

EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO ANTE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Yulia Ivanova & Jorge Corredor

Grupo de Investigación: Visión Colombia Hídrica

Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá

ivanova_yulia_alexandrovna@yahoo.com, jcorred@umng.edu.co

Recibido para evaluación: 30 de Marzo de 2006 / Aceptación: 30 de Junio de 2006 / Versión final: 07 de Julio de 2006

RESUMEN

El calentamiento global producirá cambios en el patrón de precipitaciones de todo el planeta. Esto alterará el comportamiento de los caudales de los ríos. Al cambiar el régimen de caudales se produce no sólo un cambio en los valores medios sino también en los valores extremos. Los valores extremos representan los caudales mínimos de sequía hidrológica y los caudales máximos de las grandes avenidas. Estos últimos son importantes en el diseño estructural de los puentes que habilitan la intersección de las vías terrestres con las corrientes superficiales. Estos puentes comúnmente son diseñados para condiciones de régimen hidrológico estacionario, lo que permite suponer que las probabilidades de los caudales máximos son constantes en el tiempo. Con el desarrollo del cambio climático la suposición de estacionariedad del régimen hidrológico no se cumple, en consecuencia los caudales máximos que se utilizan como valores críticos para el diseño de los puentes podrían estar subvalorados para aquellas regiones en las que se esperen aumentos de las precipitaciones. Por lo anterior es necesario evaluar la sensibilidad de los caudales máximos ante el cambio climático con el fin de entender la vulnerabilidad de los puentes construidos bajo el supuesto de régimen hidrológico estacionario. El presente artículo propone un enfoque para evaluar la sensibilidad de los caudales máximos de diseño al cambio climático. La metodología es analizada en tres casos de estudio, para los cuales la disponibilidad de información hidrometeorológica varió entre aceptable, regular y nula. Se presentan conclusiones sobre la necesidad de incluir el cambio climático como factor de diseño en las obras hidrotécnicas de gran capitalidad.

PALABRAS CLAVES: Caudal Máximo, Ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov, Cambio Climático, Modelos Matemáticos, Sensibilidad.

ABSTRACT

Global warming will lead to changes in rainfall patterns over the planet. As a consequence, it will modify streamflow behaviour too. The change of runoff regime implies not only changes in mean values, but also changes in extreme values. These extreme values represent drought runoff and high peak runoff from floods. Floods are an important factor for structural design of bridges for roads/river intersections. Usually, bridges are designed for stationary hydrologic conditions, implying that the probabilities of maximum flows are constant in time. Due to the climate change process, maximum flow values that are used as critical values for structural bridge design could be underestimated for regions where an increase of precipitation is expected. Therefore, a climate change sensitivity analysis of maximum flows is necessary. This sensitivity analysis will allow an assessment of the vulnerability of hydro-structures designed under assumption of stationary hydrological conditions. This paper presents an approach for sensitivity assessment of maximum flows under climate change conditions. This methodology is applied to three bridges with different levels of hydrometeorological information availability. For the chosen case studies information availability varies from good to poor. Finally, conclusions about the pertinence of using climate change as a key factor for design of major hydrotechnical structures are made.

KEY WORDS: Peak Flows, Fokker–Planck–Kolmogorov Equation, Climate Change, Mathematical Models, Sensitivity.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Usualmente para el diseño hidrológico se estudian los caudales máximos presentados durante cada año en las épocas de crecidas. Este análisis se utiliza para caracterizar el conjunto estadístico de los caudales máximos en términos de probabilidades de excedencia. En general las estructuras hidráulicas deben ser diseñadas para poder evacuar caudales con probabilidad de excedencia muy pequeña. Para encontrar este caudal de diseño a la serie de caudales máximos se le ajusta una función de distribución de probabilidades teórica, la cual permite obtener los caudales máximos con probabilidades de excedencia que aún no han sido registrados en los datos históricos. Cuando el régimen hidrológico es estacionario, el análisis estadístico descriptivo es suficiente para hallar los caudales máximos con las probabilidades requeridas y la suposición de que para los años siguientes estas probabilidades permanecerán invariables es válida. En la actualidad las cuencas hidrológicas se encuentran bajo fuerte presión humana y de acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático éste es un fenómeno ya en desarrollo (IPCC, 2002), por esto las probabilidades de los caudales máximos para el diseño hidrológico de los puentes no se pueden considerar constantes para los próximos años. La metodología que se presenta a continuación permite evaluar la evolución de las funciones de distribución probabilística que describen los caudales máximos de los ríos en estudio, con el propósito de analizar como cambian los caudales máximos con probabilidad de excedencia baja, es decir de aquellos que usualmente son utilizados como caudales de diseño durante la construcción de los puentes y otras estructuras hidráulicas.

Teniendo en cuenta que actualmente no existe una opinión unívoca sobre el cambio climático, (e.g., algunos escenarios señalan un posible enfriamiento (Khaustov, 1999; Berger, 1988) lo realmente valioso no es obtener resultados sobre el perjuicio o conveniencia de cada escenario, sino contar con una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de los puentes, y con ello si se detecta un escenario convincente de cambio climático la metodología permitiría de manera rápida evaluar su influencia. El presente trabajo adapta para caudales máximos la metodología desarrollada por V.V. Kovalenko (1993) para el análisis de sensibilidad de los caudales medios ante el cambio climático.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1. Modelo matemático para la simulación de la evolución de las curvas de densidad probabilística de los caudales máximos: Ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov

De acuerdo con V.V. Kovalenko (1993), este modelo se basa en las relaciones de balance de masa en un volumen de control (véase Ecuación 1).

$$\dot{X} - \dot{E} - \dot{I} = kX \quad (1)$$

Donde \dot{X} , \dot{E} , \dot{I} y k representan la intensidad de precipitaciones, evaporación, infiltración y el coeficiente de escorrentía. Teniendo en cuenta las características iniciales τ de cada cuenca, la Ecuación 1 se transforma en la ecuación diferencial (Ecuación 2):

$$\frac{dQ_{\max}}{dt} = -\frac{Q_{\max}}{k\tau} + \frac{\dot{X}}{\tau} \quad (2)$$

Donde Q_{\max} , es el caudal líquido, en este caso máximo.

Introduciendo la siguiente convención: $-\frac{Q}{k\tau} = C$, $\frac{\dot{X}}{\tau} = N$ donde “ C ” representa los parámetros internos de la cuenca y “ N ” la influencia externa, en forma de precipitaciones, sobre ésta. Considerando que “ C ” y “ N ” contienen componentes aleatorios y estos se pueden representar como: $C = \bar{C} + \tilde{C}$, $N = \bar{N} + \tilde{N}$, donde \tilde{C} y \tilde{N} representan ruidos blancos con intensidades $G_{\tilde{C}}$ y $G_{\tilde{N}}$. Aplicando procedimientos estándares se puede generalizar la Ecuación 2 para llevarla a la forma de la ecuación de Fokker-Planck-Kolmogorov (véase Ecuación 3) la cual describe la evolución, en el tiempo, de la densidad probabilística de los caudales máximos $p(Q_{\max}, t)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(Q_{\max}, t)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial Q} [A(Q_{\max}, t) p(Q_{\max}, t)] \\ & + 0.5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2} [B(Q_{\max}, t) p(Q_{\max}, t)] \end{aligned} \quad (3)$$

En esta ecuación, los coeficientes de traslación $A(Q_{\max}, t)$ y difusión $B(Q_{\max}, t)$ se definen a través de las siguientes expresiones:

$$AQ_{\max}, t = -(\bar{C} - 0.5G\tilde{C})Q_{\max} - 0.5G\tilde{C}\tilde{N} + \bar{N} \quad (4)$$

$$B(Q_{\max}, t) = G\tilde{C}Q_{\max}^2 - 2G\tilde{C}\tilde{N}Q_{\max} + G_{\tilde{N}} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que los escenarios climáticos suponen un cambio del régimen de precipitaciones desde un estado estacionario a otro nivel, también estacionario, es posible igualar a cero la derivada parcial temporal de la Ecuación 3, $\left(\frac{\partial p(Q_{\max}, t)}{\partial t}\right) = 0$; de modo que la Ecuación 3 se transforma en una ecuación de Pearson:

$$\frac{dp}{dQ_{\max}} = \frac{Q_{\max} - a}{b_0 + b_1Q_{\max} + b_2Q_{\max}^2} p \quad (6)$$

La solución de la Ecuación 6 representa la familia de curvas de Pearson, de las cuales el tercer tipo se ha utilizado ampliamente para modelar las distribuciones asimétricas de las variables hidrológicas (SNIP 2.01.14-83; Rozhdienskiy, 1974). Al deducir la Ecuación 6 con base en el modelo de Fokker-Planck-Kolmogorov se adhiere un sentido físico a los parámetros a , b_0 , b_1 y b_2 relacionándolos con la esperanza matemática de la influencia climática externa, \bar{N} , la intensidad de su ruido, $G\tilde{N}$, las características de la cuenca, \bar{C} , sus ruidos $G\tilde{C}$ y las intensidades cruzadas entre ruidos externos e internos, $G\tilde{C}\tilde{N}$:

$$a = \frac{G\tilde{C}\tilde{N} + 2\bar{N}}{2\bar{C} + G\tilde{C}} \quad (7)$$

$$b_0 = -\frac{G_{\tilde{N}}}{2\bar{C} + G\tilde{C}} \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{G\tilde{C}\tilde{N}}{2\bar{C} + G\tilde{C}} \quad (9)$$

$$b_2 = -\frac{G\tilde{C}}{2\bar{C} + G\tilde{C}} \quad (10)$$

Para efectos prácticos se opera con un número finito de momentos estadísticos (una gran cantidad de los cuales

no tiene sentido calcularlos por la corta longitud de las series históricas), por ello la Ecuación 6 se aproxima con un sistema de ecuaciones algebráicas con 4 incógnitas para los primeros momentos estadísticos

$$\alpha_n (n = 0, 1, 2, 3):$$

$$\begin{aligned} \alpha_{n-1}nb_0 + \alpha_n[(n+1)b_1 - a] \\ + \alpha_{n+1}[(n+2)b_2 + 1] = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

El procedimiento (véase Ecuación 11) para la evaluación de las consecuencias hidrológicas del cambio climático sobre el conjunto estadístico de los caudales máximos se desarrolla en dos partes:

- Partiendo de una solución conocida de la Ecuación 11, es decir con base en los momentos estadísticos α_n de la distribución probabilística del régimen actual de caudales máximos, se establecen los valores para a , b_0 , b_1 y b_2 (a este paso se le denomina problema inverso).
- Se resuelve el problema directo cambiando los parámetros de las Ecuaciones 7 a 11 por aquellos que correspondan al nuevo escenario climático. De este modo resolviendo el sistema de la Ecuación 11 se pueden encontrar los valores de pronóstico de los momentos estadísticos α_n .

Para la realización de estos pasos es necesario suponer que las intensidades de los ruidos $G\tilde{C}$, $G_{\tilde{N}}$, $G\tilde{C}\tilde{N}$ en el nuevo clima se conservarán iguales a las existentes en el clima actual. La validez de esta suposición fue analizada con pronósticos prospectivos y retrospectivos, en un centenar de estaciones hidrológicas rusas, camerunesas y colombianas (Domínguez, 2004; Kovalenko, 1993) en las cuales se detectaron heterogeneidades ocasionadas por la variabilidad de los ciclos seculares en el régimen hidrológico. En series hidrológicas de suficiente longitud y que registraban períodos seculares de alta y baja humedad, se evaluaron las funciones de distribución para cada nivel de humedad haciendo pronósticos cruzados de la función de distribución desde el período secular de baja humedad hacia el de alta humedad y viceversa. Las funciones de distribución probabilística pronosticadas se compararon con las curvas empíricas construidas con los datos reales de la serie correspondiente a cada fase de humedad aplicando el criterio de concordancia de Kolmogorov, Pearson y Smirnov:

$$D = \max |P_{emp} - P_{teor}|; \quad \lambda = D\sqrt{n} \quad (12)$$

$$n\omega^2 = \sum_{i=1}^n [P_{emp} - P_{teor}] \quad (13)$$

Los resultados demuestran que la hipótesis sobre la pseudoestacionaridad (la posibilidad de congelar la intensidad de los ruidos) con un nivel de confianza del 5% se justifica en el 70% de los casos y, que si se introducen los valores reales del coeficiente de escorrentía (o se aproximan de mejor manera) la cantidad de pronósticos acertados aumenta al 90%.

Aún con la variante planteada del modelo, que contiene simplificaciones para trabajar sólo con los primeros momentos estadísticos de las funciones de distribución para un proceso aleatorio estacionario de formación de la escorrentía, es necesario realizar un gran número de cálculos; por ello el ejercicio sobre la estabilidad del régimen hídrico ante los posibles cambios climáticos se puede resolver cualitativamente, aproximando la ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov con un sistema de ecuaciones dinámico para los momentos estadísticos:

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = nM[AQ^{n-1}] + 0.5n(n-1)M[BQ^{n-2}] \quad (14)$$

Donde M representa el símbolo de la esperanza matemática. Si $n=1$ entonces obtenemos la ecuación para la esperanza matemática del primer momento desde el origen:

$$\frac{dM[Q_{max}]}{dt} = [-\bar{C} + 0.5G_{\bar{C}}]M[Q_{max}] - 0.5G_{\bar{C}^2} + \bar{N} \quad (15)$$

Bajo la influencia de ruidos fuertes, $G_{\bar{C}} > 2\bar{C}$, tenemos

que $\frac{dM[Q_{max}]}{dt} > 0$, apareciendo inestabilidad en la esperanza matemática. En general a través de la Ecuación 14 se demuestra que la estabilidad de los momentos estadísticos de orden “ n ” se puede definir con la desigualdad:

$$\bar{C} > 0.5nG_{\bar{C}} \quad (16)$$

Esta desigualdad demuestra la disminución de la estabilidad con el aumento del orden del momento estadístico; por ejemplo, si el sistema es estable en su

varianza, también lo será en su promedio, pero a la inversa esto no es válido.

Teniendo a disposición el aparato matemático descrito anteriormente, la evaluación de la sensibilidad de los caudales máximos se puede establecer conociendo la diferencia porcentual entre los estadísticos de los caudales máximos bajo el clima actual y aquellos que tendrían lugar en un escenario de cambio climático. Comúnmente para el diseño de obras hidrotécnicas, en especial de puentes, la probabilidad de los caudales máximos de diseño se establece según la capitalidad de la obra (Haan, 2002; SNIP 2.01.14-83; Rozhidentsvietsky, 1974). Por esto una manera sencilla de evaluar esta sensibilidad es comparando, por ejemplo, el caudal máximo de probabilidad de excedencia del 5, 1, 0.1 ó 0.01% del clima actual con su homólogo del clima futuro.

La presente metodología tiene tres elementos generales que deben ser aplicados en cualquier caso de estudio. Estos son:

- Analisis de los caudales máximos para el clima actual;
- Selección de predictores del caudal máximo anual;
- Aplicación de la ecuación Fokker–Planck–Kolmogorov para evaluar la sensibilidad de los caudales máximos al cambio climático.

Dependiendo del nivel de información disponible la realización de estos pasos puede tener divergencias, pero estos elementos deben ser considerados obligatoriamente. Los detalles algorítmicos de cada uno de los elementos enunciados son presentados en detalle por Ivanova (2006).

2.2. Aplicación de la ecuación de Fokker – Planck–Kolmogorov para la evaluación de cambios a largo plazo en el régimen hidrológico

El esquema general para la evaluación de las consecuencias hidrológicas originadas por cambios del clima se consolida de la siguiente forma: La solución de la Ecuación 6 representa la Curva de Densidad de Probabilidades para los Caudales, $P(Q)$ la cual en hidrología, debido a la corta longitud de las series hidrológicas, se expresa mediante la utilización de los primeros momentos estadísticos (véase Ecuación 11). Regularmente estos estadísticos se representan en mapas de isovalores, que constituyen la solución para el sistema de la Ecuación 11 y reflejan la situación en las cuencas

hidrológicas, cuando en ellas se han estabilizado los parámetros a , b_o , b_l y b_2 . Conociendo las magnitudes de los momentos α_n , se puede resolver la Ecuación 11 con relación a los coeficientes a , b_o , b_l y b_2 que corresponden al clima que conformó las características del régimen hidrológico actual. Después, de acuerdo con la información de los escenarios futuros, se reevalúan, a través de las Ecuaciones 7 a 10, los parámetros a , b_o , b_l y b_2 , (todos o algunos de ellos), y al aplicarlos en la Ecuación 11 resolviendo con respecto a los momentos α_n , se calculan las características hidrológicas para los escenarios hidrológicos futuros. Con esta información se construyen los mapas en isovalores de los tres momentos estadísticos que caracterizan la el régimen hidrológico del escenario climático correspondiente.

Al tomar en consideración sólo tres momentos estadísticos, el sistema presentado en la Ecuación 6 toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} b_l + 0b_0 + a &= -\alpha_1, \\ 2\alpha_1 b_l + b_0 - \alpha_1 a &= -\alpha_2, \\ 3\alpha_1 b_l + 2\alpha_1 b_0 - \alpha_2 a &= -\alpha_3 \end{aligned} \quad (17)$$

Al resolver la Ecuación 16 respecto a las incógnitas a , b_o , b_l se obtienen las siguientes expresiones:

$$a = \frac{0.5(-\alpha_3 - 4\alpha_1^3 + 5\alpha_1\alpha_2)}{\left(\alpha_2 - \alpha_1^2\right)} \quad (18)$$

$$b_0 = \frac{0.5\left(-2\alpha_2^2 + \alpha_2\alpha_1^2 + \alpha_2 - \alpha_3\right)}{\left(\alpha_2 - \alpha_1^2\right)} \quad (19)$$

$$b_l = \frac{0.5(3\alpha_1\alpha_2 - 2\alpha_1^3 - \alpha_3)}{\left(\alpha_2 - \alpha_1^2\right)} \quad (20)$$

De acuerdo con las Ecuaciones de la 7 a 10 los parámetros del modelo se pueden determinar de la siguiente forma:

$$\bar{C} = \frac{\bar{N}}{(a - 0.5b_l)} \quad (21)$$

$$G_{\tilde{C}\tilde{N}} = \frac{\bar{N}b_l}{(a - 0.5b_l)} \quad (22)$$

$$G_{\tilde{N}} = \frac{2\bar{N}b_0}{(a - 0.5b_l)} \quad (23)$$

Donde \bar{N} , es la norma de precipitaciones, correspondiente al régimen climático actual.

La siguiente etapa consiste en la determinación de los parámetros futuros del modelo. En lugar de \bar{N} utilizamos

\bar{N}_{pr} que corresponde a la norma de precipitaciones de los posibles escenarios climáticos. Para las magnitudes de \bar{C} existen dos variantes: asumir $\bar{C}_{pr} = \bar{C}$, o (\bar{C} es muy cercano al inverso del valor del coeficiente de escorrentía, el cual puede variar en función del promedio de precipitaciones \bar{N} , de la temperatura del aire y de las actividades agroindustriales (f_l) tomarlo como:

$\bar{C}_{pr} = \bar{C} + f(\bar{N}, T, f_l)$. En lo correspondiente a los parámetros $G_{\tilde{N}}$ y $G_{\tilde{C}\tilde{N}}$ es necesario asumir, que $G_{\tilde{N}PR} = G_{\tilde{N}}$ y $G_{\tilde{C}\tilde{N}PR} = G_{\tilde{C}\tilde{N}}$, dado que la hidrometeorología moderna no cuenta con información confiable para la determinación de sus valores en los escenarios futuros. Sin embargo para $G_{\tilde{N}}$ existen desarrollos metodológicos que permiten su pronóstico (Pivavarova, 2002). A continuación se determinan:

$$a_{pr} = \frac{(G_{\tilde{N}} + 2\bar{N}_{pr})}{2\bar{C}_{pr}}, \quad (24)$$

$$b_{0pr} = \frac{-G_{\tilde{N}}}{2\bar{C}_{pr}}, \quad (25)$$

$$b_{lpr} = \frac{2G_{\tilde{C}\tilde{N}}}{2\bar{C}_{pr}} \quad (26)$$

Y resolviendo el sistema de ecuaciones pronosticadoras (véase Ecuación 17), encontramos:

$$\alpha_{1pr} = q_{pr} = a_{pr} - b_{lpr} \quad (27)$$

$$\alpha_{2pr} = \alpha_{1pr}a_{pr} - b_{0pr} - 2\alpha_{1pr}b_{lpr} \quad (28)$$

$$\alpha_{3pr} = \alpha_{2pr}a_{pr} - 2\alpha_{1pr}b_{0pr} - 3\alpha_{2pr}b_{1pr} \quad (29)$$

$$C_{vpr} = \sqrt{\frac{\alpha_{2pr} - q_{pr}^2}{q_{pr}^2}} \quad (30)$$

$$C_{spr} = \frac{(\alpha_{3pr} - 3\alpha_{2pr}\alpha_{1pr} + 2\alpha_{1pr}^3)}{(C_{vpr}^3 q_{pr}^3)} \quad (31)$$

$$\beta_{pr} = \frac{C_{spr}}{C_{vpr}} \quad (32)$$

Con los valores pronosticados para q , C_v y b se construyen los mapas hidrológicos correspondientes a los escenarios futuros y los correspondientes a sus anomalías, es decir a las diferencias entre el régimen hidrológico actual y los escenarios futuros. Aplicando el método de Montecarlo se reconstruyen las curvas de densidad probabilística para el régimen hidrológico del futuro. De estas se obtienen los percentiles necesarios para evaluar la sensibilidad de los caudales máximos de diseño ante la influencia del cambio climático.

2.3. Casos de estudio

Como casos de estudio se seleccionaron los siguientes 4 puentes:

Dos puentes ubicados sobre el río Magdalena: el puente Pumarejo y el puente Mariano Ospina Pérez (Girardot);

Un puente sobre el río Pamplonita: el puente Jorge Durán;

Un puente sobre el río Patá.

Para los puentes Pumarejo y Mariano Ospina Pérez existen 30 años de registros hidrometeorológicos. Para el puente Pumarejo la estación limnimétrica más cercana es Calamar (Código 2903702) con un área aferente de 257.438 km². En el tramo Calamar - Puente Pumarejo no hay afluentes grandes del río Magdalena. Por eso, el análisis de caudales se realizó con los caudales de la estación Calamar. Estos caudales se pueden ajustar añadiendo una corrección proporcional al área aferente entre Calamar y la sección del Puente Pumarejo y con los caudales de los afluentes que se encuentren en este

tramo, si se tiene la información de éstos. En la estación limnimétrica Calamar existen mediciones de caudales promedios diarios, máximos diarios, etc. Como precipitaciones predictoras (o explicativas) de los caudales máximos registrados en la estación Calamar se utilizó la suma anual de precipitaciones de 9 estaciones pluviométricas ($X_{\Sigma 9}$) seleccionadas mediante análisis regresivo múltiple. Los códigos de estas estaciones son: 2403038, 2120113, 2125011, 2312506, 2204501, 2113008, 2105009, 2105502 y 2120572. y sus datos de precipitación fueron extraídos, manualmente, de anuarios meteorológicos publicados en formato análogo. Para cada año se seleccionó el caudal máximo entre los registros de caudales medios diarios. Al conjunto estadístico de caudales máximos se le calcularon sus estadísticos y se les ajustó una función de distribución teórica para describirlos. De la función teórica ajustada se obtuvo el caudal máximo de diseño. En este caso como caudal máximo de diseño se seleccionó el caudal máximo con un percentil de excedencia del 0.01% dada la capitalidad del puente Pumarejo. A este caudal se le realizó una corrección por la corta longitud de la serie.

Cerca del Puente Mariano Ospina Pérez se encuentra la estación limnimétrica Girardot, sin embargo no se pudo obtener acceso a los datos de esta estación. Por el contrario se contaba con información de las estaciones limnimétricas Nariño y Payandé, lo que permitió calcular los caudales diarios que pasan por la sección del puente en estudio como: $Q_{Girardot} = Q_{Nariño} - Q_{Payande}$.

Las series de caudales diarios de las estaciones Nariño y Payandé cuentan con observaciones en el periodo 1983 – 2002. Al igual que con el Puente Pumarejo, de los caudales diarios obtenidos con la fórmula anterior se seleccionaron los caudales máximos para cada año del periodo 1983-2002. Al conjunto de caudales máximos también se le realizaron las pruebas de homogeneidad, el cálculo de sus estadísticos y el ajuste a una función de distribución teórica. Como caudal máximo de diseño se utilizó el caudal máximo con probabilidad de excedencia del 0.01%. Como precipitaciones predictoras de los caudales máximos de este puente fue escogida la suma de las precipitaciones anuales ($X_{\Sigma 10}$) registradas en las 10 estaciones meteorológicas con los códigos: 2206505, 2119006, 2106503, 2116008, 2125047, 2111502, 2120608, 2120607, 2105503, 2114006. Las estaciones predictoras fueron seleccionadas, como en el caso anterior,

por análisis regresivo múltiple entre los registros de precipitación disponibles y la serie de caudales máximos.

Para el puente Jorge Durán sobre el río Pamplona la información disponible es de corta longitud y se encuentra registrada en las estaciones 1601501 (precipitaciones) y 1601704 (caudales). El periodo de observación va desde 1988 hasta 1994. Para los siete años disponibles se escogieron los caudales máximos. Esta serie de caudales máximos es la más corta de las disponibles. Por lo anterior se escoge como caudal máximo de diseño el caudal $Q_{0.1\%}$, el cual como en casos anteriores debe ser ajustado con la corrección por longitud de la serie. Los caudales máximos de este puente pueden ser explicados por la suma de las precipitaciones de los 10 días antecedentes al registro del caudal máximo. Los registros de precipitación se extrajeron de la estación 1601501. El coeficiente de correlación lineal entre la suma de la precipitación de los 10 días antecedentes al registro del caudal máximo y la magnitud de este último alcanza un valor de 0,84.

Para el puente sobre el río Patá no hay disponibilidad alguna de información hidrológica. Para este río se utilizó el método de analogía hidrológica (SNIP, 2.01.14-83), utilizando como río análogo al río Cunday. El río Pata hace parte del límite entre los departamentos del Huila y Tolima y el río Cunday se encuentra en relativa cercanía al Pata en el Tolima. Con la información del río Cunday se realizó la evaluación de sensibilidad de caudales máximos al cambio climático, para luego ser transpuesta por proporción de áreas y de rendimiento hídrico a la cuenca de interés. El análisis de correlación entre los caudales máximos y las precipitaciones antecedentes concluyó que los caudales máximos del río análogo pueden ser explicados con la lluvia acumulada durante los 5 días anteriores al registro del caudal máximo de cada año. La mejor correlación se dio entre los caudales máximos y la suma de precipitaciones de los 5 días antecedentes de la estación Peñas Blancas. Este predictor tiene un coeficiente de correlación igual 0.83, lo que permite proponer una función del tipo $Q_{\max \text{ anual}} = f(X_{\Sigma 5})$ para evaluar la sensibilidad de los caudales máximos ante los efectos del cambio climático.

3. RESULTADOS

Antes de la aplicación de la ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov se evaluaron los estadísticos de los caudales máximos en el clima actual. En la evaluación de la sensibilidad de los caudales máximos se utilizó una solución cuasi-estacionaria de la ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov. La información de entrada para esta aplicación se obtuvo del análisis estadístico de las precipitaciones predictoras y de los caudales máximos de cada puente. A continuación se presenta un resumen de los estadísticos de los caudales máximos y de la información de precipitaciones predictoras, para cada puente en análisis (véase Tabla 1). Esta información alimenta a una aplicación informática que implementa la solución quasi-estacionaria de la ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov, permitiendo muy ágilmente obtener los estadísticos de los caudales máximos para el supuesto clima futuro. Para definir el escenario de cambio climático que se aplicaría a cada puente, se utilizaron los escenarios de respuesta hidrológica construidos en la Primera Comunicación Nacional sobre los efectos del cambio Climático en Colombia (Alarcón et al., 2001). Así para los puentes ubicados en la cuenca del río Magdalena se designó un incremento en las precipitaciones del 10%, mientras que para la cuenca del Pamplonita éste se hizo del 20%. Con este escenario de precipitaciones, aplicando la solución cuasi-estacionaria de la ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov se calcularon los estadísticos de los caudales máximos para las condiciones del nuevo clima. También se determinó el caudal máximo de diseño para el clima futuro, al igual que se hizo para el clima actual (véase Tabla 2). La diferencia entre la magnitud del caudal máximo de diseño del clima actual y el caudal máximo de diseño en el clima futuro representa la sensibilidad de estos al cambio climático.

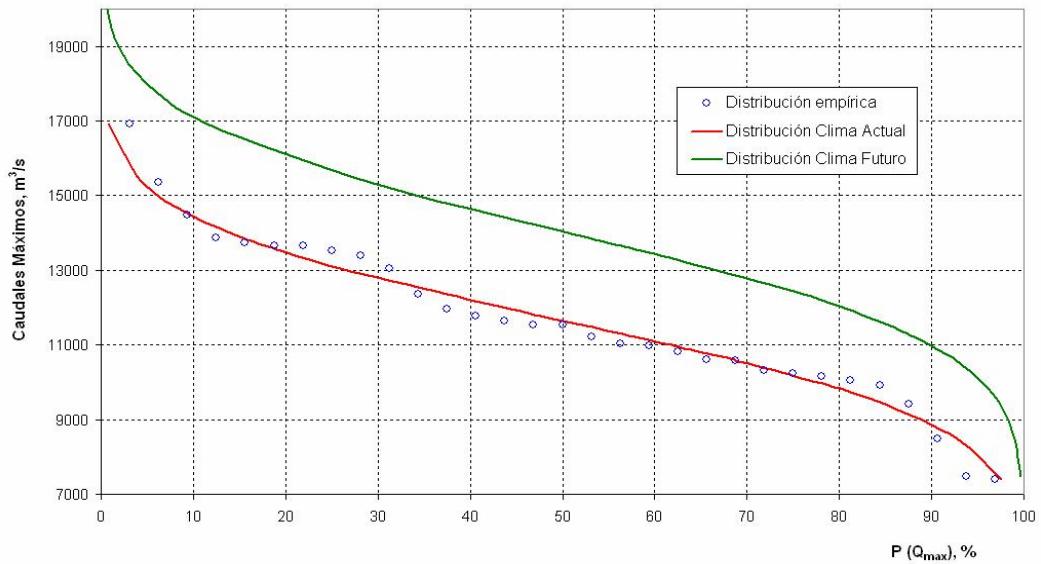
En el puente Pumarejo, para un aumento del 10% de las precipitaciones, el caudal máximo de diseño aumentó un 17% (Figura 1). Este aumento puede explicarse por la magnitud de los caudales máximos del río Magdalena, ya que la varianza es un momento estadístico de segundo orden que da mayor peso a los valores de caudal de mayor magnitud.

Tabla 1. Resumen de estadísticos de los caudales máximos clima actual

PUENTE	$\bar{Q}_{\max} \text{ m}^3/\text{s}$	Cv	Cs	$X_{\text{predictor}}$	$Q_{\max \text{ diseño}} \text{ m}^3/\text{s}$
Puente Pumarejo	12400	0.18	0.36	1820	$Q_{\max, 0.01\%} = 16000$
Puente sobre el río Patá	116	0.29	0.58	82	$Q_{\max, 0.1\%} = 185$
Jorge Gaitán Durán (Pamplonita)	70.0	0.42	0.84	79	$Q_{\max, 0.1\%} = 168$
Mariano Ospina Perez (Girardot)	3220	0.25	0.5	1900	$Q_{\max, 0.01\%} = 6086$

Tabla 2. Resumen de estadísticos de los caudales máximos clima futuro

PUENTE	$\bar{Q}_{\max} \text{ m}^3/\text{s}$	Cv	Cs	$X_{\text{predictor}}$	$Q_{\max \text{ diseño}} \text{ m}^3/\text{s}$
Puente Pumarejo	14000	0.17	0.34	2000	$Q_{\max, 0.01\%} = 19600$
Puente sobre el río Patá	125	0.35	0.70	126	$Q_{\max, 0.1\%} = 182$
Jorge Gaitán Durán (Pamplonita)	155	0.38	0.76	98.8	$Q_{\max, 0.1\%} = 249$
Mariano Ospina Perez (Girardot)	4300	0.24	0.48	1900	$Q_{\max, 0.01\%} = 6700$

**Figura 1.** Funciones de distribución en los climas actual y futuro (pte. Pumarejo)

Para el Puente Mariano Ospina Pérez, el aumento del 10% de las precipitaciones provocó un aumento del caudal máximo de diseño $Q_{\max, 0.01\%}$ de un 10% (véase Figura 2). En ambos casos, Pumarejo y Mariano Ospina los incrementos son significativos y en caso de tener un cambio de precipitaciones como el mencionado se pone en peligro la estabilidad de los puentes mencionados.

Para el puente sobre el río Patá los incrementos del caudal de diseño $Q_{\max, 0.1\%}$ fueron proporcionales con el

escenario climático propuesto (véase Figura 3), mientras que para el Pamplonita se obtuvo el resultado más incierto, para un incremento del 25% en las precipitaciones el caudal $Q_{\max, 0.01\%}$ sólo aumentó un 4% (véase Figura 4). Esto se debe a la corta longitud de la serie de tan sólo 7 años, lo que no permitió un ajuste e interpolación confiable de los caudales máximos de diseño.

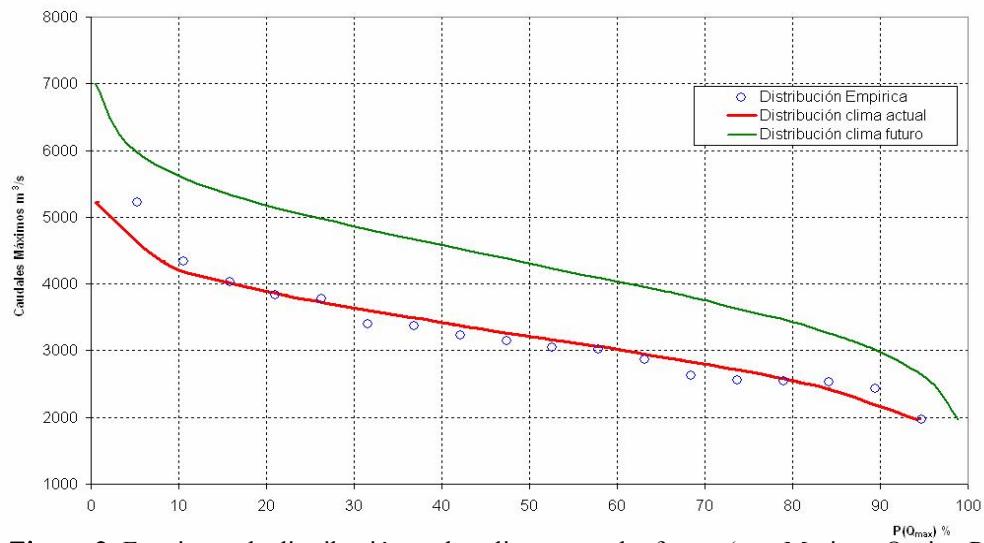


Figura 2. Funciones de distribución en los climas actual y futuro (pte. Mariano Ospina Perez)

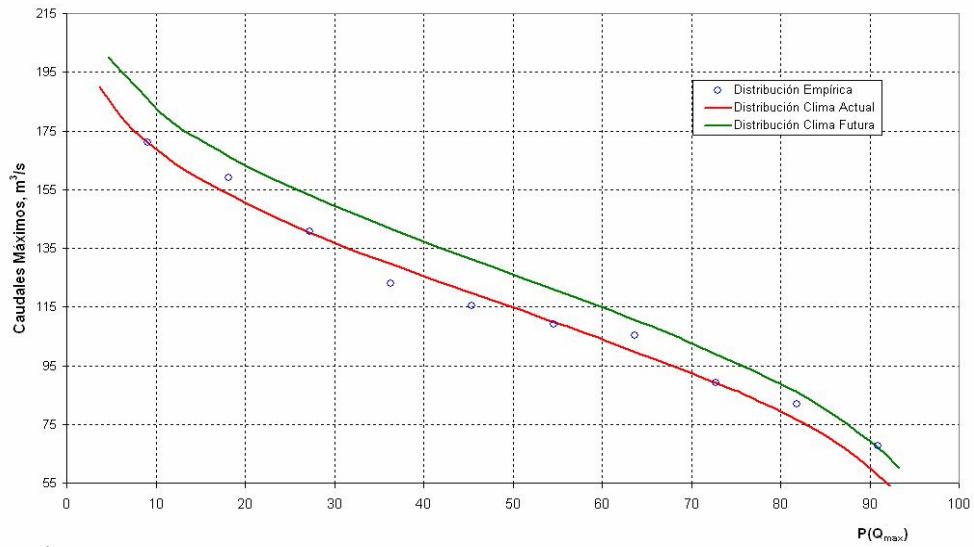


Figura 3. Funciones de distribución en los climas actual y futuro (pte. sobre el río Patá)

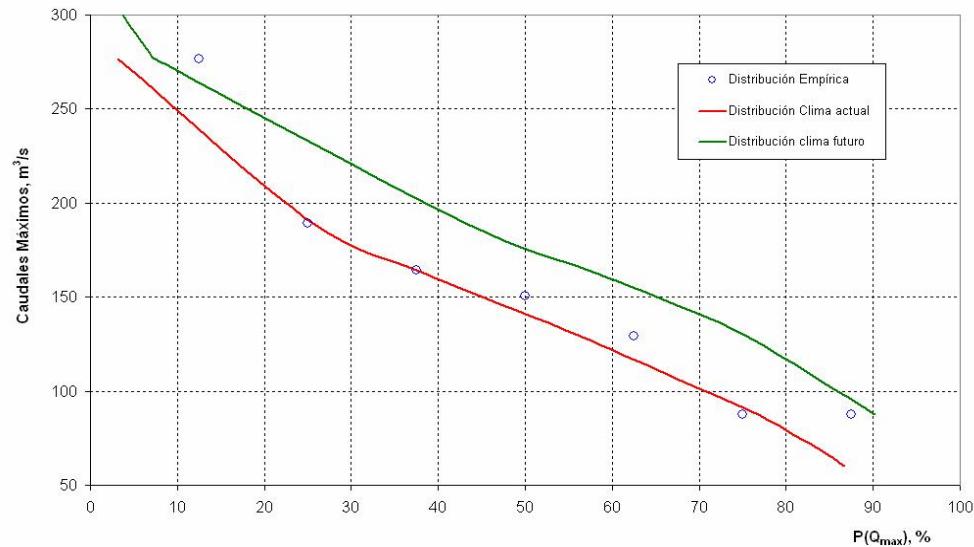


Figura 4. Funciones de distribución en los climas actual y futuro (Pte Jorge Gaitan Duran)

4. CONCLUSIONES

En general, sin tomar en cuenta escenarios de cambio de la cobertura vegetal, al aumento en las precipitaciones le corresponde un aumento del caudal máximo de diseño ($Q_{\max, 0.01\%}$, ó $Q_{\max, 0.1\%}$).

La metodología presentada permite evaluar la sensibilidad de las características probabilísticas de los caudales máximos ante posibles escenarios de cambio climático. Este método simula la evolución de las funciones de distribución de los caudales máximos bajo condiciones de clima cambiante o de fuerte presión humana sobre las cuencas hidrológicas.

El presente trabajo se adelantó en condiciones restrictivas de disponibilidad de información; en algunos casos esta disponibilidad fue nula. Estas restricciones en la información introducen dificultades en la interpretación de los resultados obtenidos.

Esta investigación desarrolló una metodología general que puede ser usada para la misma tarea con otros puentes. Es indudable que en condiciones de buena disponibilidad de información los resultados permitirán obtener conclusiones adecuadas para la disminución del riesgo hidrológico de los puentes diseñados bajo supuestos de régimen estacionario.

A lo largo de este trabajo se evaluaron puentes con distintos niveles de información desde estaciones con 5 a 15 años de de registro, hasta puentes en regiones sin datos, por ello ofrece una buena guía para la evaluación del riesgo hidrológico en condiciones de clima cambiante. Sin embargo, es necesario continuar este trabajo complementándolo con la sistematización de los algoritmos para cada nivel de información disponible. También se recomienda reajustar los resultados contenidos agregando la información existente en la actualidad en el banco de datos del IDEAM, pero que no estuvo disponible durante el tiempo de elaboración de este trabajo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alarcón et al., 2001, Colombia – Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. IDEAM-MA-

PNUD. Bogotá, Sevigraphics, 307 P.

Berger, A., 1988, Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics*. Vol. 26, pp. 624-657. Nov.

Comité Estatal para los Asuntos de Construcción: SNIP, 1985, 2.01.14-83: Definición de características hidrológicas - Normas y reglas para construcción en Rusia, Moscú.

Domínguez E, 2004, Pronóstico estocástico de afluencias a embalses hidroeléctricos de Colombia, Universidad Estatal Hidrometeorológica de Rusia, San Peterburgo, 231 P.

Haan, T. C., 2002, *Statistical methods in hydrology: Second Edition*. – Iowa: Iowa State Press, 378 P.

IPCC, 2002, Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático 2001. La base científica. PNUMA, OMM, 94 P.

Ivanova, Y., 2006, Aplicación de la ecuación de Fokker–Planck–Kolmogorov para la evaluación del riesgo hidrológico de Puentes. Informe final, orden de trabajo 2438/2005. Grupo de investigación Visión Colombia Hídrica. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. 69 P.

Khaustov, V.A., 1999, Estabilidad de características probabilísticas de escorrentía anual en el cambio climático; San Petersburgo; 20 P.

Kovalenko, V. V., 1993, Modelación de procesos hidrológicos, San Petersburgo, Hidrometeoizdat, 250 P.

Pivovarova, I. I., 2002, Evaluación de la aplicabilidad del modelo estocástico para escorrentía mínima en la evaluación del efecto del cambio climático, San – Peterburgo, 20 P.

Rozhdestvenskiy, A. V. y Chevotariov, A. I., 1974, *Métodos Estadísticos en la Hidrología*, Guidrometoizdat, Leningrado.