

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN
SOBRE LA CIUDAD DE MANIZALES**

Blanca Adriana Botero Hernández¹, Ana Cristina Cortés Cortés²

¹Profesor Asistente Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

²Estudiante Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Carrea 27 No. 64-60, Manizales, Colombia.

baboteroh@unal.edu.co, accortesc@unal.edu.co

RESUMEN:

En este artículo se presenta el análisis de la variabilidad espacial de la precipitación en términos de magnitud e intensidad, a partir de los datos registrados en la red de monitoreo meteorológico de la ciudad de Manizales. Mediante un análisis de validación cruzada, se ha determinado cual es el método más apropiado para la interpolación espacial de la precipitación sobre la ciudad de Manizales. Se ha obtenido la varianza respectiva de los campos de intensidad y magnitud y el coeficiente de variación promedio de los campos de intensidad máxima en cinco minutos. Adicionalmente se realizó un análisis de componentes principales. Los resultados de estos análisis demuestran que para el área de la ciudad de Manizales, la Red de estaciones es adecuada y destaca la presencia de zonas donde se podría reforzar la red. Del análisis de variabilidad espacial, se identifica un patrón de variabilidad homogénea, para las series de duración 1 hora y 24 horas, en la zona centro de la ciudad. Para las escalas menores, no se identificaron zonas de variabilidad homogénea, demostrando la alta variabilidad espacial de los campos de precipitación, en términos de la intensidad, sobre la ciudad de Manizales.

ABSTRACT:

This paper shows the analysis of the spatial variability of precipitation fields over Manizales city, using the data series from its meteorological monitoring network. With a cross-validation analysis, it has been determined the most appropriate method for the spatial interpolation of rainfall on the city of Manizales. It has been obtained the variance of the intensity and magnitude fields and the coefficient of variation average of the maps of maximum intensity in five minutes. In addition a principal components analysis (PCA) was done. Results show that for the size of Manizales city, the monitoring network works appropriately, although there are some areas where it could be intensified. For the mean intensity of 1 and 24 hours, a pattern of homogenous variability was identified at the central zone of the study area. For smaller scales, areas of homogeneous variability were not identified, showing the high spatial variability of rainfall intensity fields for the city of Manizales.

PALABRAS CLAVES: (*1^{era} hoja*)

Variabilidad Espacial, Campos de Precipitación, Interpolación Espacial.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Manizales, Colombia, está localizada en el ramal central de la cordillera de los Andes, a una altitud promedio de 2150 m.s.n.m. Presenta un clima característico ecuatorial de montaña, con un régimen de lluvia bimodal y un promedio anual de precipitación alrededor de los 2000 mm. Su ubicación espacial coincide con la zona más amenazada en el país y está sometida principalmente a las amenazas de terremoto, deslizamientos, erupciones volcánicas, y en menor medida inundaciones (Mejía et al, 2005). Las condiciones singulares de la ciudad, han propiciado el interés de algunas instituciones en desarrollar investigaciones multidisciplinarias relacionadas con la ocurrencia de desastres naturales en la ciudad. Actualmente, Manizales cuenta con una red de monitoreo climático conformada por 11 estaciones, ubicadas sobre la ciudad, las cuales se han venido instalando a lo largo de los últimos diez años. La información es recolectada cada cinco minutos sobre ocho variables: Temperatura, Precipitación, Radiación Solar, Humedad Relativa, Velocidad y Dirección del Viento, Presión Barométrica y Evapotranspiración (Mejía y Pachón, 2008).

El 14 de Noviembre de 2008, ocurrió uno de los eventos de lluvia más extremos de los últimos años registrados en las estaciones de la red. Durante 3 días se registraron aproximadamente 200 mm de lluvia (IDEA, 2008). En esa ocasión, a la ocurrencia de deslizamientos de laderas se sumó el flujo de lodos en los cauces y se presentaron fallas en las obras de infraestructura hidráulica, daños a viviendas por su cercanía a los cauces, y obstrucción y daños en la bocatoma del acueducto municipal, entre otras (Alcaldía, 2008). Los daños ocasionados por este episodio y por otros de similares características, han dejado de manifiesto el vacío en la información y en la metodología actual para el diseño de las obras hidráulicas de demanda y la falta de entendimiento que aun se tiene del fenómeno en sí, a escala urbana.

Actualmente, para obtener las lluvias de diseño del área de Manizales se utiliza la curva IDF de la estación Agronomía (propiedad de Cenicafé) ubicada en la parte occidental de la ciudad, y no se tiene en cuenta la variabilidad espacial del fenómeno, que en el caso de Manizales es tal, que en los últimos años de registro de la red se han presentado diferencias en la precipitación anual de hasta el 50% entre la zona de Chipre y la zona de La Enea (Mejía 2008).

En la última década, la comunidad científica ha dedicado grandes esfuerzos a estudiar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación a diferentes escalas (Buytaert et al, 2006; Rodríguez et al 2008; Obregón et al , 2008), ya que este fenómeno es una importante pieza dentro de los modelos hidrológicos. En el caso de Manizales, es de igual forma, la información de entrada para el sistema actual de alerta temprana por deslizamientos.

En este estudio se propone, a partir de los datos registrados en la red de monitoreo de la ciudad de Manizales, analizar la variabilidad espacial de la precipitación en términos de su magnitud e intensidad. De este análisis se pretende establecer si la distribución espacial de la red es adecuada y si es posible identificar algún patrón de variabilidad homogénea que permita en un futuro mejorar las herramientas de diseño actual que se tienen para la ciudad de Manizales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio, corresponde a la zona urbana del municipio de Manizales, donde están emplazadas las estaciones meteorológicas que conforman la red de estaciones de la ciudad (ver Figura 1).

El primer paso, antes de proceder con el estudio en sí de la variabilidad espacial, es determinar cuál es el mejor método de interpolación para la zona de estudio, mediante el método de la validación cruzada. Se utilizaron los métodos de interpolación disponibles en ArcGIS: Kriging Ordinario (KO), Inverso de la distancia (IDW) y Curvatura mínima (Spline). Para realizar esta validación se escogieron los 20 eventos que registraron la mayor intensidad (mm/hr) en cinco minutos, durante el 2008, el cuál fue un año especialmente húmedo (Mejía 2008) y se incluyó el evento del 14 de

noviembre, teniendo en total 21 eventos. El valor de la magnitud del evento para todas las estaciones, se obtuvo utilizando la misma ventana de duración del evento en la estación donde se registró la máxima intensidad en cinco minutos. De esta forma se garantiza que la magnitud real y la interpolada corresponden al mismo intervalo de tiempo. En la tabla 1, se presenta un cuadro resumen de estos 21 eventos, el nombre del evento contiene información sobre el evento, así el primero de la tabla (03301355) indica que ocurrió el 30 de marzo y que inició a las 13:55. Nótese que el valor de intensidad máxima para el evento del 14 de noviembre es el más bajo, sin embargo este evento tuvo tantas repercusiones en la ciudad debido a su gran duración, en la estación Yarumos se llegó a registrar alrededor de 11 horas de lluvia continua (un evento) con una lámina total de 142 mm.

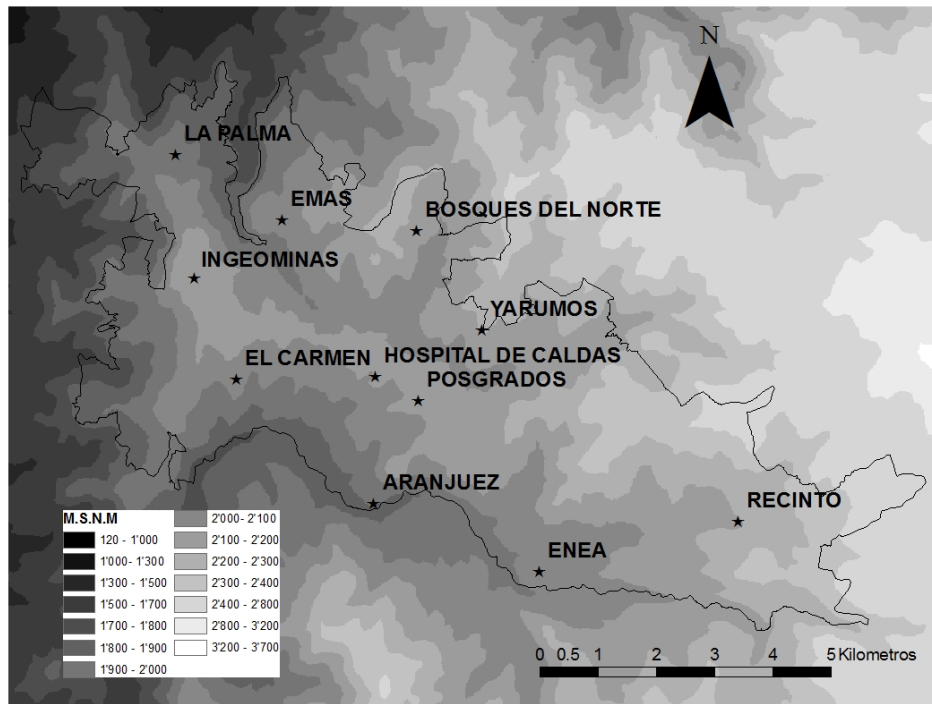


Figura 1.- Perímetro Urbano de la ciudad de Manizales y localización de las estaciones meteorológicas

Tabla 1.- Eventos utilizados para la validación cruzada

Evento	Magnitud máxima por evento (mm)	Estación donde se registra la máxima magnitud	Intensidad Máxima en cinco minutos (mm/hr)	Estación donde se registra la máxima intensidad
E07 (03301355)	34.04	Yarumos	131.04	Yarumos
E12 (04211610)	29.2	Emas	115.2	Hospital de Caldas
E20 (11301600)	17.53	El Carmen	108	Hospital de Caldas
E13 (04251825)	15.4	La Palma	103.2	La Palma
E15 (09141620)	15	Emas	103.2	Emas
E10 (04111735)	38.35	El Carmen	100.68	Ingeominas
E08 (03301405)	30.23	El Carmen	100.56	El Carmen
E18 (11151535)	42.42	Ingeominas	97.56	Ingeominas
E11 (04121630)	33.4	Emas	93.6	Emas
E05 (03111640)	32.6	La Palma	91.2	La Palma
E01 (02010130)	31.24	Posgrados	88.44	Posgrados
E06 (03111910)	29.21	Ingeominas	88.44	Ingeominas
E03 (02280115)	39.63	El Carmen	85.44	Ingeominas
E19 (11180840)	52.33	El Carmen	85.44	El Carmen

E02 (02280055)	40.14	El Carmen	85.32	El Carmen
E14 (08020105)	51.31	El Carmen	85.32	Ingeominas
E09 (04070015)	37.6	Ingeominas	82.44	Ingeominas
E16 (10091945)	68.07	Ingeominas	82.32	Ingeominas
E21 (11302240)	50.55	El Carmen	82.32	El Carmen
E04 (03041340)	27.94	El Carmen	82.2	El Carmen
E17 (11141605)	37.8	Aranjuez	81.6	Aranjuez

Para realizar la validación cruzada, se interpoló cada evento por cada uno de los métodos, incluyendo los datos registrados en 10 de las 11 estaciones de la red, y comparando el dato interpolado en el sitio de la estación no incluida, con el dato real. Para cada evento, por cada método se tienen 11 campos interpolados, lo que representa un total de 220 mapas por cada método de interpolación, para obtener la raíz del error cuadrático medio, según la expresión de la ecuación 1.

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{int_i} - x_{real_i})^2}{N}} \quad [1]$$

donde N es el número de mapas total (220), x_{int_i} es el valor de intensidad o magnitud interpolado por el método evaluado y x_{real_i} es el valor medido de la variable en ese sitio.

El análisis de variabilidad se aborda desde dos perspectivas. La primera busca establecer el rango de variabilidad en el que se encuentran los campos de precipitación en la ciudad, mediante el Coeficiente de Variación promedio de los mismos y mediante la identificación de las zonas de la ciudad donde se presenta la mayor variabilidad en intensidad máxima y magnitud y el orden de la misma. Los campos de magnitud e intensidad máxima en cinco minutos, son interpolados por el método que presenta el menor error. Una vez se tiene cada uno de estos campos se obtiene el valor del Coeficiente de Variación de cada uno de ellos y el promedio. A partir de estos campos, también se obtiene el mapa de varianza total. Para realizar este análisis se utilizaron 75 eventos de precipitación ocurridos en el año 2008. Inicialmente se escogieron todo aquellos eventos que pudieran ser considerados como fuertes, con intensidades medias mayores a 7.7 mm/h (Linsley et al 1977), pero ante la gran cantidad de eventos resultantes, se decide utilizar una muestra más depurada y se establece un límite mayor, igual a 15 mm/hr.

El segundo enfoque en el análisis de variabilidad, es mediante el uso del método de componentes principales. Esta herramienta permite reducir la dimensionalidad del conjunto de datos (Pla, 1986), entendiendo por dimensionalidad cada una de las series de tiempo. En nuestro caso, se tiene una serie por estación, y aunque 11 no es un grupo grande de series, el objetivo era identificar sobre Manizales zonas de variabilidad homogénea, que permitan en un futuro la construcción de curvas IDF zonales, que respondan a los patrones de distribución de lluvia espacial identificados para la ciudad. Para el análisis de Componentes principales se utilizaron las series (continuas) de lluvia de duración 5, 15, 30 minutos, 1 hora y 24 horas, registradas en las 11 estaciones durante el 2008.

RESULTADOS

Los errores de cada uno de los métodos de interpolación, para la magnitud e intensidad máxima en cinco minutos, obtenidos por el método de la validación cruzada se presentan en la Tabla 2. Estos errores son bajos para los tres métodos, ratificando que la densidad de la red es adecuada. Según Paturel et al, (1986) y Torres (2004), para el área de Manizales (60,94 km²) el número de pluviógrafos en función del área de la cuenca debería ser de 17, sin embargo la densidad con la que se cuenta actualmente, de 11 estaciones, resulta ser la red urbana más densa del país (Mejía, 2008). La diferencia entre KO y el método IDW afirma un resultado desde antes esperado, y es que ante una densidad de estaciones como la que se tiene sobre la ciudad de Manizales, es igualmente válido

utilizar el método del IDW, el cual es más sencillo desde el punto de vista matemático. Los errores en la intensidad son mayores que para la magnitud como era de esperarse, pues esta presenta una mayor variabilidad y por lo tanto será más difícil de predecir correctamente.

Tabla 2.- Errores obtenidos para los métodos de interpolación analizados

Método de Interpolación	Error (mm) Magnitud	Error (mm/hr) Intensidad Máxima en cinco minutos
KO	9.38	30.85
IDW	11.79	31.81
Spline	9.57	34.80

A partir de los campos interpolados con el método de K. O, se obtuvieron los errores de interpolación para cada una de las estaciones, los cuales se presentan en la Figura 2. De esta figura se observa que para la magnitud y la intensidad máxima en cinco minutos, los mayores errores se cometen si se interpola sin tener en cuenta los datos de las estaciones Ingeominas, La palma, El Carmen y Yarumos. Este error es un primer indicador de las zonas hacia las cuales se deberían dirigir los esfuerzos en aumentar la cobertura de estaciones, o en un caso más dramático, las estaciones cuyo fallo ocasionaría mayores errores en la estimación areal de la lluvia.

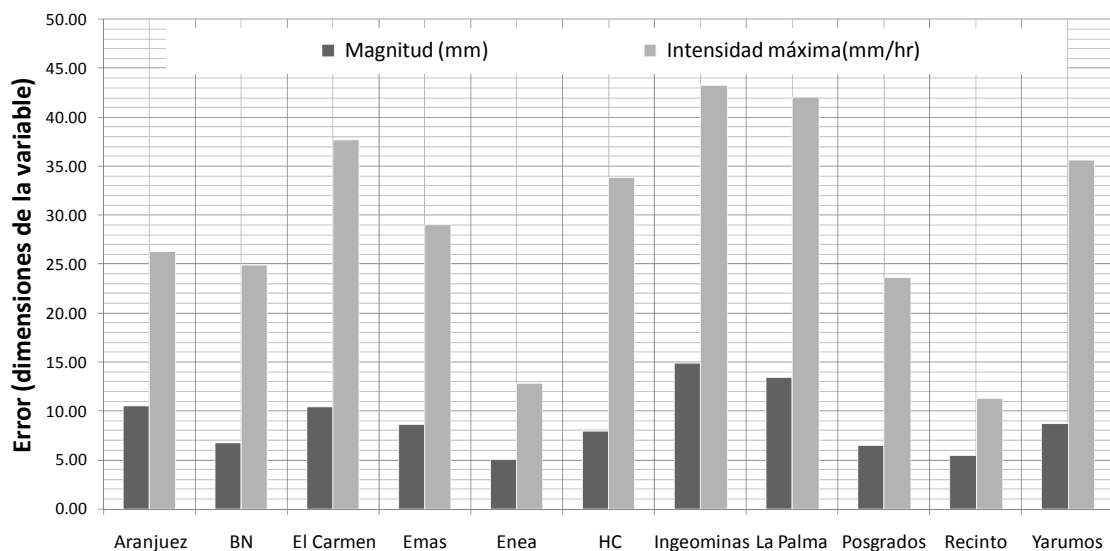


Figura 2.- Error en la interpolación por el método de K. O por estaciones

Variabilidad espacial de los campos de intensidad y magnitud:

Según el mapa de varianza (Figura 4) para las intensidades máximas en cinco minutos (mm/hr) obtenida a partir de los 75 campos interpolados, la mayor varianza se presenta concentrada alrededor de la zonas occidental y nor-occidental, con valores máximos de 588 (mm/hr)^2 , asociada a las estaciones Ingeominas y el Carmen y la menor con valores de 50 (mm/hr)^2 en la zona sur asociada con la estación Enea. La zona de mayor varianza, coincide con la zona donde se tienen registrados los mayores valores de intensidad en cinco minutos y la zona de menor, a su vez con una estación en donde se presentan valores bajos (comparados con el resto de estaciones). La varianza para la magnitud, muestra el mismo comportamiento que para la intensidad máxima en cinco minutos, aunque las zonas de máximos y mínimos están más concentradas aún alrededor de las estaciones mencionadas anteriormente. Los mayores valores de magnitud también se observan en las estaciones de esta zona. Por lo tanto, en esta zona de la ciudad, se podría decir que por evento, llueve más y con mayor intensidad, y a su vez presenta un comportamiento más variable.

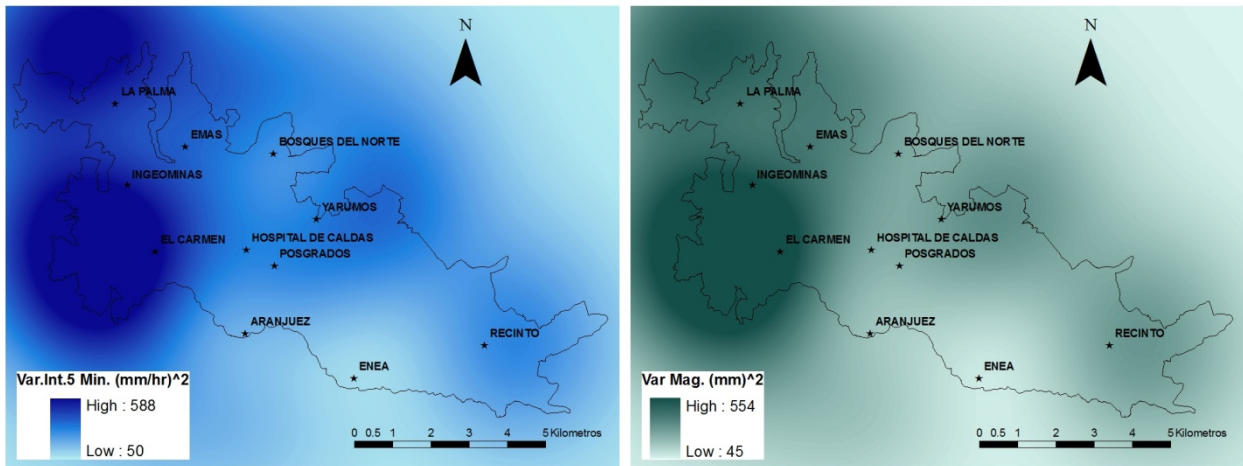


Figura 4.- Distribución espacial de la Varianza total para los campos de Intensidad máxima en 5 minutos (izquierda) y de Magnitud (derecha) sobre la ciudad de Manizales.

Los coeficientes de variación promedio de los campos de intensidad máxima en 5 minutos y de magnitud son de 172% y 107 % respectivamente indicando una alta variabilidad.

Análisis de Componentes Principales:

Respecto a los resultados obtenidos del análisis de componentes principales, se observa dependencia de la escala temporal de las series (Figuras 5 y 6).

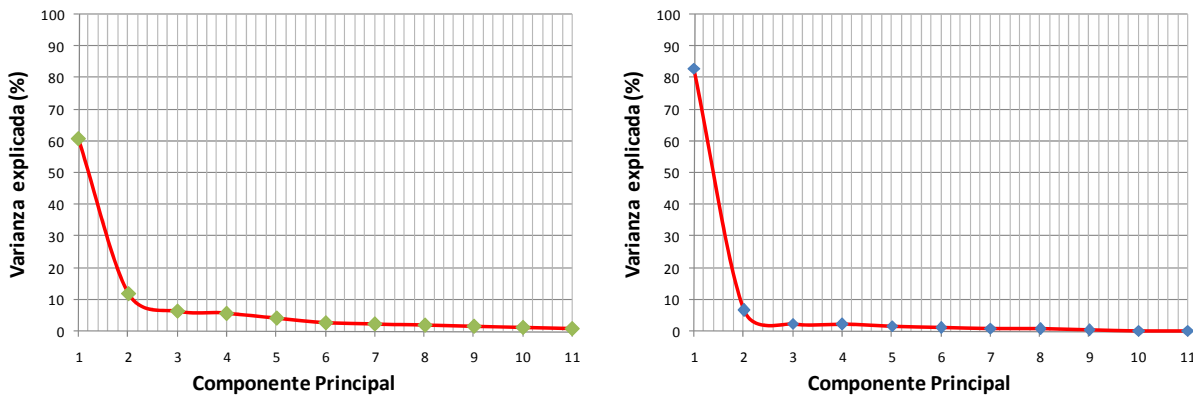


Figura 5.- Varianza explicada por cada uno de los componentes principales, para las series de lluvia de duración 1 hora (izquierda) y 24 horas (derecha).

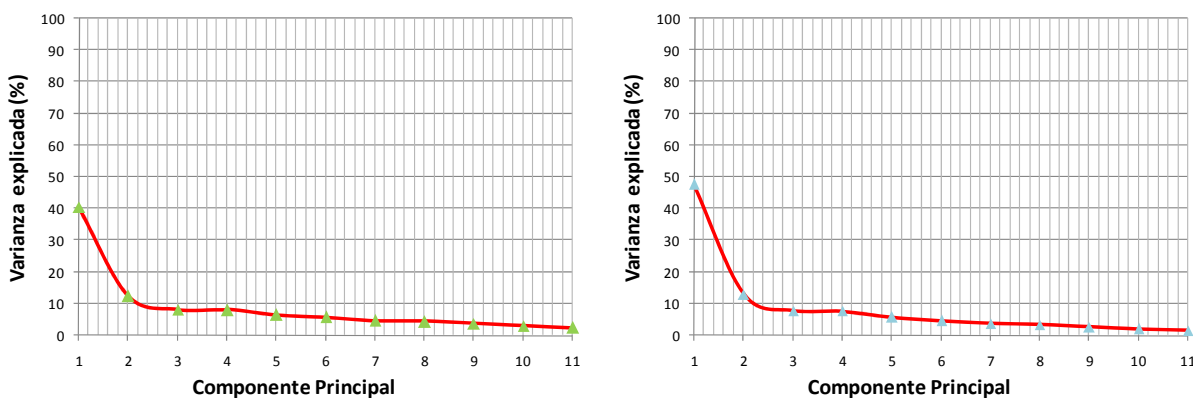


Figura 6.- Varianza explicada por cada uno de los componentes principales, para las series de lluvia de duración 5 minutos (izquierda) y 15 minutos (derecha).

La mayor parte de la varianza es explicada por las tres primeras componentes, para las series de lluvia de duración 24 horas con un 92% y 1 hora con 79% (Figura 5). A medida que la escala temporal disminuye, se observa una mayor distribución de la varianza a esas escalas, es decir, para las series de lluvia de duración 5 minutos, es necesario recurrir a los primeros 6 componentes para explicar el 80% de la varianza (Figura 6.)

Al obtener la correlación de las componentes principales con cada una de las series se observan valores altos de correlación entre 0.8 y 0.95 para las series de duración 24 horas y la primera componente principal. Esta alta correlación se identifica en su mayoría en las estaciones ubicadas hacia la zona central, tanto al norte como al sur (Ver Figura 7)

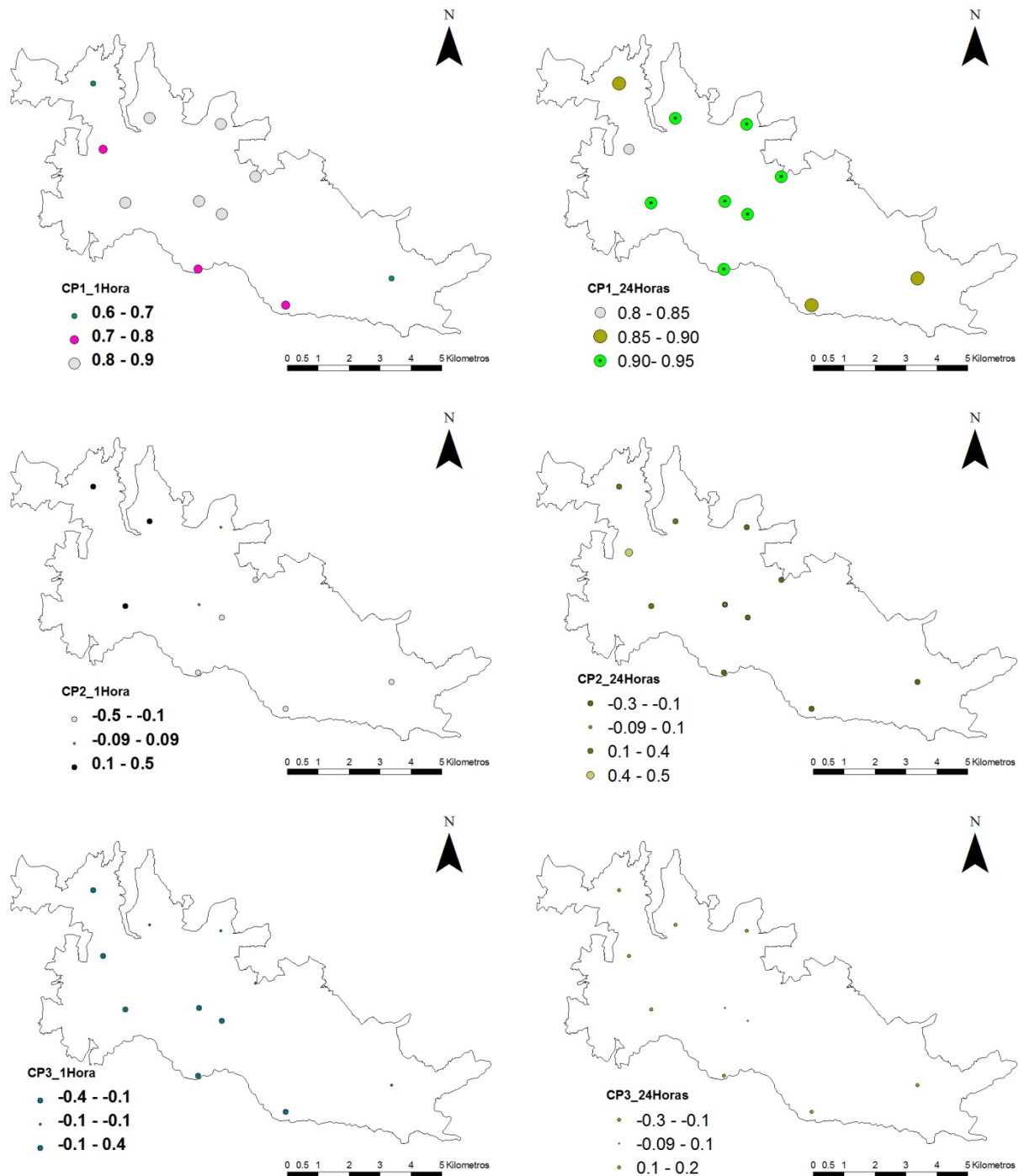


Figura 7.- Correlación entre las Componentes Principales 1, 2 y 3 (en la primera, segunda y tercera fila respectivamente) y las series de lluvia de duración 1 hora (Izquierda) y 24 horas (derecha)

Para las series de duración 1 hora y la primera componente principal también se observan valores altos de correlación del orden de 0.8. Para las componentes 2 y 3, las correlaciones con las series de escalas mayores (1 y 24 horas) son bajas y negativas del orden de 0.5. Para las escalas menores (5, 15 y 30 minutos) las correlaciones de la componente 1 son mucho menores, aunque se observa que se presentan valores por encima de 0.7 (Ver Figura 8), con las series de la zona centro de la ciudad (estaciones Hospital de Caldas y Posgrados).

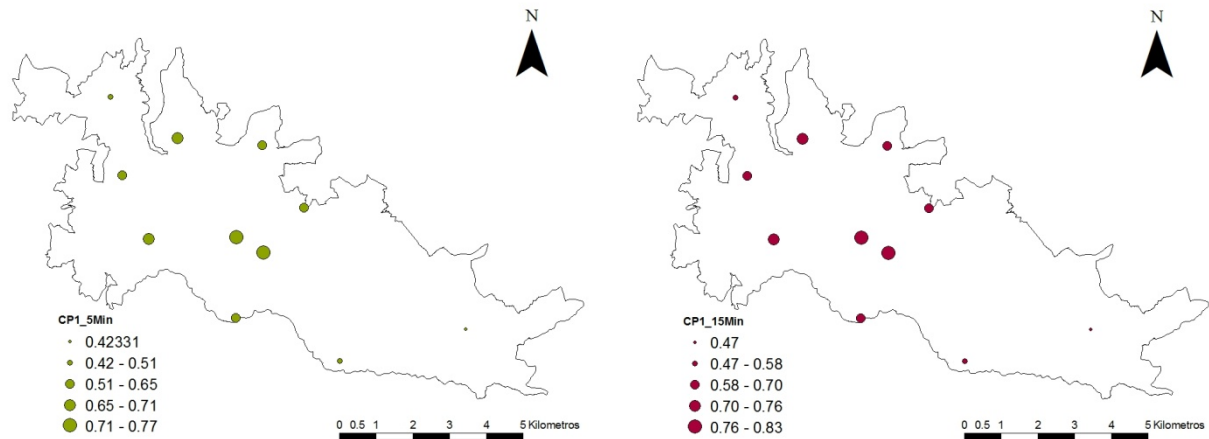


Figura 8.- Correlación entre la Componente Principal 1 y las series de lluvia de duración 5 minutos (Izquierda) y 15 minutos (derecha)

CONCLUSIONES

Se ha podido establecer, de entre varios métodos de interpolación habilitados en uno de los paquetes comerciales más utilizados para el manejo espacial de datos, como es el ArcGis, que el método más apropiado para interpolar la precipitación sobre la ciudad de Manizales es el Krigging, seguido muy de cerca por el IDW. La diferencia de error entre estos dos métodos hace que sea casi indiferente utilizar cualquiera de los dos, siendo una ventaja para el IDW su sencillez matemática. De esta validación cruzada, se comprueba que la distribución de la red de estaciones es adecuada, y se evidencia que las estaciones no son redundantes a pesar de su cercanía, sobre todo las estaciones ubicadas en la parte oeste de la ciudad, donde se presentan los valores más altos de varianza.

Del análisis de error por estación, se identifica que las estaciones Ingeominas, La palma, El Carmen y Yarumos, juegan un papel importante a la hora de interpolar los datos puntuales de lluvia. Esto sugiere que son estaciones esenciales para la red y que se debe procurar su buen funcionamiento.

Se ha podido identificar, a través del análisis de componentes principales, un patrón de variabilidad homogénea, para las series de 24 horas y 1 hora. Para las series de 24 horas, se presenta una altísima correlación con las estaciones de la zona centro y con un poco menos de correlación, aunque significativamente alta también, casi con todas las estaciones de la ciudad. Esto indica que la variabilidad de la precipitación es tan alta, que para una escala de 24 horas todas las series aportan al porcentaje de varianza explicado en la primera componente. A medida que la escala temporal de la duración de las series disminuye, también disminuye el número de estaciones con alta correlación con la primera componente principal. En las series de una hora todavía se mantiene la zona central, con una correlación alta (0.8). Para las escalas menores, no es posible identificar claramente mediante el análisis de componentes principales, zonas de variabilidad homogénea.

Para efectos de zonificar la ciudad, la zona centro se podría considerar homogénea a escalas de 1 y 24 horas. Los resultados en las escalas menores, demuestran la alta variabilidad espacial de los campos de precipitación, en términos de la intensidad, sobre la ciudad de Manizales. De igual

manera, el coeficiente de variación promedio obtenido para los campos de intensidad de los 75 eventos, ratifica esta alta variabilidad, y resalta la gran importancia y la urgente necesidad de incorporarla en los métodos para la estimación de las lluvias utilizadas para el diseño de obras hidráulicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la vicerrectoría de investigación de la Universidad Nacional, y a la dirección de investigaciones de la sede Manizales por la financiación otorgada para la ejecución del proyecto titulado ‘Análisis de la variabilidad espacio temporal de los campos meteorológicos sobre la ciudad de Manizales’, que dió origen a esta investigación.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Manizales** (2008) “Situación en la que se encuentra la Ciudad”. *Comunicado de prensa-17-11-2008*. Unidad de divulgación y Prensa. Disponible en: <http://www.alcaldiamanizales.gov.co>.
- Buytaert, W., Celleric R., Willems, P., De Bievre B. y G. Wyseure** (2006). “Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes”. *Journal of Hydrology*, 329, 413- 421.
- IDEA** (2008). *Boletines Meteorológicos*. UN de Colombia sede Manizales
- Linsley, R., Kohler M. and J. Paulus** (1977). “Hidrología para Ingenieros”. Segunda Edición. Mc Graw Hill Latinomaericana S. A Bogota ISBN: 0-07-0909148. Pg 48
- Mejía, F.** (2008) “Apuntes sobre el clima en la ciudad de Manizales”. *Boletín Ambiental* Vol 68. Octubre de 2008.
- Mejía, F. y A. Pachón** (2008). “Monitoreo Climático y Prevención de Desastres en Manizales”. En *Memorias del XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Bogotá, Colombia
- Mejía, F., Chardon A.C., Londoño, J.P y J. H. Estrada** (2005). “Zonificación de Riesgos por Deslizamientos en Áreas Urbanas Andinas.”. *Propuesta Técnica*. UN de Colombia sede Manizales.
- Obregón N., Bernal F., y V. Peñaranda** (2008) “Una aproximación metodológica en la caracterización de la dinámica espacio - temporal de la precipitación en Bogotá d.c”. En *Memorias del XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología* . Bogotá, Mayo de 2008
- Pla, L.** (1986). Análisis Multivariado: “Método de Componentes Principales”. Monografía n. 27. Secretaría General de la OEA. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington, D.C
- Rodriguez E., Camacho L.A, Jimenez A., Villarreal J. y P. Duarte** (2008). “Instrumentacion y Modelación Hidrometeorológica y ambiental de una microcuenca urbana. Caso de estudio Campus UN. Bogotá”. En *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena, Septiembre de 2008.
- E. Paturel, E., Desbodes, M., y J.M. Masson.** (1986). “Evaluation de l’influence de la densité des réseaux pluviométriques sur la détermination des lames précipitées” Informe LHM 14-16, Plan urbain, 1986.
- A. Torres** (2004). Apuntes de clase sobre Hidrología Urbana. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, pp. 52-53.