

Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory

Andrés Felipe Hurtado-Montoya^a & Óscar José Mesa-Sánchez^b

^a *HMV Ingenieros, Colombia. afhurtado@h-mv.com*

^b *Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. ojmesa@unal.edu.co*

Received: October 22th, de 2013. Received in revised form: May 14th, 2014. Accepted: May 23th, 2014

Abstract

The historical monthly precipitation fields in Colombia are estimated and studied for the period 1975 - 2006 at a spatial resolution of 5 minutes of arc, calculated using an optimal integration of information available at rain gauges and distributed monthly series of fields from satellite measurements and studies of reanalysis at different periods and various spatial resolutions. Space interpolation of point observations uses a variant of the PRISM model [1]. Based on a MDT, the relationship between precipitation and topography was studied, allowing the development and implementation of a model of interpolation similar to PRISM to estimate monthly precipitation fields. Considering the topographic effect as the most important factor in explaining the spatial variability of rainfall, the study area is discretized in homogeneous regions that allowed to represent adequately the presence of the pluviometric optimal height and the temporal variability imposed by the ITCZ.

Keywords: fields of monthly precipitation, interpolation, information integration, point and spatial information, PRISM.

Reconstrucción de los campos de precipitación mensual en Colombia

Resumen

Se presenta la reconstrucción de los campos históricos de precipitación mensual en Colombia para el periodo 1975 – 2006, a una resolución espacial de 5 minutos de arco (aproximadamente 9,3 km). Cada uno de los 384 mapas fue estimado mediante la integración óptima de la información disponible de pluviómetros, con las series mensuales de campos distribuidos provenientes de mediciones satelitales y con estudios globales de reconstrucción disponibles en diferentes periodos de tiempo y a variadas resoluciones espaciales. Para incorporar el efecto de la topografía se desarrolló una variante del modelo PRISM [1] que tiene en cuenta la existencia de lo óptimos pluviográficos, ausentes en el modelo original por ser esta una característica propia de las zonas tropicales. Como el efecto topográfico es de mayor relevancia para explicar la variabilidad espacial de la lluvia, se dividió la zona de estudio en regiones homogéneas para representar adecuadamente la presencia del óptimo pluviográfico y la variabilidad temporal impuesta por la zona de convergencia intertropical (ZCIT).

Palabras clave: campos mensuales de precipitación, clima de Colombia, integración de información, información puntual y espacial, PRISM.

1. Introducción

Los registros hidrológicos en Colombia son en general escasos, tanto por su calidad, como por su longitud y cobertura espacial. A esta limitación se suma la complejidad geográfica y climática. El resultado es un desafío especial para el conocimiento de la hidrología a escalas espaciales y temporales adecuadas para aplicaciones fundamentales como el planeamiento para el desarrollo sostenible del territorio y de sus recursos hidráulicos, la prevención de desastres, un mejor conocimiento de la influencia de los fenómenos macro-climáticos lo que permite desarrollar a su vez mejores predicciones, o para evaluar los posibles impactos del cambio climático global. En este trabajo se

contribuye al conocimiento de la hidrología colombiana mediante la reconstrucción de los 384 mapas de precipitación mensual en el periodo 1975-2006.

Entre los elementos que hacen difícil la estimación están la fisiografía con los tres ramales de la Cordillera de los Andes, la diversidad de fuentes de humedad provenientes de los océanos que nos circundan y de las cuencas del Amazonas y Orinoco, el efecto de la traslación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la complicada dinámica tropical en la cual varios procesos son todavía sólo parcialmente comprendidos como la convección, la recirculación de la precipitación, el papel activo de la vegetación sobre la circulación atmosférica mediante la evapotranspiración y la emisión de núcleos de

condensación. Están además otros factores macroclimáticos como El Niño – Oscilación del Sur (ENSO) [2], sobre los cuales a pesar de los avances todavía tenemos preguntas importantes por responder. Por último, a este panorama se suma la perturbación antrópica, resultado del cambio climático global, la deforestación, la urbanización [3] y la intervención sobre los recursos hidráulicos mediante la construcción de embalses y desviaciones de las corrientes naturales. Aunque se ha avanzado bastante sobre el conocimiento de los impactos globales del cambio climático, subsiste mucha incertidumbre sobre los efectos locales y regionales, en particular con respecto a la precipitación. En conjunto todos estos elementos conforman un marco climático e hidrológico muy especial.

En particular, la limitada información puntual de precipitación y su inadecuada distribución a lo largo y ancho del territorio nacional (Fig. 1), hace necesario recurrir a técnicas especiales para la estimación de campos distribuidos en el espacio, en las cuales se incorpore la topografía y la información secundaria como bases de datos provenientes de mediciones satelitales y estudios de datos asimilados disponibles en diferentes periodos de tiempo y a determinadas resoluciones espaciales, mapas promedios multianuales distribuidos y de isoyetas presentados en trabajos previos, entre otros, que permitan modelar adecuadamente la dinámica de la precipitación en Colombia.

En este trabajo se presenta una metodología para la estimación de los campos mensuales de precipitación que integra la información pluviométrica disponible, de tal manera que se logre una buena representación a la escala mensual de la variabilidad de la precipitación en Colombia.

La estimación de los campos mensuales de precipitación, así como de los correspondientes campos de incertidumbre, serán de gran utilidad para el apoyo en la planificación del recurso hídrico en nuestro país, para el avance en el entendimiento de nuestra hidrología y para favorecer la modelación distribuida y los beneficios que de esta se puedan obtener en campos como la hidrología, ecología, agronomía entre otros.

En [4] se presentan algunas aplicaciones de esta reconstrucción, entre ellas el estudio de tendencias y homogeneidad temporal que eventualmente puedan indicar manifestación del cambio climático. También se presentará una exploración de las relaciones entre estos campos de precipitación y fenómenos macroclimáticos.

Este estudio hizo parte del subproyecto Bases para un Modelo Hidrológico Nacional, en el marco del proyecto Grupo Red de Cooperación en Investigación sobre el Agua (GRECIA), desarrollado con el apoyo del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) por las universidades Nacional y de Antioquia en cooperación con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)

1.1. La precipitación en Colombia

La complejidad de la hidrología colombiana se debe en gran parte a la cantidad de factores que intervienen en la distribución espacial y temporal de la precipitación.

La distribución espacial de la lluvia en el territorio colombiano la determina principalmente su dinámica tropical, el desplazamiento de la ZCIT a lo largo del año, las fuentes de humedad propias de la cuenca amazónica y las provenientes del Océano Pacífico y Atlántico y su fisiografía que tiene como principal componente la cordillera de los Andes, con valles oceánicos e interandinos, estos últimos presentando características especiales asociadas a la generación de circulaciones locales en el interior de los mismos. La variabilidad de los procesos de la hidrología superficial, tales como contrastes en humedad del suelo y evapotranspiración también son de gran importancia para el entendimiento de la variabilidad espacial de la precipitación [5]. Los trabajos [6-10] son referencia obligada para abordar este tema. La distribución espacial de la precipitación en los Andes colombianos también depende de la localización en cordillera y en vertiente [11].

La variabilidad temporal de la precipitación en Colombia está determinada por diversos factores que operan a diferentes escalas como el cambio climático, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Cuasi – Bienal, el ENSO, la ZCIT, el chorro del Chocó, la dinámica de los Sistemas Convectivos de Mesoescala, la oscilación de Madden - Julian, la dinámica tropical y las características fisiográficas del país [12,8].

El papel del relieve en la climatología del país es de gran importancia por las consecuencias directas de la altitud sobre la temperatura y humedad, por el papel de obstáculo que juega la masa montañosa frente a los flujos de aire cargados de humedad, diferenciándose de esta manera climas de Barlovento y Sotavento, conocidos como efectos de abrigo sobre Colombia a los cuales se añaden una característica fundamental de su clima como lo son las circulaciones locales. El alejamiento de las fuentes de aire húmedo y la orientación de los valles y vertientes también son causas de gran variabilidad de la lluvia [6,9].

Oster [9] identifica el favorecimiento de las vertientes para recibir mayor precipitación que las llanuras o valles piedemontanos, además, de la presencia de un óptimo pluviométrico, en el cual existe una relación lluvia - altitud caracterizada por el aumento de la precipitación con la altura a partir de un nivel base, hasta alcanzar un valor máximo a determinada altitud en la cual la lluvia empieza a decrecer con la misma, anotando además que esta relación es diferente para los fondos de los valles que para las laderas de los mismos. Otros aspectos importantes señalados por Oster [9] son las lluvias preorográficas, la influencia de la altura del nivel base sobre la distribución de la precipitación, la variabilidad a la escala mensual del óptimo pluviográfico entre otros.

Un elemento esencial en la explicación del óptimo pluviográfico principal en la explicación del óptimo pluviométrico es el carácter predominante convectivo de las lluvias tropicales [13], 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 son los dos factores que explican la disminución de la precipitación con la altura.

2. Datos

La información utilizada para la elaboración de los campos mensuales de precipitación está conformada por información puntual a escala mensual y diferentes mapas distribuidos provenientes de mediciones satelitales y estudios de datos asimilados.

La información puntual corresponde a registros mensuales de 2.270 estaciones dentro de la zona de estudio (5°S - 15°N y 80°O - 65°O) distribuidas principalmente en el interior del territorio colombiano. La longitud de registro de las estaciones es variable así como sus periodos de datos faltantes. En la Fig. 1 se muestra la zona de estudio, la cual incluye parte del territorio de países vecinos, y la distribución espacial de las estaciones recolectadas para este estudio. Las fuentes de las cuales se extrajo la información son:

- 607 estaciones tomadas del software HidroSIG [14] desarrollado por Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (PARH) de la Universidad Nacional sede Medellín. La información proviene de diferentes entidades y fue adquirida por el PARH a través de proyectos de investigación, principalmente por medio del proyecto de Balances Hidrológicos [15].
- 1.192 estaciones adquiridas por medio del IDEAM para el proyecto GRECIA.
- 46 estaciones de Empresas Públicas de Medellín (EPM), utilizadas en el proyecto [16].
- 45 estaciones del IDEAM, CAR y EAAB, utilizadas en el proyecto [17].
- 16 estaciones del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- 364 estaciones de The Global Historical Climatology Network (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-monthly/index.php>), necesarias para cubrir la zona de estudio correspondiente a los países vecinos.

Los mapas distribuidos están disponibles gratuitamente en la web y son producto de diversos algoritmos o modelos que emplean mediciones satelitales y puntuales. De 11 bases de datos estudiadas por medio de análisis estadísticos comparativos con respecto a la información puntual, se seleccionaron 4 bases de datos espaciales: Global Precipitation Climatology Project (GPCP) - V2 [18], National Centers for Environmental Prediction (NCEP) / National Center for Atmospheric Research (NCAR) [19], Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) [20] y Geostationary Satellite System (GOES).

El registro histórico de las imágenes GOES está disponible desde el año de 1983 a una resolución espacial de aproximadamente 10 km. Las imágenes utilizadas corresponden a la banda del infrarrojo, en la cual se mide la temperatura de brillo de la superficie o de los elementos que se interponen a esta como las nubes. Esta información gracias a un archivo de calibración puede ser procesada la temperatura y de esta manera identificar las zonas frías relacionadas con la cobertura nubosa, muy frías relacionadas con posibles eventos lluviosos y calientes que

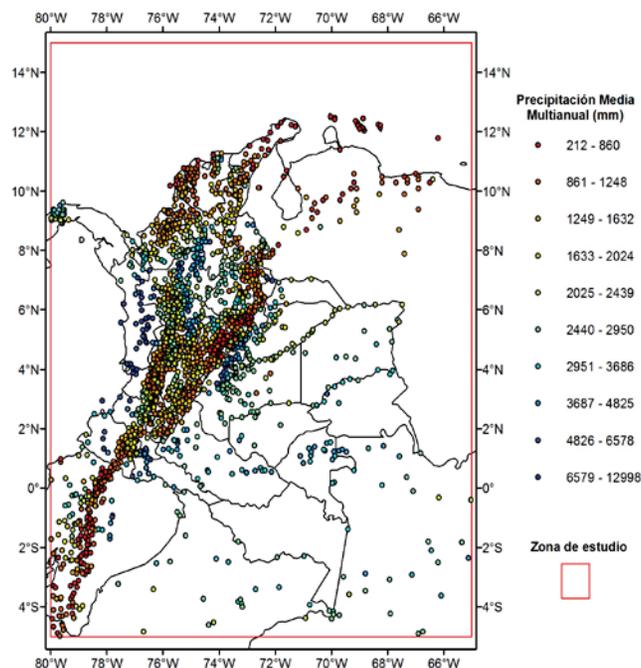


Figura 1. Zona de estudio e información puntual utilizada. Fuente: Los autores.

sugieren temperatura superficial o condiciones de cielo despejado. Ya que la información del GOES está constituida por imágenes cada 3 horas. La base de datos utilizada consiste en el promedio de las imágenes del mes, con lo cual se obtiene un promedio mensual de temperatura en cada pixel.

La topografía se estudió por medio de un Modelo Digital de Terreno (MDT) con resolución de 30 segundos de arco descargado de la página oficial de HydroSHED (<http://hydrosheds.cr.usgs.gov/>).

3. Metodología

Los mapas mensuales de precipitación son el resultado de la combinación óptima de la información espacial disponible en bases de datos y de la implementación del modelo PRISM [1] en el territorio colombiano, en ambos casos utilizando la información puntual disponible como se describe a continuación. Esta es la hipótesis fundamental a partir de la cual se formula la propuesta metodológica para la estimación de los campos mensuales de precipitación.

Se definió 5' de arco como la resolución espacial para los campos mensuales de precipitación, la cual se determinó con base en la resolución de las bases de datos disponibles, de las cuales la más fina corresponde al GOES (5' de arco aproximadamente). Resoluciones mejores a la definida representan extrapolaciones que no estarían justificadas por la información base disponible. La limitación computacional, principalmente para el modelo PRISM, también fue determinante en la resolución espacial de trabajo. El periodo de tiempo (1975 - 2006) se determinó con base en la disponibilidad de información puntual y

espacial, la cual es variable año tras año según los periodos de datos faltantes en la información puntual y la disponibilidad de las bases de datos espaciales.

Aunque la distribución espacial de la información puntual en la zona de estudio no es homogénea, por razones prácticas los campos de precipitación se estimaron a una misma resolución espacial, esperando además, que los algoritmos propuestos evidencien en los mapas de incertidumbre el efecto de la distribución espacial de la información puntual en la zona de estudio.

3.1. Mapas obtenidos a partir de las bases de datos

La información espacial disponible es comparada con las series puntuales con el fin de estimar regresiones que serán utilizados para la estimación de la precipitación en los diferentes puntos donde no se cuenta con registro pluviométrico.

El análisis correspondiente a cada una de las bases de datos espaciales consiste en comparar cada serie de precipitación puntual con la correspondiente serie de precipitación espacial obtenida del pixel en el cual está ubicada la estación de análisis. Dicha comparación consiste obtener una regresión lineal (regresión de mejor ajuste) entre ambas series que permita calcular el valor de la precipitación en el punto de análisis en el caso de que no disponer registro puntual y sí espacial. De esta manera, en cada uno de los puntos en los cuales se cuenta con registro puntual, se obtiene un valor para la pendiente m y para el intercepto b asociados al ajuste lineal, así como un estimativo del error estándar correspondiente al ajuste.

Los parámetros m y b son interpolados por medio de kriging ordinario con el fin de obtener campos continuos, los cuales permiten tener los elementos necesarios para la estimación de la precipitación en aquellos puntos en los cuales no se dispone de medición puntual. La incertidumbre al estimar los valores de precipitación por medio de una ecuación lineal queda determinada por la varianza del error en cada una de las regresiones obtenidos con la información puntual, así como por la varianza del error al interpolar los valores de la pendiente y el intercepto.

Las estaciones puntuales en las cuales el grado de asociación lineal es despreciable para un nivel de significancia del 5% no se tuvieron en cuenta para la interpolación de los parámetros m y b . El número de estaciones no tenidas en cuenta para la interpolación de los campos de parámetros por no presentar correlaciones significativas fue de 108 para el GPCP, 390 para el NCEP, 107 para el TRMM y 102 para el GOES.

El valor de la precipitación P y su error de estimación e , en determinado pixel y mes son calculados con base en las medidas de p_i disponibles y sus correspondientes valores de la varianza del error σ_i^2 . Para cada uno de los mapas estimados con los campos distribuidos de m y b correspondientes a cada una de las bases de datos espaciales se estima un campo de σ_i^2 necesario para la ponderación de los mismos y para el cálculo del error de estimación. En la interpolación de los valores de σ_i^2 se asume que la variable presenta continuidad espacial, poca variabilidad y que la

incertidumbre inherente al proceso de interpolación no es significativa comparada con los valores medidos de σ_i^2 . La interpolación de la varianza del error se hace necesaria para contar con un campo continuo que permita la integración de la información.

El valor de σ_i^2 en determinado mes y pixel de análisis, es calculado de la siguiente manera:

- En cada una de las estaciones puntuales se estima $(P_{puntual} - P_{estimada})^2$, lo cual representa una medida de la varianza del error. Estos valores son promediados en el interior del pixel de análisis para el caso en el que al interior del mismo se disponga de más de una estación puntual.
- Para los pixeles en los cuales no se disponga de información puntual, el valor de σ_i^2 es estimado por medio de interpolación empleando el método del inverso de la distancia.
- De esta manera, para cada uno de los meses y bases de datos se dispone de un campo de la varianza del error, necesario para la integración de la información y estimación de los campos mensuales de precipitación y sus correspondientes errores de estimación.

3.2. Mapas obtenidos a partir del modelo PRISM

En el planteamiento original del modelo PRISM [1] se asume que la topografía es el factor de mayor influencia sobre la variabilidad y cantidad de agua precipitada en determinada zona vía el efecto orográfico; además de existir una relación de tipo lineal entre la precipitación y la elevación. Bajo estas premisas y con la incorporación de diferentes elementos que dependen de la zona de estudio y del criterio del modelador [1] se han obteniendo buenos resultados en países como México y Estados Unidos donde la metodología ha sido ampliamente utilizada.

Partiendo de las hipótesis del método original y luego de un análisis estadístico en el cual se estudió la relación entre la precipitación y la topografía en la zona de estudio, en este trabajo se implementó el modelo en Colombia el modelo PRISM teniendo en cuenta la complejidad que impone al sistema hidrológico las características fisiográficas y tropicales fundamentalmente, siendo el óptimo pluviográfico y la alta variabilidad topográfica y pluviográfica los rasgos más relevantes.

Inicialmente se implementó el modelo PRISM estimando una regresión lineal ponderada en cada pixel según la distancia, dirección, faceta y cota del conjunto de estaciones más cercanas en el interior de la región de análisis. Como consecuencia de la limitada información puntual y su irregular distribución en el espacio, en muchos pixeles los ajustes de la regresión son muy deficientes y el valor de precipitación estimado no es coherente. Con el fin de adaptar el modelo PRISM a las características climáticas y geográficas de Colombia, así como a las limitaciones en la información y al uso de la misma de la mejor manera posible, se propone la siguiente metodología para estimar los valores mensuales de precipitación con base en sus relaciones con la topografía:

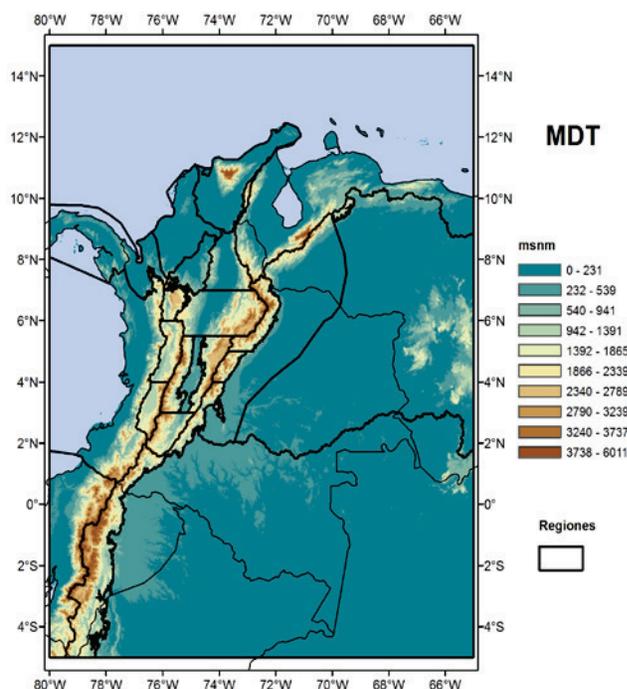


Figura 2. MDT y regiones definidas
Fuente: Los autores.

- Se definieron 22 regiones dentro de la zona de estudio (Fig. 2), la mayoría en el interior de los Andes y diferenciando cada una de las laderas de las tres cordilleras, los valles del Magdalena y el Cauca, y considerando las diferencias latitudinales por el efecto del paso de la ZCIT y la disponibilidad de información en cada uno de los meses de análisis. El trabajo [21] fue un punto de partida para la determinación de las regiones. Al considerar un mayor número de regiones se logra una mejor estimación de los campos mensuales de precipitación, sin embargo, la limitada información puntual no permitió considerar más regiones que las definidas en este trabajo. En la Fig. 2 se ilustra el MDT empleado para analizar la relación existente entre la topografía y la precipitación dentro de la zona de estudio, así como las regiones definidas para el desarrollo del modelo como se describe más adelante.
- Para cada mes y cada una de las regiones definidas se estima una regresión lineal o cuadrática según sea más apropiado entre la precipitación y la elevación correspondiente al MDT empleado. El valor de la pendiente en el ajuste permite conocer el gradiente (variación de la precipitación con la altura) característico de la región, el cual se supone constante en el interior de la misma.
- El valor del intercepto de la regresión lineal es variable en cada pixel. Este, así como la cota necesaria en la ecuación lineal son estimados según una función de ponderación, IDW por su sencillez y rapidez computacional, aplicada a las diferencias relativas de cotas y a los valores de precipitación de las

estaciones más cercanas.

- Con el fin de estimar la incertidumbre al emplear el modelo, para cada estación puntual (pixel correspondiente) se estima el valor de la precipitación empleando el modelo y removiendo la estación de análisis. De esta manera en cada uno de los puntos en los cuales se cuenta con información puntual se calcula la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo, lo cual representa una evaluación del modelo para la región y mes de análisis en cada uno de los puntos en los cuales se dispone de información puntual.
- La varianza del error al evaluar el modelo en cada estación puntual es estimada como $\sigma_{ev-PRISM}^2 = (P_{puntual} - P_{estimada})^2$. Para cada pixel esta se calcula como un promedio en el caso de disponer de más de una estación puntual dentro del mismo o es estimada interpolando empleando IDW, en el caso de que en el interior del pixel no se cuente con información puntual en el mes de análisis.
- El campo distribuido para la varianza del error obtenido según el numeral anterior representa la calidad del modelo evaluado en los puntos en los cuales se dispone de información puntual, más no una medida de la incertidumbre en dichos puntos. Para los pixeles en los cuales se cuenta con información puntual, la varianza del error, asimilada como una medida de la incertidumbre del modelo al emplear toda la información disponible y necesaria para la integración de la información, es calculada como $\sigma_{PRISM}^2 = (P_{puntual} - P_{estimada})^2$ sin remover estaciones como en el caso de la evaluación del modelo.
- Para los pixeles que no cuentan con información puntual que permita el cálculo de σ_{PRISM}^2 , esta es calculada como el producto entre el campo de $\sigma_{ev-PRISM}^2$ y un campo de ponderación con valores entre $\sigma_{PRISM}^2 / \sigma_{ev-PRISM}^2$ y 1. El campo de ponderación es construido con base en un modelo de variación lineal con la distancia, con efecto pepita igual a $\sigma_{PRISM}^2 / \sigma_{ev-PRISM}^2$ y valor máximo de 1 correspondiente al pixel sin información puntual más alejado en determinada región con respecto a aquellos en los cuales se dispone de información puntual y por ende de un valor para σ_{PRISM}^2 . Esta metodología hace uso entonces de un campo de validación del modelo y de un campo de ponderación construido con base en un variograma lineal.

3.3. Integración de los mapas obtenidos a partir de las bases de datos y del modelo PRISM

La estimación de la precipitación en cada pixel involucra la información de los diferentes campos construidos y sus correspondientes campos de varianza del error, lo cual permite establecer un factor de ponderación asociado. Los campos de precipitación empleados corresponden a cada

una de las bases de datos empleadas y los estimados con el PRISM, con el cual se tiene en cuenta las relaciones de la precipitación con la topografía en el territorio colombiano.

Con base en los campos mensuales de precipitación estimados para cada base de datos y según el modelo PRISM, se busca hallar la mejor estimación para la precipitación en determinado punto o pixel dentro de la zona de estudio. A modo de ejemplo se muestran las ecuaciones a utilizar en caso de que en la estimación intervengan dos bases de datos con su respectiva varianza en el error y valor de precipitación:

$$\hat{P} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} P_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} P_2 \quad (1)$$

$$E\{e^2\} = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2)$$

4. Resultados

Al integrar toda la información, los factores de ponderación correspondientes a la metodología del PRISM fueron los predominantes debido a que la varianza del error según esta metodología es de menor magnitud con respecto a las demás bases de datos en la mayor parte de la zona de estudio. Sin embargo, la consideración de las demás bases de datos es de gran importancia principalmente en las zonas donde el PRISM presenta deficiencias o en los meses en los cuales la información puntual es muy reducida.

Los mapas estimados a partir de las bases de datos presentaron errores significativos en comparación con la metodología PRISM debido a que se agrupa mayor cantidad de fuentes de incertidumbre. Primero, la calidad de la información espacial, lo cual se refleja en bondad en los ajustes lineales obtenidos con la información puntual. Segundo, al emplear mapas estáticos o invariantes en el tiempo no se permite capturar toda la variabilidad que exhibe el fenómeno. Tercero, la incertidumbre al interpolar los valores de m y b . Con el fin de hacer un mejor uso de la información se deben proponer metodologías dinámicas que agrupen toda la información, mediante la estimación de campos de parámetros variantes en el tiempo que permitan la desagregación de la información espacial mes a mes.

El mapa de precipitación media anual calculado con base en los mapas mensuales estimados en el periodo 1975–2006 (Fig. 3) presenta las principales características de la distribución espacial de la lluvia en el territorio colombiano. La gran variabilidad de la precipitación en pequeñas distancias determinada por fuertes gradientes inducidos por la topografía, principalmente en la llanura Pacífica y el piedemonte llanero, y en general por el efecto de la fisiografía, la cual caracteriza las cantidades anuales de precipitación distribuidas según las vertientes y valles, son aspectos que se pueden identificar en el campo distribuido estimado.

Los valores mínimos de precipitación media anual (250 - 800 mm/año) son característicos de regiones por encima de los 10° latitud norte, que corresponde a la península de la

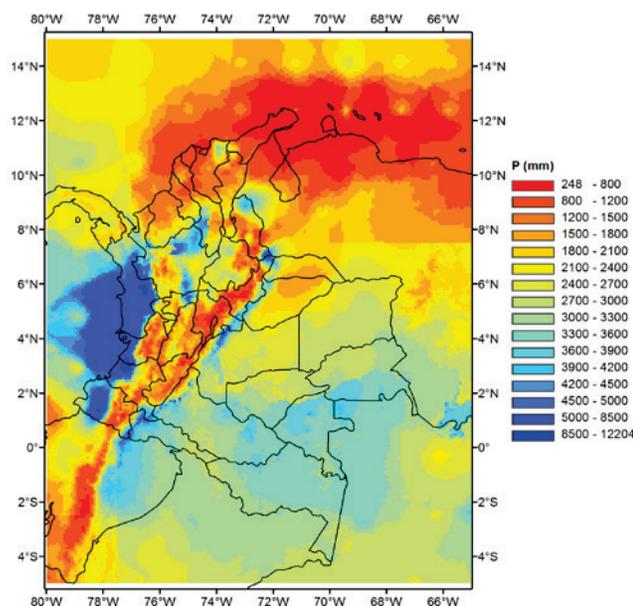


Figura 3. Mapa de precipitación media multianual
Fuente: Los autores.

Guajira y parte del territorio venezolano. La zona más crítica del departamento de la Guajira es la comprendida entre los 11,3 y 12,4° N, donde se encuentran zonas con valores entre los 250 y 500 mm/año. Valores de precipitación entre los 800 y 1.800 mm/año se presentan fundamentalmente en el norte de Venezuela, la región Caribe colombiana, las zonas más elevadas de la Cordillera de los Andes, el oeste del departamento de Antioquia y norte y sur de los departamentos de Casanare y Arauca respectivamente.

Panamá, El sur occidente de Ecuador, el sur occidente y sur oriente de la región amazónica, la mayor parte de la cuenca del Orinoco y gran parte de los valles interandinos presentan valores medios de precipitación comprendidos entre los 1.800 y 3.000 mm/año. Valores de precipitación entre 3.000 y 4.000 mm/año son los característicos de la región Amazónica. El piedemonte llanero se caracteriza por presentar altas cantidades de precipitación, con valores entre 3.000 y máximos del orden de 7.000 mm/año alrededor de los 4,3° N. El piedemonte sobre la cuenca del amazonas, el norte de Norte de Santander y la frontera entre Venezuela y los departamentos de Norte de Santander, Boyacá y Arauca también presentan cantidades significativas de precipitación, comprendidas entre los 3.000 y 5.000 mm/año.

En los valles del Cauca y el Magdalena se alcanzan grandes cantidades de precipitación, hasta de 6.700 mm/año en el occidente del departamento de Caldas (valle del Magdalena) y de 6.000 mm/año en el norte del departamento de Antioquia sobre los 7,1° N. Antioquia presenta un significativo rango de variación de sus valores medios anuales de precipitación, los cuales oscilan de 1.000 a valores máximos de 7.000 mm/año en el occidente donde limita con el departamento del Chocó.

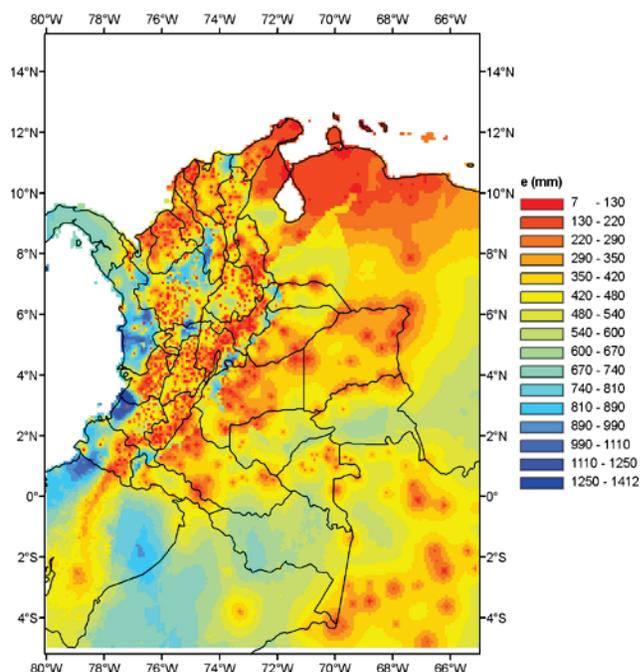


Figura 4. Error porcentual
Fuente: Los autores.

La región Pacífica colombiana es la región más lluviosa con valores mínimos de 3.000 mm/año en el norte del departamento del Chocó. El resto de la región se caracteriza por presentar valores de precipitación por encima de los 6.000 mm/año. Hacia los $-76,55^{\circ}$ O, $5,8^{\circ}$ N sobre el departamento del Chocó se presentan valores de precipitación de 10.400 mm/año, en el departamento del Cauca hacia los $-77,2^{\circ}$ O, $2,95^{\circ}$ N valores máximos de 12.204 mm/año, el cual es el valor máximo de precipitación sobre toda la zona de estudio y uno de los puntos más lluviosos del planeta.

En la Fig. 4 se muestra el error porcentual calculado con base en el mapa de precipitación media anual (Fig. 3) y su incertidumbre, estimada como un promedio anual de los mapas de incertidumbre mensuales. En este se aprecian los puntos en los cuales la incertidumbre es mínima, correspondientes a disponibilidad de información puntual en el la mayor parte del periodo de tiempo considerado. En Panamá, Ecuador, Perú y la Amazonía colombiana los errores son significativos como consecuencia de la limitada información en dichas regiones. Otras zonas críticas se encuentran en la península de la Guajira y a lo largo de la cordillera de los Andes, donde la variabilidad de la precipitación como consecuencia de factores locales no es capturada por las bases de datos utilizadas ni por la metodología empleada. En general los errores son menores del 25% en la mayor parte de la zona de estudio.

En general el campo estimado en este estudio conserva las mismas características de los presentados en estudios anteriores, diferenciándose de estos en el nivel de detalle como consecuencia de una mayor disponibilidad de información de diferentes tipos.

En diferentes trabajos se han estimado mapas de

precipitación media multianual, lo cual ha permitido el estudio de la variabilidad espacial de dicha variable y de los balances hidrológicos a largo plazo. En este trabajo no solo se ha obtenido dicho mapa sino la serie de tiempo histórica de mapas mensuales en el periodo 1975-2006, lo cual representa una gran herramienta para el estudio de la variabilidad espacial y temporal del recurso hídrico en el país. Los trabajos futuros en esta dirección deben estar enfocados en el análisis de los mapas obtenidos y en perfeccionar los mismos por medio de una optimización de los modelos de correlación entre la información espacial, puntual y topográfica, buscando a su vez una mejor resolución espacial de los mapas resultantes.

5. Conclusiones

En esta investigación se propone y desarrolla una metodología para la reconstrucción de los campos mensuales de precipitación en Colombia, a una resolución espacial de 5 minutos de arco en el periodo 1975-2006, a partir de la integración de la información puntual y espacial disponible.

Los mapas de precipitación obtenidos fueron el resultado de una combinación óptima entre los estimados a partir de bases de datos de campos distribuidos de precipitación y los estimados a partir de la implementación del modelo PRISM. Dicha combinación o ponderación se basó en los campos de varianza del error, lo cual a su vez permitió la estimación de los correspondientes mapas históricos de incertidumbre.

Con base en la estimación de los mapas mensuales de precipitación para cada base de datos y para el modelo PRISM, y en los correspondientes campos de la varianza del error, se obtuvieron los mapas históricos mediante la integración óptima de ambas metodologías, además de los correspondientes campos de incertidumbre.

Para el caso del modelo PRISM, se desarrolló un modelo de interpolación empleando la información puntual y la topografía partiendo de la hipótesis fundamental del modelo PRISM, la cual consiste en considerar el efecto topográfico como el principal factor para explicar la variabilidad espacial de la precipitación. El desarrollo de este modelo de interpolación se basó en representar adecuadamente el óptimo pluviográfico, la variabilidad interestacional y la cantidad de agua precipitada según la información puntual.

La metodología llevada a cabo permitió reconstruir los campos históricos de precipitación obteniendo resultados muy coherentes y considerando la topografía como un factor fundamental para explicar la variabilidad de la precipitación en Colombia.

La base de datos de precipitación estimada se convierte en una importante fuente de consulta y abre las puertas para futuros trabajos de investigación relacionados con el entendimiento de la hidrología colombiana y en general de la distribución espacio temporal del recurso hídrico en Colombia.

Referencias

- [1] Daly, C., Neilson, R.P. and Phillips, D.L., A statistical - Topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33, pp. 140-158, 1994.

- [2] Bjerknes, J., Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *J. Mon. Weather*, 97, pp. 163-172, 1969.
- [3] Palacio, C. y Jimenez, J.F., *Climatología urbana y de montaña*. DYNA, 79 (175E), pp. 61-69, 2012.
- [4] Hurtado, A.F., Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano, MSc Tesis, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia, 2009.
- [5] Poveda, G., Mesa, O.J., Agudelo, P.A., Álvarez, J.F., Arias, P.A., Mejía, J.F., Moreno, H.A., Salazar, L.F., Toro, V.G. y Vieira, S.A. Diagnóstico cuantitativo del ciclo diario de la precipitación en Colombia mediante información satelital y en tierra. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2003.
- [6] Trojer, H., Fundamentos para una zonificación meteorológica y climatológica del trópico y especialmente de Colombia. *Cenicafé*, X (8), pp. 287 – 371, 1959.
- [7] Snow, J. W., The climate of northern South America. *Climates of Central and South America*, in Schwerdtfeger, W., Ed., pp. 295 – 403, Elsevier, Amsterdam, 1976.
- [8] Mesa, O.J., Poveda, G. y Carvajal, L.F., Introducción al clima de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia, 1997.
- [9] Oster, R., Las precipitaciones de Colombia. *Colombia Geográfica*, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, VI (2), 147 P., 1979.
- [10] Mejía, F., Mesa, O., Poveda, P., Vélez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., Barco, J., Cuartas, A., Montoya, M., y Botero, B., Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. DYNA, 127, pp. 7-24, 1999.
- [11] Weischet, W., Klimatologische Regel zur Vertikalverteilung der Niederschläge in Tropengebirgen, *Die Erde* 100 Jg. H., 2-4, pp. 287-310, 1969.
- [12] Poveda, G., La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cien.*, 28 (107), pp. 201-222, 2004.
- [13] Hastenrath, S., *Climate dynamics of the tropics*. Boston: Kluwer Academic Publ., 1991.
- [14] Poveda, G., Mesa, O.J., Vélez, J.I., Mantilla, R.I., Ramírez, J.M., Hernández, O.O., Borja, A.F. y Urzola, J.A., *HidroSIG: An interactive digital atlas of Colombia's hydroclimatology*. *Journal of Hydroinformatics*, 9(2), pp. 145-156, 2007.
- [15] Vélez, J.I., Poveda, G. y Mesa, O.J., Balances hidrológicos de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia, 2000.
- [16] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, AMVA., *Diseño y puesta en marcha de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá en jurisdicción del AMVA*. UPB, UDEA, UNAL, UDEM, 2008.
- [17] EMGESA - Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, *Reconstrucción de las series mensuales de caudal natural para la cuenca del río Bogotá*, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia, 2007.
- [18] Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin., The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, 4, pp. 1147-1167, 2003.
- [19] Kalnay et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, pp. 437-470, 1996.
- [20] National Aeronautics and Space Administration - NASA, Goddard Space Flight Center. 2007 Tropical Rainfall Measuring Mission Science Data and Information System. Interface Control Specification Between the TSDIS and the TSDIS Science User (TSU), vol. 4; File Specifications for TRMM Products-Levels 2&3. 2007. http://disc.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM_DP/01_Data_Products/02_Gridded/07_Monthly_Other_Data_Source_3B_43/.
- [21] Jaramillo, R.A. and Chaves, C.B., Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé* 51(2), pp. 102-113, 2000.

F. Hurtado-Montoya, Ing. Civil en 2006 y MSc. de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Esp. en Turbomáquinas de la Universidad Eafit en 2014. Del año 2006 al 2009 trabajó como auxiliar de investigación y docente de Cálculo Integral en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Desde el año 2009 trabaja en HMV Ingenieros como ingeniero especialista en las áreas de hidráulica e hidrología y actualmente también es docente de cátedra en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid en la Facultad de Ingeniería.
ORCID: 0000-0003-4928-3227

O. J. Mesa-Sánchez, Ing. Civil de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia en 1978, MSc. En 1982 y PhD. En 1985 de la Universidad de Mississippi, Estados Unidos; Ingeniero de diseño en Integral de 1978 a 1983; Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia desde 1985. Ha sido Decano de la Facultad, Vicerrector de la Sede de Medellín, Vicerrector de Investigación de la Universidad, Director del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
ORCID: 0000-0001-8717-3489