

XIV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y CICLOS ANUAL Y SEMIANUAL DE
LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA**

Oscar Mesa, Germán Poveda, Jaime I. Vélez, John F. Mejía
Carlos D. Hoyos, Ricardo Mantilla, Janet Barco, Adriana Cuartas,
Blanca A. Botero, María I. Montoya.

*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.*

Resumen

Los mapas de distribución de la precipitación y sus ciclos anual y semianual han sido desarrollados dentro del marco del proyecto “Balances Hidrológicos de Colombia”, en los cuales la precipitación es factor fundamental. Se usa información básica de estaciones ubicadas sobre el territorio Colombiano y algunas en países vecinos (información primaria), así como información obtenida en estudios anteriores (información cualitativa o secundaria) y en estudios climáticos a escala global. Los mapas se han construido mediante técnicas geostadísticas de interpolación, tales como el método de “Kriging Ordinario” para la interpolación a escala mensual y “Kriging con deriva externa” para la precipitación media anual y por regiones. Para obtener los ciclos anual y semianual se utilizó la transformada rápida de Fourier. Se observa en los resultados consistencia con algunos de los factores que intervienen en el régimen climático Colombiano, como la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), las características topográficas y otros mecanismos asociados a la génesis de la precipitación en Colombia.

Abstract

Maps of the spatial distribution of mean annual rainfall and its annual and semiannual cycles have been developed within the project “Surface Water Budget of Colombia”, where rainfall is a fundamental element. Basic information consists of rain gauges spread over the Colombian territory and some in the neighbor countries, as well as in previous studies (considered as qualitative and secondary information), but also large-scale climatic studies. The maps were constructed through interpolation methods such as ‘Kriging with drift’ (long term averages) and ‘Ordinary Kriging’ (monthly averages). The annual and semiannual cycles were estimated using the Fast Fourier Transform. In general, results included in the spatio-temporal precipitation maps are consistent with the meridional displacement of the Intertropical Convergence Zone, the topographic features and other mechanisms involved in precipitation variability over the country.

1. Introducción

En el marco del proyecto “Balances Hidrológicos de Colombia”, realizado por la Universidad Nacional de Colombia a través del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) y Colciencias, cuya motivación inicial era reevaluar el potencial hidroeléctrico de Colombia, se construyeron mapas de las componentes del ciclo hidrológico, a nivel de promedios de largo plazo y a una escala espacial definida por retículas de 5 minutos de arco (aproximadamente 9 km de lado).

La variabilidad espacial del clima de Colombia está principalmente determinada por: (1) su situación tropical, bajo la influencia de los vientos alisios y la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical; (2) su vecindad con los Océanos Pacífico y Atlántico, fuentes muy importantes de humedad que penetra hacia el interior; (3) su conformación fisiográfica que incluye la presencia de la cordillera de los Andes cruzando el país de suroeste a noreste, con valles interandinos y vertientes de cordillera con marcadas diferencias climáticas; (4) la circulación propia de la cuenca del Amazonas, en donde Colombia tiene una gran extensión (incluyendo la región más lluviosa de toda la cuenca); (5) la variabilidad de los procesos de la hidrología superficial, tales como los contrastes en humedad de suelo y evapotranspiración, fuertemente influenciados por la vegetación, el tipo de suelos, el aspecto (ángulo zenital local), y la circulación de vientos locales, (6) la interacción océano-tierra-atmósfera sobre la franja mas al este del Océano Pacífico tropical, realizada por la dinámica del ‘chorro del CHOCO’, un chorro de vientos húmedos de bajo nivel ubicado a los 5°N, que penetra al territorio colombiano por el occidente en la zona del Chocó [23 y 24].

La existencia de un óptimo pluviográfico es uno de los rasgos más reconocidos de la distribución de la precipitación con la altitud en Colombia. Tal óptimo corresponde a una elevación para la cual la precipitación es máxima entre el nivel base y la cima de la cordillera, ver Figura 1. Un factor principal en la explicación de este óptimo pluviográfico es el carácter predominante convectivo de las lluvias tropicales [9], las zonas bajas reciben menos lluvia porque se benefician menos del ascenso orográfico y porque están afectadas por evaporación de la lluvia que cae desde la base de las nubes. Por encima del óptimo pluviográfico, la disminución de la humedad del aire con la altura a escala global y de la cantidad de agua precipitable en las nubes convectivas, a escala local, explican la disminución de la precipitación con la altura.

La distribución espacial de la precipitación en los Andes colombianos también depende de la localización en cordillera y en vertiente, ver Figura 2, en la cual se evidencia que el óptimo pluviográfico sobre cada cordillera, se presenta a una altura aproximada de 1500 m.s.n.m. Este hecho se ha discutido en detalle en los trabajos de las referencias: [12, 22, 29 y 36].

Desde el punto de vista temporal, la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es uno de los mecanismos preponderantes para explicar la variabilidad anual y semianual de la precipitación en Colombia. La bimodalidad o unimodalidad de la distribución de la precipitación en el ciclo anual está asociada al paso de la ZCIT por el territorio Colombiano, así como de su interacción con las circulaciones de los Océanos Pacífico, Atlántico y de la cuenca del Amazonas. La ZCIT se localiza dos veces encima del centro del territorio Colombiano; en su camino hacia el Sur en la época de Octubre - Noviembre y hacia el norte en la época de Abril - Mayo, produciendo dos temporadas de más alta pluviosidad (bimodalidad) en el centro del país. Cuando la ZCIT se ubica hacia el sur del territorio colombiano (en el verano del hemisferio sur), la zona de la costa Caribe sufre una disminución en las lluvias; de igual forma en el verano del hemisferio norte (Julio - Agosto) la zona sur del país sufre tal disminución.

Otros fenómenos climáticos de escala global, que influyen en la variación temporal de la precipitación en Colombia son el fenómeno EL Niño/ Oscilación del Sur, la oscilación de Madden-Julian, las ondas del este y la Oscilación Quasi-Bienal.

Estudios sobre la influencia de estos fenómenos en la hidroclimatología de Colombia se encuentran en los trabajos referenciados en [2, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 26, 27, 29, 31 y 36]

Figura 1. [Distribución de la precipitación con la altitud en la cuenca del río Combeima para 1973 \(Adaptada de Oster, 1979\)](#)

Figura 2. [Distribución de la precipitación en un corte transversal de los Andes Colombianos por la latitud 5°N.](#)

2. Información utilizada

Para la construcción de los mapas de precipitación se utilizaron registros de estaciones (datos mensuales y anuales) y mapas de estudios anteriores. Entre los registros se encuentran 162 estaciones del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) con registro anual y mensual; 542 estaciones del mismo instituto con precipitación media multianual, de las cuales 321 poseen datos de precipitación media mensual; 14 estaciones en Urabá extractadas del trabajo referenciado en [4]; 14 estaciones con datos mensuales y anuales en el Amazonas extractadas del calendario meteorológico [3]; 9 estaciones del Brasil y 15 del Ecuador cerca a los límites con Colombia. En la Figura 3 se observa la distribución de todas las estaciones de registro finalmente utilizadas. Nótese la ausencia de estaciones en la Orinoquía y la Amazonía.

Para lograr una mayor confiabilidad, uniformizar la información y eliminar la influencia de la variabilidad interdecadal y, en la medida de lo posible la variabilidad interanual en la estimación del promedio multianual de la precipitación, los registros se homogeneizaron en el período comprendido entre enero de 1966 y diciembre de 1987, por tratarse de un período que contiene el inicio y el fin de igual número de ciclos completos El Niño y La Niña.

Se utilizaron los mapas de precipitación construidos por el Estudio Nacional de Aguas (ENA) en 1984 y mapa de Oster (1979) [6 y 17], cuya escala es de 1:500.000, ver Figura 3; los mapas del Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX), elaborados por Meeson y Sellers [16], con resolución espacial de 1 grado; y el mapa mensual del proyecto EOS-Amazon [38] con resolución espacial de 12 minutos.

Figura 3. [A\). Distribución espacial de las estaciones de precipitación en Colombia \(688 estaciones con precipitación media anual\), el tamaño del rombo define la proporción respecto a la estación con mayor registro. Las regiones 1, 2 y 3 muestran las zonas Caribe, Andina y Pacífica respectivamente. Separación utilizada para la interpolación por regiones. B\) y C\) Mapas de estudios anteriores \(información secundaria\).](#)

3. Metodología

Desde el punto de vista matemático, el problema de construir un mapa de precipitación (P) corresponde al de interpolar y extrapolar una superficie ($P=P(x,y)$) que es función de las coordenadas geográficas x , y . Esta función ha sido observada (con error) en un conjunto n de puntos distribuidos irregularmente en el espacio. El semivariograma, expresado en la ecuación (1), es una función que proporciona la estructura de variabilidad espacial y permite además de incluir la separación entre las estaciones h (distancia euclidiana), incluir la diferencia entre el valor de la precipitación de cada una de las

observaciones z . El análisis de semivariograma se realizó para las estaciones sobre todo Colombia y por regiones, ver Figura 3. Cálculos de semivariograma en varias direcciones fueron realizados con el fin de encontrar las direcciones de mínima y máxima continuidad en el campo de precipitación, mediante la ecuación

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[z(u+h) - z(u)]. \quad (1)$$

Mientras el semivariograma relaciona la variabilidad con el incremento de la distancia, la función de covarianza indica la dependencia espacial. Así, para datos con valores bajos de semivariograma (muy próximos) se tienen valores altos de covarianza (alta correlación entre ellos), por lo que será esta función la que defina los factores de ponderación usados para construir el campo de precipitación. $\gamma(\mathbf{h})$ constituye la fuente de información usada en Kriging para lograr la ponderación óptima en la interpolación.

Para obtener los ciclos anual y semianual, usando los mapas mensuales interpolados con Kriging ordinario, se utilizó la transformada rápida de *Fourier* (FFT de sus iniciales en inglés). La FFT es una metodología eficiente para calcular la transformada discreta de *Fourier*, la cual, básicamente, descompone una señal en senos y cosenos de diferentes frecuencias y con diferentes amplitudes. La transformada discreta de *Fourier* (DFT) de una serie de datos se define como

$$\hat{f}_n \equiv \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i n k / N}, \text{ con } n = -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2}. \quad (2)$$

Donde $f_i \equiv f(t_i)$ con $t_i = i\Delta t$ é $i = 0, 1, \dots, N-1$, representa una serie de N datos en el tiempo, separados por un intervalo Δt . Así, \hat{f}_n es el resultado de la DFT (amplitud) para el ciclo asociado a la frecuencia dada por $n/N\Delta t$. El resultado de la FFT es generalmente un número complejo, por lo que además de la amplitud es posible estudiar la fase del senoide correspondiente a un ciclo determinado. La fase Φ se define como

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(\hat{f}_n)}{\text{Re}(\hat{f}_n)} \right]. \quad (3)$$

Se utilizaron las amplitudes asociadas a frecuencias correspondientes a periodos de 12 y 6 meses respectivamente. La amplitud (resultado de la DFT) y la fase caracterizan los ciclos anual y semianual de la precipitación, permitiendo comparar para un punto específico el ciclo que es más importante (asociado con el movimiento de la ZCIT), y obtener la localización temporal (en este caso mensual) del máximo de cada ciclo. Mediante el análisis del comportamiento espacial de dichos ciclos es posible estudiar cómo y cuándo, fenómenos climáticos globales y locales (especialmente la migración de la ZCIT, el chorro del Chocó, la cercanía al mar y a las cordilleras) afectan la hidroclimatología de Colombia [10].

4. Resultados

Los modelos de semivariogramas se estimaron para los datos a nivel anual y mensual. Para la variable en estudio se encontró que la dirección de máxima continuidad para todas las estaciones es N30E, dirección que puede ser explicada por la orientación de las cordilleras en Colombia. Separando el territorio nacional por regiones se encontraron las direcciones de máxima continuidad, mostradas en la Figura 4. Cada una de estas direcciones puede ser explicada en por la dirección predominante de los vientos y de la topografía. De estos semivariogramas se extrajeron los parámetros requeridos para la asignación de los factores de ponderación en los métodos de Kriging.

Para involucrar el semivariograma en la interpolación, se ajustaron los modelos exponencial y Gaussiano, sin embargo, utilizando polinomios de alto orden se logró mayor ajuste, lo que llevó a usarlos

para representar la estructura de varianza de los datos, ver Figura 4. El semivariograma proporciona también información de la máxima distancia para la cual hay aporte de información de los datos (rango) sin hacer búsquedas muy lejanas y que presenten grandes problemas de extrapolación y mezcla de procesos físicos en la interpolación, en la Figura 4, el rango esta representado por la letra a , medido en grados y su valor en la ordenada correspondiente (meseta) esta representado por la letra b . Con estos parámetros y los que representan la dirección ortogonal a la principal, se obtiene la información de las elipses de búsqueda, cuyo eje mayor esta inclinado en la dirección principal, tiene longitud $2a$ y la relación de sus ejes esta determinada por la relación de anisotropía [5].

Cada mapa de deriva produjo un mapa interpolado de precipitación media anual y de varianza del error en la estimación para todo Colombia y por regiones, los cuales fueron validados y revisados para verificar que no hubiese extrapolación en lugares con ausencia de datos. Sin embargo, para las regiones de Orinoquía y Amazonía la escasa información no garantiza una buena interpolación en esas zonas, razón por la cual se optó por dejar el valor de los mapas antiguos validando la magnitud de estos en los sitios donde se contaba con registros, luego, se integró toda esta información para producir un solo mapa, verificando en ellos concordancia con los conocimientos generales de la distribución de la precipitación, ver Figura 5.

La variabilidad mensual en los mapas interpolados refleja varios de los fenómenos que actúan sobre el país, uno de ellos es el movimiento meridional de la Zona de Convergencia Intertropical en el transcurso del año. Los mapas mensuales fueron estimados interpolando con el método de Kriging Ordinario, de 606 estaciones con precipitación promedio mensual, ver Figura 6.

Figura 4. [Semivariograma de las estaciones de precipitación: \(a\) Para todo Colombia, \(b\), \(c\), y \(d\) para la regiones Andina, Caribe y Pacífica, respectivamente. La línea continua muestra la estructura de los datos calculados con la ecuación \(1\), la punteada corresponde al ajuste gaussiano y la línea discontinua al ajuste polinómico. En los gráficos se muestran los respectivos parámetros de ajuste de los modelos y direcciones de tendencia respecto el azimuth norte.](#)

Con el fin de determinar la convergencia de manera global de las tendencias y de los valores anuales y mensuales, se comparó visualmente la modulación del ciclo anual, según este trabajo, con la del trabajo realizado sobre la distribución espacio temporal de la precipitación en la cuenca del Amazonas[38], obteniendo muy buenos resultados en cuanto la modulación mensual y para los valores anuales, ver Figura 7.

Luego de aplicar la metodología propuesta para todos los puntos del mapa de precipitación, se representaron en el espacio la amplitud y la fase de los ciclos anual y semianual. En la Figura 8, se presentan la suma vectorial de estos ciclos para indicar los máximos absolutos debido a la variabilidad anual y semianual de la precipitación en Colombia. El tamaño de las flechas representa la amplitud del ciclo para cada punto relativa al “reloj” ubicado en la esquina superior derecha de la figura, el cual tiene asociada una escala característica. La dirección de los vectores señala el máximo de cada ciclo dentro del año, con enero hacia el norte, julio hacia el sur, abril hacia el este y octubre al oeste.

5. Discusión

Los mapas construidos se encuentran en formato digital, dentro de un software que se ha denominado HYDRO-SIG, un sistema de información Geográfica para la hidroclimatología de Colombia. El campo de precipitación fue estimado a una escala adecuada, teniendo en cuenta la información local disponible, la información obtenida de estudios climáticos globales y de sensores remotos. El conoci-

miento climático acerca de la variabilidad espacial y temporal del clima, en particular la influencia orográfica fue ingrediente importante de esta estimación. También se incorporó el conocimiento previo contenido en los mapas de precipitación disponibles. Las técnicas de interpolación modernas también son un complemento importante para garantizar la objetividad de la estimación.

La importancia de la precipitación en el ciclo hidrológico es contrastada con la escasa información recolectada en el campo en Colombia, son motivo de preocupación. El poco mantenimiento de las estaciones, el sesgo en la distribución espacial de las estaciones, sumado a la diversidad de mecanismos de producción de la lluvia, la topografía quebrada en gran parte del territorio, son todos factores que introducen incertidumbre y dificultad en el entendimiento de la distribución espacio-temporal de la variable en discusión.

Los diferentes métodos de interpolación suavizan los campos y pueden introducir extrapolaciones no deseadas, pues los campos en la realidad pueden ser más irregulares. En particular para este tipo de variable, que es caracterizada por una gran variabilidad espacio temporal, incluso para escalas de tiempo mensual o estacional, la interpolaciones con estos métodos no garantizan resultados que conserven o describan lo que ocurre con ella en cada instante y en cada lugar. Para mejorar los resultados se propone discretizar la interpolación por regiones que cumplan con características hidrológicas similares como se plantea en forma muy gruesa en el presente trabajo. Lo ideal para el estudio de esta variable es hacer una separación de regiones en las que jueguen como variables: la vertiente, dirección predominante de los vientos, la altura sobre el nivel del mar y otros aspectos particulares de cada zona. Las ventajas del método de Kriging con deriva Externa son que permite tomar la forma de una variable y conservar la información primaria (mediciones) y tomar en consideración la correlación espacial. La hipótesis fundamental debe ser el sentido físico de la variable secundaria.

Figura 5. [A la izquierda el mapa de precipitación media anual interpolado y depurado de valores extrapolados para el periodo homogeneizado. Mapa Actualmente usado en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia. A la derecha mapa de varianza del error en la estimación usando Kriging con deriva externa, 688 estaciones y mapa de deriva del ENA.](#)

La no-linealidad de los fenómenos involucrados en la hidrología induce restricciones a las escalas de tiempo y espacio. La restricción de retículas de 5 minutos de arco es simultáneamente muy fina y muy gruesa:

- Horizontalmente la escala es gruesa para determinar cuencas pequeñas o medianas. En aplicaciones se debe estimar la divisoria y el área de las cuencas usando topografía de mejor resolución.
- Hidrológicamente la resolución es bastante más detallada que lo que permite la información existente.

Algunas conclusiones acerca de los datos usados:

- La principal limitante del presente trabajo es la información base por su escasez y calidad. Buena parte de Colombia está desprovista de estaciones de medición de todo tipo. Las que existen están concentradas básicamente en la región andina. En particular las regiones de la Amazonía y la Orinoquía están casi completamente desprovistas de información confiable suficientemente extensa, a pesar de su importancia climática, ambiental y de biodiversidad para el país.

Figura 6. [Mapas interpolados para los 12 meses en el periodo homogeneizado, con base en el mapa final. Los meses están organizados por columnas](#)

Figura 7. [Mapas de precipitación superpuestos: Mapa Balances Hidrológicos de Colombia \(1999\) y Proyecto EOS-Amazon.](#)

Figura 8. [Suma vectorial de los ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. El tamaño y la dirección de la flecha representan la amplitud y la fase, ambas relativas al “reloj”.](#)

- Aunque la variable precipitación es la mejor observada, la densidad de la red y la distribuciones de las estaciones es definitivamente inadecuada teniendo en cuenta los grandes gradientes y los cambios de tendencias que se presentan en el campo de la precipitación, inducidos por la topografía y la climatología.
- Estas conclusiones acerca de la calidad de la información coinciden con el análisis de *Oster* (1979) en casi todos los sentidos, excepto respecto a la disponibilidad de la información. Duele reconocer que algunas entidades disponen de información que no fue posible involucrar en este estudio por sus políticas exclusivistas.
- En estas circunstancias cabe la pregunta acerca de la relación de proporcionalidad entre la calidad y la facilidad de acceso a la información. El uso depura y el no uso esconde las inconsistencias.

En el estudio de los ciclos anual y semianual, ver Figura 8, se observa claramente el paso de la ZCIT por Colombia, ocasionando en el centro del país dos máximos en la precipitación. Mientras el ángulo entre los vectores que salen de cada punto sea más parecido a 180° , el ciclo semianual es más importante que el anual. Cuando ambos vectores están aproximadamente superpuestos la explicación es el predominio del ciclo anual sobre el semianual de dicho punto. También se observa que la presencia de las cordilleras ejerce gran importancia en la dirección del máximo del ciclo anual.

El máximo de lluvias en Octubre y Noviembre es también asociado con la mayor actividad (intensidad) del Chorro del Chocó, al igual que para los mínimos de enero y febrero en el centro de Colombia. El estudio del comportamiento espacial de los ciclos anual y semianual de la variable precipitación y de otras variables climáticas usando la metodología propuesta, requiere un análisis más profundo que lleve a comprender mejor el clima colombiano. Nótese que los vectores en el espacio se pueden interpretar como un flujo de las características hidroclimáticas que se dirige en sentido contrario al presentado en los vectores.

En general, los resultados son consistentes y aceptables. En algunas regiones el balance hidrológico permite concluir la necesidad de mejorar en la observación y estimación de la precipitación. Un ejemplo de esto son las regiones del Cesar y del Putumayo. El análisis espacio-temporal de la precipitación por medio de los sensores remotos, apoyados con validaciones de mediciones puntuales, ha mostrado tener muy buena acogida en el campo práctico y en la investigación, alcanzando resoluciones espaciales y temporales muy finas y posibilitando la medición en lugares de difícil medición tal como los océanos y bosques.

6. Referencias

- [1] Bras, L. y Rodriguez-Iturbe, I., *Random Function and Hydrology*, Eddison-Wesley Publishing Company, 385-403, 1985.
- [2] Carvajal, L.F., Salazar J.E., Mesa, O.J., y Poveda, G. *Aplicación del Análisis Espectral Singular a series hidrológicas en Colombia*. Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología, IAHS, Santiago de Chile, Vol.3, 97-108, 1994.
- [3] Colombia – Ministerio de Agricultura – Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Adecuación de tierras - HIMAT - *.Calendario Meteorológico 1994*. (PE-AM-020). Santa fé de Bogotá, 1994.
- [4] CORPOURABA (Corporación Regional de Desarrollo de Urabá). Estudio de Factibilidad Presa de Aprovechamiento Múltiple Sobre el Río Chigorodo. Abril de 1988.

- [5] Deutsch, C y Journel, A, GSLIB “*Geostatistical Software Library and User’s Guide*”, Oxford University Press, 1992.
- [6] FONADE - Departamento Nacional De Planeación. *Estudio Nacional de Aguas. Informe Pricipal*. Mejía M.,y Perry. 449p., Bogotá, 1985.
- [7] Geostatistics for petroleum resevoir characterization, Workshop notes, FSS International, Esso Colombiana Limited, Bogota, septiembre 7-11, 1998.
- [8] Gil, M. M. y Quiceno, N., *La influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia*. Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1997.
- [9] Hastenrath, S., *Climate dynamics of the tropics*, Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publisher, 1991.
- [10] Hoyos, C., Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas a señales hidrológicas y sísmicas. Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1999.
- [11] Martínez, T., Principales sistemas sinópticos en Colombia y su influencia en el comportamiento del tiempo, *Atmósfera*, No. 16, 1-10, 1993.
- [12] Mesa, O. J., Poveda, G. y Carvajal, L.F. *Introducción al Clima de Colombia*. Imprenta Universidad Nacional de Colombia., Bogotá, 1997.
- [13] Mesa, O. J., Poveda, G., Carvajal, L.F y Salazar, J.E. *Influencia de variables macroclimáticas en la hidrología Colombiana*. Boletín Hidrológico de las Empresas Públicas de Medellín, No. 3., 25-58,
- [14] Mesa, O. J., Poveda, G., Carvajal, L.F y Salazar, J.E. Predicción hidrológica usando redes neuronales, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 3, 385-396, 1994a.
- [15] Montealegre, J. E. y Pabón, J.D. Características climáticas relevantes durante la ocurrencia de fenómenos ENOS en el nor-occidente suramericano, HIMAT, Bogotá, 1992.
- [16] NASA Goddard DAAC Data Series, GLOBAL DATA SETS FOR LAND-ATMOSPHERE MODELS (GEWEX), ISLSCP Initiative: 1987-1988, Volúmenes 1-5.
- [17] Oster, R. *Las Precipitaciones en Colombia*. Revista Colombia Geográfica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Vol. VI, No. 2, 1979.
- [18] Poveda, G. *¿Atractores Extraños (Caos) en la Hidro-Climatología de Colombia?*, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Volumen XXI, Numero 81, Santa Fe de Bogota-Colombia, Noviembre de 1997.
- [19] Poveda, G. Cuantificación del efecto de El Niño y La Niña sobre los caudales en Colombia. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 107-117, 1994b.
- [20] Poveda, G. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 131-144, 1994c.
- [21] Poveda, G. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas. Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 93-105. 1994a.
- [22] Poveda, G. *Modulación de la Hidroclimatología de Colombia por el ENSO y otros Fenómenos de Gran Escala*. Trabajo de promoción a profesor Asociado. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1996.
- [23] Poveda, G. *Retroalimentación dinámica entre el fenómeno El niño/Oscilación del sur y la hidrología de Colombia*. Tesis de Ph.D., Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1998.
- [24] Poveda, G., y Mesa, O.J. On the existence of Lloró (the rainest Locality on Earth):Enhanced Ocean – Land- Atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No 11,1675-1678, 2000.
- [25] Poveda, G., Mesa, O.J., Carvajal, L.F., y Salazar, J.E. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas, Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 93-105, 1994.

- [26] Poveda, G., y Mesa, O.J. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia, Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days, 227-236, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications, 1995.
- [27] Poveda, G., y Mesa, O. J, Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), *Atmósfera*, 17, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá, 1993.
- [28] Poveda, G., y Mesa, O. J. *Efectos Hidrológicos de la Deforestación. Energética*. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, N°16, 91–102, Diciembre, 1995.
- [29] Poveda, G., y Mesa, O. J. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic-atmospheric phenomena, *J. Climate*, Vol. 10, No. 10, 2690-2702, 1997.
- [30] Poveda, G., y Mesa, O.J. *Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia*. Revista de Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XI, No. 1, 21-37, 1996a.
- [31] Poveda, G., y Penland, C. Predicción de caudales medios en Colombia usando Modelación Lineal Inversa, Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 119-129, 1994.
- [32] República de Colombia, Ministerio de Agricultura, HIMAT (Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras). *Calendario Meteorológico* 1994. Santa Fé de Bogotá, D.C.
- [33] Snow, J. W., *The climate of northern South America*, En: *Climates of Central and South America*, editado por W. Schwerdtfeger, Elsevier, Amsterdam, 295-403, 1976.
- [34] Tojer, H. Fundamentos para una zonificación meteorológica y climatológica del Trópico y especialmente de Colombia. *Cenicafé*, Chinchiná, Caldas, Vol. 10, No 8, 287-373, 1959.
- [35] UNALMED-UPME-COLCIENCIAS, *Balances hidrológicos de Colombia*, 1999.
- [36] UNAL-UPME. Universidad Nacional de Colombia- Unidad de Planeación Minero-Energética. *Estudio Hidrometeorológico para la Definición de Estrategias de Largo Plazo de Generación de Energía Eléctrica*. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Medellín, 1996.
- [37] UNAL-UPME-COLCIENCIAS. Universidad Nacional de Colombia - Unidad de Planeación Minero-Energética. *Balance Hidrológico de Colombia*. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Medellín, 1999.
- [38] University of Washington – Int. Na. Pesquisas Espaciais, Brasil, *Patters and Processes of Charge in the Amazon River Basin*. Disponible en Internet en www.boto.washington.edu/eos/index.htm , 1995.
- [39] *User's Manual of Variogram and Kriging*, Colorado State University, Fort Collins, December, 1981.

RECONOCIMIENTOS. Este estudio se desarrolló mediante financiación de la Unidad de Planeación Minero-Energética del Ministerio de Minas y Energía y de COLCIENCIAS.