

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

FREDDY MEJÍA, OSCAR MESA, GERMÁN POVEDA,
JAIME VÉLEZ, CARLOS HOYOS, RICARDO MANTILLA,
JANET BARCO, ADRIANA CUARTAS,
MARÍA MONTOYA, BLANCA BOTERO.
*Universidad Nacional de Colombia.
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos*

RESUMEN

En el marco del proyecto "Balances hidrológicos de Colombia" se han elaborado mapas de la distribución espacial y los ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. El mapa de isoyetas producido se apoya en la información de estaciones, en los estudios anteriores, estudios climáticos de mayor escala y técnicas de interpolación. Algunas técnicas geoestadísticas de interpolación, como por ejemplo Kriging con Deriva Externa, fueron implementadas en la obtención del mapa de precipitación media anual, apoyadas en registros de estaciones (información primaria) y mapas de estudios anteriores (información cualitativa o secundaria). La interpolación de la precipitación a escala media mensual se estimó usando Kriging Ordinario. En la detección de los ciclos anual y semianual se utilizó la transformada rápida de Fourier. El resultado está relacionado con la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical.

ABSTRACT

The analyses of Colombia's mean annual rainfall distribution and of its annual and semiannual cycle shown in this paper are the result of a wider research project on Colombia's water budget. The rainfall map is based upon Rainage data, maps produced in previous studies, large scale climatic analysis and various interpolation techniques. Kriging with drift was used for the interpolation of the annual rainfall, taking previous maps as the drift

term. For the monthly values ordinary krigging was used. The amplitude and phase of the annual and semiannual cycle of precipitation was estimated by means of Fourier transform. Annual and semiannual cycles of precipitation over Colombia reflect the passage of the Intertropical Converge Zone.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la distribución espacial y el ciclo anual de la precipitación, es de vital importancia para un país desde el punto de vista social y económico. 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 en Colombia, 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 precipitación es la componente fundamental del ciclo hidrológico.

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

* Trabajo realizado con el patrocinio de COLCIENCIAS y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME

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. El trabajo clásico de *Trojer* (1959) es una referencia obligada para abordar este tema, así como también el trabajo de *Snow* (1976), relacionado en *Mesa, Poveda y Carvajal* (1997). También *Oster* (1979) contiene un diagnóstico coherente de la precipitación en Colombia.

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 aproximadamente de 1500 m.s.n.m. para la cual la precipitación es máxima entre el nivel base y la cima de la cordillera, ver Figura 1. La ubicación altitudinal de tal óptimo es muy variable, teniendo en cuenta la variabilidad de la humedad absoluta, del nivel de base del valle y de las circulaciones locales.

Un factor Principal en la explicación del óptimo pluviométrico es el carácter predominante convectivo de las lluvias tropicales (*Hastenrath*, 1991), las zonas bajas reciben menos lluvias 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 son los dos factores que 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. Este hecho se ha discutido en detalle en los trabajos de *Poveda y Mesa* (1995 y 1997), *Poveda* (1996), *UNAL-UPME* (1996), y *Mesa, Poveda y Carvajal* (1997). En la misma figura, se evidencia que el óptimo planográfico sobre cada cordillera, se presenta en una altura aproximada de 1500 m.s.n.m.

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 la geografía Colombiana, así como de su interacción con las circulaciones de los Océanos Pacífico, Atlántico y de la cuenca del Amazonas. La distribución espacial de la lluvia sobre Colombia está asociada a la época del año. Cuando la ZCIT se encuentra más al sur (en el verano del hemisferio sur), la zona de la costa Caribe sufre una disminución en las lluvias; lo mismo sucede en la zona sur durante el verano del hemisferio norte (Julio-Agosto). La ZCIT pasa dos veces por encima 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 de Colombia.

Otros fenómenos climáticos de escala global, que influyen en la variación temporal de la precipitación en Colombia son el Fenómeno del Niño/ Oscilación del Sur, La Oscilación Cuasi Bienal, La Oscilación de Madden-Julian y Las Ondas del Este.

Estudios sobre la influencia de estos fenómenos en la hidroclimatología de Colombia se encuentran en *Gil y Quiceno* (1997), *Hoyos* (1999), *Martínez* (1993), *Poveda y Mesa* (1993, 1995, 1996a, 1997), *Poveda* (1994a, 1994b y 1994c, 1996, 1997, 1998), *Poveda y Penland* (1994), *Poveda et al.* (1994), *Mesa et al.* (1994a y 1994b), *Montalegre y Pabón* (1992), *UNAL-UPME* (1996), *Salazar et al.* (1994), y *Carvajal et al.* (1994).

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información utilizada en la construcción de los mapas de precipitación, proviene de registros de estaciones (datos mensuales y anuales) y mapas de estudios anteriores.

Entre los registros de estaciones utilizadas, se encuentran 162 estaciones con registro anual y mensual del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y

Estudios Ambientales); 542 estaciones del SCMH (Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología) con precipitación media multianual, 321 de las cuales poseen también datos de precipitación media mensual; 14 estaciones en Urabá extractadas del Informe Estudio de Factibilidad Presa de Aprovechamiento Múltiple sobre el Río Chigorodó (1988); 14 estaciones con datos mensuales y anuales en el Amazonas extractadas del Calendario Meteorológico 1994, HIMAT; y 9 estaciones de Brasil y 15 de Ecuador cerca a los límites con Colombia. En la Figura 3 se observa la distribución de todas las estaciones de registro finalmente utilizadas. Note la casi total ausencia de estaciones en la Orinoquía y la Amazonia. Para mayor confiabilidad y para uniformizar la información y eliminar la influencia de la variabilidad interdecaadal 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 periodo comprendido entre enero de 1966 y diciembre de 1987, por tratarse de un periodo que contiene el inicio y el fin de ciclos completos El Niño y La Niña y la misma cantidad de fases negativas y positivas.

Se utilizaron los mapas de precipitación construidos por el Estudio Nacional de Aguas (ENA) en 1984 cuya escala era de 1:500.000, mapa de Oster (1979), mapa de Snow (1976), mapas del Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) y Global Data Sets for Land-Atmosphere Models con resolución espacial de 1 grado, y el mapa mensual del proyecto EOS-Amazon (1995) realizado por el INPE (Brasil) y la Universidad de Washington para toda la cuenca del Amazonas con resolución espacial de 12 minutos. Estos mapas fueron de gran importancia, al ser utilizados como deriva en la interpolación espacial de la precipitación. Particularmente los mapas de Oster y del ENA fueron bastante útiles en dicha labor. En la Figura 4 se observa el mapa de Oster y en la Figura 5 el mapa del ENA. Las diferencias más grandes en estos dos mapas se encuentran en el Chocó, donde el mapa del ENA tiene valores más altos de precipitación. Es fácil observar el poco detalle de estos mapas en la zona de los llanos Orientales y el Amazonas, debido a la falta de registros. Estos mapas recogen el conocimiento que los autores tenían del clima colombiano, por lo tanto son un punto de partida básico para este estudio.

3. METODOLOGÍA

3.1 ESTRUCTURA DE VARIABILIDAD ESPACIAL

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 y . Esta función ha sido observada (con error) en un conjunto n de puntos (Figura 3) distribuidas irregularmente en el espacio. La función no es suave y tiene variabilidad asociada a los controles climáticos descritos en la interpolación.

La función de variabilidad espacial $\gamma(h)$, o más generalmente, la medida de variabilidad espacial, es en esencia, una forma de reemplazar la distancia euclidiana h por una distancia estructural $2\gamma(h)$ que es específica del campo en estudio.

El semivariograma es una función de uso común en geoestadística que describe la medida de proximidad de los datos. Es función del vector de separación h entre dos puntos. El semivariograma es simplemente la mitad del variograma definido como el valor esperado de la diferencia entre dos valores del campo en cuestión (precipitación) separados entre sí en el espacio por el vector h . Mientras el variograma da información de proximidad, la función de covarianza lo hace sobre la dependencia o correlación, así para datos con valores de variograma bajos (muy próximos) se tienen valores de covarianza altos (alta correlación entre ellos), por lo que será esta función la que defina los pesos que se usaron para construir el campo a estimar. Para determinar los pesos debemos encontrar en primera instancia, el tipo de dependencia espacial que presenta los datos en estudio. La definición matemática del semivariograma es

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

El semivariograma es una función de vectores, depende de la orientación y de la magnitud del vector. Una propiedad importante del semivariograma es que su valor es igual a cero si su argumento h es igual a cero. Sin embargo, cuando los puntos se comparan con puntos

cada vez más distantes, la variabilidad entre ellos es posiblemente mayor. La función $\gamma(h)$ define la vecindad máxima sobre la cual puntos de control deberían seleccionarse para estimar un valor deseado, $\gamma(h)$ es la fuente de información usada en Kriging para lograr la ponderación óptima en la interpolación de la función a trazar.

3.2 INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN

Para la obtención de los mapas de distribución de la precipitación tanto a escala temporal anual como mensual se utilizaron varias técnicas geoestadísticas de interpolación Kriging con Deriva Externa y Kriging Ordinario, (*User's Manual of Variogram and Kriging*, 1981; Bras y Rodríguez-Iturbe, 1984; Deutsch and Journel, 1992; UNALMED-UPME-COLCIENCIAS (Anexo B), 1999).

La importancia de los métodos de Kriging, el cual originalmente fue limitado al campo minero, se ha expandido durante los últimos años para otras ciencias. Particularmente, el método ha encontrado gran importancia en el campo de la hidrología; también existen otros métodos usados en el campo hidrológico que hoy en día son muy usados para el cálculo de isoyetas¹. El método de Kriging consiste esencialmente en estimar un valor desconocido de la variable en estudio como una combinación lineal de n valores conocidos (registros de campo), esto da a lugar a un sistema de ecuaciones con una solución única, esto si la matriz de covarianzas es definida positiva teniendo que cumplirse que: la función de variabilidad espacial $\gamma(h)$ sea apropiada y no haya datos repetidos o que generen redundancia en el sistema. La Técnica de Kriging tiene la propiedad de exactitud, es decir, la superficie obtenida retiene los datos de partida, evalúa la variabilidad espacial de variables regionalizadas, interpolación óptima de la variable en estudio y realiza una estimación de la

¹ Se puede decir que algunos de estos métodos tienen una gran componente de arbitrariedad y subjetividad. (planos hechos a mano y técnicas de interpolación de peso), algunas de ellas no son interpoladores exactos (solo los métodos interpoladores de LaGrange son interpoladores exactos) y ninguno de esos métodos cuantifica la confiabilidad del error, (*User's Manual of Variogram and Kriging*, 1981).

dependencia de los interpoladores. El término "Interpolaciones óptimas" nos refiere a una interpolación insesgada, no tiene prejuicios y nos provee la mínima varianza del error en los estimativos

Por ejemplo, la técnica del Kriging con deriva externa es una extensión del Kriging Universal. El modelo de tendencia se limita a dos términos $m(u) = a_0 + a_1 f_1(u)$, con $f_1(u)$ igual a una variable externa (secundaria). La variabilidad suave de la segunda variable se requiere para poder estimar la variable primaria $Z(u)$. Sea $y(u)$ la variable secundaria; el modelo de tendencia es entonces

$$E[Z(u)] = m(u) = a_0 + a_1 y(u)$$

se asume que $y(u)$ refleja la tendencia espacial de la variabilidad de Z en forma lineal (variable externa o secundaria). La estimación de la variable Z y el correspondiente sistema de ecuaciones, se describe en forma resumida a continuación:

Sea Z' el valor de la precipitación en los puntos de interés (puntos a estimar)

$$Z' = m(u) + R(u)$$

donde $m(u)$ es la componente de tendencia o media de la variable estimada (determinística, de forma conocida pero magnitud desconocida) y $R(u)$ es la componente residual o fluctuación (es estocástica, su continuidad espacial se asume conocida (semivariograma)). (Deutsch y Journel, 1992).

Por medio de transformaciones algebraicas podemos llegar a

$$Z'_0 = \sum_{i=1}^n w_i Z(u_i)$$

Por lo tanto la variable a estimar es una combinación lineal de los datos conocidos. Haciendo los pesos w_i óptimos para cada una de las estimaciones y teniendo en cuenta la deriva y la variabilidad espacial se llega a el siguiente sistema de ecuaciones

$$\sum_{i=1}^n w_i(u) \text{Cov}(u_i - u_0) + \mu_0 + \mu_1 y(u_i) = \text{Cov}(u - u_i).$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1,$$

$$\sum_{i=1}^n w_i y(u_i) = y(u).$$

donde, n es el numero de puntos, w_i son los pesos y μ_i los multiplicadores de Lagrange asociados a cada uno de las restricciones del sistema (mediciones). Los $y(u_i)$ son los valores de la deriva de los puntos que participan en la estimación de la variable.

3.3 CICLO ANUAL Y SEMI-ANUAL DE LA PRECIPITACIÓN

Para la detección de los ciclos anual y semianual se utilizó la transformada rápida de *Fourier* (FFT), desarrollada finalmente en 1965 por *J. Tukey* y *J. Cooley* aunque originalmente atribuida a Gauss. La FFT es una manera más rápida de 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 (registro) se define como

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

Donde

$$f_i \equiv f(t_i) \text{ con } t_i = i\Delta t \text{ é } i = 0, 1, \dots, N-1.$$

representa una serie de N datos en el tiempo, separados entre sí Δt , y $\hat{f}_n$, 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 sinusoides correspondiente a un ciclo deseado. La fase Φ se define como

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

Los datos utilizados en la detección de los ciclos anual y semianual, provienen de los mapas mensuales interpolados usando Kriging ordinario.

Como el objetivo de este trabajo es el estudio de la variabilidad espacial de los ciclos anual y semianual, se utilizan 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 cuál ciclo es más importante (relacionado 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 el desplazamiento de la ZCIT y cercanía al mar y a las cordilleras) afectan la hidroclimatología de Colombia.

4. RESULTADOS

4.1. ESTRUCTURA DE VARIABILIDAD ESPACIAL

Los modelos de semivariogramas se estimaron para los datos de precipitación a nivel anual y mensual, de allí se leyeron los parámetros requeridos por el método con respecto a la variabilidad espacial de la precipitación (la meseta, el rango y el efecto pepita, ver Figura 6. El primer paso, una vez construidos los semivariograma, es determinar las direcciones de máxima y mínima continuidad de los datos (mayor y menor rango o alcance). Para la precipitación se encontró que las direcciones de máxima y mínima continuidad son N30E y S60E respectivamente, explicado, además, por la dirección de las cordilleras, relieve de Colombia.

El semi-eje mayor de las elipses de búsqueda esta inclinado N30E y tendrá una longitud máxima de dos grados de arco. Para búsquedas muy lejanas se presentan problemas de extrapolación y mezcla de procesos físicos. Para representar el semivariograma en la interpolación se ajustaron varios modelos o funciones que representaran los valores de semivariograma obtenidos directamente de los datos. Los mejores modelos ajustados mostraron ser el modelo exponencial y el modelo gaussiano; un ajuste realizado con polinomios de alto orden mostró el mejor ajuste, por lo que se usaron estos polinomios para representar la estructura de varianza de los datos.

4.2. MAPAS INTERPOLADOS

Para el mapa de precipitación media anual se utilizó la técnica de Kriging con deriva externa, la cual usa la

información seleccionada de las estaciones (en total 688 estaciones, información puntual, ver Figura 3) y los mapas de precipitación del ENA (1984) y *Oster* (1979) como derivas (ver Figura 4 y Figura 5). Estos mapas se digitalizaron para tener la información para la escala requerida, 5 minutos de arco (aproximadamente escala 1:2500000). A nivel mensual se implementó el método de Kriging Ordinario debido a que no se cuenta con información suficiente, a buena escala, de la distribución mensual de la precipitación para usar como deriva. Para la interpolación es necesario conocer la variabilidad espacial de las estaciones y además el valor de la deriva en las estaciones y en los puntos que se quieren conocer. Cada deriva produjo un mapa interpolado de precipitación para todo Colombia, los cuales fueron validados y revisados para verificar que no hubiese extrapolación en lugares con ausencia de datos, luego, se integro esta información para producir un solo mapa, verificando en ellos concordancia con los conocimientos generales de la distribución de la precipitación (ver Figura 7).

El método de interpolación proporciona al mismo tiempo un mapa de varianza del error en la estimación, ver Figura 8. En la figura se observa que los puntos de mayor varianza de error en la estimación coinciden, según la distribución de las estaciones, con los puntos de carencia de información primaria.

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 por interpolación con el método de Kriging Ordinario con 680 estaciones, de la proporción que cada uno de los meses representa con respecto al promedio anual (ver Figura 9). Luego, este resultado fue aplicado a cada uno de los mapas de precipitación media anual.

Con el fin de determinar la convergencia en forma global de las tendencias de los valores anuales y mensuales, se hizo una comparación visual de 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

(Proyecto EOS-Amazon, 1995), obteniendo muy buenos resultados en cuanto la modulación mensual y también para los valores anuales. (ver figura 10)

4.3 CICLO ANUAL

Luego de aplicar la metodología propuesta para todos los puntos del mapa de precipitación, es posible representar en el espacio la amplitud y la fase de los ciclos anual y semianual.

En la Figura 11 se representan la amplitud y la fase del ciclo anual, en la Figura 12 se presentan para el ciclo semianual y en la Figura 13 se presentan para la suma de los ciclos anual y semianual (suma vectorial).

El tamaño de las flechas representa la amplitud del ciclo para cada punto relativa al "reloj" ubicado en la esquina superior derecha en cada 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.

Debido a que el ciclo semianual tiene 2 máximos en el año, en la Figura 12 se observa que de cada punto salen dos vectores que se oponen, señalando dichos máximos.

En la Figura 13 se grafica la suma vectorial de los ciclos anual y semianual para representar los máximos absolutos debido a la variabilidad anual y semianual de la precipitación en Colombia, dado fundamentalmente por la migración de la ZCIT.

5. DISCUSIÓN

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 conocimiento 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 contrastada con la escasa información recolectada del campo en Colombia, son motivo de preocupación. La no controlada recolección de datos, el poco mantenimiento de las estaciones, la heterogeneidad en el período, la sesgada distribución espacial de las estaciones, sumadas 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 interpolación con estos métodos no garantizan resultados que conserven o describan lo que ocurre con ella en cada instante y en cada lugar.

Las ventajas del método de Kriging con deriva Externa es 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.

La no-linealidad de los fenómenos involucrados en el clima de 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 la información permite.

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 cerca a las tres grandes ciudades. 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.

- Aunque la variable precipitación es la mejor observada, la densidad de la red y la distribución 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 de las Figura 11 a la Figura 13), se observa claramente el paso de la ZCIT por Colombia, ocasionando en el centro del país dos máximos en la precipitación.

En la Figura 13, 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 del dicho punto.

Se observa que la presencia de las cordilleras ejerce gran importancia en la dirección del máximo del ciclo anual (Figura 12), reflejándose también en la Figura 13.

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.

Aunque no se presenta en este artículo, en el marco del Proyecto "Balances Hidrológicos de Colombia", también, aunque de manera preliminar, se presenta una primera estimación de la precipitación indirecta por rocío. El método propuesto tiene una buena base física, produce resultados razonables que concuerdan en su distribución espacial con las observaciones indirectas de su existencia e importancia en las zonas más altas. Este aspecto merece profundización.

6. REFERENCIAS

- User's Manual of Variog and Kriging, Colorado State University, Fort Collins, December, 1981.
- Deutsch, C y Journel, A, GSLIB "Geostatistical Software Library and user's guide", Oxford University Press, 1992.
- Geostatistics for petroleum reservoir characterization, Workshop notes, FSS International, Esso Colombiana Limited, Bogotá, septiembre 7-11, 1998.
- Bras, L. y Rodriguez-Iturbe, I., Random Function and Hydrology. 1985.
- UNALMED-UPME-COLCIENCIAS, Balances hidrológicos de Colombia, 1999.
- 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.
- Oster, R. *Las Precipitaciones en Colombia*. Revista Colombia Geográfica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Vol. VI. No. 2. 1979.
- Mesa, O. J., Poveda, G. y Carvajal, L.F. *Introducción al Clima de Colombia*. Imprenta Universidad Nacional de Colombia.. Bogotá, 1997.
- 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.
- 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.
- 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.
- UNAL-UPME-COLCIENCIAS. Universidad Nacional de Colombia- Unidad de Planeación Minero-Energética. Balance Hidrológico de Colombia. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Medellín, 1999.
- 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.

- 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.
- Martínez, T., *Principales sistemas sinópticos en Colombia y su influencia en el comportamiento del tiempo*. *Atmósfera*, No. 16, 1-10, 1993.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Poveda, G., *Atractores Extraños (Caos) en la Hidroclimatología de Colombia?* En Imprenta. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 1997.
- 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.
- Hastenrath, S., *Climate dynamics of the tropics*. Atmospheric sciences library, 1991.
- Oster, R., *Las Precipitaciones en Colombia*. *Revista Colombia Geográfica*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá. Vol. VI, No. 2, 1979.
- 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.

- 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. 1994 b.
- Montealegre, J. E. y Pabón, J.D. *Características climáticas relevantes durante la ocurrencia de fenómenos ENOS en el nor-occidente suramericano, HIMAT, Bogotá, 1992.*
- 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.
- 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.*
- CORPOURABA (Corporación Regional de Desarrollo de Urabá). *Estudio de Factibilidad Presa de Aprovechamiento Múltiple Sobre el Río Chigorodo. Abril de 1988.*
- 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.*
- FONADE - Departamento Nacional De Planeación.
Estudio Nacional de Aguas. Informe Pricipal. Mejía M.,y Perry. 449p., Bogotá, 1985.
- NASA Goddard DAAC Data Series, GLOBAL DATA SETS FOR LAND-ATMOSPHERE MODELS (GEWEX), ISLSCP Initiative: 1987-1988, Volúmenes 1-5.

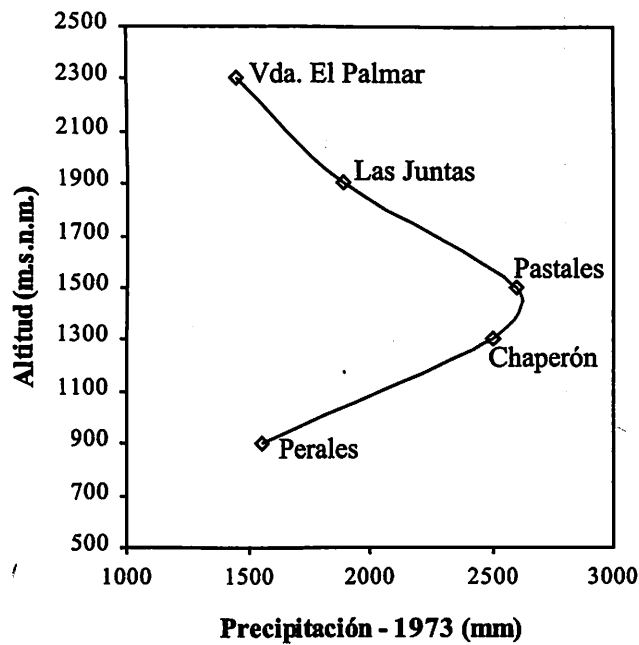


Figura 1 Distribución de la precipitación con la altitud en la cuenca del río Combeima para 1973
(Adaptada de Oster, 1979)

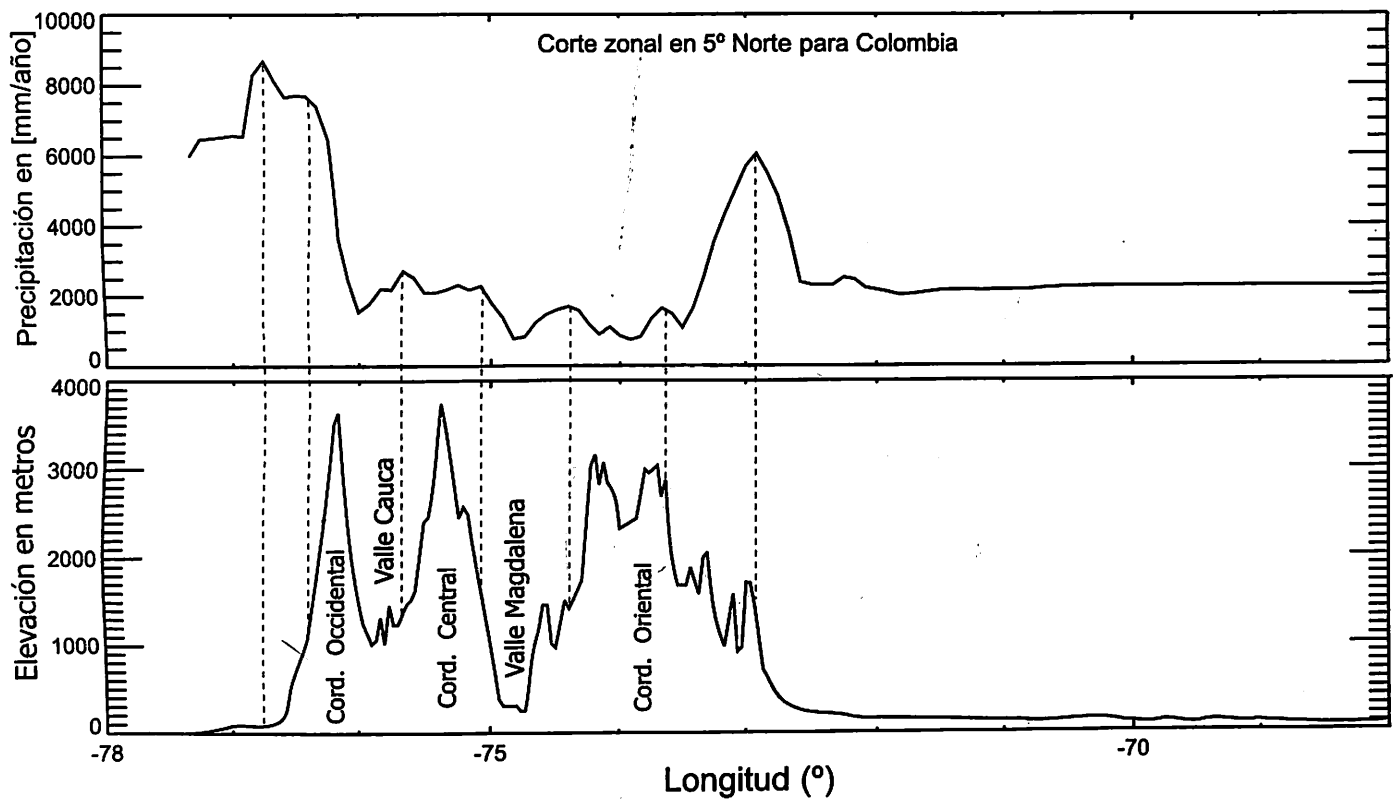


Figura 2 Distribución de la precipitación en un corte transversal de los Andes Colombianos por la latitud 5° N

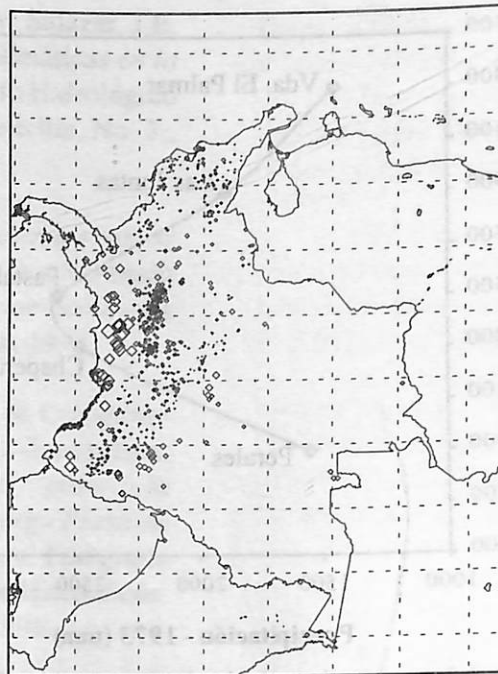


Figura 3 Distribución espacial de las estaciones de precipitación en Colombia, el tamaño del rombo define la proporción respecto a la estación con mayor registro de precipitación media anual

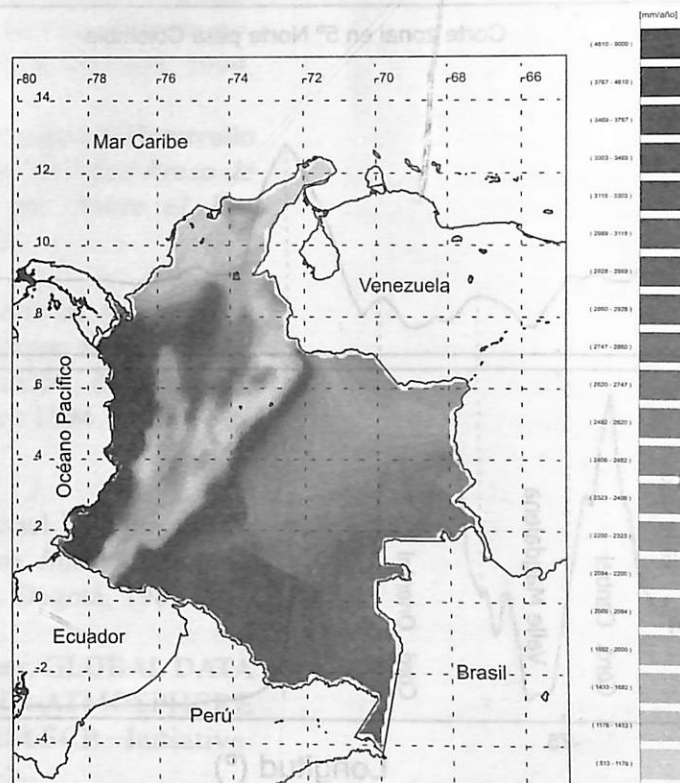


Figura 4 Mapa de precipitación Oster, 1979

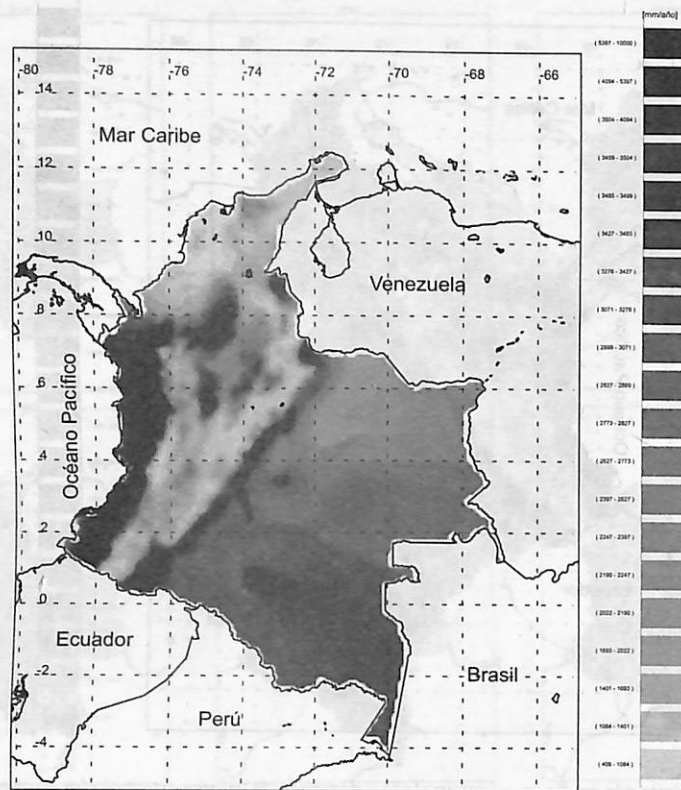


Figura 5 Mapa de precipitación ENA, 1984

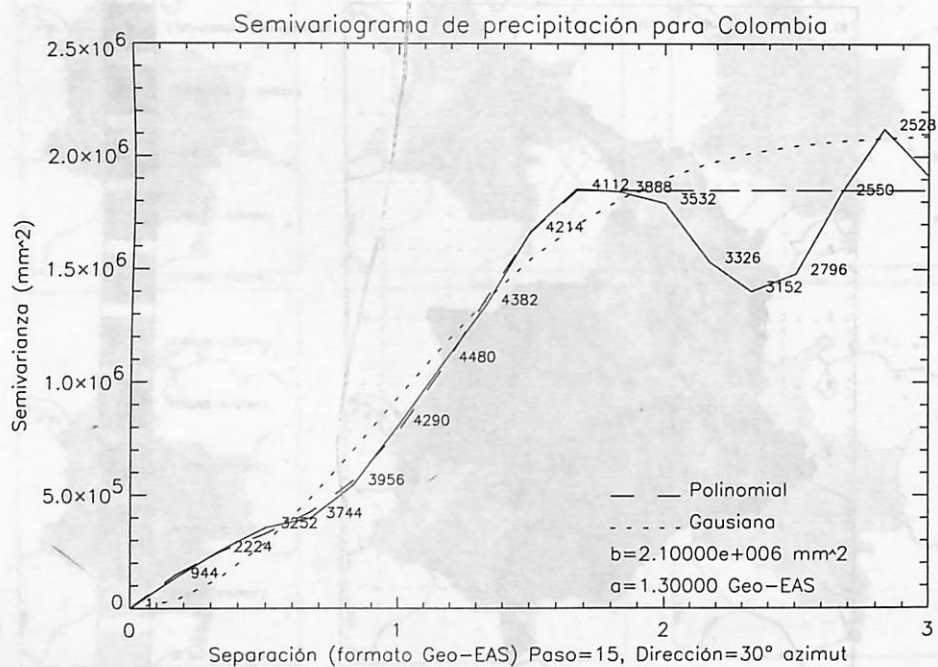


Figura 6 Semivariograma de las estaciones de precipitación en todo Colombia, la línea continua es la estructura de los datos, las otras dos de los modelos ajustados. Dirección de búsqueda N30 E.

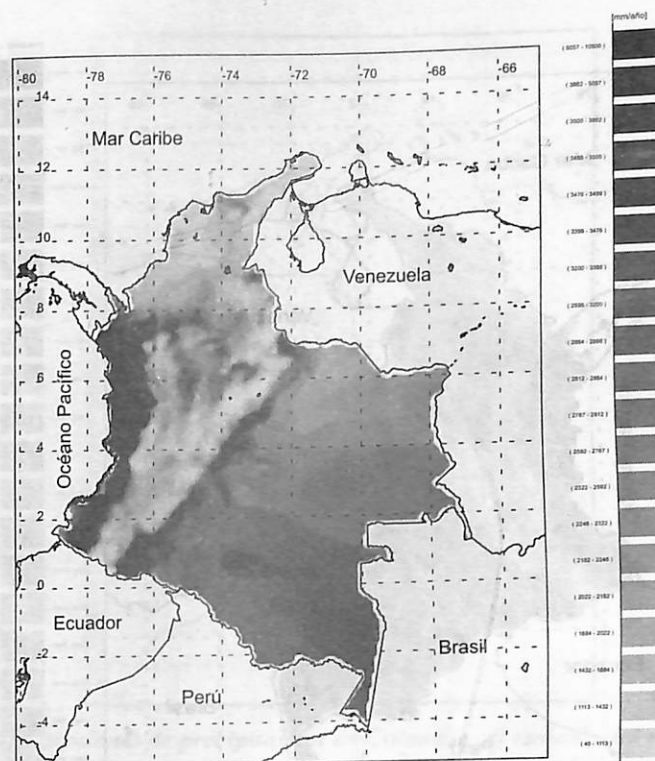


Figura 7 Mapa de precipitación media anual interpolado y depurado de valores extrapolados para período homogenizado. Mapa actualmente usado en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia

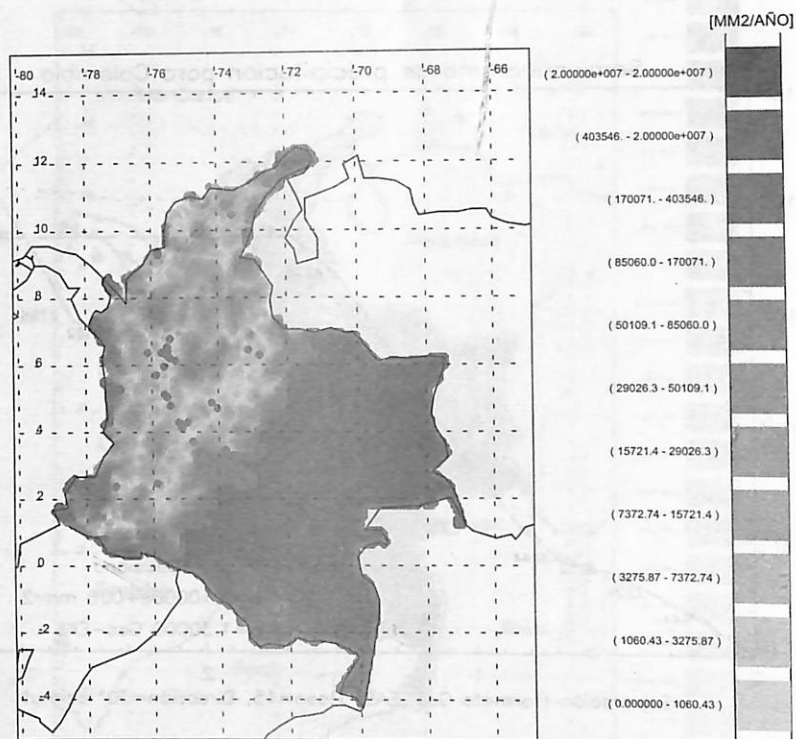


Figura 8 Mapa de varianza del error en la estimación usando Kriging con deriva externa, 688 estaciones y mapa del ENA.

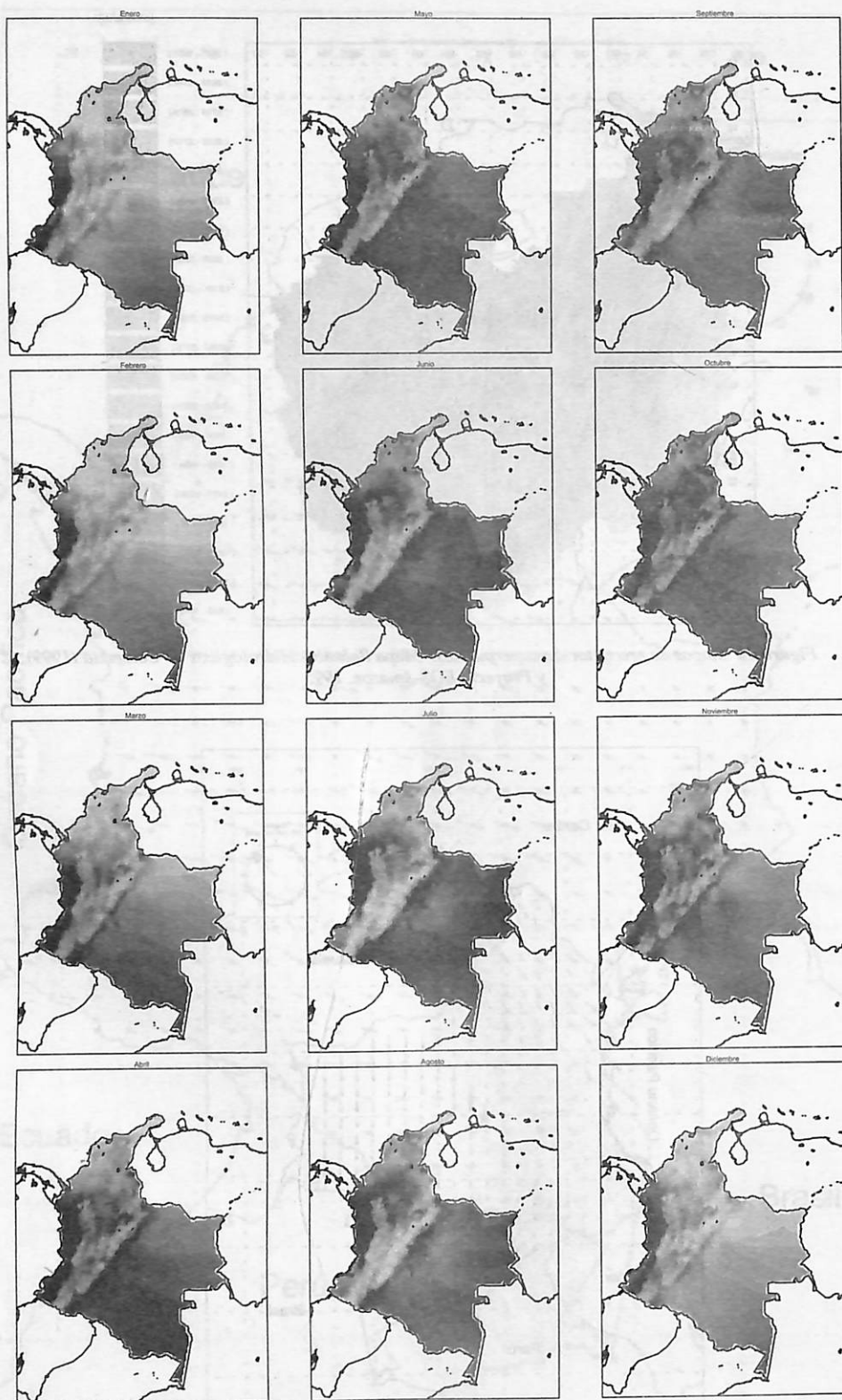


Figura 9 Mapas interpolados para los 12 meses en el período homogenizado, con base en el mapa final.
Los meses están organizados por columnas.

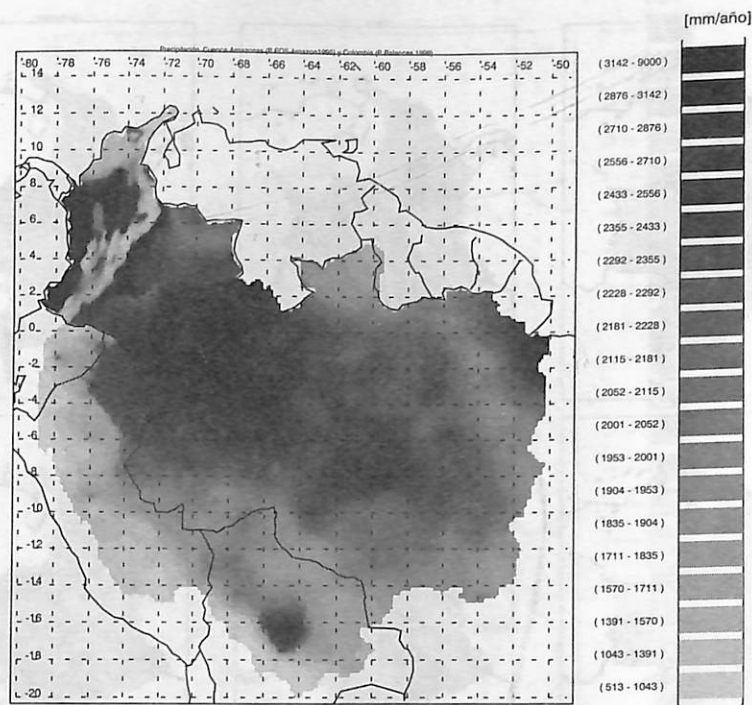


Figura 10 Mapas de precipitación superpuestos: Mapa Balances Hidrológicos de Colombia (1999) y Proyecto EOS-Amazon, 1995

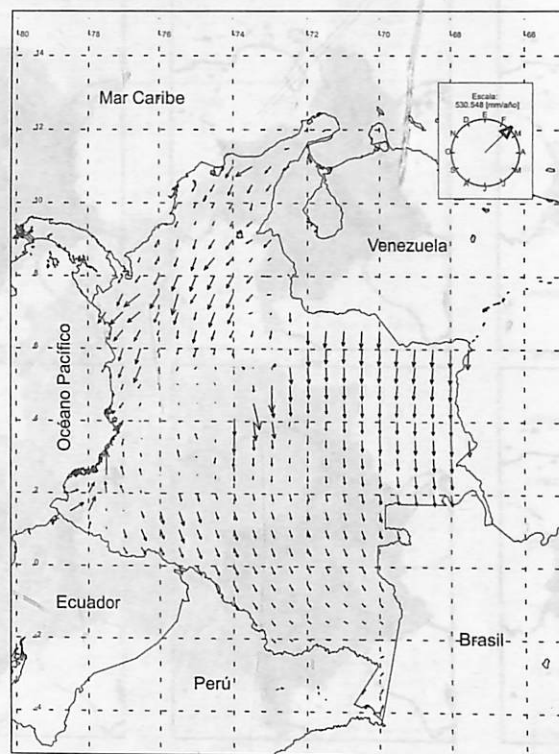


Figura 11 Ciclo anual de precipitación en Colombia. El tamaño de la flecha representa la amplitud y su dirección la fase, ambas relativas al "reloj" ubicado en la esquina superior derecha.

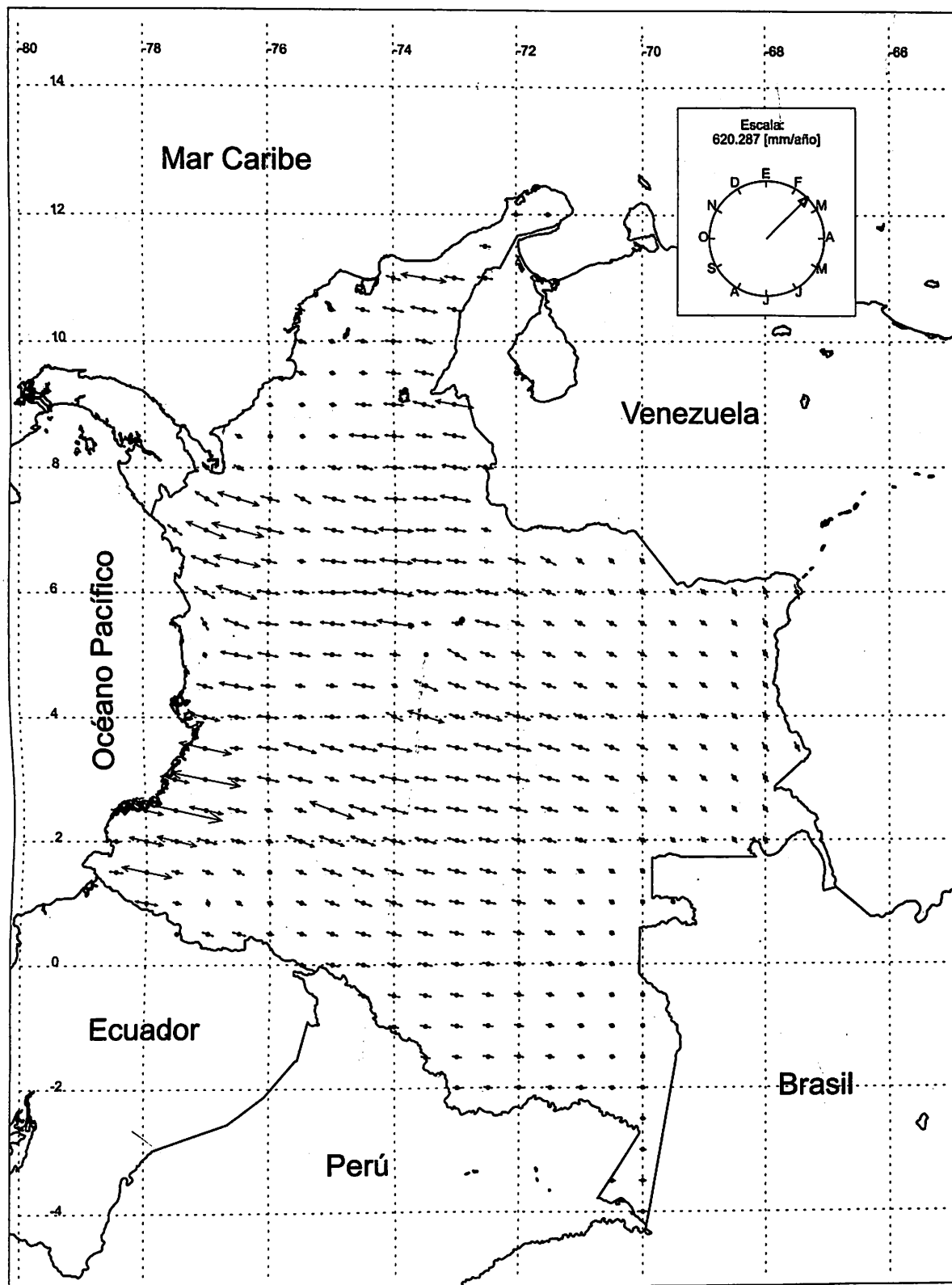


Figura 12 Ciclo semianual de la precipitación en Colombia. El tamaño de la flecha representa la amplitud y su dirección la fase, ambas relativas al "reloj" ubicado en la esquina superior derecha.

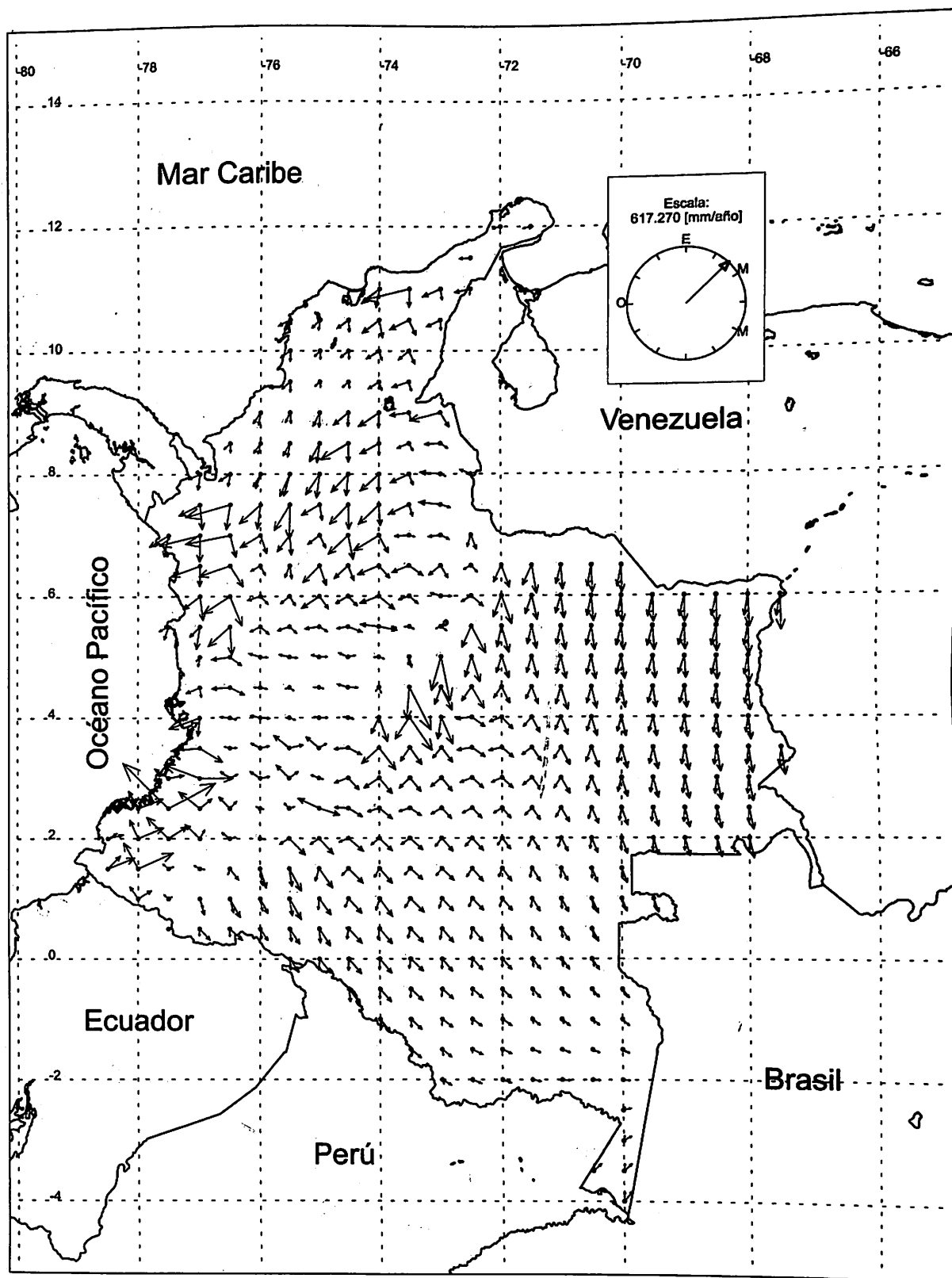


Figura 13 Suma vectorial de los ciclo anual y semianual de la precipitación en Colombia. El tamaño de la flecha representa la amplitud y su dirección la fase, ambas relativas al "reloj" ubicado en la esquina superior derecha.