo económico, el cual se podría expresar mediante (Dubrof A., 1999):

$$R_{EN} = f(p(H), P_{EN}) \quad (2)$$

en donde:

- R_{EN} riesgo económico en la navegación,
- H nivel promedio del agua de cada día para el período de estiaje,
- $p(H)$ amenaza del evento hidrológico expresada mediante la probabilidad del nivel del agua al día siguiente,
- P_{EN} pérdida económica en la navegación.

Hasta la fecha no se tienen estimaciones específicas de las pérdidas de la navegación sobre el río Magdalena ocasionadas por la ausencia o error de los pronósticos hidrológicos, convirtiéndose ésta en una tarea a desarrollarse en el futuro cercano. La probabilidad de un determinado nivel del agua para uno o varios días siguientes, se podría simular mediante la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov, la cual permite modelar la transición de la densidad de probabilidades de los niveles del agua en los sitios requeridos.

Esta ecuación, originalmente presentada por Rayleigh, estudiada y obtenida por Einstein, Fokker y Planck, se expresa mediante una ecuación diferencial en derivadas parciales y es aplicada ampliamente en otras áreas (Blanco L., 2003; Rivera H., 2001):

$$\frac{\partial p(H,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial H} [A(H,t)p(H,t)] + 0,5 \frac{\partial^2}{\partial H^2} [B(H,t)p(H,t)] \quad (3)$$

en donde:

$p(H, t)$ probabilidad del nivel diario,
 $A(H, t)$ parámetro de tendencia,
 $B(H, t)$ parámetro de difusión.

$$\begin{aligned} A &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} M[\Delta H | H(t)] \\ B &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} M[\Delta H^2 | H(t)] \\ \Delta H &= H(t + \Delta t) - H(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Para definir los parámetro de tendencia y difusión de la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov se debe conocer el modelo que simula la dinámica de la variable hidrológica en estudio (Kovalenko V., 1992). En este sentido, la ecuación de Kolmogorov permite establecer una relación directa entre la física del proceso en estudio y su interpretación probabilística, convirtiéndose en una herramienta que rompe con el paradigma de la disyuntiva entre la hidrología y la estadística tradicional.

En nuestro caso, la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov simula la evolución de la probabilidad de determinados niveles del agua en sitios diferentes para cada día futuro, permitiendo de esta manera conocer en tiempo real la amenaza futura del evento hidrológico para el operario de navegación. El modelo de Kolmogorov parte de la existencia del modelo que simula la dinámica de los niveles del agua para el horizonte temporal de un día y para los sitios de Calamar, El Banco y Puerto Berrio sobre el río Magdalena.

La definición del modelo que simula la dinámica de los niveles promedios diarios durante el período de estiaje para los sitios de Calamar, El Banco y Puerto Berrio tuvo en cuenta las siguientes circunstancias: a) el modelo debe pronosticar cuantitativamente el nivel del agua; b) el margen de error del nivel del agua pronosticado

diariamente no debe superar el 10%; c) el modelo debe ser aplicable con la información climática e hidrológica existente en tiempo real; d)) la captura de información por parte del modelo debe ser en tiempo real; e) el modelo debe funcionar automáticamente y en forma manual; f) aunque el modelo funcione en tiempo real debe contar con medidas de validación; g) el pronóstico a emitir debe ser difundido en menos de 1 hora a los navieros para la toma de decisiones respectivas.

En este sentido, se descartó el uso del modelo propuesto por la Comisión de Expertos de los Países Bajos por los siguientes motivos: a) los aforos en los sitios requeridos del río Magdalena no cuentan con la instrumentación ni la frecuencia requerida para establecer una relación nivel-caudal que permita pronosticar los niveles con márgenes de error menores al 10%; y b) en la actualidad se cuenta con información climática e hidrológica en tiempo real con mayor cobertura espacial. Aunque una transformación del modelo propuesto es posible, su restricción mayor radica en que pronostica los caudales y exige la relación nivel-caudal para obtener los niveles requeridos.

El análisis del modelo cualitativo aplicado tanto por el IDEAM hasta el 2002 como el aplicado por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad del Norte permitió establecer las siguientes restricciones en ambos casos: a) para el operario de la navegación es de mejor soporte en sus decisiones conocer el nivel del agua en forma cuantitativa que cualitativa; b) los pronósticos cualitativos que se emiten no permiten establecer márgenes de error medibles cuantitativamente. Por ello, resultó necesario desarrollar y aplicar un modelo que retomara las ventajas de los anteriores y eliminara las restricciones de éstos. En este sentido se adaptó y validó un sistema experto de pronósticos de los niveles del agua para cada día del período de estiaje en los sitios requeridos. A continuación se describe el modelo que soporta el sistema experto desarrollado (Rivera H., 2002).

Como primera aproximación, la dinámica de los niveles diarios promedios del agua para Calamar, El Banco y Puerto Berrio durante el período de estiaje se puede simular mediante el modelo dinámico:

$$\frac{dH}{dt} = f(\tau, k, \zeta, H) \quad (5)$$

en donde:

- τ parámetro que representa a la propiedad de inercia de cualquier sistema ante la influencia de algún factor externo,
- k parámetro que representa a las propiedades del sistema,
- ζ que representa a los factores externos que ejercen influencia sobre el sistema

Se propuso expresar la función (del lado derecho del modelo) de la siguiente manera:

$$f(\tau, k, \zeta, H) = \gamma h, \quad \gamma = f(k, \tau) \quad (6)$$

En donde los parámetros γ y h representarán a las propiedades internas del sistema y a la propiedad de inercia del sistema ante los factores externos. En este caso, una de estas propiedades se reflejan mediante un valor constante igual a la unidad ($\gamma = 1$), valor que se obtuvo luego del proceso de calibración.

El modelo que simula la dinámica de los niveles del agua toma entonces la siguiente expresión:

$$\frac{dH}{dt} = \gamma h \quad (7)$$

Los parámetros de tendencia y difusión de la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov para este modelo dinámico se definen como:

$$\begin{aligned} A &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} M[\Delta H | H(t)] = \gamma h \\ B &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} M[\Delta H^2 | H(t)] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Entonces la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov para simular la amenaza diaria de los niveles del agua toma la expresión:

$$\frac{\partial p(H, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial H} [A(H, t) p(H, t)] = -\gamma h \frac{\partial}{\partial H} p(H, t) \quad (9)$$

En el trabajo que se publica a continuación sólo se presenta la aplicación del modelo dinámico (7); en la actualidad se está investigando en los resultados previos que ha arrojado la aplicación de la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov (9) para el caso del modelo dinámico validado.

4. DESARROLLO PRACTICO

Para aplicar el modelo (7) a los sitios seleccionados, se procedió a solucionar la EDD que le representó. La solución de la EDD se dio mediante aproximación numérica:

$$\begin{aligned} H_{i+1} &= \Delta t \lambda h + H_i \\ \gamma &= 1, \quad \Delta t = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$h = \pm \left| \frac{H_{i+1} + H_i}{\phi} \right| \quad (11)$$

en donde,

- H_i nivel del agua en el sitio de interés, en unidades de metros; el índice "i" indica que se toma el nivel del agua del día en que se realiza el pronóstico;
- H_{i+1} nivel del agua en el sitio de interés, en unidades de metros; el índice "i+1" indica que se toma el nivel del agua del día anterior al día en que se realiza el pronóstico;
- ϕ nivel del agua en el sitio de interés, en unidades de metros; el índice "i+1" indica que es nivel del agua que se pronostica para el día siguiente;

Este sistema experto tiene en cuenta la experiencia de los funcionarios de turno, la dinámica de los factores externos (clima, aspectos meteorológicos y sinópticos), expresada por los expertos de las áreas de meteorología y climatología que asisten al Comité de Alertas Ambientales.

El sentido positivo o negativo de h depende de: a) la cantidad de aguas lluvias precipitadas sobre la cuenca del río Magdalena, b) la tendencia de las lluvias sobre la cuenca, que se obtiene de los pronósticos meteorológicos, c) la tendencia de la humedad sobre la cuenca, d) el relieve aguas arriba del sitio para el cual se pronostica el nivel del agua.

Este sistema experto permite predecir el nivel del agua en términos de promedios diarios durante el período de estiaje, así como también el nivel promedio mínimo y máximo que se presentará durante el día. Los valores del nivel promedio diario se estiman por la expresión:

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n}$$

en donde:

n cantidad total de valores del nivel del agua,
 H_j nivel del agua diario,
 H nivel del agua promedio, hallado mediante el promedio aritmético.

Veamos un ejemplo de la aplicación del sistema experto, para el pronóstico del nivel promedio diario para el día 04 de Junio de 2002 en la estación Calamar.

En este caso, el pronóstico se elabora el día 03 de Junio, a las 18:00 horas, cuando ya se conoce el valor del nivel del agua promedio diario; entendiendo por día, el intervalo temporal de 24 horas comprendido entre las 18:00 horas de la tarde del día 02 de Junio y las 18:00 horas de la tarde del día 03 de Junio.

Mediante el sistema experto se pronosticará el nivel promedio diario en el sitio Calamar, sobre el río Magdalena. Es decir, se predice el nivel promedio diario del agua para el intervalo temporal comprendido entre las 18:00 horas de la tarde del día 03 de Junio y las 18:00 horas de la tarde del día 04 de Junio.

1) Se estima el valor del nivel promedio diario para el lapso temporal desde las 18:00 horas de la tarde del día 02 de Junio y las 18:00 horas de la tarde del día 03 de Junio, aplicando el método mencionado:

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n} = 5.61$$

2) Se estima el valor del nivel promedio diario para el lapso temporal desde las 18:00 horas de la tarde del día 01 de Junio y las 18:00 horas de la tarde del día 02 de Junio, aplicando el método mencionado:

$$H_{i-1} = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n} = 5.56$$

3) Luego de varias pruebas y ensayos bajo el proceso de calibración, se llegó a la conclusión de plantear la relación de los niveles con la siguiente expresión:

$$h = \pm \left| \frac{H_{i-1} + H_i}{\phi} \right| = \pm \left| \frac{H_{i-1} + H_i}{1} \right|$$

Aquí se advierte que también resultó muy favorable durante el proceso de calibración, la relación:

$$h = \pm \left| \frac{H_{i-10} + H_{i-9} + \dots + H_i}{10} \right|$$

4) Se tienen en cuenta las condiciones climáticas y meteorológicas de la nación del día en que se realiza el pronóstico hidrológico. Para el día 03 de Junio de 2002 se tuvieron las siguientes condiciones, por citar algunas: “En la zona andina, se tenía cielo semicubierto y lluvias en Santander, Antioquia, centro y norte del Eje Cafetero, Altiplano Cundiboyacense y Valle. Lloviznas en la región montañosa sur. En el caribe, cielo parcialmente cubierto y lluvias moderadas en Magdalena, litoral de Bolívar, Atlántico, sur de la Guajira y de carácter aislado en sectores de Urabá, Córdoba, Bolívar, Sucre y Cesar.”

5) Se tienen en cuenta las condiciones climáticas y meteorológicas de la nación que se pronostican para el día siguiente. Para el día 04 de Junio de 2002 se dieron los siguientes pronósticos: “En la zona andina habrá cielo parcialmente nublado y lluvias en Antioquia y sectores del Eje Cafetero en la mañana. En la tarde y horas de la noche, lluvias moderadas en los Santanderes, Antioquia, el Eje Cafetero, Boyacá y Valle; precipitaciones en general de menor intensidad en el altiplano Cundiboyacense y la región montañosa sur. Para el caribe, se espera cielo semicubierto y lluvias en gran parte de la región, especialmente en horas de la tarde, con mayor intensidad en Magdalena, Atlántico y norte de Cesar en la tarde y al sur de Bolívar, Córdoba y Cesar en la noche”

6) Se tiene en cuenta el pronóstico cualitativo hidrológico: “De acuerdo con la información recibida de las estaciones automáticas y de radio, el siguiente es el estado de niveles para los principales ríos del país. Cuenca del río Magdalena- Parte Baja: De acuerdo con la información de la estación El Banco, la tendencia es a estabilizarse, los niveles se encuentran con valores por encima del promedio del mes de junio, alcanzando la cota crítica para la localidad de Belén, en la Ciénaga de Zapatosa, y Pinto en Magdalena y san Martín de Loba en Bolívar. La estación de Calamar presenta ascenso de niveles en valores altos”.

7) Dado que el experto de turno pronostica cualitativamente un ascenso de niveles, para el caso de los niveles en la estación Calamar, entonces el pronóstico del nivel promedio diario en este sitio se elabora con el

modelo dinámico de la siguiente expresión:

$$H_{i+1} = +\Delta t \gamma \left| \frac{H_{i-1} - H_i}{\varphi} \right| + H_i = 5.60$$

Como se puede apreciar (ver Tablas 1, 2 y 3), estos cálculos se pueden realizar de manera ágil y fácil en una tabla de Excel o con una calculadora sencilla, sin exigir para ello la existencia de programas especiales.

TABLA 1. Ejemplo de la realización del pronóstico de niveles diarios en Calamar

Fecha	Nivel del agua registrado	Tendencia del nivel, dada por el Experto	Nivel "pronostico" para el día siguiente
23-05-2002	5.13	+	*****
24-05-2002	5.16	+	5.22
25-05-2002	5.23	+	5.19
26-05-2002	5.37	+	5.30
27-05-2002	5.34	+	5.50
28-05-2002	5.35	+	5.37
29-05-2002	5.37	+	5.36
30-05-2002	5.41	+	5.39
31-05-2002	5.46	+	5.45
01-06-2002	5.52	+	5.51
02-06-2002	5.56	+	5.58
03-06-2002	5.61	+	5.60
04-06-2002	5.66	*****	*****

TABLA 2. Ejemplo de la realización del pronóstico de niveles diarios en El Banco

Fecha	Nivel del agua registrado	Tendencia del nivel, dada por el Experto	Nivel "pronostico" para el día siguiente
23-05-2002	6,31	+	*****
24-05-2002	6,37	+	6,36
25-05-2002	6,36	+	6,36
26-05-2002	6,37	+	6,43
27-05-2002	6,44	+	6,37
28-05-2002	6,62	+	6,38
29-05-2002	6,75	+	6,51
30-05-2002	6,82	+	6,79
31-05-2002	6,95	+	6,89
01-06-2002	7,07	+	6,89
02-06-2002	7,15	+	7,08
03-06-2002	7,27	+	7,19
04-06-2002	7,37	*****	*****

TABLA 3. Ejemplo de la realización del pronóstico de niveles diarios en Puerto Berrio

Fecha	Nivel del agua registrado	Tendencia del nivel, dada por el Experto	Nivel “pronostico” para el día siguiente
23-05-2002	3,42	+	****
24-05-2002	3,38	+	3,66
25-05-2002	3,42	+	3,42
26-05-2002	3,94	+	3,47
27-05-2002	3,90	+	4,46
28-05-2002	4,25	+	3,94
29-05-2002	4,80	=	3,94
30-05-2002	5,10	+	5,35
31-05-2002	5,22	+	5,40
01-06-2002	5,07	+	5,34
02-06-2002	4,90	+	5,22
03-06-2002	5,05	+	5,07
04-06-2002	4,70	****	****

En la primera columna de estas tablas se indica la fecha de la elaboración del pronóstico, en la segunda, se presenta el valor (en unidades de metros) del nivel del agua, registrado por la estación automática y recibido en Bogotá. En la comuna tercera, se indica la conclusión del “experto” de turno en el servicio de alertas con respecto a la dinámica futura del nivel del agua: si el funcionario de turno considera que los niveles se mantendrán estables, entonces se aplica un signo “=”, si considera un aumento, entonces se aplica un signo “+”, y si considera una disminución de niveles para el siguiente día, entonces un “-”; en la última columna se presenta el valor del nivel del agua que se pronostica para el día siguiente.

Existen diversos criterios para evaluar la calidad del funcionamiento de un modelo. Uno de ellos, consiste en establecer de manera preliminar algunos “intervalos de confianza” que debe cumplir la metodología de pronósticos:

- 1) los pronósticos que se den con un margen de error menor al 5% con respecto al valor del nivel registrado se consideran muy buenos;
- 2) los pronósticos que se den con un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado se consideran buenos;
- 3) los pronósticos que se den con un margen de error entre el 10% y el 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran satisfactorios;
- 4) los pronósticos que se den con un margen de error

superior al 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran no satisfactorios.

En nuestro caso, se considera un pronóstico acertado si se ubican en la categoría de muy buenos y buenos; es decir, es acertado el pronóstico siempre y cuando el margen de error no supere el 10%.

El funcionamiento del modelo se evaluó en dos etapas: a) desde el 12 de febrero de 2002 hasta el 10 de octubre de 2002 y b) desde el 02 de agosto de 2003 hasta el 01 de diciembre de 2003. Según este criterio, los pronósticos realizados para los sitios Calamar, El Banco y Puerto Berrio, en más del 90% de los casos pertenecen al rango de “muy buenos” y “buenos”. Se debe advertir, que en el 10% restante de los casos, los pronósticos para Puerto Berrio han llegado a presentar errores de más del 15%. En la Figura 4 se muestran tanto los niveles registrados como los pronósticos para la primera etapa de evaluación para El Banco.

El modelo desarrollado y validado para los tres sitios, a fecha de 2004 es aplicado diariamente en CORMAGDALENA en Barrancabermeja y se adelantan los primeros ensayos de soporte al sector naviero. Se espera que la plataforma informática generada se mejore, al igual que los márgenes de error de los pronósticos. Sólo en el 2004 se ha iniciado la fase de pronosticar la amenaza del nivel crítico para la navegación en Calamar, El Banco y Puerto Berrio a partir de la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov.

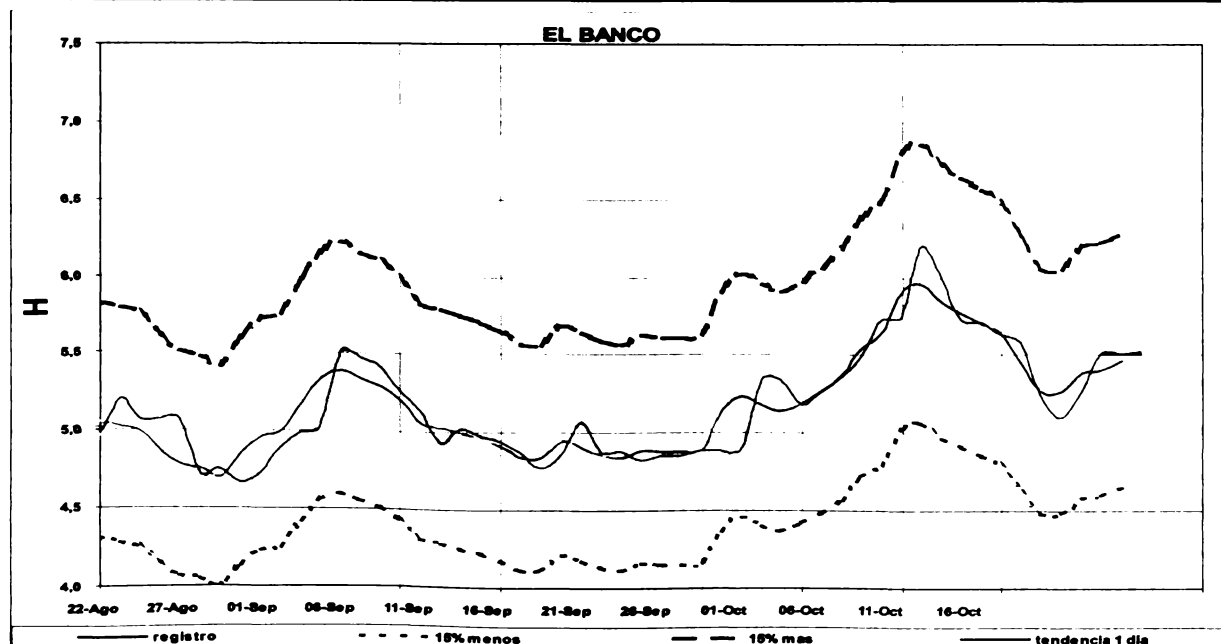


FIGURA 4. Resultados de los pronósticos de los niveles diarios que emite el sistema experto.

5. RECOMENDACIONES

Aunque en esta fase inicial del desarrollo del modelo dinámico determinista de pronósticos de niveles diarios para el periodo de estiaje se han logrado algunos resultados favorables, se deben tener en cuenta las siguientes orientaciones o recomendaciones para mejorar el apoyo al operario de navegación sobre el río Magdalena:

1) Dadas las circunstancias actuales en instrumentación y frecuencia temporal de los aforos (durante un año no suelen realizarse más de 3 aforos en sitios en donde las secciones transversales varían frecuentemente) es mejor pronosticar cuantitativamente los niveles diarios que los caudales diarios. Además, en realidad el operario de navegación sobre el río requiere es el nivel del agua y no su caudal.

2) Para los casos en que se requiera pronosticar los caudales diarios, resultaría interesante conocer la calidad en términos cuantitativos de los caudales que se obtienen a partir de la curva nivel-caudal, y a partir de ésta poder establecer la calidad de los pronósticos de caudales. Ello toma importancia para el sector naviero y otros, más cuando la realidad hidrológica que genera el modelo no compagina con la que debe enfrentar el usuario del

pronóstico. Desafortunadamente, los autores desconocen trabajos que en la actualidad se adelanten en esta dirección.

3) A lo largo del río Magdalena existen sitios con mayores problemas para la navegación que los que se experimentan en Calamar, El Banco y Puerto Berrio; en este sentido, será benéfico ampliar la aplicación del modelo desarrollado para sitios como La Gloria, San Pablo, Gamarra, El Contento, Badillo y otros.

4) La mejora de la calidad del modelo debe contemplar la introducción de variables aleatorias que reflejen la incertidumbre misma del proceso hidrológico durante el período de estiaje mediante el desarrollo y aplicación de Ecuaciones Diferenciales Estocásticas; con ello, además de aminorar los errores de los pronósticos de los niveles diarios también se podrá pronosticar la amenaza diaria a través de la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov, ya con el parámetro de difusión incluido (no nulo).

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a contratistas y funcionarios del IDEAM, Ministerio de Transporte, CORMAGDALENA y otras entidades que de una u otra manera han facilitado y agilizado el desarrollo del modelo de pronósticos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Blanco L., 2003. Análisis Estocástico (notas de clase). Imprenta Universidad Nacional, Bogotá.
- Dubrof A., 1999. Modelación de situaciones en riesgo. Ed.: Finanzas y Estadísticas, Moscú, En ruso.
- Kovalenko V., 1992. Modelación de los procesos hidrológicos. Ed.: Gidrometeorizdat, San Petersburgo, En ruso.
- Ministerio de Obras Públicas, Planeación Nacional, 1974. Informe de la Comisión de Expertos de Holanda del proyecto de navegación sobre el río Magdalena. Bogotá.
- Rivera H., 2001. Lineamientos ingenieriles para la administración pública del agua con énfasis en la predicción de la oferta mensual hídrica bajo escenario no estacionario. Biblioteca Virtual del PHI-UNESCO, disponible en <http://www.unesco.org.uy/phi/bibli.htm>, Uruguay.
- Rivera H., 2002. Informe Técnico del Contrato 0011 de 2002 “Estrategias en materia de alertas hidrológicas para el mejoramiento de la efectividad del Servicio de Información Ambiental del IDEAM”. Bogotá.