Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente

• Víctor Hugo Guerra-Cobián •
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

• Khalidou M. Bâ • Emmanuelle Quentin-Joret •
• Carlos Díaz-Delgado •
Universidad Autónoma del Estado de México, México

• Alin A. Cârsteanu •
Instituto Politécnico Nacional, México

Resumen

Este trabajo presenta el proceso necesario de adecuación de datos de precipitación obtenidos de imágenes de radar meteorológico mediante SIG para su empleo en el modelado hidrológico distribuido. El objetivo principal ha sido la evaluación de la calidad de la información de radar a través de las simulaciones del modelo hidrológico y la comparación con la simulación generada con datos de pluviómetros. Para llevar a cabo lo anterior, se simularon tres eventos. Se incluyó la avenida extrema que se presentó en la cuenca del río Escondido, México, en abril del 2004; se utilizaron datos horarios del radar meteorológico ubicado en la base aérea Laughling Texas, Estados Unidos, que consisten en archivos de tipo binario en un listado de valores de precipitación en mm. La calidad de los datos de radar se llevó a cabo mediante un análisis de correlación con datos de pluviógrafos de estaciones automatizadas. Los resultados obtenidos indican que en la comparación radar-pluviógrafo existen pares de datos en los que mientras en el radar se estima un valor "cero", en el pluviógrafo se está registrando un valor mayor que cero o viceversa. Por otra parte, la varianza explicada de los datos de precipitación estimados a partir de información de radar, con respecto a las mediciones de los pluviógrafos en las estaciones consideradas en el análisis, fue menor a una escala horaria que en la escala diaria. Finalmente, las simulaciones realizadas con datos de precipitación-radar para eventos extremos muestran que el hidrograma reproduce acertadamente el hidrograma observado. En cambio, en la simulación efectuada con datos pluviométricos, tanto el pico como la forma del hidrograma, no fueron simulados de manera adecuada.

Palabras clave: NEXRAD, radar meteorológico, modelo distribuido, SIG, *CEQUEAU*.

Introducción

Hoy en día, los hidrólogos y especialistas involucrados en la solución de diversos problemas de recursos hídricos y ambientales reconocen la importancia de incorporar una alta resolución a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación como uno de los factores más importantes en las aplicaciones hidrológicas (Pathirana *et al*., 2003). Adicionalmente, en el modelado hidrológico existe un creciente interés en el uso de datos de precipitación estimados a partir de imágenes de radar. En efecto, la estimación de la precipitación mediante datos

generados por radar es particularmente útil en zonas montañosas, donde la topografía accidentada y la altitud del terreno limitan significativamente la operación de las redes climatológicas debido a dificultades de acceso (Hossain *et al*., 2004). Sin embargo, también es precisamente en zonas montañosas donde se llegan a presentar dificultades para la estimación de la precipitación con imágenes de radares, ya que la señal emitida por el radar puede verse interferida por las montañas, limitando el análisis a la zona no interferida por obstáculos físicos.

Actualmente, las estimaciones de precipitación a partir de información de radar se utilizan en el modelado del fenómeno lluvia-escorrentía, lo cual permite maximizar la aplicación de modelos hidrológicos y especialmente los de tipo distribuido. Las aplicaciones incluyen el pronóstico hidrológico, la determinación de zonas de inundación y la evaluación de los recursos hídricos (Durrans *et al*., 2002; Jessen *et al*., 2005; Krajewski *et al*., 2006). Además de la aplicación directa de los radares en meteorología, la aplicación de éstos a fenómenos hidrológicos requiere de una calibración, la cual consiste en obtener relaciones de reflectividad para diferentes intensidades de precipitación, específicamente dentro de la zona de influencia (Rosengaus, 1995). Este proceso se debe realizar a través de una red de pluviógrafos con una resolución temporal del orden de minutos.

Con respecto a la modelación hidrológica, Neary *et al*. (2004) utilizaron datos de radar y datos de pluviógrafo con el modelo hidrológico *HEC-HMS* para determinar la aplicabilidad de la información de radar con modelos no distribuidos o globales. Estos autores encontraron que los escurrimientos simulados con datos procedentes de radar, en general fueron subestimados por el modelo hidrológico y los gastos picos observados no fueron simulados adecuadamente. Con respecto a la aplicación de datos de radar en modelos hidrológicos distribuidos, Kalin y Hantush (2006) utilizaron datos de precipitación estimados a través de radar, así como datos de pluviógrafos, conjuntamente con el modelo *SWAT* (Neitsch *et al*., 2002). Particularmente se interesaron en la exploración del potencial de los datos de radar como una fuente alterna de los datos de precipitación obtenidos a través de pluviógrafos.

Por otro lado, cabe recordar que el principio de funcionamiento del radar meteorológico consiste en la emisión de pulsos electromagnéticos hacia la atmósfera, y los equipos detectan los ecos o reflejos de energía de los conglomerados de lluvia presentes en la atmósfera. De esta manera se pueden ubicar tormentas caracterizando su estructura, así como cuantificar la intensidad de la lluvia. La cobertura de un radar meteorológico típico es de aproximadamente 240 km de radio. Sin embargo, la cobertura real es menor debido a la curvatura de la Tierra y a la orografía del lugar donde se encuentre instalado. Los radares no miden directamente el volumen de agua, sino la reflectividad Z (ecuación (1)) o energía reflejada por las gotas de agua. Las principales fuentes de incertidumbres en los datos arrojados por el radar meteorológico son debidas precisamente a que el radar no mide directamente la precipitación, la cual es convertida en intensidad R (ecuación (2)) mediante la relación Z-R (ecuación (3)), deducida a partir de un análisis estadístico entre los datos del radar y datos de estaciones convencionales (p.e. pluviómetros). Otra fuente de incertidumbre se debe a que la precipitación a nivel de la superficie es deducida a través de medidas del radar a ciertas alturas por encima del suelo, y la variabilidad de la precipitación en la altitud puede causar una sobrestimación o subestimación (Jayawickreme y Hyndman, 2007). Esto implica que para utilizar los datos de precipitación inferidos a partir de imágenes de radar es necesario estimar la incertidumbre antes de utilizar la información en el modelado hidrológico.

$$Z = \frac{\pi}{6}\int_0^{D\text{máx}} V(D)N(D)D^3 dD \qquad (1)$$

$$R = \int_0^{Dmáx} N(D) D^6 dD \qquad (2)$$

$$R = aZ^b \qquad (3)$$

Donde:

$N(D)$ es una función de distribución del número de gotas de agua.
$V(D)$ es una función de distribución del volumen de las gotas de agua.
D es el diámetro de las gotas de agua.
$D_{máx}$ es el máximo diámetro detectado de gotas de agua.

En la ecuación (3), los parámetros *a* y *b* dependen de la calibración del radar y se han obtenido mediante un análisis de correlación utilizando datos de radar, así como datos de precipitación obtenidos a través de pluviógrafos. Por ejemplo, en el cuadro 1 se presentan algunos valores de los parámetros a y b utilizados para transformar la reflectividad en precipitación (Bedient *et al*., 2000; Javier *et al*., 2007).

El presente estudio muestra el proceso necesario de adecuación de datos de precipitación obtenidos de imágenes radar meteorológico mediante un SIG (sistema de información geográfica) para su empleo en el modelado hidrológico distribuido. El objetivo principal ha sido la evaluación de la información de radar a través de las simulaciones del modelo hidrológico y la comparación con la simulación obtenida con base en datos de pluviometría. Particularmente, se simularon tres eventos en la cuenca del río Escondido, México: dos ordinarios en 2003 y la avenida extrema que se presentó en abril del 2004.

Metodología

Zona de estudio

La cuenca del río Escondido se localiza al norte de México y se origina en la Sierra del Burro; por la margen izquierda recibe al río San Antonio, para posteriormente cruzar por la ciudad de Piedras Negras antes de unirse por la margen derecha con el río Bravo. La cuenca tiene un área de 3 175 km^2 hasta la estación hidrométrica Villa de Fuentes. El tipo de vegetación en la cuenca es básicamente matorral submontano. La corriente principal nace en una altitud de 1 000 metros sobre el nivel del mar (msnm) y recorre una longitud de 160 km hasta una elevación de 245 msnm, donde se localiza la estación hidrométrica. La precipitación media anual en la cuenca varía de 400 a 600 mm.

La zona de estudio cuenta con tres estaciones meteorológicas convencionales y un observatorio meteorológico (figura 1), los cuales son operados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la información está disponible en la base de datos *CLICOM* (*Climatic Computing Project*) a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Adicionalmente existe una red de estaciones automatizadas sobre la margen derecha del río Bravo que son operadas por la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos (CILA). Con respecto a la información hidrométrica, el

Cuadro 1. Relaciones *Z-R* utilizadas para la estimación de la precipitación con base en imágenes de radar meteorológico.

Ubicación del radar	Parámetro		Relación *Z-R*
	a	*b*	
Llanura	300	1.4	$R = 300Z^{1.4}$
Montaña	119	0.77	$R = 119Z^{0.77}$
Tropical	250	1.2	$R = 250Z^{1.2}$

Fuentes: Bedient *et al*., 2000; Javier *et al*., 2007.

registro de caudales medios diarios medidos en la estación hidrométrica Villa de Fuentes data de 1932 a la fecha y se obtuvo de http://www.ibwc.state.gov. Los caudales se obtienen a partir de las curvas de aforo de la estación, la cual cuenta con un vertedor triangular para la medición del flujo en época de estiaje y una canastilla para aforar con molinete hidráulico en crecidas. El promedio de los caudales diarios máximos de 1932 a 2007 es de 59.3 $m^3 s^{-1}$. Sin embargo, durante el periodo de registro se han presentado varios eventos extraordinarios (cuadro 2), siendo el máximo registrado el ocurrido en abril de 2004.

Cuadro 2. Caudales máximos registrados en el río Escondido de 1932 a 2007.

Año	Caudal máximo ($m^3 s^{-1}$)
1936	190
1957	218
1964	371
1969	193
2004	883

Fuente: http://www.ibwc.state.gov.

Datos NEXRAD

En México existe una red de radares meteorológicos equipados con tecnología *Doppler* y operados por la Conagua a través del SMN. Las estaciones cuentan con sistema ininterrumpible de energía, sistema de protección contra incendios y sistema de comunicaciones vía satélite con el centro colector de datos que se ubica en las instalaciones del SMN en la ciudad de México. Actualmente, la cobertura del territorio nacional no se encuentra a un 100%, por lo que la cuenca del río Escondido no está cubierta por el radio de influencia del radar mexicano más cercano.

Debido a lo anterior se utilizaron datos de un radar meteorológico localizado en la

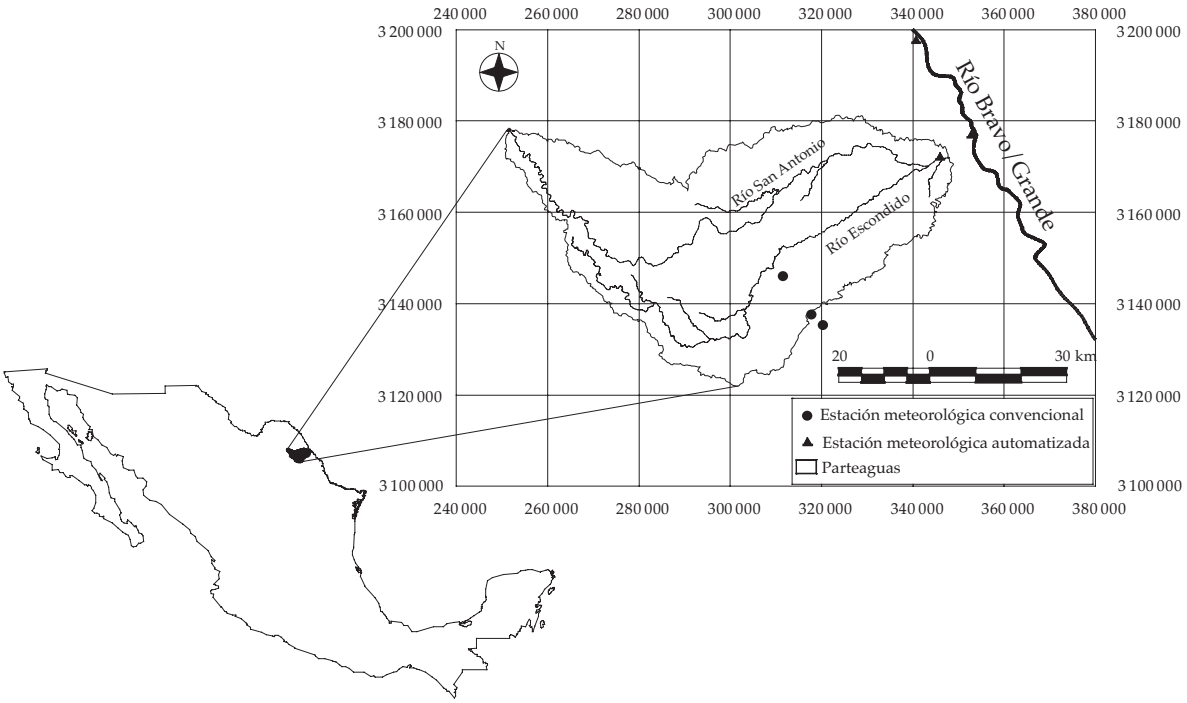


Figura 1. Zona de estudio.

base aérea Laughling Texas, Estados Unidos. Este radar es del tipo WSR-88D (*Weather Surveillance Radar 1988 Doppler*), conocido como la generación futura de radares meteorológicos o NEXRAD (*next-generation weather radar*). La información generada por este tipo de radares fue diseñada específicamente para cubrir la parte continental de Estados Unidos con base en una proyección polar estereográfica (Reed y Maidment, 1999), conocida como HRAP (*Hydrologic Rainfall Analysis Project*). Con respecto a la disponibilidad de los datos fuente utilizados, éstos únicamente abarcan parte de la frontera norte de México y alcanzan a cubrir la totalidad de la cuenca del río Escondido (figura 2). La información se obtuvo de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de los Estados Unidos. Se utilizaron archivos horarios del 1º de enero de 2002 al 31 de diciembre de 2004 (37 224 archivos y 239 faltantes). Esta información se encuentra en archivos horarios de tipo binario, en un listado de valores de precipitación en mm. El formato de los datos es de tipo real de cuatro octetos (con siete cifras significativas) para cada celda de la rejilla HRAP. Para la zona de estudio se extrajo la información contenida en coordenadas HRAP de las columnas 489 a 517 y renglones 110 a 127.

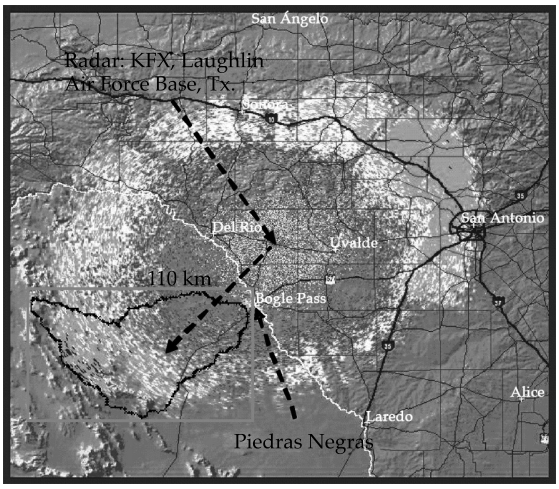


Figura 2. Imagen de precipitación obtenida con el radar sobre la cuenca del río Escondido a las 8:00 am del 4 de abril del 2004.

Para determinar la calidad de la información se llevó a cabo un análisis estadístico, el cual consistió en comparar mediante un análisis de regresión lineal los datos de radar contra los datos de precipitación de tres estaciones automatizadas (pluviógrafos), las cuales se localizan sobre la margen derecha del río Bravo y son operadas por la CILA. En el cuadro 3 se muestran tanto las estaciones convencionales como las estaciones automatizadas utilizadas. En la combinación de datos de precipitación se utilizaron pares de datos con la precipitación estimada a partir de las imágenes de radar de la malla HRAP que coincidía con la ubicación de cada uno de los pluviógrafos y para cada uno de los intervalos analizados. En el análisis se emplearon datos de precipitación a intervalos de tiempo horarios y diarios, verificando que los datos de radar y de pluviógrafo estuvieran en escala de tiempo UTC. Cabe mencionar que sólo se consideraron pares de datos que tuvieran registros de precipitación concomitantes.

Finalmente, para hacer coincidir la malla de puntos de precipitación de radar con la malla de cuadros del modelo hidrológico utilizado, se realizó un proceso de remuestreo del sistema HRAP utilizando una función de interpolación lineal. Esto consistió en estimar la esperanza matemática de los valores horarios de los puntos precipitación de radar circunscritos en cada cuadro en que se discretizó la cuenca. Se automatizó el proceso de remuestreo, así como la obtención de archivos de precipitación en el formato que requería el modelo hidrológico. Lo anterior se efectuó mediante el diseño e implementación de un módulo hidrogeomático inserto en el SIG *Idrisi* (Quentin *et al*., 2007).

Modelo hidrológico

La evaluación de la calidad de los datos de radar se basó tanto en el análisis estadístico

Cuadro 3. Estaciones terrenas convencionales y automáticas utilizadas en el análisis.

Estación		Ubicación		Registro de datos
Nombre	Tipo	Longitud	Latitud	
Zaragoza	Convencional (pluviómetro)	-100.929	28.429	Diario
Allende E	Convencional (pluviómetro)	-100.859	28.354	Diario
Allende S	Convencional (pluviómetro)	-100.833	28.333	Diario
El Moral	Automatizada (pluviógrafo)	-100.634	28.898	Horario
Piedras Negras	Automatizada (pluviógrafo)	-100.506	28.713	Horario
Río Escondido	Automatizada (pluviógrafo)	-100.557	28.668	Horario

correspondiente, así como en la precisión de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con el modelo hidrológico. El modelo hidrológico de parámetros distribuidos utilizado en esta investigación es el modelo *CEQUEAU* (Morin *et al*., 1998). Este modelo es de tipo determinístico y de simulación continua, que discretiza la cuenca en estudio en una malla de cuadros. Considera las variaciones espaciotemporales tanto de las características físicas como de la precipitación (Bâ *et al*., 2001). La simulación hidrológica del modelo se basa en tres recipientes: el recipiente lagos y ciénagas, el recipiente suelo y el recipiente subsuelo. Consta de dos partes que definen la forma en que se obtienen el flujo o caudal a la salida de la cuenca. La primera parte es la función de producción que modela el movimiento vertical del agua en los recipientes. Para cada cuadro que discretiza la cuenca, el modelo asigna la precipitación obtenida del promedio, ponderado con respecto a las distancia, de las tres estaciones más cercanas a dicho cuadro. La segunda parte, definida como función de transferencia, es la encargada de modelar el movimiento del agua de elemento en elemento o de cuadro por cuadro. El coeficiente de transferencia de cada cuadro está relacionado con las características hidráulicas parciales predominantes del flujo, es decir, la capacidad de amortiguar la onda mediante el depósito en la red. Un buen índice de la capacidad de amortiguación en una parte del cuadro es el área de agua libre en el cuadro. Un gran lago, por ejemplo, absorbe el flujo, pero su influencia también depende del área de la cuenca aguas arriba. El modelo *CEQUEAU* utiliza los coeficientes de transferencia para cada cuadro, considerando el área cubierta por el agua y la zona aguas arriba de dicho cuadro.

La validación de las simulaciones se llevó a cabo con base en el criterio numérico propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). Este criterio cuantifica la precisión de los resultados, relacionando los caudales observados *Qo* y los caudales calculados *Qc* expresados por la ecuación (4). El dominio matemático de existencia del valor del coeficiente de Nash es de -∞ hasta 1, donde la unidad representa la simulación perfecta:

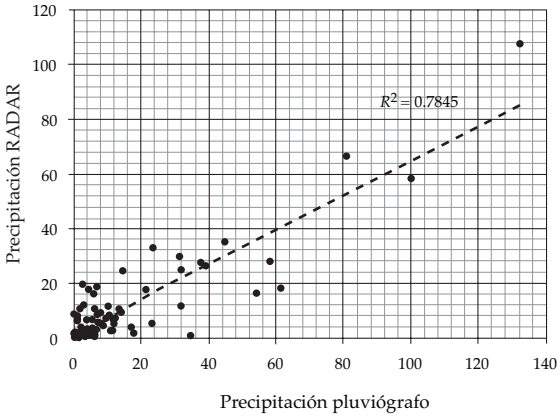
$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{Ci} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{Oi} - \overline{Q_O})^2} \qquad -\infty < \mathrm{NTD} \leq 1 \quad (4)$$

La implementación del modelo hidrológico requirió de: a) un archivo de datos fisiográficos, b) un archivo de datos hidrometeorológicos y c) un archivo con los parámetros del modelo. Para crear el archivo fisiográfico se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) generado por interferometría de radar, así como un nuevo módulo hidrogeomático que trabaja en el SIG *Idrisi*, y desarrollado para automatizar el proceso de extracción de los sentidos del flujo y la ocupación del suelo de cada cuadro de la malla que discretiza la cuenca en formato *CEQUEAU* (Guerra-Cobián, 2007). Se construyeron los archivos de datos hidrometeorológicos: el primero con los datos de los pluviómetros localizados en la zona de estudio, el segundo con los datos del radar meteorológico en el formato del modelo hidrológico. Por último, se efectuó la calibración y validación con base en el ajuste de los parámetros del modelo hidrológico considerando dos escenarios. En el primer escenario sólo se utilizaron los datos de las estaciones convencionales (datos de pluviómetro). El segundo escenario de simulación se realizó con los datos de precipitación estimada con radar. El procedimiento de calibración se realizó en dos etapas: en la calibración primaria se utilizó la técnica de prueba y error, y en la segunda etapa, o calibración óptima, se empleó la herramienta de optimización de parámetros contenida en el modelo *CEQUEAU*. Se calibraron los parámetros del modelo que controlan el flujo vertical del agua (alturas de vaciado, umbrales de agua en los recipientes, etcétera), así como los coeficientes del flujo de los recipientes.

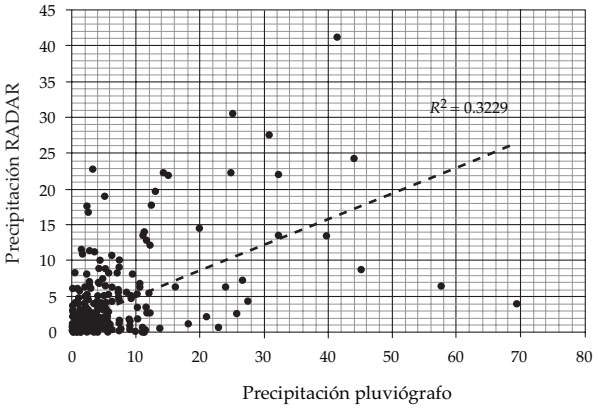
Resultados y discusión

Análisis estadístico de los datos de radar

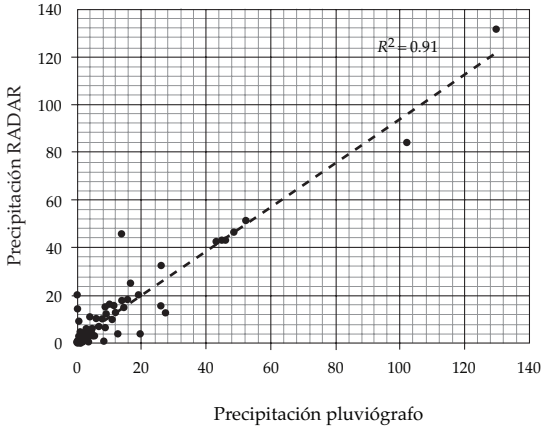
El proceso de verificación de la calidad de los datos de radar se llevó a cabo mediante un análisis de contraste con los datos correspondientes de pluviógrafos, los cuales se muestran en la figura 3. Con la dispersión existente de los datos se aprecia que la precipitación estimada por el radar difiere significativamente de la precipitación medida por los pluviógrafos para los intervalos de tiempo analizados. Estos resultados coincidieron en los tres pluviógrafos seleccionados y de acuerdo con Neary *et al*. (2004), esta dispersión no es atribuible totalmente al radar, sino que probablemente se debe a las fuentes de incertidumbre en las mediciones de pluviógrafos. En efecto, esta incertidumbre puede atribuirse a un error sistemático en la medición de viento y evaporación, así como un inadecuado funcionamiento mecánico. Otra fuente de incertidumbre es probablemente ocasionada por la diferencia entre las áreas de toma de datos, ya que la precipitación obtenida por medio del radar está promediada en una celda cuadrada de 16 km^2 y el dato del pluviógrafo es puntual. En el cuadro 4 se presentan los resultados del análisis de correlación entre los datos de radar y de pluviógrafo. Se observa que los valores del coeficiente de determinación (R^2) de las tres estaciones consideradas en el análisis, a intervalo de tiempo horario, son menores que con intervalo de tiempo diario (cada 24 horas). De las estaciones analizadas, la estación río Escondido fue la que presentó el mejor ajuste bajo un intervalo horario (R^2=0.60), y la estación Piedras Negras con intervalo de tiempo diario (R^2 = 0.92). Los resultados obtenidos con intervalo diario coinciden con los resultados encontrados por Kalin y Hantush (2006) en análisis similares, ya que reportan valores de R^2 entre 0.87 y 0.91 para el mismo intervalo de tiempo. Asimismo, los resultados del presente estudio indican que, en la comparación radar-pluviógrafo, existen pares de datos concomitantes que, mientras en el sensor del radar se estima un valor "cero", en el sensor del pluviógrafo se está registrando un valor mayor que cero o viceversa. Esto podría estar relacionado directamente con la capacidad del sensor en detectar la precipitación. Además, contrario a los resultados obtenidos en otras



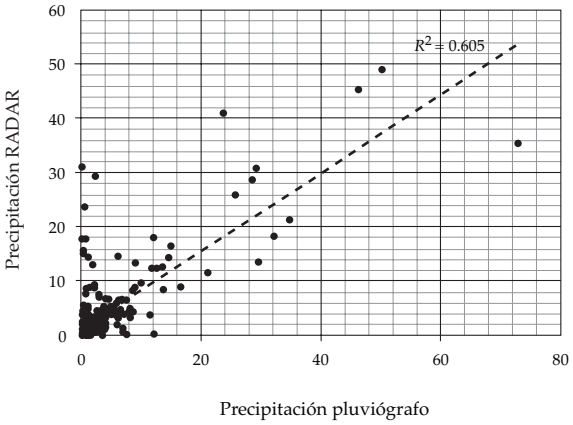
El Moral datos diarios, en mm



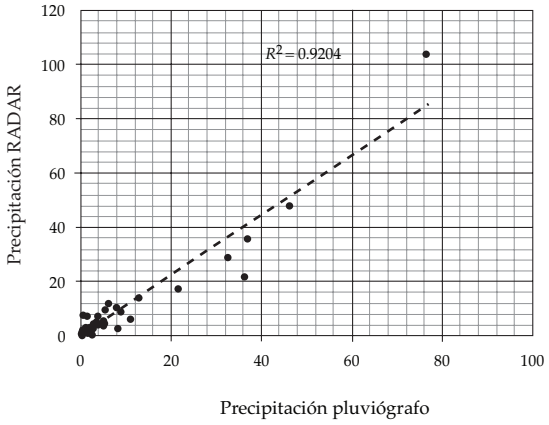
El Moral datos horarios, en mm



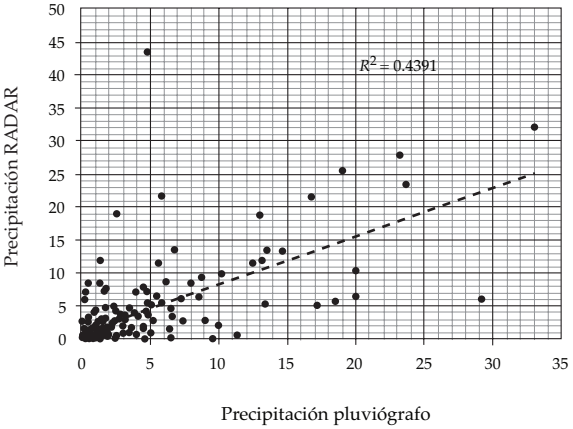
Escondido datos diarios, en mm



Escondido datos horarios, en mm



Piedras Negras datos diarios, en mm



Piedras Negras datos horarios, en mm

Figura 3. Dispersión de datos de precipitación horaria y diaria radar-pluviógrafo.

Cuadro 4. Resultados del análisis estadístico.

Estación	Intervalo de tiempo	R^2	Modelo de ajuste
El Moral	Horario	0.32	$Y = 0.36x + 1.35$
	Diario	0.78	$Y = 0.63x + 1.75$
Río Escondido	Horario	0.60	$Y = 0.722x + 1.13$
	Diario	0.91	$Y = 0.93x + 1.44$
Piedras Negras	Horario	0.44	$Y = 0.73x + 0.92$
	Diario	0.92	$Y = 1.11x - 0.149$

Cuadro 5. Resultados de la simulación hidrológica.

		Caudal medio ($m^3 s^{-1}$)	Caudal máximo ($m^3 s^{-1}$)	Coeficiente de Nash (adimensional)
Evento 1	Observado	0.98	20.80	-
	Calculado con pluviómetros	8.91	5.96	-0.272
	Calculado con precipitación-radar	2.937	13.37	0.356
Evento 2	Observado	0.58	9.06	-
	Calculado con pluviómetros	13.61	6.63	-0.500
	Calculado con precipitación-radar	1.04	6.70	0.132
Evento 3	Observado	10.03	883.0	-
	Calculado con pluviómetros	5.19	61.6	0.079
	Calculado con precipitación-radar	8.35	884.5	0.974

cuencas por Jayawickreme y Hyndman (2007), la estimación de la precipitación con radar en los píxeles que coinciden con los pluviógrafos fue sobrestimada.

Proceso de remuestreo de los datos de radar

La función de remuestreo del *software Idrisi* fue empleada para obtener una restauración geométrica de las imágenes. Se utilizó para georregistrar las imágenes en un sistema de referencia mediante las coordenadas de una serie de puntos de control en un archivo existente, así como en el nuevo sistema de referencia deseado, convirtiendo el archivo creado al nuevo sistema de referencia por medio de una función cartográfica polinomial lineal. Los resultados gráficos del proceso utilizado se muestran en la figura 4 y consisten en una imagen de puntos del sistema HRAP remuestreada en formato raster. Este procedimiento permitió analizar gráficamente la distribución espacial de la precipitación en la cuenca del río Escondido. Igualmente, se observa que entre las 7:00 y 8:00 horas del día 4 de abril del 2004, la distribución de la precipitación no cubre la totalidad de la superficie de la cuenca. Esta precipitación no fue registrada en las estaciones de terreno debido a que éstas se encontraban alejadas

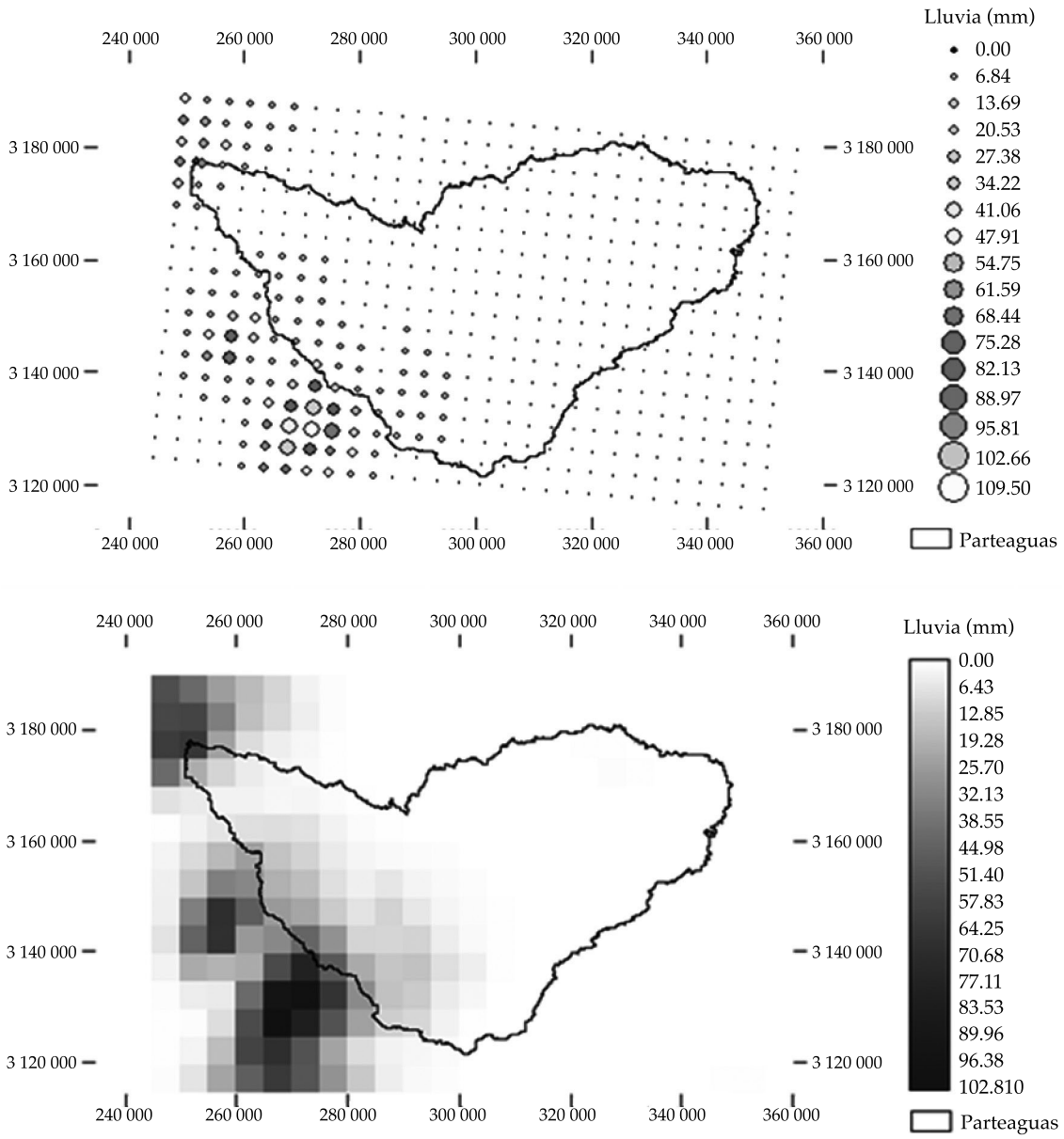


Figura 4. Remuestreo de datos de precipitación HRAP a precipitación *CEQUEAU*.

del centro y área de influencia de la tormenta. De acuerdo con los datos de las estaciones terrenas, se registró un valor máximo de 15 mm de precipitación, mientras que el valor máximo estimado por el radar fue de 101.1 mm (tomando como referencia la precipitación acumulada entre las 7:00 y 8:00 am del 4 de abril del 2004).

Simulación hidrológica

La simulación se efectuó en el periodo comprendido de 2002 a 2004, lapso en el que se cuenta con la información del radar. Además, la calibración se llevó a cabo utilizando los datos de precipitación estimada a partir de imágenes de radar. Lo anterior se debió a que

sólo se cuenta con tres pluviómetros, y éstos no están distribuidos de forma adecuada dentro de la cuenca. Ello ocasionó que no se pudiera efectuar la calibración del modelo únicamente con datos de pluviómetros.

Con respecto a los resultados obtenidos de la simulación, la figura 5 muestra la comparación de los hidrogramas observado y simulado en la cuenca del río Escondido, así como sus respectivos hietogramas. Para los eventos 1 y 2 se observa que los hidrogramas no fueron simulados satisfactoriamente. Sin embargo, en el evento 1, la simulación con datos de precipitación-radar es considerablemente mejor que la simulación con datos de pluviómetros. En cambio, en el evento 3, el hidrograma obtenido en la simulación realizada con datos de precipitación-radar reproduce adecuadamente el hidrograma observado. También se observa en el hidrograma obtenido en la simulación efectuada con datos de pluviómetros que no fue posible reconstruir de manera adecuada el caudal que se presentó durante el evento. Los valores del coeficiente de Nash, así como los caudales medios del año 2004 y máximo anual se muestran en el cuadro 5. El coeficiente de Nash que se obtuvo en el proceso de calibración corresponde a la avenida máxima del mes de abril del 2004 (evento 3). Con respecto a los escurrimientos durante los años 2002 y 2003, fueron prácticamente cero, excepto los eventos 1 y 2. Lo anterior es una característica de la cuenca del río Escondido, ya que se encuentra en una zona semidesértica, donde las lluvias son de tipo convectivo, asociadas con frentes fríos y ocasionalmente con eventos ciclónicos. Además, el caudal base es prácticamente nulo para varios meses del año.

Resulta evidente que la deficiencia del modelado con base en información pluviométrica se debió a que la distribución de la tormenta en la cuenca se localizó en una zona donde no se contaba con dispositivos de medición de precipitación.

Por otro lado, cabe mencionar que a pesar de que el modelo *CEQUEAU* no está diseñado para trabajar con un formato de datos de precipitación estimada a partir de radar meteorológico, gracias a que el modelo discretiza la cuenca en una malla de cuadros, ésta se adecuó fácilmente a la malla de los datos de precipitación estimados por imágenes de radar.

Conclusiones

Las estimaciones de la precipitación con base en imágenes de radar son particularmente útiles en zonas donde las tormentas son aisladas o de tipo convectivas y, específicamente, si la red de estaciones meteorológicas no cubre eficientemente estas zonas. Complementariamente, el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) como parte del preprocesamiento de la información requerida en el modelado hidrológico es hoy en día una herramienta indispensable. En efecto, los SIG son necesarios para el tratamiento y manejo de las imágenes de precipitación-radar debido a que permiten la visualización y edición de la información, así como la extracción de los datos de precipitación mediante el desarrollo de algoritmos computacionales insertos en el SIG.

Los datos de precipitación-radar utilizados en el modelado hidrológico permitieron simular tres eventos. Entre éstos en el evento 3 (abril de 2004), considerado como extraordinario, fue simulado de forma ampliamente satisfactoria tanto el caudal pico de la avenida como la forma del hidrograma. En cambio, para los eventos ordinarios 1 y 2 no fue posible reconstruirlos de manera adecuada. Sin embargo, en forma general, se considera una modelación apropiada para eventos potencialmente generadores de inundación con daños asociados. Los resultados obtenidos mostraron que a nivel horario existe una baja correlación entre los datos de precipitación medida por pluviómetro y la estimada por imágenes de radar. En cambio, a nivel diario se obtuvieron buenas correlaciones. Finalmente, es de suma

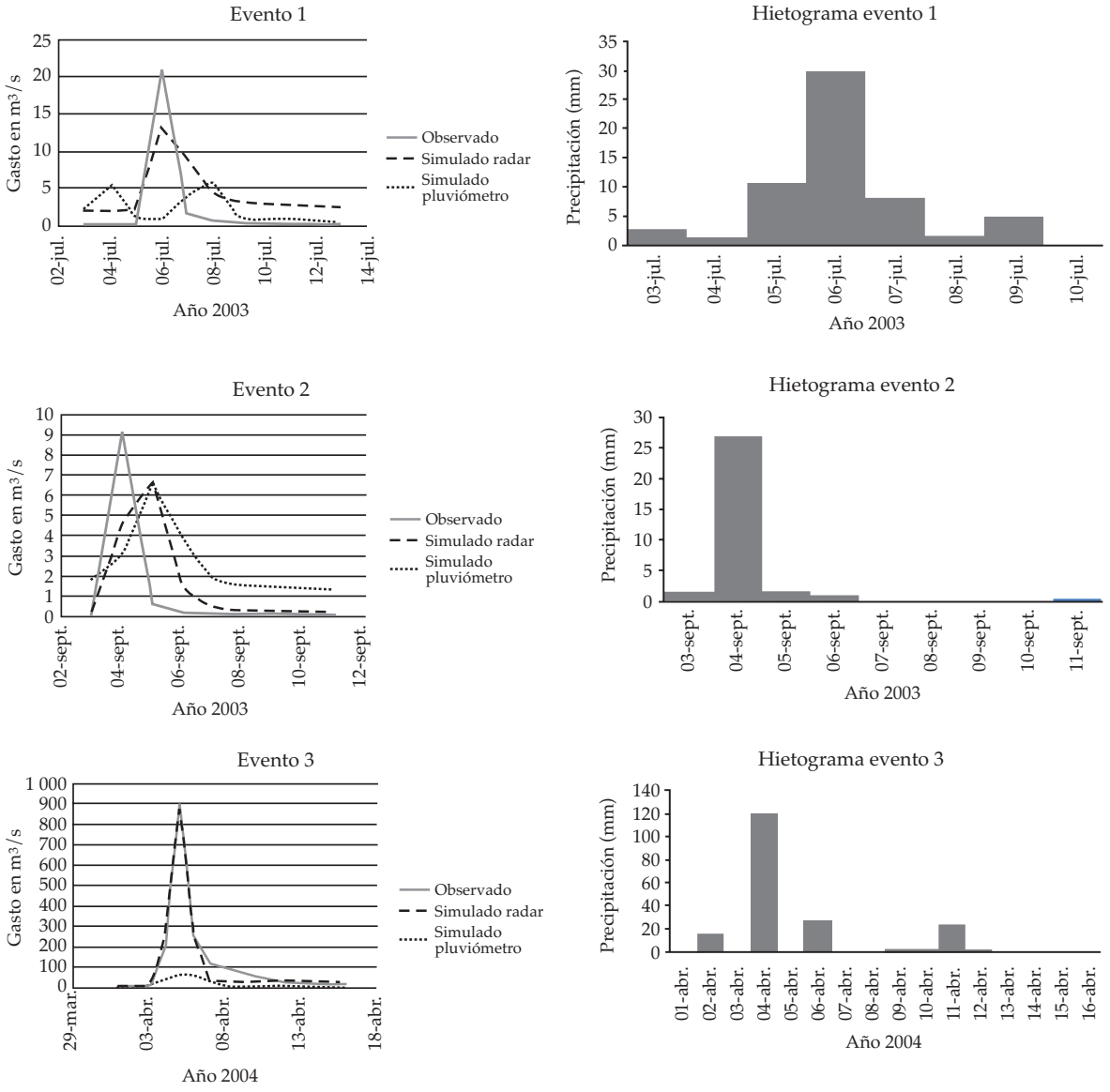


Figura 5. Resultados de la simulación hidrológica efectuada en *CEQUEAU* con datos de pluviómetro y RADAR.

importancia en el modelado hidrológico conocer las capacidades y limitaciones de los datos de precipitación estimados a través de radar, ya que esto permitirá su aplicación de una manera más eficiente y facilitará la toma de decisiones oportunas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al financiamiento otorgado por Semarnat-Conacyt en el marco del proyecto *FOSEMARNAT 2004-01-00174* del cual el responsable es el doctor Khalidou M. Bâ. Los autores agradecen al

doctor Robert J. Kuligowski de la NOAA por facilitar la información de radar.

Recibido: 06/04/09
Aprobado: 03/12/10

Referencias

BÂ, K.M., DÍAZ-DELGADO, C. y RODRÍGUEZ, V. Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 4, octubre-diciembre de 2001, pp. 117-126.

BEDIENT, P.H., HOBLIT, B.C., GLADWELL, D.C., and VIEUX, B.E. NEXRAD Radar for Flood Prediction in Houston. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 5, No. 3, 2000, pp. 269-277.

DURRANS, S.R., JULIAN, L.T., and YEKTA, M. Estimation of Depth-Area Relationships using Radar-Rainfall Data. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 7, No. 5, 2002, pp. 356-357.

GUERRA-COBIÁN, V.H. *Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado hidrológico de cuencas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU*. Tesis Doctoral. Toluca, México: Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEM, 2007, 317 pp.

HOSSAIN, F., ANAGNOSTOU, E.N., DINKU, T., and BORGA, M. Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty. *Hydrological Processes*. Vol. 18, 2004, pp. 3277-3291.

JAVIER, J.R.N., SMITH, J.A., ENGLAND, J., BAECK, M.L., STEINER, M., and NTELEKOS, A.A. Climatology of extreme rainfall and flooding from orographic thunderstorm systems in upper Arkansas River basin. *Water Resources Research*. Vol. 43, 2007, W10410, doi:10.1029/2006WR005093.

JAYAWICKREME, D.H. and HYNDMAN, D.W. Evaluating the influence of land cover on seasonal water budgets using Next Generation Radar (NEXRAD) rainfall and stream data. *Water Resources Research*. Vol. 43, 2007, W02408, doi: 10.1029/2005WR004460.

JESSEN, M., EINFALT, T., STOFFER, A., and MEHLIG, B. Analysis of heavy rainfall events in North Rhine-Westphalia with radar and rain gauge data. *Atmospheric Research*. No. 77, 2005, pp. 337-346.

KALIN, L. and HANTUSH, M.M. Hydrologic modeling of an Eastern Pennsylvania Watershed with NEXRAD and Rain Gauge Data. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 11, No. 6, 2006, pp. 555-569.

KRAJEWSKI, W.F., NTELEKOS, A.A., GOSKA, R. A GIS-based methodology for the assessment of weather radar beam blockage in mountainous regions: two examples from the US NEXRAD network. *Computers & Geosciences*. No. 32, 2006, pp. 283-302.

MORIN, G., SOCHANSKI, W., and PAQUET, P. *Le model de simulation de quantité CEQUEAU-ONU, Manuel de référence*. Quebec: Organisation des Nations Unies et INRS-Eau, rapport de recherché No. 519, 1998, 252 pp.

NASH, J.E. and SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology*. Vol. 10, 1970, pp. 282-290.

NEARY, V.S., HABIB, E., and FLEMING, M. Hydrologic modeling with NEXRAD precipitation in middle Tennessee. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 9, No. 5, 2004, pp. 339-349.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KIRINY, J.R., WILLIAMS, J.R., and KING, K.W. *Soil and water assessment tool user's manual, version 2000*. College Station, Texas, USA: TWRI Report Tr-192, Texas Water Resources Institute, 2002.

PATHIRANA, A., HERATH, S., and YAMADA, T. *On the Modeling of Temporal Correlations in Spatial-Cascade Rainfall Downscaling*. Sapporo, Japan: Weather Radar Information and Distributed Modeling, International Association of Hydrological Sciences, 2003.

QUENTIN, E., DÍAZ-DELGADO, C., GÓMEZ-ALBORES, M.A., MANZANO-SOLÍS, L.R. y FRANCO-PLATA, R. *Desarrollo Geomático para la Gestión Integrada del Agua*. XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (XI CONFFIBSIG), Universidad Nacional de Luján (UNLu)-Argentina, Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (SIBSIG), del 29 al 31 de mayo de 2007, Buenos Aires, Argentina.

REED, S. and MAIDMENT, D.R. Coordinate transformations for using NEXRAD data in GIS-based hydrologic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 4, No. 2, 1999, pp. 174-182.

ROSENGAUS, M. Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda parte de dos), *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. X, núm. 2, 1995, pp. 59-78.

Abstract

GUERRA-COBIÁN, V.H., BÂ, K.M., QUENTIN-JORET, E., DÍAZ-DELGADO, C. & CÂRSTEANU, A.A. Use of NEXRAD information for hydrological modeling in watersheds with sparse rain gauge networks. Water Technology and Sciences, *formerly* Hydraulic engineering in Mexico *(in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 35-48.*

This paper presents the process to adjust precipitation data obtained from weather radar images using GIS, for use in distributed hydrologic modeling. The main objective was to evaluate the quality of radar data using hydrologic model simulations and comparisons with simulations generated from rain gauge data. To this end, three events were simulated, including the flood that occurred in the Escondido River basin, Mexico, in April 2004. Hourly data were used from weather radar located in Laughling AFB, Texas, USA, which consist of binary files from a list of values of precipitation in mm. The quality of radar data was performed by a correlation analysis with data from automated rain gauge stations. The results indicate that data pairs exist in the radar-rain gage comparison, in which the radar is calculated as "zero" and the gauge registers a value greater than zero, or vice versa. Moreover, the explained variance between the precipitation data calculated from radar information and rain gauge measurements from the stations in the analysis was less at the hourly scale than the daily scale. Finally, simulations with radar precipitation data for extreme events show that the simulated hydrograph accurately reproduces the observed hydrograph. On the other hand, in the simulated hydrograph for rainfall data, neither the peak discharge nor the hydrograph shape was adequately simulated.

Keywords: *NEXRAD, meteorological radar, distributed model, GIS, CEQUEAU.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Víctor Hugo Guerra-Cobián

Centro Internacional del Agua
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León
Ciudad Universitaria s/n, A.P. 58-F
66450 San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México
Teléfono: +52 (81) 8352 4969, extensión 213
Fax: +52 (81) 8376 0477
victor.guerracb@uanl.edu.mx

Dr. Khalidou M. Bâ
Dra. Emmanuelle Quentin-Joret
Dr. Carlos Díaz-Delgado

Centro Interamericano de Recursos del Agua
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.5, Unidad San Cayetano
50110 Toluca, Estado de México, México
Teléfono: +52 (722) 2965 550
Fax: +52 (722) 2965 551
khalidou@uaemex.mx
equentin@uaemex.mx
cdiazd@uaemex.mx

Dr. Alin A. Cârsteanu

Departamento de Matemáticas
Escuela Superior de Física y Matemáticas
Instituto Politécnico Nacional
U.P. Adolfo López Mateos, edificio 9
07738 México, D.F., México
Teléfono: +52 (55) 5729 6000
Fax: +52 (55) 5729 5051
alin@math.cinvestav.mx