

ESTUDIO DE TORMENTAS TIPO EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO

STUDY OF TYPE STORMS IN QUERETARO CITY

M. ALFONSO
GUTIÉRREZ LÓPEZ

alfonso.gutierrez@uaq.mx

FABIOLA DEL R.
ARELLANO LARA

Facultad de Ingeniería, División
de estudios de Posgrado,
Universidad Autónoma de
Querétaro

Análisis de tormentas en la Zona Metropolitana de Querétaro

El estudio espacio-temporal de tormentas que se presenta además de aplicar las técnicas tradicionales de análisis hidroclimatológico de eventos, tales como kriging y análisis de frecuencias, muestra la bondad y potencial de combinar la información interpretada de imágenes de satélite con estas técnicas. Dado este enfoque, el trabajo se ha organizado como sigue: primero se muestra el análisis temporal sobre las tormentas registradas por estaciones meteorológicas automáticas (EMA) situadas en los alrededores de la zona metropolitana de Querétaro, estudio del cual fueron seleccionados los casos de estudio que a su vez fueron trasladados al análisis sobre imágenes de satélite, es decir se procedió a la aplicación de las técnicas basadas en estas imágenes para obtención de la precipitación. Posteriormente se realizó el análisis geoestadístico de la lluvia en el área de estudio, así el conjunto de resultados obtenidos en cada una de las etapas mencionadas son contrastados y comentados, todo direccionado a mostrar y comprobar las capaci-

Resumen

Se presenta una revisión sobre el origen de las precipitaciones y su distribución espacio-temporal sobre la zona metropolitana del municipio de Querétaro. Se analiza y detalla el origen de las lluvias extremas que ocasionan severos daños en la región de estudio. Se presenta un ejemplo de interpretación de variogramas direccionales y se muestra cómo esta función matemática puede representar variaciones espaciales y formar patrones de lluvia en una región a través de un kriging. Un análisis de imágenes de satélite confirma que los variogramas teóricos obtenidos son la herramienta para representar fielmente la variabilidad espacial del fenómeno. Los resultados indican que el acoplamiento de las características meteorológicas que se obtienen de las imágenes de satélite, con los datos de lluvia en superficie, pueden definir patrones de tormentas que deben ser tomados en cuenta para el alertamiento contra inundaciones, el desarrollo de planes directores contra inundaciones en la ciudad de Querétaro, etc.

Palabras clave: Kriging, campos de lluvia, interpolación espacial.

Abstract

A basic review regarding the origin of precipitation and its spatial and temporal distribution on the Queretaro's urban zone is presented. The origin of extreme rainfall events that caused severe damages in Queretaro City is analyzed. An example on the interpretation of directional variograms is presented and it is showed how this mathematical function can represent spatial variability and form rainfall patterns within a region through a kriging procedure. The analyses of satellite images confirm that theoretical variograms are the right tool to faithfully represent the spatial variability of a hydrological phenomenon. The results presented in this paper index that meteorological characteristics, provide by the satellite images in downscaling with the rainfall data in field, could be used for built rainfall patterns expressed in typical storms. Flood hazard mapping, and improve institutional frameworks for flood management, are some of the outputs of the implementation of typical storms in a hydrologic modeling.

Key words: Kriging, rainfall fields, spatial interpolation,

dades de implementar las imágenes de satélite en estudios hidrológicos. No obstante, se debe precisar que los alcances de la presente investigación corresponden a la etapa inicial del proyecto integral análisis de tormentas en la ciudad de Querétaro. Así esta fase del trabajo permite sustentar el paso al siguiente nivel de detalle, en una continuación de la investigación. Enseguida se describen brevemente los procedimientos y resultados obtenidos en los apartados mencionados.

Análisis temporal de tormentas

Análisis de tormentas de la EMA Huimilpan

En este apartado fue abordado el estudio de las tormentas ocurridas en la zona metropolitana de Querétaro, con base en los registros de la EMA Huimilpan, para el periodo de registro comprendido entre los años 2000 a 2007 y en los meses de la temporada de lluvias. El objetivo del estudio se centró en la localización de cada una de las tormentas (de inicio a término de la precipitación), las cuales fueron clasificadas y procesadas encontrándose al final la tormenta típica correspondiente a cada uno de los meses que conforman la temporada de lluvias.

En total fueron encontradas 751 tormentas distribuidas en duraciones desde los 20 minutos hasta 7 horas (420 min). Al año se originaron en promedio 107 tormentas, desde el franco comienzo de la estación de lluvias (junio) al mes de

septiembre en promedio se presentaron 24 tormentas cada mes (tabla 1), luego en el mes de octubre la incidencia de tormentas disminuyó al 50% mostrando la retirada de la temporada de lluvias. Los parámetros calculados por cada una de las duraciones fueron: tormentas, promedio, acumulación máxima, acumulación promedio, desviación acumulada. Probabilidad e Intensidad. Estos valores también fueron empleados de soporte para la identificación de la tormenta típica máxima de cada mes.

Se encontró que el número de tormentas ocurridas en los meses de junio y agosto mantuvo una tendencia de entre 20 y 40 eventos hasta el año 2005, donde se presentó un descenso importante de las lluvias del mes de junio, ver figura 1. En cambio las distribuciones del total de tormentas correspondientes a los meses de julio y septiembre mostraron grandes variaciones, en especial durante el año 2003 donde no hubo lluvias en julio y sin embargo se presentó la mayor cantidad de tormentas por mes considerando todo el registro de la EMA en cuestión, siendo éste el mes de septiembre. Por otro lado, el mes de octubre mantuvo una tendencia de ocurrencia entre cinco y 20 tormentas.

Con base en los resultados mensuales del análisis fue identificada la duración de tiempo de tormenta la cual tuviera los mayores valores de casi todos los parámetros, aunque se otorgó un mayor peso a la intensidad (I) y al acumulado máximo (acum. max).

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Prom	21	24	25	24	12
Desv	11.96	18.35	11.81	17.70	7.99
Max	35	55	37	56	24
Min	4	0	0	0	0

Tabla 1. Estadísticos mensuales totales de tormentas (2000-2007), EMA Huimilpan.

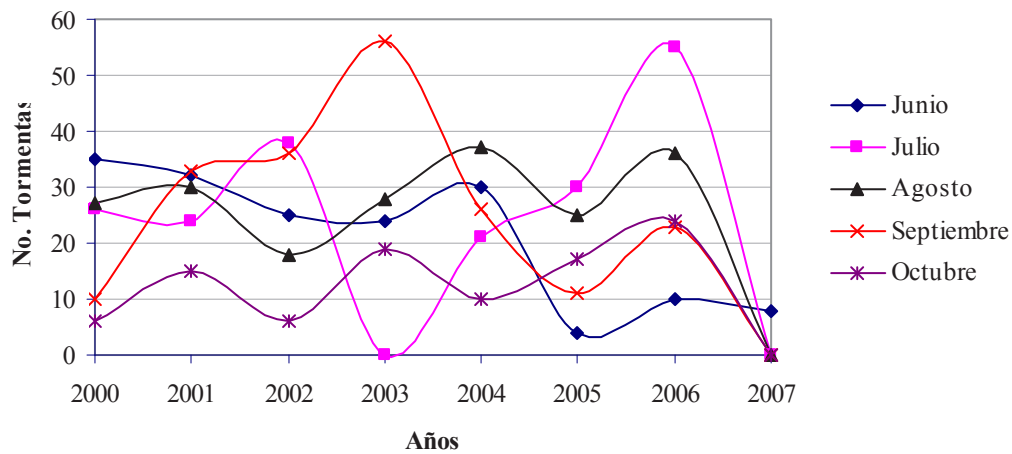
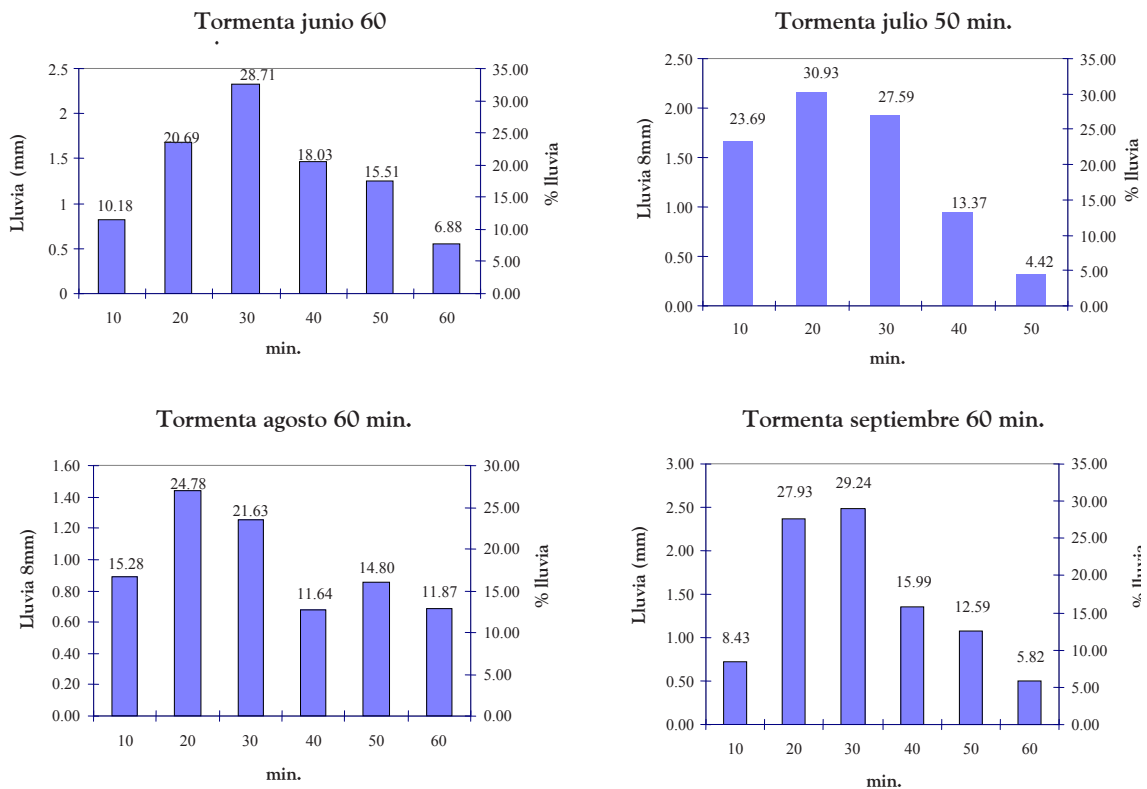


Figura 1.- Tendencias anuales y mensuales de la cantidad de tormentas, EMA Huimilpan.

Con este procedimiento la duración de tormenta que cumpliera con estas condiciones fue la nombrada como tormenta típica. Es importante mencionar que no fueron consideradas las duraciones de 20 y 30 min por no representar riesgos importantes de escurrimientos.

En resumen, se encontró que 60 minutos son los correspondientes a la duración de la tormenta típica máxima exceptuando para los meses de julio y octubre, cuyas tormentas típicas correspon-

den a aquellas con duraciones de 50 min. y 90 min. respectivamente, ver figura 2. El 50% del volumen de lluvia se precipita en los primeros 30 minutos para las tormentas de junio, agosto y septiembre. En el caso de la tormenta típica de julio el 50% de la precipitación cae en los primeros 20 minutos, y 40 minutos se requieren para obtener el 50% del volumen de precipitación para octubre, aunque en 30 min. se alcanza la máxima lámina.



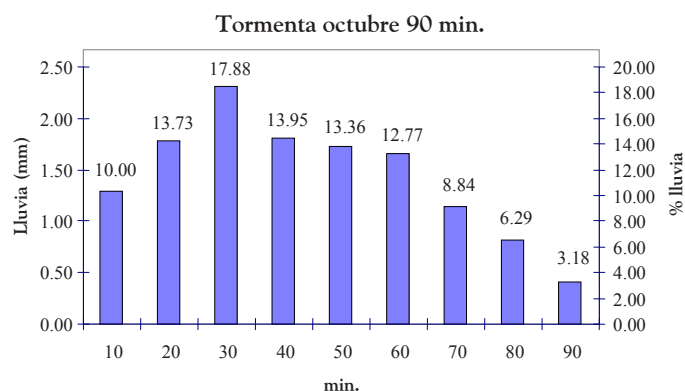


Figura 2.-Hietogramas de las tormentas típicas mensuales, EMA Huimilpan.

Se encontró que la lámina media acumulada para la tormenta de 60 min. es de 8 mm con una probabilidad de ocurrencia del 20% aproximadamente. La lámina máxima encontrada del análisis de los hietogramas máximos fue de 42 mm, y sin embargo la estructura de tal hietograma típico para 60 min guarda muy buenas semejanzas con las distribuciones en el tiempo de las tormentas de 60 min. especialmente con la del mes de junio, la cual es casi idéntica. En las duraciones mayores a los 60 minutos, el tiempo para el cual se alcanzaba el máximo volumen se fue ampliando paulatinamente y no correspondía más al primer pico, ya que se presentaban más de uno.

Análisis de tormentas de la EMA Presa Allende

En la identificación de las tormentas típicas registradas por la EMA Presa Allende se aplicó la misma metodología del análisis de las tormentas realizado sobre los datos de la EMA Huimilpan. Fueron utilizados los registros de la EMA Presa Allende, igual para el periodo comprendido entre el año 2000 y 2007. Fueron identificadas 405 tormentas con duraciones desde los 20 minutos hasta 7 horas (420 minutos). En promedio se presentaron 9 tormentas cada mes (tabla 2), exceptuando en el mes de junio, mes en el que ocurrieron 15 eventos en promedio. Tal comportamiento es muy estable en cuanto a la cantidad

de tormentas. Se debe resaltar el hecho de que el número promedio de tormentas es aún menor que el 50% de tormentas que registró la EMA Huimilpan, condición que se esperaba sucediera debido a la evolución y trayectoria de las tormentas que por lo general se dirigen al norte del estado (NW y NE), esto en temporada de lluvias. Así del análisis anual se tiene que se originaron en promedio 50 tormentas. En cuanto a los análisis mensuales se encontró que el número de tormentas ocurridas en los meses de julio a octubre mantuvo una tendencia de entre 5 y 15. En el mes de junio se presentó la mayor variación del número de tormentas entre los años y los meses, ver figura 3.

La tormenta típica de cada mes fue localizada aplicando la misma metodología que en las tormentas de la EMA Huimilpan, de tal forma que la tormenta típica correspondiente a este caso tiene una duración de 60 minutos, para todos los meses de la temporada de lluvias, de acuerdo a este estudio. El 50% del volumen de lluvia se precipita en los primeros 30 minutos, tal como se expuso en el análisis de los hietogramas máximos, sin embargo la curva de las tormentas típicas de junio, julio y septiembre presentaron un sesgo a la izquierda que sucede a los 20 minutos (ver figura 4). A diferencia de los hietogramas típicos de la EMA Huimilpan donde estos guardaban una forma aproximadamente normal.

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Prom	15.88	8.38	9.75	8.50	8.13
Desv	13.77	4.87	5.68	5.01	6.53
Max	38	13	17	16	20
Min	0	0	0	0	0

Tabla 2. Estadísticos mensuales totales de tormentas (2000-2007) , EMA Presa Allende.

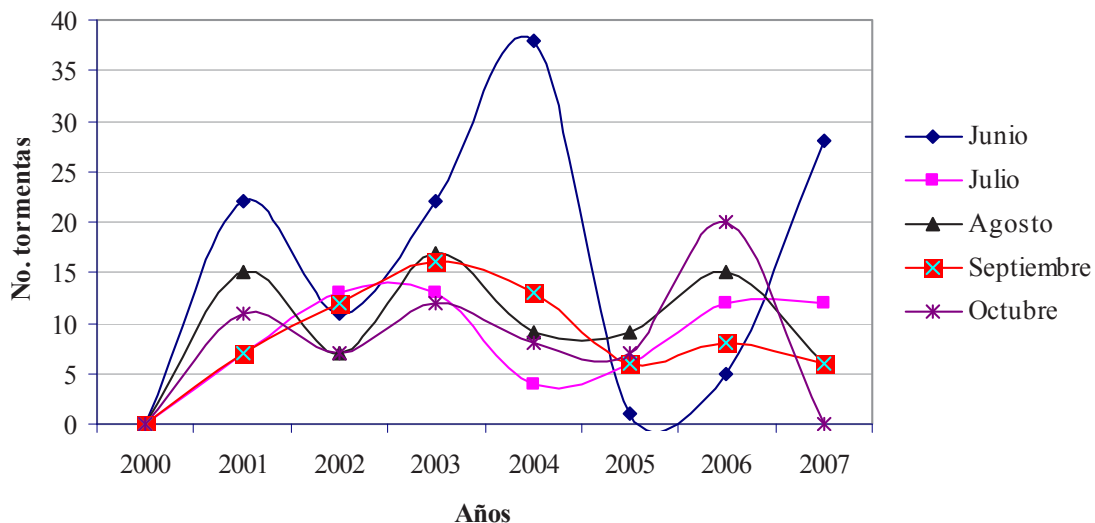


Figura 3.- Tendencias anuales y mensuales de la cantidad de tormentas, EMA Presa Allende.

La lámina media acumulada para la tormenta de 60 min. es de 7 mm con una probabilidad de ocurrencia de 24% aproximadamente. Existe una ligera diferencia de 1 mm (12.5%) por encima de la lámina acumulada promedio de la EMA Huimilpán, incremento que también se refleja en la probabilidad de ocurrencia, el cual es del orden de 20%. Aunque estos porcentajes disminuyen

ambos 50% por el tamaño de la población de tormentas registradas por esta EMA. La estructura temporal para la tormenta de 60 min derivada del análisis de las series de tiempo no guarda buenas similitudes con las distribuciones típicas del análisis previo, excepto por el mes de agosto y octubre, principalmente con el mes de octubre.

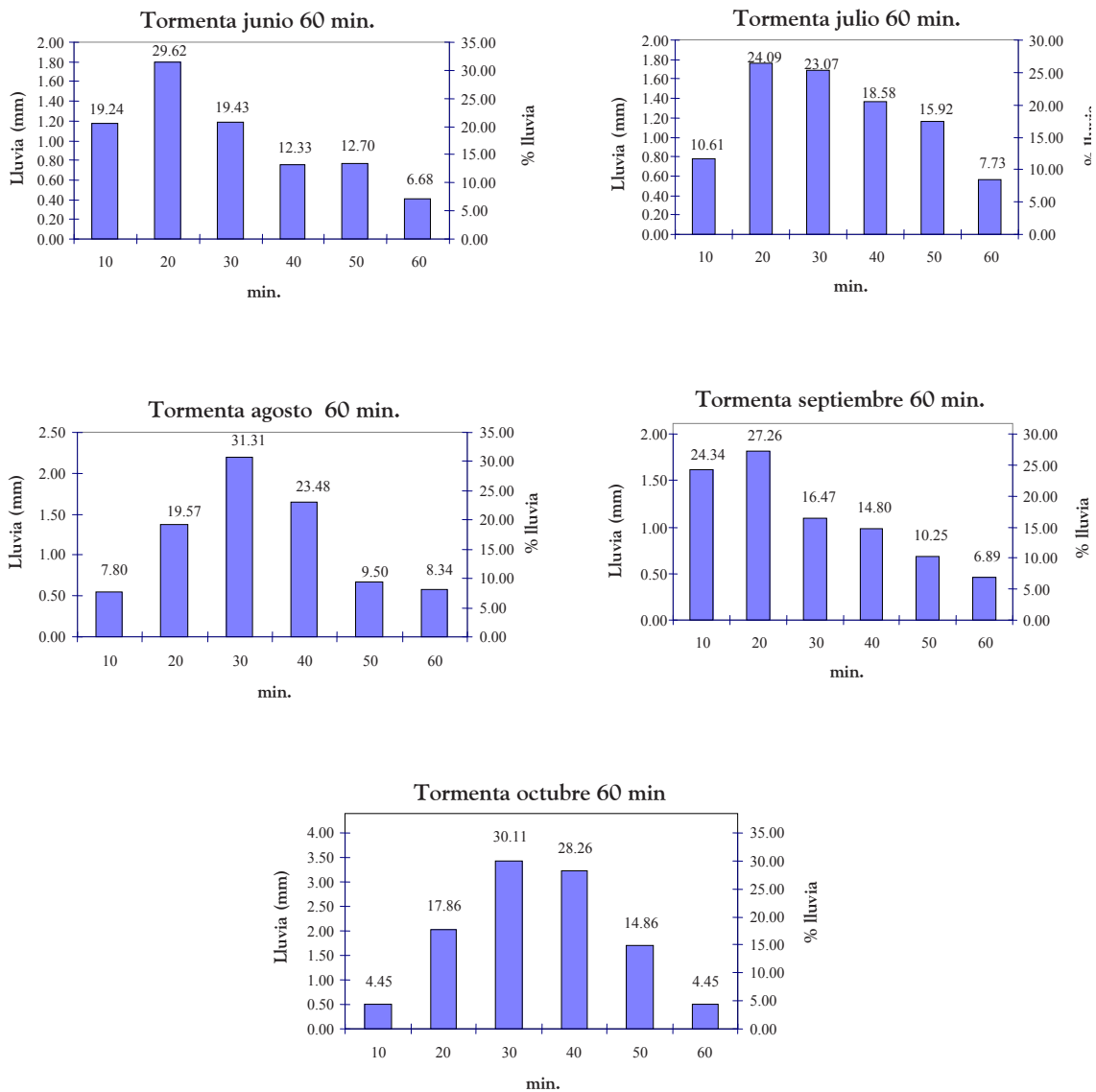


Figura 4.-Hietogramas de las tormentas típicas mensuales, EMA Presa Allende.

Los análisis de las tormentas típicas en ambas EMAs junto con los análisis de los hietogramas máximos han permitido obtener las estructuras en el tiempo de los eventos medios mensuales y máximos para la zona de estudio, de enorme utilidad en estudios hidrológicos por ejemplo para el diseño de estructuras contra inundación. Sin embargo el estudio también puso de manifiesto la sensible diferencia de las distribuciones temporales de la precipitación de un sitio a otro, de una EMA a la otra (Huimilpan a Presa Allende), lo cual fue previsto en un principio tan solo por la

cobertura de las EMAs, por lo que debe tenerse especial cuidado en la aplicación de los resultados a cuencas grandes o de otra manera trasladarse los resultados con los procedimientos adecuados (fuera del alcance de este estudio). Se remarca entonces que los resultados correspondientes a la EMA Huimilpan resultan más adecuados para ser aplicados a la zona urbana de Querétaro. Obtenidos estos resultados se procedió al análisis de las tormentas típicas máximas utilizando imágenes de satélite.

Análisis de la precipitación basado en imágenes de satélite

Antecedentes

En este estudio se abordó la estimación de la lluvia basada en imágenes de satélite ya que estas imágenes ofrecen la ventaja de tener una extensa cobertura espacial (escala sinóptica) y temporal. Además las imágenes también permiten el estudio de la dinámica relacionada con los sistemas de tormentas, aprovechable a la vez en la implementación de protocolos de alerta contra inundaciones, observación de eventos extremos, etc.

La estimación de lluvias por medio de imágenes de satélite se basa principalmente en el uso de datos visibles (VIS) e infrarrojos (IR), así como en los valores de radiación de microondas pasivas. Las técnicas para la interpretación de imágenes VIS e IR requieren adicionalmente de métodos complementarios empíricos que infieren de manera cuantitativa las lluvias. Particularmente la principal ventaja de las imágenes IR es que por el hecho de registrar temperaturas de brillo de las nubes (temperatura de emisión de la radiación electromagnética) es posible obtener estas imágenes durante las 24 horas del día.

Para el presente estudio fue seleccionada la técnica de estimación de lluvia GOES infrarroja operacional, mejor conocida como la técnica del auto-estimador de Vicente *et al.* (1998), la cual es empleada actualmente en su versión mejorada (hydro-estimador) por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional) en México y NOAA-NESDIS (Nacional environmental satellite, data and information service) en los Estados Unidos de América, entre otras instituciones internacionales. Es importante resaltar que la validez de estas y la mayoría de las técnicas de estimación de lluvia por imágenes de satélites IR están limitadas a las regiones para las que fueron creadas, tal como lo muestran las investigaciones de Marrocu *et al.* (1993), Oh *et al.* (2002) en la península de Corea y Menz (1997) para el este de África.

El objetivo de esta sección del estudio es presentar la comparación entre hietogramas de casos de estudio obtenidos a partir de imágenes infrarrojas de satélite con los hietogramas generados en base a los registros y análisis de la pre-

cipitación en superficie obtenidos en la sección anterior. El alcance de este estudio se limita a 2 casos de estudio (tormentas ocurridas en la zona urbana de Querétaro) ya que únicamente se muestra la bondad de la aplicación de imágenes de satélite.

Descripción de la técnica auto-estimador

Como se mencionó anteriormente, este algoritmo fue desarrollado por Vicente *et al.* (1998) para la estimación de la lluvia por medio de imágenes de satélite IR en la banda $10.7 \mu\text{m}$ (canal 4), provenientes de los satélites GOES-8 y GOES-9, y especialmente sobre eventos relacionados con convección profunda en la temporada de verano.

El algoritmo consiste en una ley de regresión de potencia derivada de la estadística realizada entre las estimaciones instantáneas de lluvia derivadas de radar en superficie y las temperaturas del tope de las nubes obtenidas por satélites, ambas estimaciones hechas para el mismo tiempo y espacio (mayo a junio de 1995, en la zona central de las grandes planicies de EUA). También dicha ecuación requiere ser afectada por los siguientes factores de corrección: por humedad, crecimiento de nubes y un gradiente de temperatura de tope de las nubes, para un mejor ajuste de los estimados, cuyos procedimientos pueden ser consultados en Vicente *et al.* (1998). La expresión es la que se muestra a continuación:

$$R = 1.1183 \times 10^{11} \exp(-3.6382 \times 10^{-2} T^{1.2}) \quad (1)$$

Donde R es la razón de lluvia en milímetros por hora y T es la temperatura del tope de las nubes en grados Kelvin para el rango entre 195 y 260 °K. La lluvia promedio en una hora (I, mm/hr) estimada a partir de imágenes IR en canal 4 se obtiene píxel por píxel entre las 3 imágenes consecutivas a cada media hora aplicando el concepto de media triple (trimean), contando con las imágenes previamente procesadas con la ecuación 1. Por lo tanto razón de lluvia para una hora esta dada por:

$$\text{Lluvia (1 hora)} = (\text{Lluvia mínima} + 2 * \text{Lluvia media} + \text{Lluvia máxima}) / 4 \quad (2)$$

De tenerse valores de lluvia iguales en 2 o 3 de las imágenes, el resultado de la lluvia promedio de una hora se puede calcular como la media simple. Para periodos más largos de una hora simplemente se acumulan los resultados horarios de lluvia.

Metodología y resultados

Las imágenes IR que se emplearon en este estudio fueron proporcionadas de manera gratuita por el SMN, las cuales provienen del satélite GOES-12 y corresponden a las temporadas de lluvias para los años 2004 al 2006 en intervalos de 15 minutos aproximadamente. Estas imágenes de satélite se encuentran en formato de imagen comprimido .PCX, en proyección nativa del software satelital MARTA, datum WGS84 y a una resolución de 4 km x 4km. La cobertura comprende desde los 80° a los 123° de longitud oeste y de los 14° a los 36° de latitud.

El aprovechamiento de la información de temperatura de brillo de las imágenes para la estimación de lluvia requirió principalmente del siguiente procesamiento:

- Transformación los valores de píxeles a temperaturas de brillo para la extracción de las nubes frías
- Identificación de sistemas nubosos
- Aplicación del algoritmo auto-estimador para la estimación de lluvia

La transformación de píxeles a valores de temperatura de brillo y la identificación de nubes frías se realizó con base en la convención aplicada por la NOAA para imágenes IR disponible en www.goes.noaa.gov/ECIR3.html, que consiste en las siguientes formulaciones:

- A : si $B > 176$ entonces $T = 418 - B$ (3)
- B : si $B \leq 176$ entonces $T = 330 - (B/2)$ (4)

donde B es el valor del pixel y T corresponde a la temperatura en °K. Tales condiciones están relacionadas con el criterio de Maddox (1980) sobre los parámetros de identificación de los sistemas de tormentas, entre los cuales estableció el umbral inicial de temperatura para nubes frías (32 °C). La ecuación 3 corresponde al umbral de esta temperatura fría, por lo fue aplicada para la extracción de los sistemas nubosos sobre las imágenes.

En cuanto a la identificación evolutiva de los sistemas nubosos fue tomado nuevamente el criterio de Maddox (1980), de manera de mantener una consistencia en la metodología, de esta forma se analizaron las imágenes correspondientes a seis horas previas a la ocurrencia del evento seleccionado asegurando así la determinación de la trayectoria de los sistemas nubosos en su paso sobre el área de estudio. Adicionalmente fueron trazados los centros de los núcleos convectivos de los sistemas, junto con sus diagonales superiores e inferiores, esto para cada una de las imágenes. En conjunto estas acciones permitieron la validación de los sistemas nubosos como tales y el conocimiento de su comportamiento. No obstante que se utilizó el criterio de Maddox (1980) para la identificación de los sistemas nubosos por ser el más robusto, existen otros criterios orientados a la localización de estructuras nubosas más pequeñas en comparación con el criterio de Maddox (1980), como son las de Bartels et al. (1984), Fritsch (1986), Kane et al (1987) y Augustine et al. (1988), por ejemplo.

Posteriormente de haberse realizado el rastreo de las tormentas se procedió con la estimación de la lluvia con la técnica del auto-estimador. En esta etapa el conjunto de imágenes utilizadas fueron las correspondientes a la duración de la lluvia registrada por la EMA Huimilpan.

Esta metodología descrita se aplicó a dos tormentas comprendidas dentro del grupo de tormentas típicas para la zona metropolitana de Querétaro, es decir de 60 min. de duración, cuyo análisis se presentó en el apartado anterior. De manera arbitraria fueron elegidas tormentas ocurridas en el mes de septiembre del año 2004 y del año 2006. Las imágenes disponibles para el mes de septiembre de 2005 presentaron discontinuidad de origen en los píxeles, razón por la que no fue

posible su incorporación a este estudio. Entonces los casos de estudio fueron la tormenta ocurrida el 29 de septiembre del 2004 que comenzó a las 01:50 a.m. y la tormenta del 24 de septiembre del 2006 de las 00:30 a.m. Los resultados de la lluvia para cada tormenta se presentan a continuación.

Tormenta 29 de septiembre del 2004

Durante el mes de septiembre el país está bajo la actividad ciclónica en su fase saliente, así como a la llegada temprana de frentes fríos. Tal como sucedió el 29 de septiembre del 2004, ya que en esta fecha en cuestión se tuvieron condiciones de humedad en el centro del país asociadas a varios fenómenos, como fueron el paso de un frente frío proveniente del norte, una onda tropical afectando el sureste y una corriente de chorro también al noreste del país. Tales condiciones provocaron la inestabilidad en superficie sobre el centro del país, específicamente propiciaron la tormenta de tipo convectivo que afectó la zona urbana de Querétaro.

Se analizaron un total de 23 imágenes comprendidas entre las 9:00 p.m. del día 28 de septiembre del 2004 y las 3:20 a.m. del día siguiente para el rastreo de la tormenta, tal como fue

explicado previamente. A partir del análisis se encontró que se formaron 3 sistemas nubosos nombrados del 1 al 4 (figura 5), siendo el sistema 2 el cual provocó la precipitación sobre la ciudad de Querétaro en la madrugada del día 29. Este sistema tuvo un desarrollo nocturno, frecuente en este mes del año excepto por sistemas nubosos asociados a los ciclones. El desplazamiento de los sistemas encontrados es hacia el noreste, como se observa en la figura 5, donde han sido identificadas las posiciones temporales de los núcleos convectivos por cada sistema. Se asoció el color amarillo con el inicio del sistema y color rojo para la última posición del núcleo convectivo. La extensión del sistema 2 cumplió con las condiciones un sistema nuboso asociadas a la temperatura y extensión, al mantener una longitud mayor a los 100 km durante su trayectoria por la zona de estudio. Se presentó también un fenómeno de fusión de sistemas, relativo a los sistemas 3 y 4, situación bastante común en la evolución de tormentas y que es evidente claramente cuando se emplean imágenes de satélite, no así directamente con otros insumos de información. El desarrollo de los sistemas nubosos es particularmente importante por ser altamente aplicable como herramienta de alerta en la mitigación contra inundaciones.

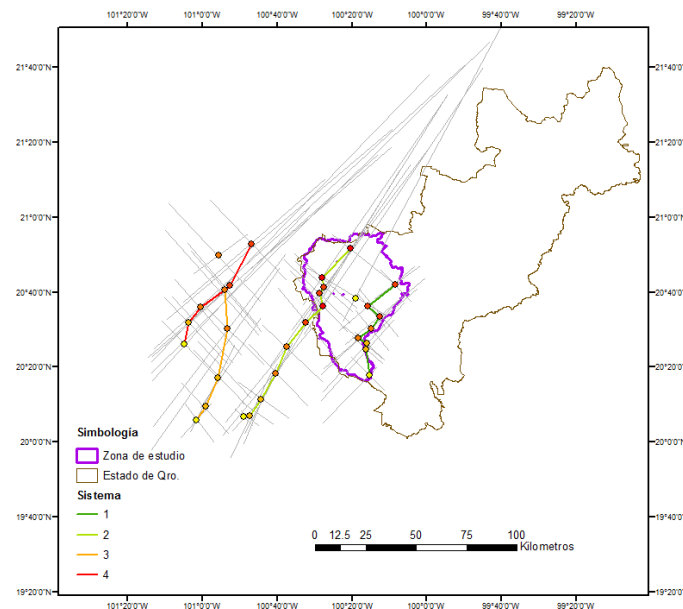


Figura 5. Rastreo de los sistemas nubosos, 29 de septiembre del 2004, en el Estado de Querétaro y en la Zona Metropolitana de la Ciudad.

Una vez completado el rastreo de la tormenta, se procedió a la obtención de la lluvia. La estimación de la lluvia fue modificada para el presente estudio, en cuanto a que los factores de corrección recomendados sobre el algoritmo auto-estimador no fueron ejecutados. La variación al algoritmo se basó en el hecho de que de antemano se contaba con el conocimiento de la precipitación ocurrida, entonces era posible la comparación entre ambas estimaciones de lluvia (medida en superficie y derivada de imágenes IR), objetivo de este apartado de la investigación, obteniendo además de manera simultánea la relación entre los cálculos. Estos resultados constituyen un excelente precedente para un estudio más extenso de las relaciones entre los dos tipos de estimaciones de lluvia y conformar quizás la base de un sistema de mitigación de riesgos de inundaciones para la ciudad de Querétaro. Habiendo ejecutado lo anterior se continuó con el cálculo de los estadísticos de las estimaciones de lluvia para obtener la razón de lluvia para una hora y resolver la ecuación 2. Estos mapas fueron generados mediante álgebra de mapas sobre las imágenes raster

con las estimaciones de lluvia. El mapa final de la aplicación de la metodología del auto-estimador se muestra en la figura 6, en la cual se agregaron los puntos centrales de las celdas del raster.

La transformación del raster razón de lluvia para la tormenta a puntos se realizó para obtener la distribución espacial mediante la interpolación de Kriging, la cual se muestra en el mapa de la figura 7. La validación de estos resultados se debía llevar a cabo al comparar la lluvia registrada por la EMA Huimilpán acumulada en el mismo periodo de tiempo en cuestión, sin embargo, en este caso, la cobertura final de lluvia obtenida a partir de las imágenes IR, después de haberse resuelto la ec. 2, no cubrió el punto de localización de esta EMA, como se observa en la fig. 7. Esto no implica desde luego que en ningún instante de la duración de la tormenta está no hubiera pasado sobre la EMA, y por supuesto tampoco se desvirtúa a la técnica de estimación de lluvia.

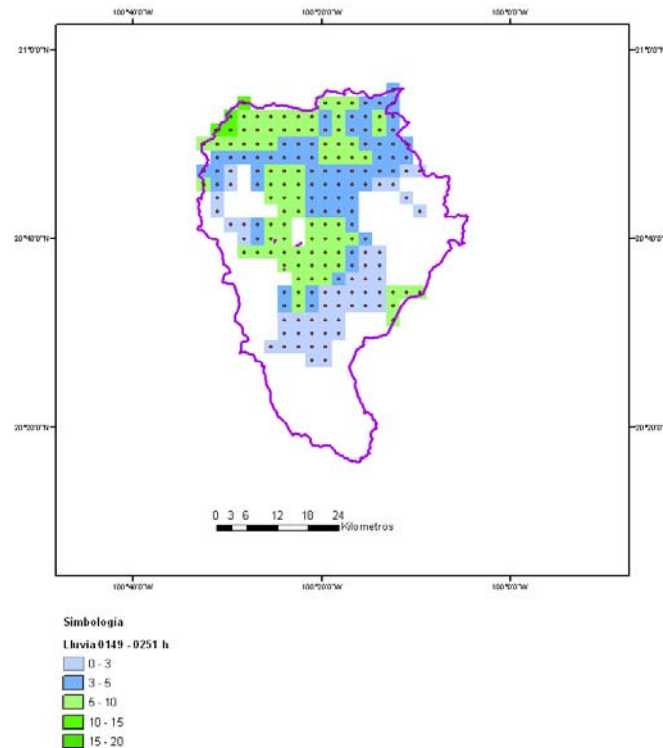


Figura 6. Lluvia estimada entre 01:49 02:51 hr para la tormenta del 29 de septiembre del 2004 en la cuenca de la Zona Metropolitana.

Previendo que se pudiera presentar esta situación, fue seleccionado un punto de ubicación aproximadamente al centro de la cuenca de estudio, cuyas coordenadas son $100^{\circ} 23' 16''$ de longitud oeste y $20^{\circ} 35' 16''$ de latitud norte. Dicho punto también se encuentra en el mapa de la figura 7 entre las isoyetas de 5 y 6 mm/hr, y su valor de razón de lluvia asociado es de 5.26 mm/hr, obtenido por interpolación. Por lo tanto, la lá-

mina acumulada en este punto para la tormenta del día 29 de septiembre del 2004 a la 1:50 a.m. es de 5.26 mm. Para este mismo punto también fue determinada la distribución temporal aplicando la estructura temporal encontrada para el hietograma máximo de la EMA Huimilpan, acción válida dado que el punto cae dentro de la zona de cobertura de esta estación. En la figura 8 se presenta el resultado.

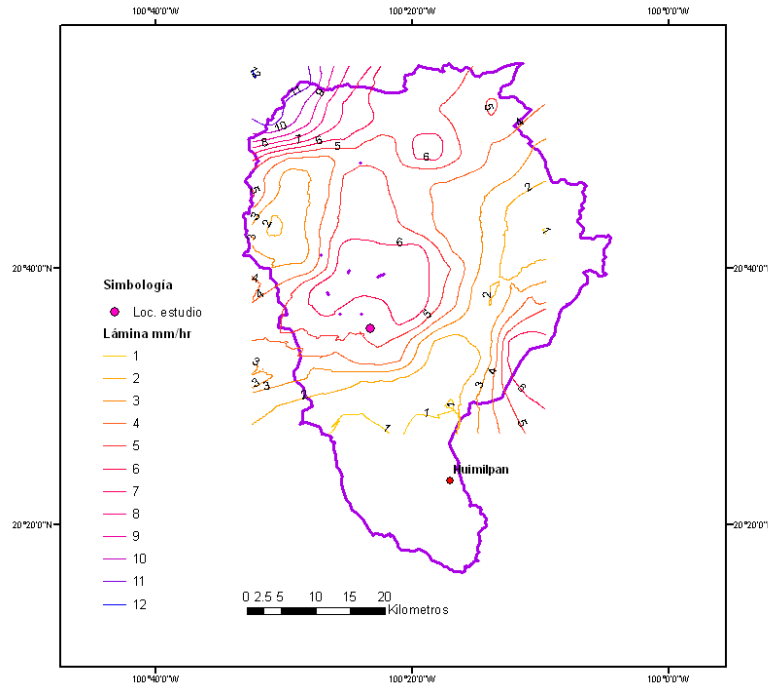


Figura 7. Distribución espacial de la lluvia del 29 de septiembre del 2004 en la cuenca de la Zona Metropolitana generada de imágenes IR.

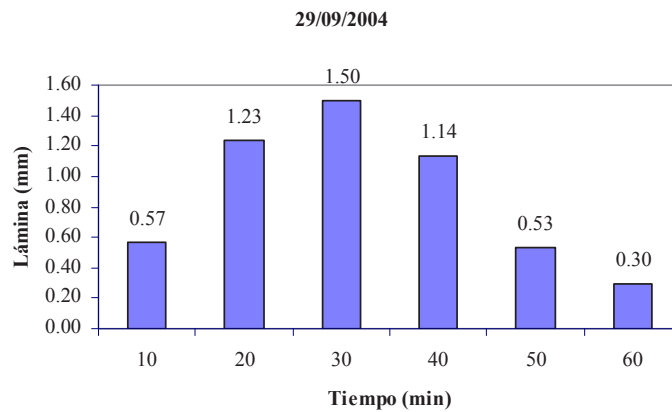


Figura 8. Hietograma en el punto de estudio para la tormenta del 29/09/2004 con duración de 60 min.

Tormenta 24 de septiembre del 2006

Las condiciones de humedad en el ambiente el 24 de septiembre del 2006 sobre el centro del país favorecieron la ocurrencia de lluvias ligeras, tal como sucedió en la zona metropolitana de Querétaro.

21 imágenes fueron las analizadas para el rastreo de esta tormenta, comprendidas entre las 8:00 p.m. del día 23 de septiembre del 2006 y las 1:30 a.m. del día 24 de sep. En la figura 9 se presentan los 6 sistemas nublados desarrollados en el

periodo de tiempo especificado, numerados del 1 al 6, siendo el sistema 1 el responsable de la precipitación sobre la ciudad de Querétaro. Este sistema al igual que el analizado anteriormente tuvo un desarrollo nocturno. En esta ocasión el desplazamiento de los sistemas encontrados fue cambiante, en ocasiones hacia el noroeste, otras ligeramente al suroeste y volviendo hacia el noroeste, en general el desplazamiento tendió al oeste, como se observa en la figura 9. Siguiendo la metodología aplicada a la tormenta anterior han sido identificadas las posiciones temporales de los núcleos convectivos por cada sistema.

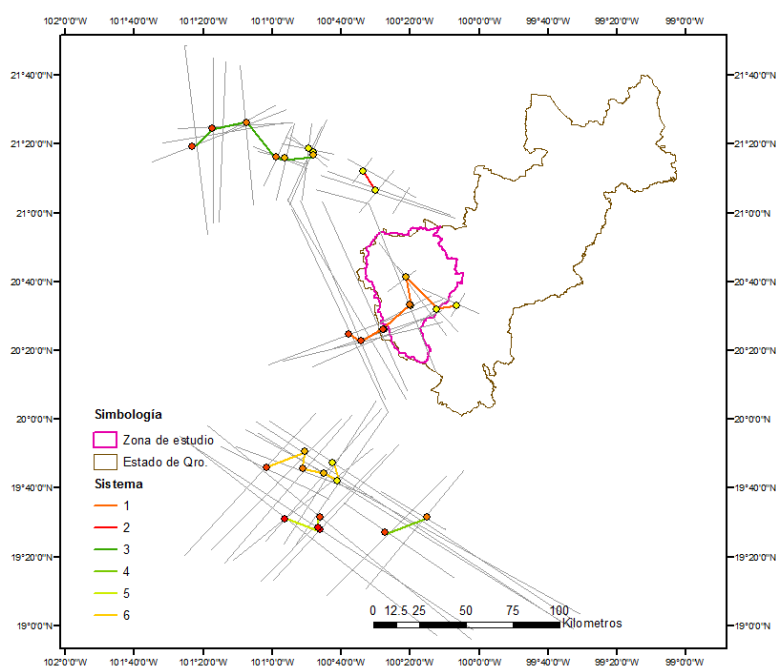


Figura 9. Rastreo de los sistemas nublados, 24 de septiembre del 2006.

Luego de completado el rastreo de la tormenta, se procedió al cálculo de la lluvia de acuerdo a la técnica del auto-estimador exceptuando de nuevo de las correcciones, exactamente como en la tormenta anterior. En la figura 10 se presenta la imagen de la razón de lluvia para 1 hr junto con sus puntos centrales de las celdas del raster.

La razón de lluvia para 1 hr fue calculada empleando el método de interpolación de Kriging, como se muestra en el mapa de la figura 11. A diferencia de la dificultad para realizar la validación de estos resultados ocurrida en el caso anterior, la

EMA Huimilpán quedó cubierta por la imagen de la razón de lluvia de 1 hr, como se observa en la misma figura. Al punto de la localización de la EMA le corresponde una razón de lluvia de 30.43 mm/hr, calculada por la interpolación entre las isoyetas de 30 y 33 mm/hr, lo que significa que la lámina para la duración de esta tormenta (60 min) resulta de 30.43 mm. Por otro lado la lámina acumulada registrada por la EMA para el mismo periodo de tiempo de la fecha en cuestión fue de 37.34 mm. De esta manera la diferencia entre la estimación de lluvia a través de imágenes IR difiere en 18.5% de la lluvia proveniente de la

EMA. Tal resultado es bastante alentador, a pesar de la presente investigación abarcó una muestra pequeña de eventos y sin embargo al menos para esta tormenta la distribución espacial de la precipitación estimada es completamente válida en la zona de cobertura arrojada por del procesamiento de las imágenes, aplicando el ajuste determinado.

Sobre el mismo punto adicional utilizado en el análisis de la tormenta anterior fue calculado el

hiograma correspondiente. Entonces primero se determinó la razón de lluvia sobre el punto, esta fue de 10.44 mm/hr (ya que tal punto quedó entre las isoyetas de 9 y 12 mm/hr) ver figura 11. Después de aplicar el ajuste por la EMA la razón de lluvia pasa a 8.51 mm/hr. La lámina acumulada en este punto entonces es de 8.51 mm y su distribución temporal se muestra en la figura 12, la cual fue generada de acuerdo al procedimiento descrito antes.

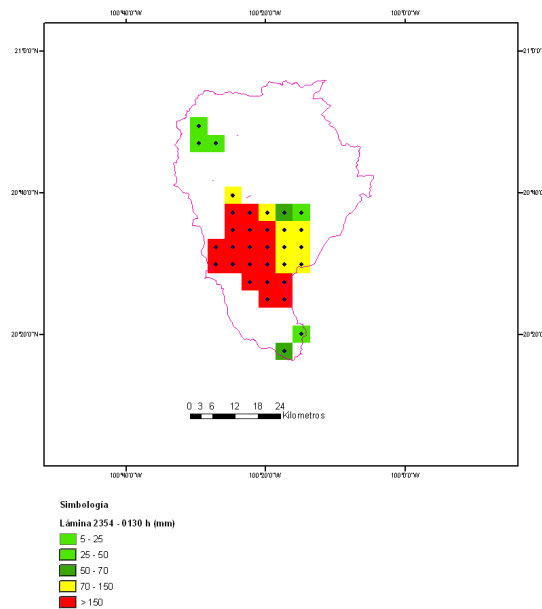


Figura 10 Lluvia estimada entre 00:30 01:30 hr para la tormenta del 24 de septiembre del 2006 en la cuenca de estudio.

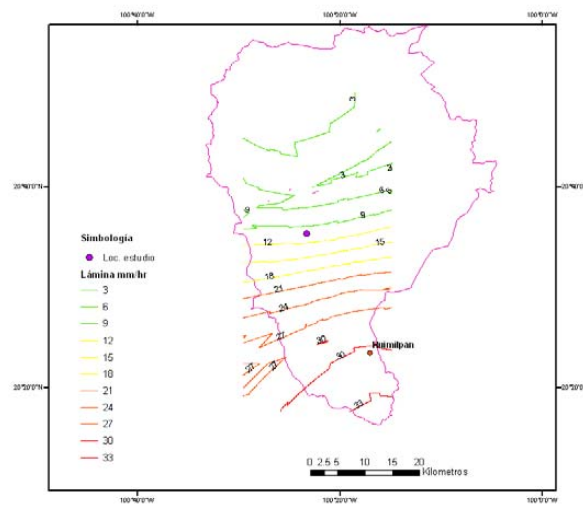


Figura 11. Distribución espacial de la lluvia del 24 de septiembre del 2006 en la cuenca de estudio generada de imágenes IR.

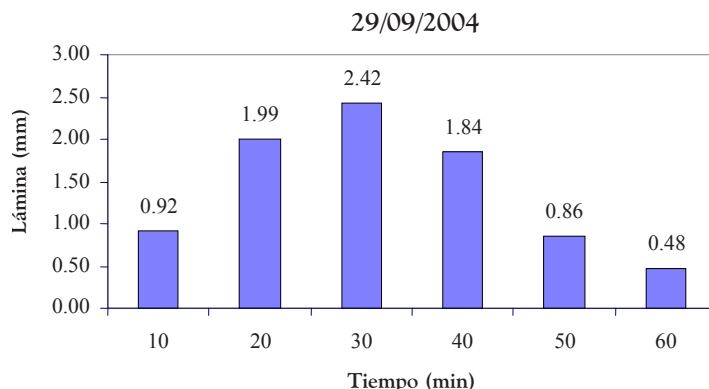


Figura 12.- Hietograma en el punto de estudio para la tormenta del 24/09/2006 con duración de 60 min.

Análisis de la tormenta típica utilizando variogramas

Se obtuvieron los variogramas de la variabilidad espacial sobre las precipitaciones ajustados teóricamente, luego con estos resultados y las mediciones de las estaciones en tierra fueron estimados los variogramas en intervalos de 10 min. Esto fue realizado con el fin de preservar la estructura temporal de las tormentas típicas máximas, con duración de una hora. Se seleccionó el periodo de retorno de 10 años como ejemplo. Estos resultados se muestran a continuación.

Es muy importante resaltar que la distribución espacial encontrada en este caso se acerca mucho al comportamiento espacial de la lluvia estimado a partir de las imágenes de satélite, principalmente sobre la segunda tormenta analizada. También, la agregación de estas isoyetas ajusta en buen grado al valor de la lluvia asociado a la isoyeta estimada sobre el punto de localización de la EMA Huimilpan generado de imágenes (ver figura 11).

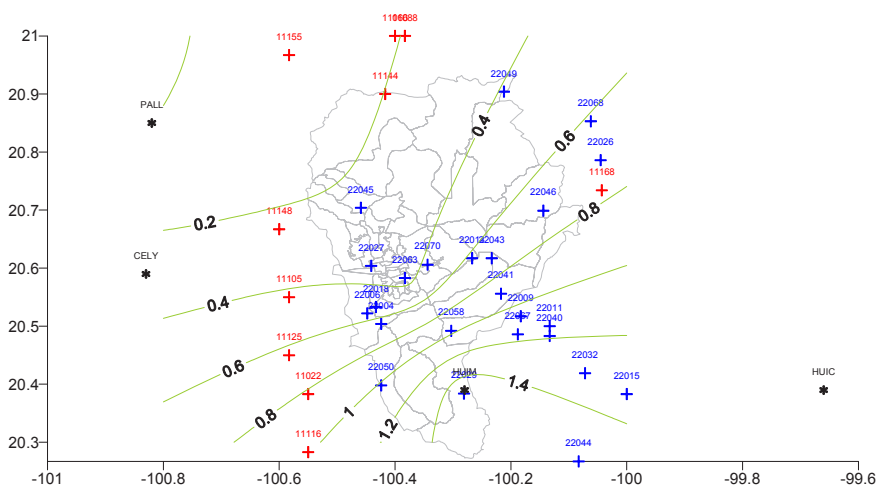


Figura 13. Precipitación (Tr=10) para 10 minutos de una tormenta de duración de una hora.

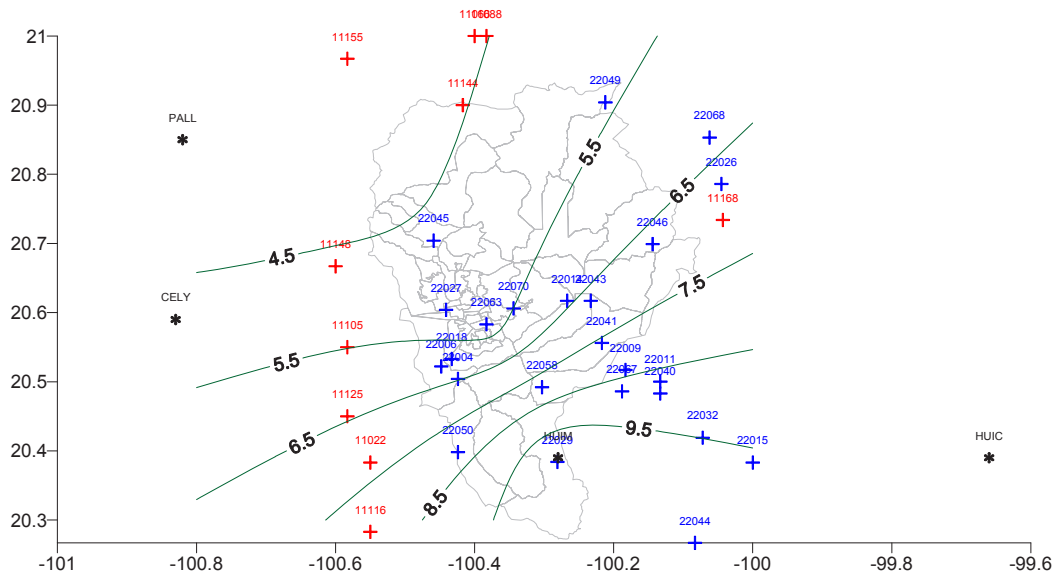


Figura 14. Precipitación ($Tr=10$) para 20 minutos de una tormenta de duración de una hora.

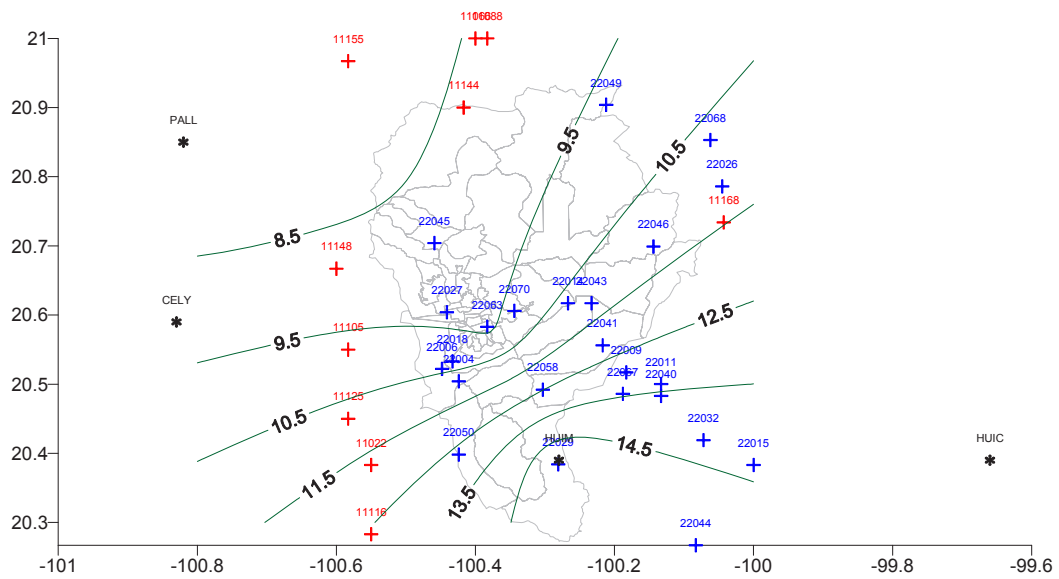


Figura 15. Precipitación ($Tr=10$) para 30 minutos de una tormenta de duración de una hora.

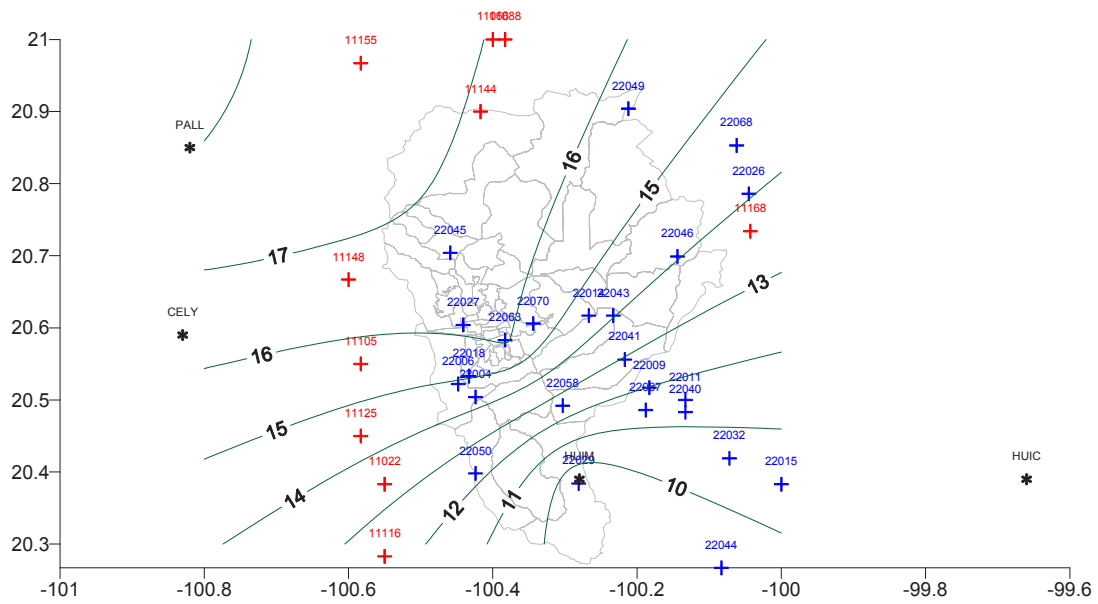


Figura 16. Precipitación ($Tr=10$) para 40 minutos de una tormenta de duración de una hora.

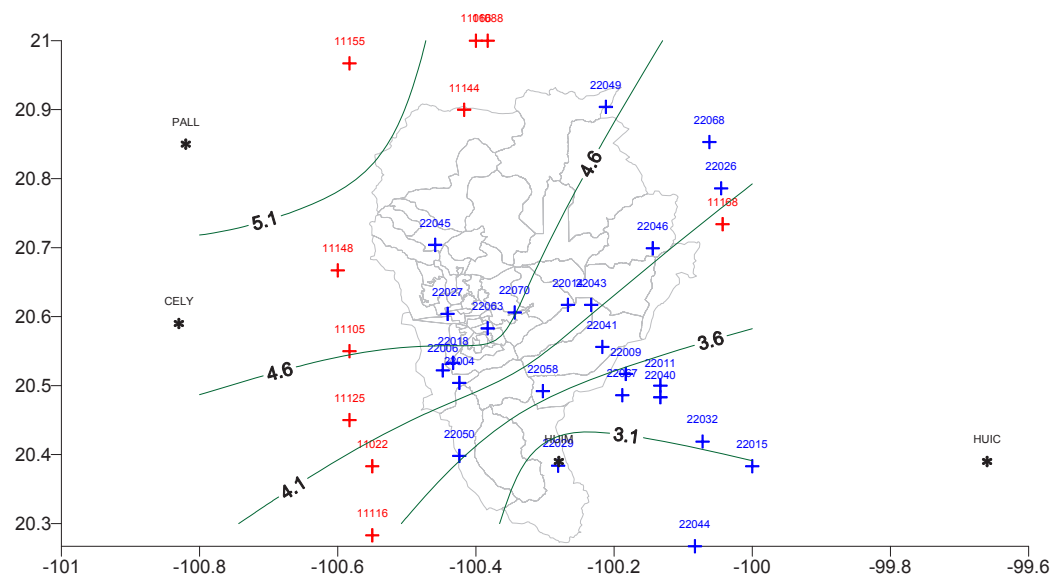


Figura 17. Precipitación ($Tr=10$) para 50 minutos de una tormenta de duración de una hora.

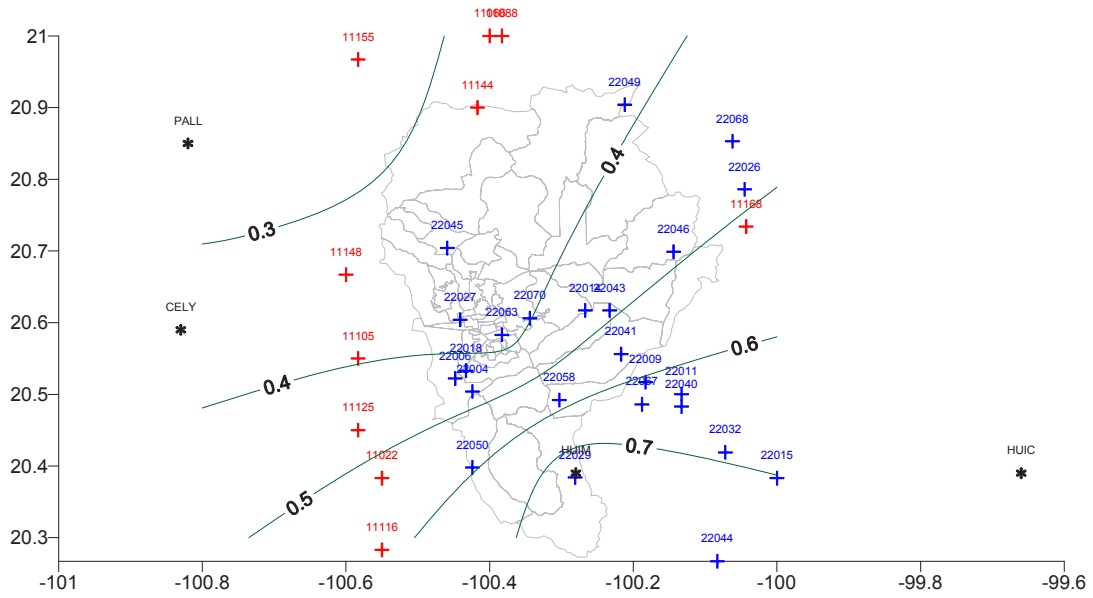


Figura 18. Precipitación ($Tr=10$) para 60 minutos de una tormenta de duración de una hora.

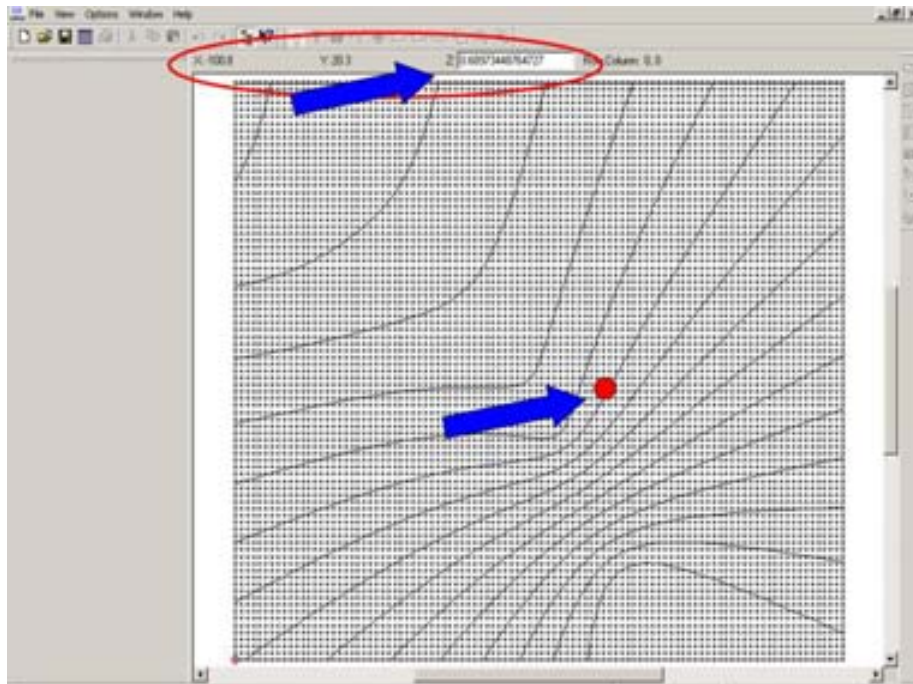


Figura 19. Vista general de la herramienta computacional desarrollada.

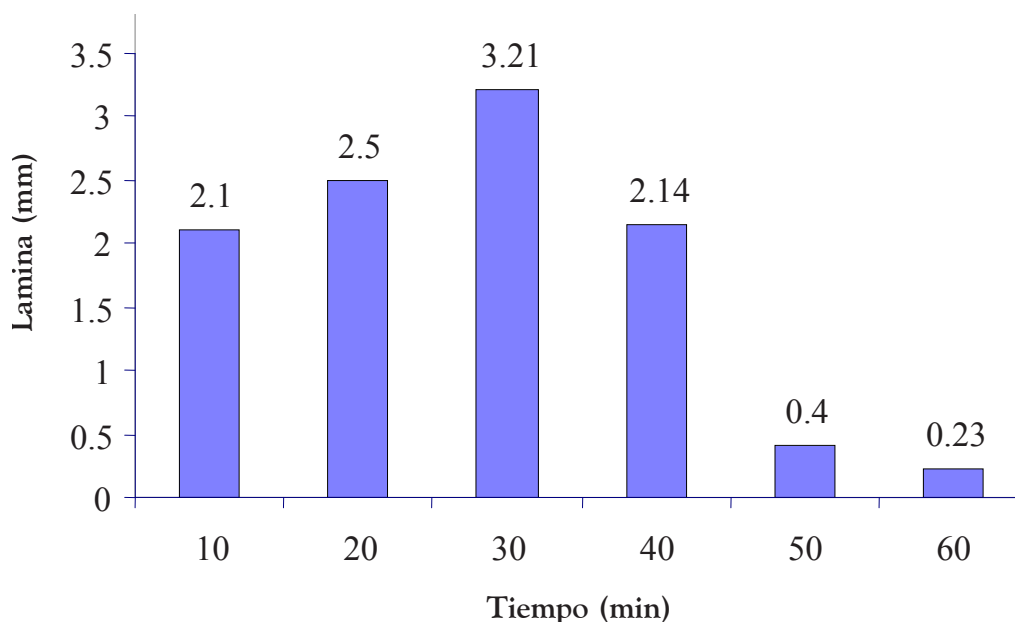


Figura 20. Hietograma tipo para el punto en estudio obtenido con variogramas.

Herramienta computacional

Con el objeto de sistematizar los cálculos que se han presentado en este trabajo se desarrolló una herramienta computacional, en donde es suficiente seleccionar en una malla interpolada con todo este procedimiento y se leen los valores de cada uno de los intervalos del hietograma, en este caso para una lluvia de 60 minutos.

De esta forma al seleccionar el punto de estudio se tendría el siguiente hietograma típico, ver figura 20, el cual se puede comparar con el de la figura 19 en cada uno de los intervalos de tiempo, pudiendo ser considerado cualquiera de estos dos adecuado para llevar a cabo una modelación más detallada. Cabe mencionar que estos hietogramas que se presentan son puntuales, pero la herramienta computacional permite seleccionar cualquier sitio dentro de la cuenca en donde se requiera el dato de tormenta típica.

Conclusiones

Los resultados encontrados relativos a la validez de aplicación de la estimación de lluvia con base en imágenes IR, así como las tormentas típicas empleando variogramas y EMAs, mostró en uno de los casos analizados muy buen ajuste, menor al 20%, al ser comparado con los datos de la EMA Huimilpan, lo cual significó buena certidumbre de la lluvia calculada en cualquier punto del área de cobertura de la tormenta. Adicionalmente para los casos de estudio de sistemas nubosos fueron rastreadas sus trayectorias siendo en dirección noreste y noroeste. Así mismo se identificaron los desarrollos y coberturas espaciales de tales tormentas. Estos resultados iniciales en conjunto pueden ser parte de una herramienta presumiblemente de gran utilidad en mitigación de riesgos por inundaciones, debido a la capacidad de aplicarse en tiempo real y de manera remota. Sin embargo claramente esto implicaría realizar con mayor extensión el estudio, es decir sobre una muestra de eventos adecuada, lo cual se escapa de los alcances de este trabajo.

Referencia Bibliográfica

- Augustine J.A. and Howard K.W., 1988. Mesoscale Convective Complexes over the United States during 1985. *Monthly Weather Rev.*, 116: 685-701.
- Bartels, D.L., J.M. Skradski, and R.D. Menard, 1984. Mesoscale convective systems: A satellite data-based climatology. NOAA Tech. Memo. ERL ESG 8, Dept. Of Commerce, Boulder, CO, 63 pp. [NTIS PB-85-187904]
- Fritsch, J. M., R. J. Kane, and C. R. Chelius, 1986. The contribution of mesoscale convective systems to the warm season precipitation in the United States. *J. Appl. Meteor.*, 25:1333-1345.
- Houze, R., 1993. *Cloud Dynamics*. International Geophysic series, Vol. 53. Academic Press.
- Kane, R. B., Jr., C. R. Chelius, and J. M. Fritsch, 1987: Precipitation characteristics of mesoscale weather systems. *J. Climate Appl. Meteor.* 26: 1345-1357.
- Maddox, R. A., 1980. An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data. *Mon. Wea. Rev.* 108:1108-1121.
- Marrocu M., Pompei A., Dalu G., Liberti G. L., Negri A., 1993. Precipitation estimations over Sardinia from satellite infrared data. *International Journal of remote sensing*. 14: 115-138.
- Menz G., 1997. Regionalization of precipitation models in east Africa using Meteosat data. *International Journal Climatology*. 17: 1011-1027.
- Oh H. J., Sohn B. J., Smith E. A., Turk F. J., Aesuk S., Chung H. S. 2002. Validating infrared-based rainfall retrieval algorithms with 1-minute spatially dense rainguage measurements over korean peninsula. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 81: 273-287.
- Vicente, G. V., Scofield, R. A.; Menzel, W. P. 1998. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79: 1883-1898.