

# El mecanismo de reforzamiento hidrológico de los procesos de calentamiento global en Colombia

*Hydrological reinforcement mechanism  
of the global warming processes in Colombia*

**Jaime Andrés Moreno Miranda**  
**Efraín Antonio Domínguez Calle**  
**Sergio Esteban Lozano Báez**

**RESUMEN:** El presente estudio busca entender el mecanismo del reforzamiento hidrológico de los procesos de calentamiento global en el territorio Colombiano. Para esto se utilizó la información hidrometeorológica de 1.310 series de precipitación, 465 de caudal y 602 de temperatura, para el periodo comprendido entre enero de 1970 y diciembre de 2005. Se realizaron análisis de tendencia por variable hidrometeorológica y por Zona Hidrológica para la precipitación y la escorrentía. Luego, se estudia un modelo teórico basado en la física, el cual incorpora la dinámica del reforzamiento hidrológico. Como pruebas del reforzamiento hidrológico en los procesos de calentamiento global se resalta un evidente aumento de las temperaturas, y la variación de las variables hidrometeorológicas. Para el desempeño del modelo se considera que el resultado es claro y evidencia la relación entre los procesos de calentamiento global y los procesos del ciclo hidrológico.

**PALABRAS CLAVES:** Hidrología, evapotranspiración, ciclo hidrológico, modelación matemática.

Submetido: 22/05/2015

Revisão: 01/09/2015

Aprovado: 20/11/2015

**ABSTRACT:** This paper aims to understand the hydrological reinforcement mechanism of the global warming processes in Colombian territory. For this purpose we used hydrometeorological information of 1,310 precipitation series, 465 on flow and 602 on temperature, for the period between January 1970 and December 2005. Trend analyses were performed by hydrometeorological variable and by Hydrological Zone for precipitation and runoff. A theoretical model based on physics is then studied, incorporating the dynamics of hydrological reinforcement. As evidence of the hydrological reinforcement mechanism of the global warming processes, an apparent temperature increase and the variation of hydrometeorological variables are highlighted.. For model performance the result is considered clear and shows the relationship between the processes of global warming and the processes of the hydrological cycle.

**KEY WORDS:** Hydrology, evapotranspiration, water cycle, mathematical modeling.

## INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es un proceso ampliamente aceptado y soportado por los registros de temperatura de miles de estaciones alrededor del mundo. Uno de los esquemas conceptuales y diagnósticos más aceptados para este tema, corresponde a los emitidos a través de los reportes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). El IPCC atribuye el proceso de calentamiento global de los últimos 50 años, principalmente a la acción antrópica, debido a las emisiones de gases efecto invernadero como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) entre otros. Sin embargo, también destaca la importancia de los efectos de retroalimentación y la interacción con otros procesos y componentes del sistema climático, especialmente los cambios en el vapor de agua (IPCC, 2007; IPCC,

2013). En contraste, algunos estudios señalan que las relaciones no lineales entre los balances de energía, la cobertura del suelo y el ciclo hidrológico, en conjunto, pueden llegar a tener la misma importancia que las emisiones de  $\text{CO}_2$  como fuerza motora de los procesos de calentamiento global (HUNTINGTON, 2006; ALESSANDRI et al., 2012), en este contexto dependiendo de las condiciones se podría estar potenciando o amortiguando los efectos de los procesos hidrológicos, fenómeno que en el presente estudio es definido como el mecanismo del reforzamiento hidrológico de los procesos de calentamiento global. Lo anterior, da lugar a la necesidad de entender la relación entre los procesos hidrológicos y los procesos de calentamiento global. En particular el mecanismo de reforzamiento que se busca verificar, es aquel en el cual dado un aumento en la temperatura, se genera un cambio en el contenido de humedad en la cuenca. Lo que a su

vez implica una mayor o menor capacidad y conductividad térmica y calorífica, afectando directamente la velocidad de evapotranspiración y con ello todo el proceso del ciclo hidrológico. De otro lado, debido a que la atmósfera permite fácilmente el ingreso de radiación al planeta como onda corta, pero cuando ésta alcanza la superficie terrestre es re-emitida como onda larga, la cual no logra escapar tan fácilmente, se configura el efecto invernadero. Al conjugarse estos dos procesos, si se tiene en cuenta que un aumento en el contenido de humedad en la cuenca, conlleva a una mayor capacidad de almacenamiento calorífico y por ende a una mayor intensidad en la emisión de radiación de onda larga, lo que acelera el aumento de la temperatura promedio del aire y nuevamente afecta la velocidad de evapotranspiración. La teoría de este modelo viene siendo desarrollada por la escuela Rusa de hidrología, con el autor Naidenov (1992) quien en la década de los noventa inició las investigaciones enfocadas al problema de las oscilaciones de los niveles del mar Caspio, dando como resultado curvas de distribución probabilísticas bimodales como solución de la ecuación de Fokker Planck Kolmogorov, posteriormente se desenvolvieron los trabajos (NAIDENOV; PODSECHIN, 1992; NAIDENOV; KOZHEVNIKOVA, 2001; NAIDENOV; SHVEIKINA, 2005) que permitieron proponer un modelo no lineal en el cual se exhibe inestabilidad y regímenes de autooscilación. Teóricamente, fue demostrada la ciclicidad de los procesos hidrológicos, como consecuencia de dos leyes naturales (ley de conservación de la materia y la ley de conservación del impulso) y de la cual se obtuvo un atractor simple (SHVEIKINA; KOZHEVNIKOVA, 2008). Sin embargo, esta teoría ha sido escasamente evaluada en los países tropicales, encontrándose una carencia de información científica para el tema. En el caso de Colombia las revisiones de estudios anteriores se han limitado al análisis de algunas estaciones en particular (DOMÍNGUEZ; RIVERA, 2010; GARCÍA et al., 2012), lo que hace necesario comprender el mecanismo del reforzamiento hidrológico de los procesos de calentamiento global, dado que no sólo permitiría dimensionar mejor las causas del calentamiento global, sino también estimar con mayor grado de confiabilidad los efectos sobre la sociedad y el medio ambiente. El entendimiento de las relaciones bidireccionales entre los procesos hidrológicos y de calentamiento global, representaría un elemento fundamental para la gestión de los recursos naturales, la determinación de medidas de mitigación y adaptación, y la definición de riesgo hidrológico (NAN et al., 2011). En consecuencia, el objetivo de

este trabajo fue entender el mecanismo del reforzamiento hidrológico de los procesos de calentamiento global en el territorio Colombiano, teniendo como unidad de análisis las zonas hidrológicas.

## METODOLOGIA

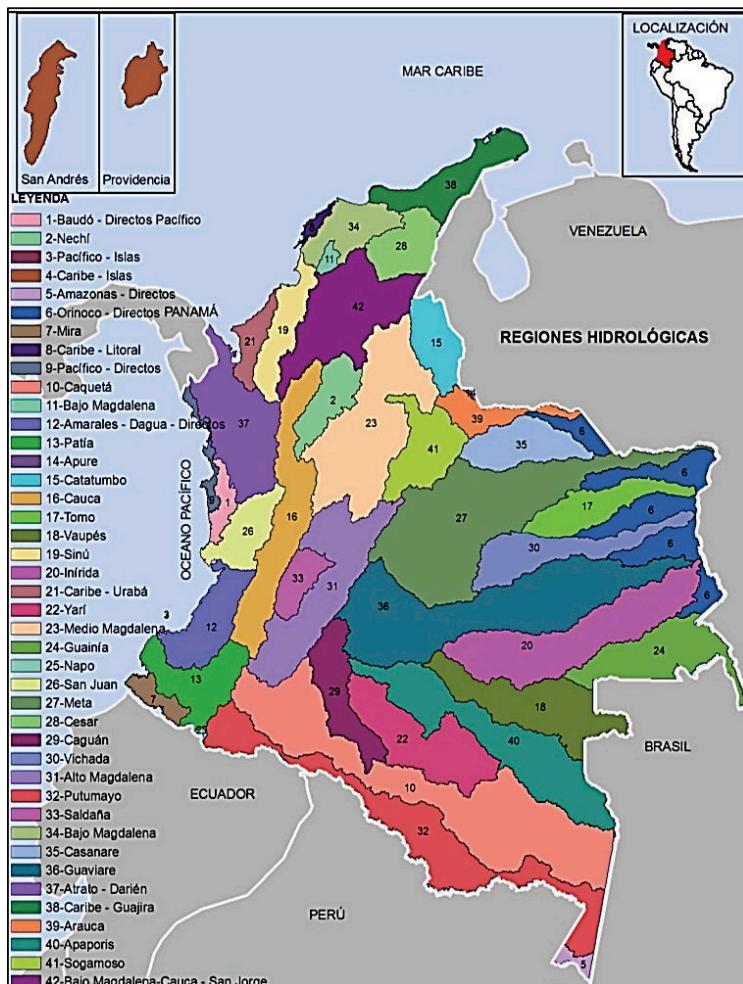
El área de estudio se seleccionó a partir de las 42 zonas hidrológicas (Figura 1) en las que se divide Colombia, estas zonas pertenecen a 5 áreas hidrológicas y se sub-dividen en 351 sub-zonas hidrológicas (IDEAM, 2010).

### Análisis de tendencia por estaciones hidrometeorológicas

El insumo principal para la realización de este estudio fueron las estaciones hidrometeorológicas administradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). En total, se utilizaron los registros a resolución mensual de 1.310 series de precipitación, 465 de caudal y 602 de temperatura, para el periodo comprendido entre enero de 1970 y diciembre de 2005. Un primer filtro para la selección final de estaciones fue el periodo con información, en la cual las estaciones debían tener por lo menos 30 años de registros de datos. Obteniendo 642 estaciones de precipitación, 212 de caudal y 155 de temperatura. Posteriormente, para cada una de las series se realizaron: el análisis de datos faltantes, la detección de datos anómalos y el análisis de consistencia. También, se calculó la prueba de aleatoriedad o prueba de rachas (BENDAT; PIERSOL, 2010), la prueba de homogeneidad, el ajuste de densidad de probabilidad, el cálculo de medidas de correlación (DOMÍNGUEZ et al., 2011) y el análisis de tendencia (SHESKIN, 2011). Para gestionar la información se construyeron bases de datos relacionales, por medio del software MySQL 5,0.

### Análisis de tendencia por zonas hidrológicas

Este análisis se realizó para las variables de precipitación y caudal, inicialmente las series hidrometeorológicas fueron agregadas por zonas hidrológicas, construyendo las nuevas series en una resolución mensual y anual. Con el fin de realizar una generalización espacial de las series hidrometeorológicas, se empleó la metodología de krigado. Los fundamentos teóricos que soportan la aplicación de dicha metodología son ampliamente abordados por diferentes autores (MATHERON, 1962; CRESSIE, 1985). Para la extracción de los datos se programaron algunos



**FIGURA 1.** Zonas hidrológicas en las que se divide Colombia.

códigos y se hizo uso de sistemas de información geográfica. A partir de las series por zona hidrológica, se realizó el análisis de tendencia por medio de la prueba Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). Sin embargo, en las series de caudal algunas zonas hidrológicas no tenían la información suficiente para determinar las series de escorrentía anual, lo que llevó a seleccionar para este análisis 29 zonas hidrológicas. Adicionalmente, para aquellas zonas en las cuales la prueba Mann-Kendall no rechazó la hipótesis de tendencia, se realizó el ajuste de una regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados (STEDINGER; TASKER, 1985) y, a partir de la pendiente de la recta, se obtuvo la tasa de cambio promedio a la que está variando la temperatura y la precipitación.

Para conocer el incremento de la temperatura para el año 2100, el valor de la pendiente se multiplicó por 95 años, esto debido a que la información de las estaciones estaba disponible hasta el año 2005.

**27**

### Modelo teórico del reforzamiento hidrológico

El modelo propuesto por Naidenov (1992) se basa en la ley de conservación de la materia y ley de conservación del impulso del movimiento, las cuales se representan por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= P - E(W) - Q \\ \frac{dQ}{dt} &= G - \frac{Q}{K(W)} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $W$  representa las reservas de humedad, el caudal, es la precipitación, la evaporación, es la fuerza de gravedad que actúa sobre las masas de agua en la cuenca, y  $K$  es un coeficiente de resistencia al movimiento del agua, relacionado con las características hidrológicas de la cuenca. En el modelo de Naidenov, el volumen de control propuesto corresponde a todo la cuenca, incluyendo así el contenido de humedad correspondiente a las reservas de aguas superficiales y subterráneas, la humedad edáfica, el agua de lagos y pantanos y la humedad de las plantas. Sin embargo, en este estudio, el volumen de control utilizado, corresponde a la cuenca, pero sin incluir el componente de aguas subterráneas, únicamente se incluye hasta la capa activa del ciclo hidrológico.

Por otro lado, en el trabajo de Shveikina y Kozhevnikova (2008), se revisan las condiciones generales para la aparición de auto-oscilaciones en el sistema (ecuación 1), al igual que se propone una solución a estas ecuaciones, con el propósito de determinar los cambios cualitativos en los atractores sobre el

diagrama de fase. El resultado es un nuevo sistema que toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\frac{d\tilde{W}}{dt} &= a_{10}\tilde{W} + a_{01}\tilde{Q} + a_{20}\tilde{W}^2 + a_{30}\tilde{W}^3 \\ \frac{d\tilde{Q}}{dt} &= b_{10}\tilde{W} + b_{01}\tilde{Q} + b_{20}\tilde{W}^2 + b_{30}\tilde{W}^3 + b_{11}\tilde{W}\tilde{Q} + b_{21}\tilde{W}^2\tilde{Q}\end{aligned}\quad (2)$$

En el anterior sistema la evaporación juega un papel muy importante ya que depende en forma no lineal de las reservas de humedad en el suelo. Esto genera que el sistema de ecuaciones del balance hídrico y de cantidad de movimiento del agua sean fuertemente no lineales e inestables, creando auto-oscilaciones, lo que podría demostrar la capacidad del sistema hacia una auto-organización. La auto-organización es un proceso de establecimiento de orden en el sistema como producto de la interacción conjunta de sus componentes (SHVEIKINA; KOZHEVNIKOVA, 2008; KOZHEVNIKOVA; SHVEIKINA, 2008).

En el sistema que se auto-organiza todos sus elementos están interrelacionados y cada elemento carga información sobre todos los demás elementos. Prácticamente, la auto-organización representa el establecimiento de una organización, movimiento estable y de orden a causa de la interacción de los elementos del sistema y bajo ausencia de influencias ordenadoras desde el exterior del sistema. Adicionalmente, las auto-oscilaciones son oscilaciones no amortiguadas y auto-sostenidas que ocurren en sistemas disipativos, abiertos y lejanos del equilibrio, los cuales se definen por sus parámetros, cualidades y esencia del sistema. Geométricamente, las auto-oscilaciones se expresan en el espacio de fase del sistema como una trayectoria atractor, dispuesta en un dominio limitado del espacio de fase y que atraen hacia sí todas las trayectorias cercanas. Este tipo de trayectorias se denominan ciclos límite y sirven de patrón para las auto-oscilaciones periódicas. Las dimensiones del ciclo límite definen la amplitud de las auto-oscilaciones, el tiempo de viaje de un punto en el ciclo y el periodo de auto-oscilación. A su vez la forma del ciclo límite define la forma de oscilación del sistema.

Los autores Naidenov y Shveikina (2005) han investigado el sistema (Ecuación 2) dando diferentes valores al parámetro dejando los otros parámetros con los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\frac{d\tilde{W}}{dt} &= a_{10}\tilde{W} - \tilde{Q} - 0,5\tilde{W}^2 - \tilde{W}^3 \\ \frac{d\tilde{Q}}{dt} &= 0,5\tilde{W} - 0,4\tilde{Q} - \tilde{W}^2 - 0,5\tilde{W}\tilde{Q} - 4\tilde{W}^2\tilde{Q} - 6\tilde{W}^3\end{aligned}\quad (3)$$

El conjunto de estos coeficientes demuestra la sensibilidad de la evaporación de la cuenca y el coeficiente de resistencia al movimiento del agua a las reservas de humedad. La solución del sistema propuesto para la reserva de humedad y la escorrentía como funciones del tiempo representa un proceso auto-oscilatorio, en este caso, la escorrentía presenta cierto rezago con respecto a las reservas de humedad.

Una característica relevante de la anterior solución (ecuación 3) es que bajo una velocidad de evaporación el atractor se convierte en un punto y el sistema tiende a un estado estable. Con el periodo de las oscilaciones multianuales es de 28.6 años. El sistema, muy lentamente, entra en un régimen de auto-oscilaciones y se necesita más de 1.000 pasos para que las oscilaciones sean estables. Con el sistema rápidamente tiende a la trayectoria límite (son suficientes 200-300 pasos) y la amplitud de oscilación tanto de las reservas como de la escorrentía crecen rápidamente aunque el periodo de oscilación se preserva. Con el periodo de oscilación crece hasta 36.8 años y con el régimen de auto-oscilaciones se detiene. Este modelo muestra que la velocidad de evaporación puede influenciar el periodo de oscilación. Lo que llevaría a pensar en que las oscilaciones multianuales de la escorrentía se detectan un número significativo de periodos de oscilación desde 2 a 3 años hasta ciclos seculares. Por último, en el sistema (Ecuación 3), se realizó un ajuste debido a que en la ecuación del balance hídrico se utilizan las precipitaciones en forma de magnitud constante. No obstante, en realidad esta magnitud se distingue por su alta variabilidad en el tiempo y en el espacio. En calidad de una primera aproximación se pueden usar precipitaciones periódicas como perturbación del sistema utilizando la función coseno. El sistema toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\frac{dW}{dt} &= a_{10}\tilde{W} - \tilde{Q} - 0,5\tilde{W}^2 - \tilde{W}^3 + 0,1 \cos(2\pi t) \\ \frac{dQ}{dt} &= 0,5\tilde{W} - 0,4\tilde{Q} - \tilde{W}^2 - 0,5\tilde{W}\tilde{Q} - 4\tilde{W}^2\tilde{Q} + 6\tilde{W}^3\end{aligned}\quad (4)$$

## Modelación del reforzamiento hidrológico de los procesos de calentamiento global

La información requerida para la modelación fueron datos de escorrentía, contenido y variación de la humedad en la cuenca. No obstante, no se tenían los datos de las últimas dos variables. Por tal razón, a partir de la ley de conservación de masa, se procedió de la siguiente forma:

$$m_I - m_0 = \Delta m \quad (5)$$

Donde es la masa que entra al volumen de control; es la masa que sale del volumen de control. Y es la variación de la cantidad de masa dentro del volumen de control. Posteriormente, se definió la ecuación que se utiliza en la modelación, esta se presenta a continuación:

$$P - ETR - EM - \frac{(I + O_E)}{A_{zh}} = \frac{\Delta W}{At \cdot A_{zh}} \quad (4)$$

Donde es la precipitación, es la evapotranspiración anual, es la escorrentía anual, es la infiltración, son las extracciones de otro tipo, es el área de la zona hidrológica, es la variación en el contenido de humedad de la zona hidrológica, intervalo de tiempo para el cual se efectúa el balance de masas (Un año para la presente modelación). Sin embargo, para se evidenció una carencia de bases de datos que permitiera cuantificar las extracciones, y en el caso de la información que se dispone en Colombia no es lo suficientemente detallada, como ocurre con los estudios de suelo. En consecuencia se generaron 3 tipos de resultados: 1) Balances de masa en los que en todos o casi todos los años, la variación en el contenido de humedad era positiva. 2) Balances de masa en los que en todos o casi todos los años, la variación en el contenido de humedad era negativa. 3) Balances de masa en los que la variación en el almacenamiento presentaba alternancia de signos. Posteriormente una vez determinadas las series de variación en el contenido de humedad de las zonas hidrológicas, se procedió a estandarizar las variables que incluye el modelo. Para esto, a cada dato se restó el valor de la media y luego se dividió entre la desviación estándar de toda la serie. Por medio de esta estandarización, el valor inicial de contenido de humedad en la zona es irrelevante. A partir de las series de valores estandarizados, se procedió a parametrizar el modelo (Ecuación 4) para lo cual se utilizó como herramienta de optimización

Solver de Excel. No obstante, el interés se centró en el parámetro de control, es decir la velocidad de evaporación, por lo que para los demás parámetros se mantuvieron los mismos valores, encontrándose únicamente el valor de . Se destaca que la calibración del modelo se realizó utilizando como función objetivo el criterio del centro hidrometeorológico de Rusia (POPOV, 1968), el cual se puede determinar a partir de la expresión:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^r - Q_i^m)^2}{n-1}}$$

Donde es la desviación estándar de los incrementos de las afluencias, es el número de pronósticos, es el incremento de las afluencias, es el error medio, es la desviación estándar de los errores de los pronósticos son las afluencias observadas, finalmente son las afluencias modeladas. Esta ecuación es altamente importante porque relaciona la desviación estándar de los incrementos de la magnitud pronosticada con la desviación estándar de los errores de pronóstico, exigiendo que la variabilidad de los errores cometidos en los datos modelados no supere la variabilidad de los incrementos de los datos observados (DOMÍNGUEZ et al., 2011).

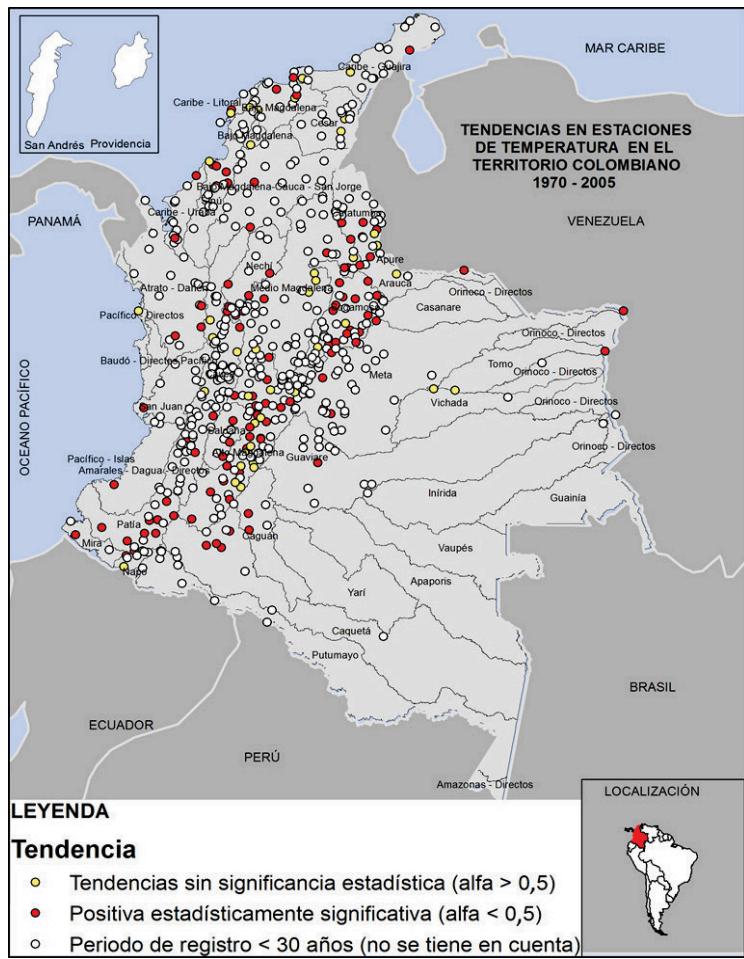
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cuanto a las series de temperatura, de las 155 estaciones con un periodo de registro mayor o igual a 30 años, 116 estaciones presentaron tendencias positivas (75%), lo cual ratifica el hecho de que el país está sufriendo un aumento de las temperaturas (Figura 2). La pendiente de la recta, resultado del ajuste de regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados, evidencia que la tasa de cambio promedio a la cual está aumentando la temperatura anualmente corresponde a 0,0191 °C/año, lo que implica que en el año 2100 la temperatura en el territorio colombiano aumentaría 1,8°C. Este resultado concuerda con la mayoría de estudios a nivel mundial, en los cuales para el año 2100 el aumento de la temperatura media se proyecta entre 1°C y 3,5°C, sin embargo en algunos casos las proyecciones pueden llegar hasta los 5°C (IPCC, 2014). A nivel nacional existen escenarios que calculan el incremento de la temperatura para

el año 2100 en 2,1°C. Algunas de las consecuencias que traería incremento de la temperatura para el país son: aumentos en el nivel del mar, derretimiento de glaciares, retroceso de los ecosistemas de alta montaña, reducción de la productividad agropecuaria y mayor vulnerabilidad a los fenómenos climáticos extremos (IDEAM, 2015; IDEAM et al., 2015). Por otro lado, la tasa a la cual está aumentando el valor de la temperatura por año es similar en las zonas hidrológicas ( $C_v = 0,0759$ ). Estos resultados, junto con la baja variabilidad del conjunto de valores de tasas de cambio promedio de las series de temperatura por zona, indicarían que el calentamiento se debe más a procesos globales que locales.

En cuanto a la precipitación, en los análisis realizados sobre las series registradas en las estaciones, se obtuvo que de las 642 series con más de 30 años, 139 estaciones no rechazaron la hipótesis tendencia (), de las cuales 40 presentaron tendencia positiva y 99 tendencia negativa. De otro lado, en cuanto a los análisis realizados sobre las series obtenidas de la agregación espacial por zona hidrográfica, se evidencia una tendencia a la disminución en las precipitaciones anuales en una franja que se extiende desde el sur occidente del país, en los límites con Ecuador, pasando por las zonas hidrológicas del Alto Magdalena, llegando a las zonas de Arauca y Casanare. Igualmente, la influencia de las características orográficas colombianas, se aprecia en las zonas de Yá, Apaporis, Vaupés, Inírida, Guaviare y Vichada, donde hay una tendencia al incremento en las precipitaciones. Adicionalmente, en la zona del Sinú se presenta tendencia negativa, mientras que en el bajo Magdalena las tendencias son positivas (Figura 3). Estos resultado se puede comparar con los estudios a nivel nacional, en los cuales se espera que para el año 2100, la precipitación media

disminuya entre 10% a 30% en aproximadamente el 27% del territorio nacional, esta disminución intensificaría la desertificación, la pérdida de fuentes y cursos de agua. En contraste, para este mismo periodo las precipitaciones incrementarían entre 10% a 30% en el 14% del país, lo que aumenta la posibilidad de deslizamientos, inundaciones y daños a la infraestructura (IDEAM et al., 2015). De otro lado, debe aclararse que únicamente en cuanto a la precipitación se logró obtener resultados en todo el territorio colombiano, pues la información de las demás variables hidrometeorológicas no fue suficiente para obtener conclusiones particularmente en las zonas de la Orinoquía y Amazonía Colombiana.

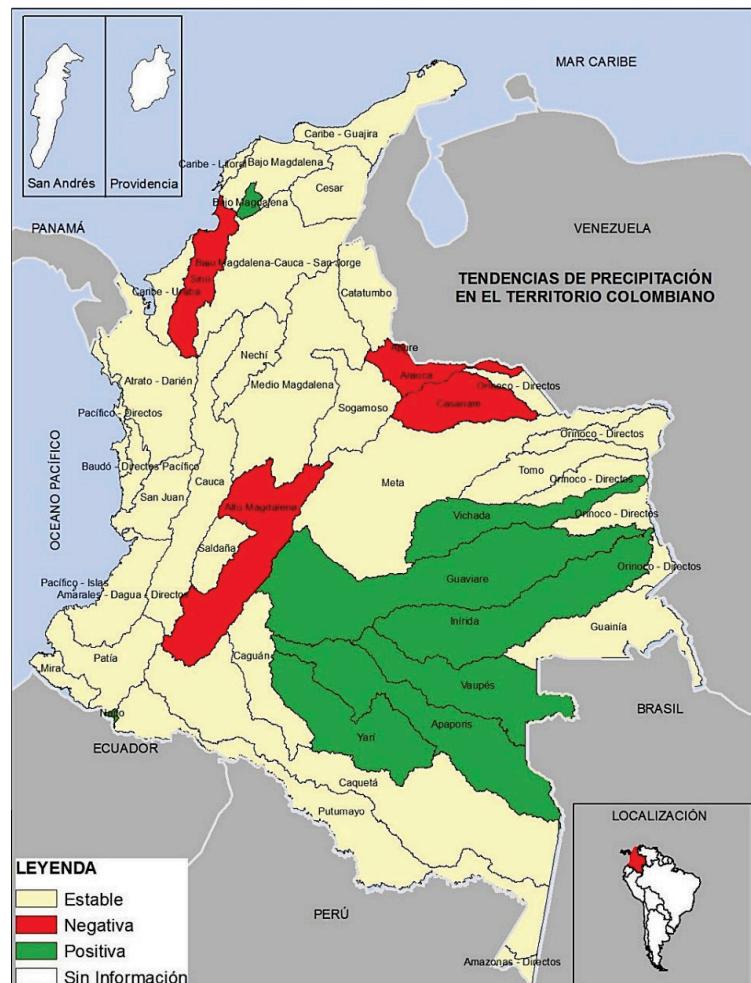


**FIGURA 2. Mapa de tendencias en estaciones de temperatura en el territorio Colombiano.**

En las series de caudal, correspondientes a las estaciones hidrológicas, 65 no rechazaron la hipótesis de tendencia, obteniendo 23 series con tendencia positiva y 42 con tendencia negativa (prueba Mann-Kendall con un nivel de significancia). En cuanto a las series obtenidas a partir de la generalización espacial para la escorrentía a nivel de zonas la franja que en el caso de las tendencias de las precipitaciones se extiende desde los límites con el vecino país del Ecuador hasta la zona de Arauca se mantiene. A nivel de zonas hidrológicas, a esta franja se adhieren el Caguán y Sogamoso. Por otro lado, la tendencia negativa es clara en las zonas del Caribe-Urabá, Sinú y Nechí al occidente del país. Al oriente aparecen Tomo y Guainía con tendencia hacia la disminución de caudales. En forma contraria, en las zonas que drenan al Pacífico se observa el aumento de los caudales anuales. No obstante, dada la densidad de estaciones de la red hidrológica, en buena parte del territorio nacional, no es posible ser concluyente al respecto (Figura 4).

Al comparar los mapas de tendencia de las precipitaciones y de las escorrentías, los resultados muestran bastante congruencia unos con otros. En ninguna zona se presentó el caso en el cual mientras la precipitación está aumentando la escorrentía está disminuyendo, ni tampoco la situación opuesta. En aquellas zonas en las cuales en una de las dos variables se presenta tendencia y en la otra no, se puede atribuir la diferencia a que la dispersión de la segunda variable fue demasiado alta como para rechazar la hipótesis de tendencia. Otro factor que puede dar lugar a esta condición se debe a grandes extracciones en algunas corrientes, o cambios en las demás variables que determinan el balance hídrico de la zona hidrológica, como la evapotranspiración o aportes subterráneos.

En el modelo de reforzamiento hidrológico se encontró que la zona Hidrológica con un mejor resultado (0,55) en el criterio de desempeño fue la zona de Cesar. Para la cual el valor de fue de 1,43758. Con este parámetro se resolvió el sistema de ecuaciones diferenciales (Ecuación 4), partiendo de 2 condiciones iniciales para el contenido de humedad () y la escorrentía () estandarizados. Los resultados, tal como lo expuesto en el modelo teórico conducen a la conformación de un ciclo límite (Figura 5). En este caso se realizaron 2.000 iteraciones, las cuales corresponderían a 2.000 años respectivamente. Sin embargo, para el valor del parámetro identificado para la zona del Cesar, se aprecia que el atractor se



**FIGURA 3.** Mapa de la tendencia de precipitación en el territorio Colombiano.

encontraría en una condición estable, es decir, que esta cuenca no tendría una tendencia a pasar fácilmente de un estado estable a otro estado estable completamente diferente, alterando drásticamente la relación entre las variables que definen el ciclo hidrológico en la cuenca.

## CONCLUSIONES

Con este trabajo se evidencia el incremento en la temperatura de la superficie terrestre de Colombia. A nivel de zonas hidrológicas los análisis de tendencia de precipitación y escorrentía permitieron identificar patrones a escala regional. Para el modelo de reforzamiento hidrológico, el buen desempeño obtenido para la zona hidrológica del Cesar, por medio del modelo teórico estudiado, constituye otra prueba del tipo de reforzamiento hidrológico sustentado por el modelo. Mediante la generalización estocástica del modelo planteado, se considera que se pueden entender y dimensionar mucho mejor las características físicas del reforzamiento hidrológico en los procesos de calentamiento global. Por último, la evidente relación asimétrica que se presenta en el país, en términos de la densidad de estaciones, especialmente de tipo hidrológico, dejando descubiertas áreas de vasta extensión; limita no sólo los resultados de este tipo de estudios, sino la capacidad de gestión sobre el recurso hídrico, si a la baja densidad de estaciones en algunas zonas se le suma la corta

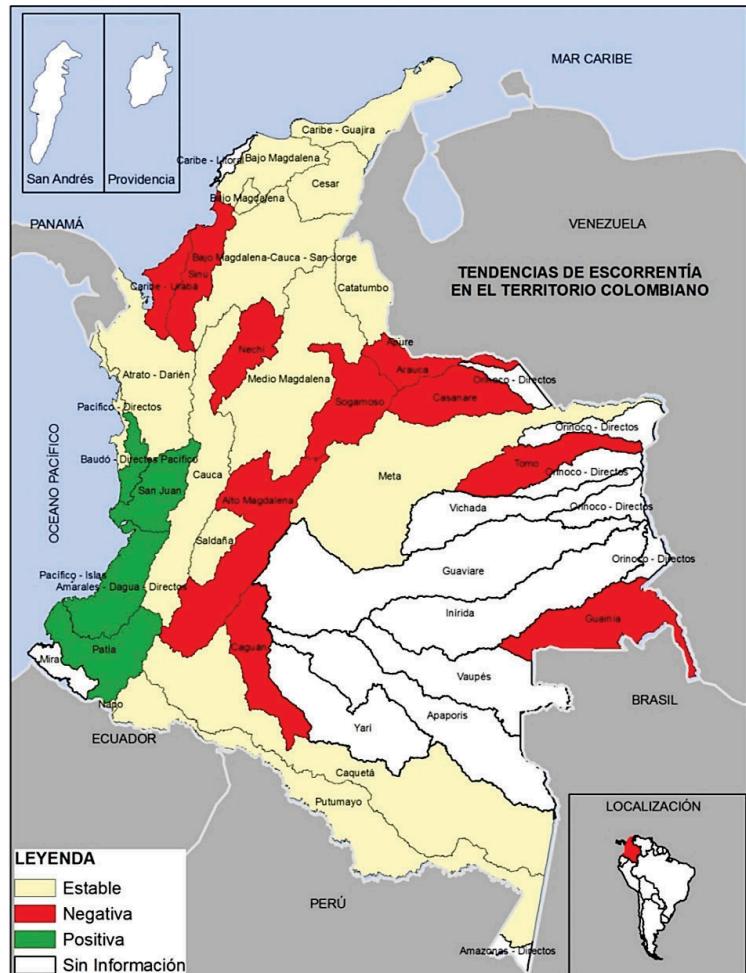


FIGURA 4. Mapa de la tendencia de escorrentía en el territorio de colombiano.

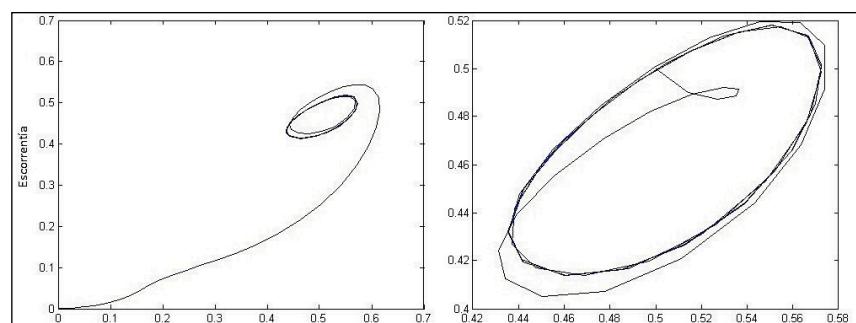


FIGURA 5. Solución del modelo de reforzamiento hidrológico en la zona del Cesar con parámetro = 1,43758.

longitud de muchas series, así como la recurrencia de datos faltantes, el déficit de información aumenta. De esta forma, los esfuerzos que se realicen en cuanto al mejoramiento de la calidad de la información hidrometeorológica, seguramente repercutirán en una mejor capacidad de planeación y ordenamiento territorial en el país.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico científico del instituto de problemas del agua de la academia

de ciencias Rusa, a través de la profesora Valentina Shveikina, así como de la Universidad Lomonosov, por medio de la profesora Irina Kozhevnikova. También agradecemos el apoyo del Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia y la Niñez (UNICEF), el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Corporación Ecoversa y a los grupos de investigación de Ecología y Territorio, al de Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente y a la Maestría de Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana por el apoyo para la realización del trabajo de grado (MORENO, 2010).

## Referências

- ALESSANDRI, A.; FOGLI, P.G.; VICHI, M.; ZENG, N. Strengthening of the hydrological cycle in future scenarios: atmospheric energy and water balance perspective. *Earth System Dynamic*, v. 3, n. 2, p. 199-212.
- BENDAT, J.; PIERSOL, A. *Random Data: Analysis & Measurement Procedures*. New Jersey: Wiley. 2010. 613 p.
- CRESSIE, N. Fitting variogram models by weighted least square. *Mathematical geology*, v. 17, n. 5, p. 563-585, 1985.
- DOMÍNGUEZ, E.; RIVERA, H. Fokker-Planck-Kolmogorov equation approach for the monthly affluence forecast of Betania hydropower reservoir. *Journal of Hydroinformatics*, v. 12, n. 4, p. 486-500, 2010.
- DOMÍNGUEZ, E.; DAWSON, C. W.; RAMÍREZ, A.; ABRAHART, R. J. The search for orthogonal hydrological modelling metrics: a case study of 20 monitoring stations in Colombia. *Journal of Hydroinformatics*, v. 13, n. 3, p. 429-442. 2011.
- GARCÍA, M.; PIÑEROS, A.; BERNAL, F.; ARDILA, E. Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, v. 36, p. 60-64. 2012.
- HUNTINGTON, T. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, v. 319, n. 1-4, p. 83-95, 2006.
- IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. *Estudio nacional del agua 2010*. Bogotá: IDEAM. 2010.
- IDEAM. *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá: IDEAM. 2015.
- IDEAM et al. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. UNATINTAMEDIOS, Bogotá, 2015.
- IPCC Summary for Policymakers. In: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- KENDALLL, M. G. *Rank correlation methods*. London: Charles Griffin. 1975. 210 pp.
- KOZHEVNIKOVA, I. A.; SHVEIKINA, V. I. Nonlinear dynamics of level variations in the Caspian sea. *Water Resources*, v. 35, n. 3, p. 297-304. 2008.
- MANN, H. B. Non-parametric test against trend. *Econometrica*, v. 13, 245-259. 1945.
- MATHERON, G. *Traité de géostatistique appliquée*. París: Editions Technip. 1962. 334 pp.
- MORENO, J.A. El Mecanismo de Reforzamiento Hidrológico de los Procesos de Calentamiento Global -Caso de Estudio Colombia. Tese (Mestrado) Maestría de Hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana. 2010. 83 p.
- NAIDENOV, V. I. Nonlinear model of the Caspian sea level oscillations. *Mat. Model.*, v. 4, n. 6, p. 50-64, 1992.
- NAIDENOV, V. I.; SHVEIKINA, V. I. Hydrological theory of the earth's global warming. *Russ Meteorol Hydrol*, v. 12, 31-38, 2005.
- NAIDENOV, V. I.; PODSECHIN V. P. A Nonlinear mechanism of water level fluctuations of inland reservoirs. *Water Resour*, v. 6, p. 5-11, 1992.
- NAIDENOV, V. I.; KOZHEVNIKOVA I. A. Nonlinear variations of the level of the Caspian sea and the global climate. *Dokl Phys*, v. 46, p. 340-345. 2001.
- NAN, Y.; BAO, M.; CHUN, L. Impact Analysis of climate change on water resources, *Procedia Engineering*, v. 24, p. 643-648. 2011.
- PANEL INTERGUBERNAMENTAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO – IPCC. *Cambio climático 2007 informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: IPCC. 2007. 104 p.

PANEL INTERGUBERNAMENTAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO – IPCC. *Climate change 2013 the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* New York: Cambridge University Press. 2013. 1535 p.

POPOV, G. E. *Fundaments of hydrological forecasting.* Leningrad LA - Russian: Guidrometeorologicheskoe izdatielzvo. 1968. 294 p.

SHESKIN, D. *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures.* Florida: Chapman and Hall/CRC. 2011. 1926 p.

SHVEIKINA, V.I.; KOZHEVNIKOVA, I.A. Estimating the probabilities od Caspian level transition from one state into another based on the solution of kolmogorov's inverse equation. *Water Resources*, v. 35, n. 1, p. 45-52. 2008.

STEDINGER, J. R.; TASKER, G. D. Regional hydrologic analysis, 1, Ordinary, weighted and generalized least squares compared. *Water Resources Research*, v. 21, n. 9, p. 1421-1432. 1985.

**Jaime Andrés Moreno Miranda** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. E-mail: jaimeamorenom@gmail.com.

**Efraín Antonio Domínguez Calle** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia E-mail: edoc@mathmodelling.org.

**Sergio Esteban Lozano Báez** Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: sergiolozano1391@gmail.com.