

ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN DIARIA A TRAVÉS DE UN SIG CON IMÁGENES DE RADAR METEOROLÓGICO

• Iván Vilchis-Mata •

Universidad Autónoma del Estado de México

• Emmanuelle Quentin •

Universidad Nacional de Loja, Ecuador

• Khalidou M. Bâ • Carlos Díaz-Delgado •

Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen

El presente trabajo está centrado en la integración de información, corrección de errores y estimación de datos cuantitativos de precipitación diaria con base en imágenes de radar meteorológico banda C. Este desarrollo incluye una propuesta metodológica y aplicación geomática en un Sistema de Información Geográfica (*Idrisi*). El caso de estudio se realizó con base en la información generada por el radar Cerro Catedral, ubicado en la porción central de México, con una resolución espacial y temporal base de 832.78 m y 15 min, respectivamente. En su mayoría, los coeficientes de determinación alcanzados (r^2) entre la precipitación diaria estimada con información de radar y la obtenida en estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) variaron entre 0.50 y 0.90 al interior de un radio de influencia de radar de 150 km. Con base en los resultados obtenidos, la herramienta geomática construida es una alternativa de estimación de precipitación diaria que mejora y complementa a la red pluviométrica terrestre. Con ello se facilita la comprensión de la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones y justifica su empleo en estudios hidrológicos y de gestión integrada de recursos hídricos.

Palabras clave: precipitación, radar meteorológico, *SIG-Idrisi*, estimación de precipitación.

Introducción

La evaluación y gestión de recursos hídricos en una cuenca o región es una función del conocimiento y análisis de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo dentro de la misma, y donde la precipitación es un componente principal. De manera tradicional, las redes de pluviómetros y pluviógrafos han sido utilizadas para analizar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, y generar un muestreo discreto en el espacio y continuo en el tiempo. Por su parte, el radar meteorológico ha sido utilizado,

desde los años cuarenta, en el pronóstico meteorológico y en un nivel cualitativo. Hoy en día, el radar es una herramienta eficaz en hidrología que permite la estimación cuantitativa de pluviometría y el conocimiento detallado del campo de tormenta, con escala temporal de 5 o 15 minutos, una resolución espacial de 1 a 2 km², en un radio de cobertura hasta de 300 km. Con ello se obtiene un muestreo continuo de la precipitación en el espacio y discreto en el tiempo para su análisis sobre amplias regiones. Su utilidad en la modelación y gestión hidrológica para el pronóstico de inundaciones se

adapta perfectamente a la utilización de modelos hidrológicos distribuidos (Sánchez-Diezma et al., 2004). Sin embargo, los datos de radar contienen errores asociados con la propagación anómala, ecos falsos, bloqueo orográfico y altura del haz sobre el terreno (Díaz-Vera et al., 2009). Adicionalmente, se puede mencionar la falta de una estructura y procesos dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), que faciliten el tratamiento de datos espaciales y temporales, a fin de disponer de estimaciones pluviométricas adecuadas, oportunas y confiables.

El objetivo principal de este trabajo es construir una herramienta geomática en el SIG-*Idrisi*, que permita la integración de datos de radar y la generación de información con calidad para su uso hidrológico en aquellas cuencas insertas en el radio de acción óptimo del radar o redes de radares. Los resultados de este proceso son evaluados por los coeficientes de determinación (r^2) entre la estimación de precipitación con imágenes corregidas, acumuladas a nivel diario, y los datos obtenidos en 36 estaciones meteorológicas automáticas (EMAs). Este proceso evalúa la robustez e incertidumbre de la presente propuesta, que pretende complementar la información generada por las redes terrestres de monitoreo de precipitación.

Materiales y método

El proceso sistemático de corrección de errores y análisis de la información generada por radar es presentado a través de diez etapas y con base en el análisis de imágenes PPI (*Plan Position Indicator*) de resolución espacial de 832.78 m, resolución temporal de 15 min, tomadas a un ángulo de 0.5° sobre la horizontal, con un radio de cobertura de 299.8 km (figura 1) del radar meteorológico Cerro Catedral banda C ($\lambda = 5.33$ cm) ubicado en el Estado de México, a los 19° 32' 57" de latitud norte, 99° 31' 13" de longitud oeste y a una altitud de 3 790 msnm (terreno 3 770 msnm).

Etapa 1. Obtención de imágenes

Corresponde a la transferencia de archivos crudos PPI del radar Cerro Catedral por parte del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Su almacenamiento considera por día 96 imágenes (una imagen cada 15 minutos). Se recopiló un total de 17 588 imágenes, para el periodo comprendido entre las 00:01 UTC del 1° de junio de 2008 y las 23:46 UTC del 1° de junio de 2009. Es necesario subrayar que no todos los días se obtuvieron imágenes cada 15 minutos; el periodo con más datos ausentes se presentó de septiembre a noviembre.

Etapa 2. Integración de imágenes

Este proceso se realiza mediante el módulo *GENERICRASTER (Idrisi)*. Para ello es necesario indicar el tipo de archivo (formato de 1 banda *BSQ-band-sequential*), número de columnas y renglones del formato raster (720 x 720), coordenadas extremas del radio de influencia del radar (299.8 m), así como el sistema de referencia geográfico, el cual debe ser definido considerando que las líneas de azimut (haz del radar) son rectas y los ángulos pueden ser usados para representar líneas de distancia o rango constante, donde el centro de la imagen corresponde con la localización del radar. Dado que las imágenes del radar están en coordenadas polares, es necesario definir y adecuar el sistema de referencia USGS Lambert Azimuthal Equal Area (major s-ax: 6371000, minor s-ax: 6371000, origin long: -99.520280 y origin lat: 19.549300).

Etapa 3. Giro de imágenes

La información original presenta un giro de 180° debido a la dirección de escaneo del radar y es necesario invertir el orden de los renglones de la imagen con el módulo *TRANSDPOSE (Idrisi)*.

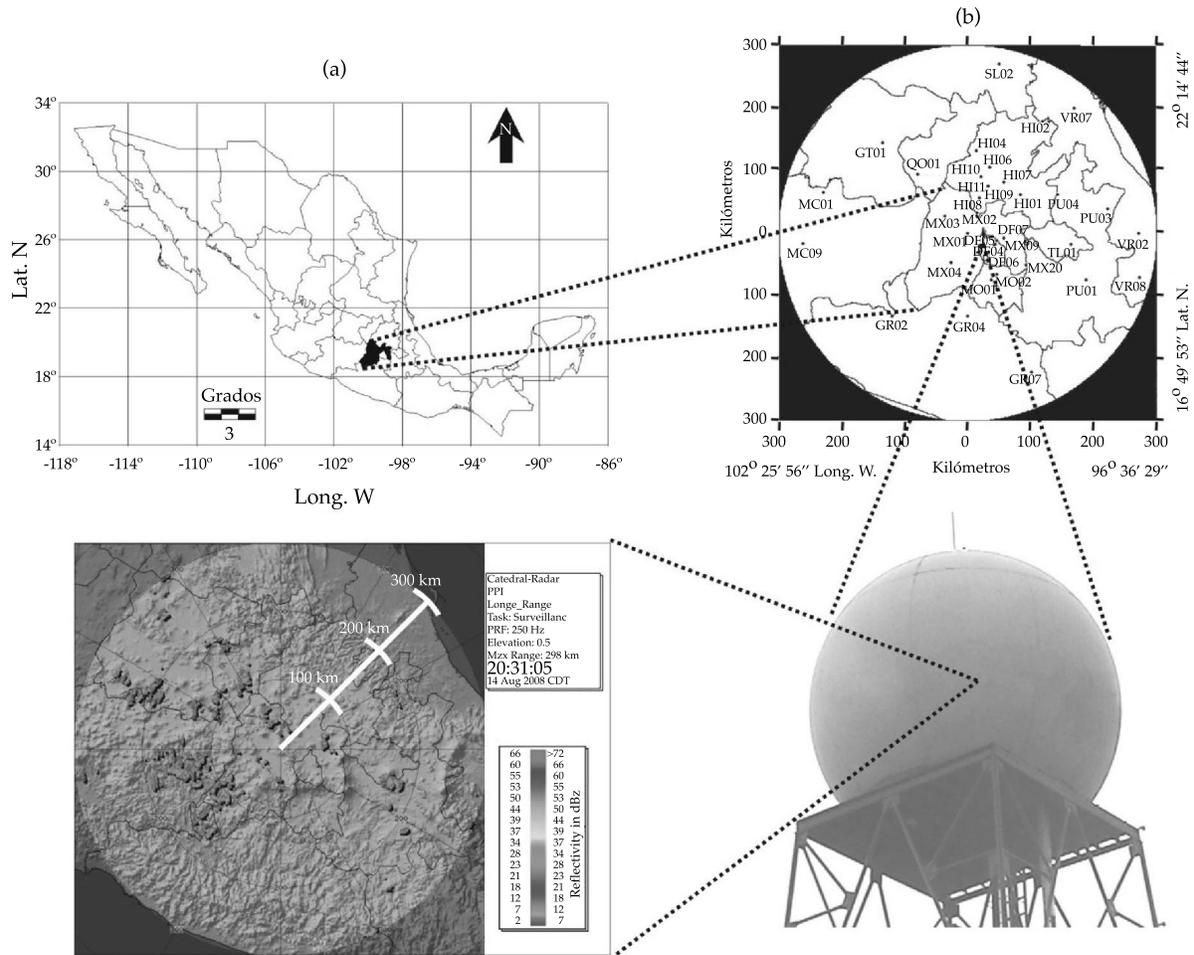


Figura 1. a) Ubicación y producto PPI (en formato GIF) generado por el radar de Cerro Catedral y b) EMA's.

Etapa 4. Conversión de valores de reflectividad

Para la obtención de los valores de dBZ (decibelios de Z), se efectúa una conversión de los valores dados en el rango de 0-255 (8 bits) por las imágenes del radar, con el modelo propuesto por *Environment Canada* (Rashedul, 2005): $dBZ = 0.5 * N - 32$. Donde N corresponde al valor dado en el rango de 0-255, y los valores resultantes corresponden al rango de -32 a 95.5 dBZ.

Etapa 5. Corrección de errores de estabilidad

Se refiere a la reducción de efectos de atenuación del haz emitido por el radar debido a lluvia sobre el radomo y se efectúa con el método desarrollado por Sempere-Torres *et al.* (2002) y Sempere-Torres (2003), proporcionando un factor de corrección de +3 dBZ de reflectividad cuando existe precipitación sobre el radomo y un umbral de precipitación que puede afectar la señal igual o superior a 7 dBZ (0.1 mm/60 min).

Etapas 6. Caracterización de la precipitación

Corresponde a la identificación de los campos de tormenta, grupos de píxeles en valores de dBZ de la imagen con base en el algoritmo propuesto por Steiner *et al.* (1995), para zonas convectivas (≥ 40 dBZ) y zonas estratiformes (< 40 dBZ).

Etapas 7. Conversión en valores de reflectividad

Una vez caracterizada la precipitación, es necesario realizar la conversión de dBZ a valores de reflectividad (Z) con el modelo $Z = 10^{(dBZ/10)}$.

Etapas 8. Relación reflectividad-intensidad de precipitación

La relación Z - R constituye un proceso que facilita la obtención de intensidad de precipitación R (en mm/60 min) a partir de la reflectividad (Z), para ello se recurre a relaciones empíricas de la forma $Z = aR^b$. En el caso en estudio, se utilizó para zonas estratiformes el modelo Marshall-Palmer (Sánchez-Diezma, 2001): $Z = 200R^{1.6}$ ($R = (Z/200)^{0.625}$) y para zonas convectivas el modelo NEXRAD: $Z = 300R^{1.4}$ ($R = (Z/300)^{0.714}$). Operacionalmente, el radar sólo considera el modelo Marshall-Palmer, pero como mejora metodológica se utiliza el modelo Z - R , en función de la discriminación efectuada en la etapa 6.

Etapas 9. Generación de productos acumulados

Esta etapa se centra en la estimación de productos cartográficos acumulados de precipitación, basados en la adición de imágenes consecutivas (cada 15 minutos) para un cierto periodo de tiempo (horario 4, diario 96 y suma de productos diarios para la estimación mensual).

Etapas 10. Corrección por errores orográficos

A los productos acumulados es necesario corregirles los errores producidos por intercepción

del haz con el terreno. Para ello, es necesario crear una máscara raster, derivada de la adición de imágenes consecutivas, a fin de identificar los ecos del suelo, zonas situadas detrás de un eco de suelo y donde la lluvia es minimizada a causa de la energía perdida en la intercepción (zonas apantalladas), y los lóbulos secundarios causados por la intercepción con el terreno de partes de la energía no incluidas en el haz principal del radar, que en general resultan con un valor "cero". Adicionalmente se elimina el ruido residual por medio de un proceso de interpolación y con ello se garantiza la estimación de precipitación en zonas interferidas por sistemas montañosos y edificios volcánicos. En el caso de estudio, se identificaron y corrigieron bloqueos orográficos del haz, correspondientes a los volcanes Jocotitlán, Nevado de Toluca, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, así como también el sistema de laderas NW del volcán Nevado de Toluca, y del Ajusco, los cuales generan zonas apantalladas en su parte posterior y presencia de ecos del suelo debido a lóbulos secundarios ocasionando ausencia de datos. Finalmente, se realiza un proceso de análisis entre los datos pluviométricos estimados con el radar (x) y los observados en las EMAs (y) con base en el coeficiente de determinación (r^2), es decir, el cuadrado del coeficiente de correlación del momento de Pearson (r) de

la forma:
$$r^2 = \frac{\left(\frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \right)^2$$

último proceso interpretado como validación puntual y no espacio-temporal del método aquí propuesto debido a la diferencia de muestreos correspondientes en cada uno de los procedimientos de monitoreo pluviométrico.

Resultados

El esquema conceptual propuesto, así como los procesos descritos, se pueden estructurar bajo un esquema geomático, denominado Macromodelo en *Idrisi*, identificando la

entrada de datos, el análisis espacial, los procesos aplicados a la información y las salidas de estimaciones obtenidas. Como proceso de validación de la metodología se ha considerado como aceptable un valor de $r^2 \geq 0.5$. Las estimaciones de precipitación con imágenes de radar resultaron adecuadas para distancias al radar inferiores a 150 km, con un mejor ajuste en aquellos casos donde se puede

considerar que la precipitación presentó una estructura más uniforme (cuadro 1). Fuera de este radio, aun cuando se obtuvieron algunas estimaciones aceptables, no se observa un patrón que garantice las estimaciones. Es importante señalar que la diferencia entre los valores estimados y el dato puntual observado por la red de automática es de $\pm 20-30\%$, lo cual puede ser considerado como una aproximación

Cuadro 1. Comportamiento del coeficiente r^2 a nivel diario para los meses analizados.

EMA	r^2 (julio 08)	r^2 (agosto 08)	r^2 (abril 09)	r^2 (mayo 09)	Observaciones
1)DF04	0.93	0.69	0.50	0.73	Muy significativo, buena explicación del comportamiento de la precipitación.
1)DF05	0.30	0.21	0.01	0.56	Poco significativo, variabilidad en sub y sobreestimación de precipitación.
1)DF06	0.59	0.58	0.91	0.77	Muy significativo, buena explicación del comportamiento de la precipitación.
1)DF07	0.53	0.26	0.52	0.86	Significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
1)GR04	0.28	0.38	----	----	Poco significativo, EMA inconsistente en suministro de datos.
1)HI01	0.96	0.75	0.91	0.97	Muy significativo, buena explicación del comportamiento de la precipitación.
1)HI04	0.76	0.78	----	0.23	Significativo, sobreestimación de precipitación (convectiva).
1)HI06	0.81	0.85	----	0.80	Muy significativo, EMA inconsistente en suministro de datos.
1)HI07	0.14	0.87	0.76	0.85	Significativo, variabilidad en sub y sobreestimación de precipitación.
1)HI08	0.53	0.46	0.96	0.92	Significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
1)HI09	0.70	0.62	0.94	0.25	Significativo, variabilidad en sub y sobreestimación de precipitación.
1)HI10	0.75	0.61	----	0.55	Significativo, EMA inconsistente en suministro de datos.
1)HI11	0.99	0.59	----	0.82	Significativo, EMA inconsistente en suministro de datos.
1)MO01	0.20	0.83	0.60	0.49	Significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
1)MO02	0.53	0.50	0.31	0.46	Significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
1)MX01	0.82	0.75	0.54	0.46	Significativo, EMA afectada por atenuación sobre el radomo.
1)MX02	0.93	0.21	0.71	0.72	Significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
1)MX03	0.75	0.77	0.95	0.91	Muy significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
1)MX04	0.09	0.01	0.14	0.38	Poco significativo, EMA afectada por bloqueo orográfico y subdetección.
1)MX09	0.00	0.70	0.61	0.65	Significativo, sobreestimación de precipitación (convectiva).
1)MX20	0.16	----	0.48	0.12	Poco significativo, EMA afectada por bloqueo orográfico y subdetección.
1)QO01	0.01	0.13	0.97	0.33	Poco significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
2)GR02	0.36	0.09	----	----	Poco significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
2)GR07	0.21	0.05	0.01	0.02	Poco significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
2)GT01	0.36	0.52	0.45	0.70	Poco significativo, variabilidad en sub y sobreestimación de precipitación.

Cuadro 1 (continuación). Comportamiento del coeficiente r^2 a nivel diario para los meses analizados.

EMA	r^2 (julio 08)	r^2 (agosto 08)	r^2 (abril 09)	r^2 (mayo 09)	Observaciones
2)HI02	0.93	0.21	0.97	0.61	Significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
2)MC01	0.57	0.78	0.72	0.45	Significativo, subestimación de precipitación y zona de subdetección.
2)MC09	0.63	0.04	0.00	0.01	Poco significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
2)PU01	0.22	0.00	0.58	0.12	Poco significativo, EMA afectada por zona de subdetección.
2)PU03	0.97	0.33	1.00	0.05	Poco significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
2)PU04	0.16	0.03	0.25	0.15	Poco significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
2)SL02	0.77	0.80	----	0.92	Muy significativo, no afectada por bloqueo orográfico y subdetección.
2)TL01	0.04	0.02	0.66	0.33	Poco significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
2)VR02	0.00	0.01	0.81	0.50	Poco significativo, subestimación de precipitación (estratiforme).
2)VR07	----	----	----	----	EMA inconsistente en suministro de datos.
2)VR08	0.01	0.02	0.00	0.00	Poco significativo, variabilidad en sub y sobreestimación de precipitación.
Radio de distancia al radar: 1) inferior a 150 km; 2) superior a 150 km					

de la incertidumbre al momento de utilizar este tipo de información.

Conclusiones y recomendaciones

El método propuesto de estimación de precipitación con datos del radar meteorológico de Cerro Catedral con respecto a las técnicas tradicionales puntuales (pluviómetros y pluviógrafos) de adquisición de la información de precipitación proporciona información cuantitativa corregida y detallada, con una alta resolución espacial (832.78 m) de los campos de tormenta y representa un ejemplo del análisis más complejo de su tipo debido a las características orográficas de la zona. Se resalta la identificación y clasificación del tipo de precipitación, así como la aplicación de una doble relación $Z-R$, para diferenciar los rangos de intensidades y, con ello, considerar las características y evolución de la precipitación en la zona de influencia del radar. Igualmente, el proceso implementado en *Idrisi* de integración, análisis y corrección de errores de los datos obtenidos de las

imágenes del radar meteorológico es aplicable a otros radares banda C. Es importante señalar que el nivel de corrección dependerá del análisis espacial y temporal, así como de las características propias de cada radar. Por otro lado, la integración de información de radares aledaños facilitaría un análisis del comportamiento de la precipitación, al abarcar zonas de observación mayores al de un solo radar; esta información podría ser utilizada para la vigilancia y el seguimiento permanente de fenómenos hidrometeorológicos que afectan al territorio nacional.

Entre las aplicaciones hidrológicas de la información obtenida se subraya la modelación distribuida de lluvia-escurrimiento, el análisis de riesgo por inundación, así como el balance hidrológico a nivel de mesoescala, entre otros. Particularmente, el uso de información obtenida del radar Cerro Catedral ofrece una alternativa para estudios hidrológicos y gestión de recursos hídricos en las cuencas Valle de México y Lerma en la porción correspondiente al Estado de México.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los árbitros y revisores por sus atinados comentarios, así como al Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto, y de manera especial, al ingeniero Armando Rodríguez Dávila del Servicio Meteorológico Nacional, por todo su apoyo.

Recibido: 05/08/10
Aceptado: 12/04/11

Referencias

- DÍAZ-VERA, M.A., HERRERA-ZAMARRÓN, G.S. y VALDÉS-MANZANILLA, A.A. Un modelo de correlación lineal para la estimación espacial de la precipitación en el valle de la Ciudad de México, combinando datos de pluviógrafos con imágenes de radar meteorológico. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 3, julio-septiembre de 2009, pp. 63-90.
- RASHEDUL, I.M. *Improved quantitative estimation of rainfall by radar*. Tesis de maestría en Ciencias Físicas. Winnipeg, Canadá: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Manitoba, 2005.
- SÁNCHEZ-DIEZMA, R., SEMPERE-TORRES, D., CORRAL, C. y BERENGUER, M. *Desarrollos avanzados para la medida de la lluvia por radar*. II Jornadas sobre los Sistemas de Ayuda a la Decisión ante Problemas Hidráulicos e Hidrológicos en Tiempo Real, Madrid, España, 2004.
- SÁNCHEZ-DIEZMA, G.R. *Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 330 pp., 2001.
- SEMPERE-TORRES, D., SÁNCHEZ-DIEZMA, R., BERENGUER, M., PASCUAL, R., and ZAWADZKI, I. *Improving radar rainfall measurement stability using mountain returns in real time. Use of radar observations in hydrological and NWP models*. Russchenberg, H. (editor). Delft: ERAD, 2002, pp. 213-216.
- SEMPERE-TORRES, D. *Improving radar rainfall measurement stability using mountain returns in real time*. 31st Conf. on Radar Meteor., Seattle, WA, 220-221, 2003. En Sánchez-Diezma, R., Sempere-Torres, D., Corral, C., Berenguer, M. *Desarrollos avanzados para la medida de la lluvia por radar*. Ponencia presentada en las II Jornadas Sobre los Sistemas de Ayuda a la Decisión ante Problemas Hidráulicos e Hidrológicos en Tiempo Real, Madrid, España, 2004.
- STEINER, M., HOUZE, R.A.J., and YUTER, S.E. Climatological characterization of three dimensional storm structure from operational radar and raingauge data. *J. Appl. Meteor.* Vol. 34, 1995, pp. 1978-2007.

Abstract

VILCHIS-MATA, I., QUENTIN, E., BÂ, K.M. & DÍAZ-DELGADO, C. *Daily rainfall estimation using a GIS with weather radar imagery*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 167-174.

This research focuses on the integration, error correction and quantitative estimation of daily rainfall data based on C-Band weather radar imagery. This work includes a methodological proposal and a geomatic application in a Geographic Information System (Idrisi). The case study was based on the Cerro Catedral weather radar located in central Mexico, with a spatial and temporal resolution of 832.78 m and 15 min, respectively. Most determination coefficients (r^2) for estimated daily rainfall based on radar information and information obtained by the Automatic Weather Stations ranged between 0.50 and 0.90, within a 150 km influence radius. Based on these results, the geomatic tool built serves as an alternative for estimating daily rainfall that improves and complements the rain gauge network. This facilitates the understanding of spatial-temporary variability in rainfall and justifies its use in hydrological and studies on integrated water resources management studies.

Keywords: rainfall, weather radar, GIS-Idrisi, rainfall estimation.

Dirección institucional de los autores

M.C. Iván Vilchis Mata

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Centro Interamericano de Recursos del Agua
Carretera Toluca Atlacomulco km. 14.5
Unidad San Cayetano
50200 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfonos: +52 (722) 2965 550/51 y 1806 191/92
ivanvilchismata@yahoo.com.mx

Dr. Emmanuelle Quentin

Universidad Nacional de Loja (UNL)
Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA)
Ciudad Universitaria "Ing. Guillermo Falconí Espinosa",
La Argelia
Casilla postal 1101 2636 o casilla postal letra "S"
Loja, ECUADOR
Teléfono y fax: +593 (07) 2545 155
emmanuelle.quentin@gmail.com

Dr. Khalidou M. Bâ

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Centro Interamericano de Recursos del Agua
Carretera Toluca Atlacomulco km. 14.5
Unidad San Cayetano
50200 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfonos: +52 (722) 2965 550/51 y 1806 191/92
khalidouba@yahoo.com

Dr. Carlos Díaz Delgado

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Centro Interamericano de Recursos del Agua
Carretera Toluca Atlacomulco km. 14.5
Unidad San Cayetano
50200 Toluca, Estado de México, MÉXICO
Teléfonos: +52 (722) 2965 550/51 y 1806 191/92
cdiazd@uaemex.mx