

ANÁLISIS FORENSE DE LA TORMENTA DEL 27 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO UTILIZANDO IMÁGENES INFRARROJAS

Forensic analysis of the storm of September 27, 2017
in the metropolitan area of Querétaro using infrared images

Juan Pablo Molina Aguilar^{1*}, M. Alfonso Gutiérrez López¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia
valnahr@hotmail.com

RESUMEN

En los últimos años la sociedad queretana ha sido afectada de manera recurrente durante la temporada de lluvia debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos. El presente trabajo analiza lo acontecido en el territorio estatal por la tormenta del 27 de septiembre del 2017 que dio origen a afectaciones importantes. La lectura del nivel digital en píxeles referenciados con la posición geográfica de las estaciones meteorológicas automáticas en imágenes infrarrojas permitió pronosticar la intensidad de lluvia por medio de la técnica Hidroestimador y de mapas de la evolución mediante la técnica de Kriging. Como resultado se determinó la precipitación en zonas sin instrumentación y se observó que la tormenta mostró un desarrollo espacial uniforme, mientras que en su evolución temporal se distinguen dos etapas claras de intensificación de lluvia en la zona metropolitana, así como en el centro y noreste del territorio estatal. Con base en el análisis de las lluvias determinadas mediante el Hidroestimador y la lectura de imágenes infrarrojas, se concluye que las precipitaciones antecedentes disminuyeron la capacidad de infiltración por la saturación del terreno y se incrementaron los coeficientes de escurrimiento aumentando significativamente los volúmenes de agua producto del escurrimiento superficial en las zonas de incidencia de la tormenta y colapsando la red hidrológica y el sistema de drenaje pluvial.

Palabras clave: Hidroestimador, percepción remota, tormenta, pronóstico, escurrimiento superficial

ABSTRACT

In recent years the queretana society has been affected repeatedly during the rainy season due to the presence of extreme hydrometeorological phenomena. The present work analyzes what happened in the state territory due to the storm of September 27,

2017 that gave rise to important affectations. The reading of the digital level in pixels referenced with the geographical position of the automatic meteorological stations in infrared images allowed us to forecast the intensity of rainfall using the Hydrostatimator technique, elaborating evolution maps using the Kriging technique. As a result, precipitation was determined in areas without instrumentation and it was observed that the storm presented a uniform spatial development, while in its temporal evolution there are two clear stages of rainfall intensification, in the metropolitan area as well as in the center and northeast of the state territory. It is concluded based on the analysis of the rainfall determined by the Hydroestimador based on the reading of infrared images that the previous rainfall decreased the infiltration capacity due to the saturation of the soil, the runoff coefficients were increased, significantly increasing the water volumes produced by the surface runoff in the areas affected by the storm, collapsing the hydrological network and the storm drainage system.

Keywords: Hydroestimador, remote sensing, storm, forecasting, surface runoff.

INTRODUCCIÓN

Los vientos de gran intensidad sobre la superficie terrestre representan una característica importante de las tormentas severas y las precipitaciones torrenciales, que muestran intensa actividad eléctrica y granizo [1]. Por las inundaciones asociadas a lo anterior, se derivan afectaciones a mediano y largo plazo particularmente, las cuales son causantes de pérdidas materiales, daños a infraestructura, decesos en la población y la aparición de enfermedades vinculadas con el estancamiento del agua.

La importancia de dichos daños se cuantifica en el porcentaje del PIB del país, que representan un mayor impacto para países en vías de desarrollo o bien para las zonas urbanas con tendencia creciente de concen-



tración poblacional [2]. Esto último se observa en el estado de Querétaro, México, y en particular en su zona metropolitana (ZMQ).

Estas tormentas severas son producto del choque de masas de aire, que presentan un gradiente importante de temperatura que llega a causar inestabilidad ambiental y a caracterizarse por una circulación del aire con vientos del orden de 23 m/s a 26 m/s [3]. Al respecto, los meses de junio a octubre comprenden el periodo de mayor intensidad para México por la época de ciclones tropicales tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico [4]. A lo anterior se suma la incidencia del cambio climático derivada de causas naturales o antrópicas que inciden en el calentamiento global, detonan en manifestaciones atmosféricas extremas [5] y causan preocupación y alarma por sus características y consecuencias.

El riesgo de éstas está en función de los contextos físico, social y económico en conjunto con el grado de exposición a la amenaza, lo que potencializa la vulnerabilidad de la sociedad, los recursos ambientales, la infraestructura, los servicios básicos y de salud [6]. Por ello la construcción de instrumentos como matrices de daño, índices de vulnerabilidad, funciones y curvas de pérdida asociados al régimen pluviométrico (magnitud y frecuencia de la precipitación) permiten una adecuada estimación de los escenarios para revisar pérdidas potenciales [7].

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) refiere que las secuelas crecen en sectores de población con carentes condiciones sociales y económicas que son características de distintas regiones en el país [2]. Ante dichos escenarios la información meteorológica es trascendental para analizar el tiempo presente y elaborar pronósticos hidrometeorológicos con el fin de establecer alertas y acciones de mitigación, trabajos en construcción, operación de puertos marítimos y aeropuertos [8] [9], así como para determinar políticas de operación en presas de almacenamiento e implementar acciones de protección civil.

Los recientes avances tecnológicos han permitido la construcción de satélites geoespaciales ambientales y estaciones meteorológicas automáticas (EMA), instrumentados con sensores para la medición de variables en escala temporal y espacial durante la formación, evolución y disipación de los fenómenos naturales, recolectando gran cantidad de información de todas las latitudes en grandes centros mundiales donde se decodifica, gráfica y publica [10].

Las aplicaciones meteorológicas de estos sensores no sólo sirven para observar las nubes, captar radiaciones no visibles provenientes de la tierra y su atmósfera al detectar la presencia y movimiento de fenómenos climatológicos, frentes fríos, ciclones tropicales, ondas tropicales y zonas de convergencia causantes de tormentas severas, sino auxilian adicionalmente en la estimación de su impacto y daños [11].

Hoy día los satélites meteorológicos son herramientas fundamentales para el pronóstico atmosférico y estudios meteorológicos, cuya mayor ventaja es el uso de la teledetección en la cobertura espacio-temporal, la cual no se consigue con las redes pluviométricas instaladas actualmente [12].

La teledetección tiene su origen en la representación de la energía electromagnética acorde con la física de la teoría ondulatoria, la cual observa y mide propiedades sin contacto físico directo en objetos, áreas o fenómenos. La información captada por medio de los sensores describe cambios en el entorno respecto del campo electromagnético emitido o reflejado según la longitud o frecuencia de ondas llamadas bandas espectrales (rayos X, luz visible, infrarrojo o microondas) del espectro electromagnético [13].

Los componentes de un sistema de teledetección de superficie terrestre son la fuente de radiación, la interacción con la superficie, la atmósfera y los receptores generándose radiación incidente, radiación reflejada y radiación emitida [14]. Los conceptos más importantes son la imagen captada que recibe el nombre de imagen satelital digital (ISD) y

el método de obtención. Los sensores están integrados por detectores pequeños que captan el espectro de radiación reflejada por la superficie terrestre y transforman las lecturas en valor digital para formar una matriz en escala de grises o colores, que representan una imagen similar a una fotografía [15].

Las imágenes infrarrojas (IR) permiten definir la forma, estructura y características de los sistemas convectivos [16], frentes fríos y zonas de convergencia al utilizar el reflejo de umbrales de temperatura aun cuando las nubes altas no están muy bien relacionadas con el desarrollo físico de la tormenta y la lluvia asociada a la temperatura captada [17]. Su estructura irregular y caótica de rápida evolución se deriva de gradientes térmicos anormales aunado con núcleos de variación barométrica [18].

Algunos estudios espacio-temporal han sido desarrollados para la ZMQ empleando el análisis de frecuencias y la técnica de kriging [19], la cual ha mostrado la posibilidad de interpretar información proveniente de imágenes satelitales empleando variogramas direccionales y determinando los patrones de lluvia de la región. De manera particular la distribución espacial de tormentas en el estado de Querétaro, utilizando información registrada en pluviómetros contrastada con el pronóstico de la técnica Hidroestimador (HE) basada en la temperatura tope de nubes a partir de valores de nivel digital, mostró diferencias en los registros, lo anterior obedece a que no precipita toda la nubosidad observada en la imagen y existe una disminución de lluvia por evaporación producto de su fricción con la atmósfera sin ser registrada en superficie [20].

El presente trabajo tiene por objetivo analizar el desarrollo temporal y espacial de la tormenta causante de importantes afectaciones en la ZMQ y el territorio estatal, registrada el 27 de septiembre del 2017, utilizando el HE para el pronóstico de intensidad de lluvia, en la posición geográfica de las EMA de la Red del Centro de Investigaciones del Agua-Querétaro (RED CIAQ), imágenes IR y

el método geoestadístico Kriging para identificar su origen y evolución.

METODOLOGÍA

Antecedentes

En el recuento de daños a causa de la tormenta sucedida durante la noche del martes 26 y la madrugada del miércoles 27 de septiembre del 2017 se puso en evidencia las afectaciones en gran parte del territorio del estado de Querétaro. Santiago de Querétaro, San Juan del Río, El Marqués y Corregidora fueron los municipios con mayor afectación.

A consecuencia de esta tormenta y la inundación resultante, se mostró un deceso en el Parque Industrial Benito Juárez y la movilización a distintos albergues de 200 personas en la capital del estado, 350 en Corregidora y 198 en San Juan del Río, debido a los desbordamientos, así como por la aparición de 2 socavones sobre Paseo de la República.

Se generaron inundaciones y encharcamientos en al menos 50 colonias de la ZMQ. Entre las más afectadas están el Centro Histórico, Santa María Magdalena, El Tintero, Carrillo, Jurica Pueblo, Jurica Campestre, Santa Rosa Jáuregui, Bosques del Cimatario, Obrera, Satélite, Pie de la Cuesta, Parque Industrial Benito Juárez, San Francisquito y Plaza de las Américas (Figura 1).

También distintas vialidades se vieron afectadas como el libramiento Sur Poniente a la altura del puente de Tec Milenio y la incorporación a Vista Real, la lateral de Constituyentes de Plaza Constituyentes al puente Santa Bárbara, la lateral de Bernardo Quintana frente al Parque Querétaro 2000, la avenida 5 de Febrero desde avenida Universidad hasta Jurica, en el sentido a San Luis Potosí. Además de la avenida Zaragoza desde Allende hasta Corregidora, las cuales sufrieron inundaciones en el transcurso de la lluvia y una vez que ésta cesó (Figura 1).



Figura 1. Zonas inundadas (azul) y vialidades afectadas (rojo) durante la tormenta del 27 de septiembre del 2017

La cantidad de volumen precipitado ocasionó también el desbordamiento de los drenes Jurica, El Arenal y Tlacote los cuales llegaron al límite de su capacidad ocasionando tirantes de agua de hasta 1 m de altura.

Materiales

Imágenes satelitales

Las imágenes digitales, comúnmente llamadas imágenes satelitales, obtenidas por teledetección están conformadas de píxeles asociándose cada uno de ellos con un número llamado nivel digital (DN) o valor de brillo (VB) que se localizan en la intersección de cada fila i y cada columna j en las K bandas de la ISD [21]. Desde el enfoque computacional las imágenes son matrices de valores digitales de tipo byte, por ello la rasterización de la misma se caracteriza por contar con un número acotado de filas y columnas generando un número total de píxeles producto de ambos [14].

Las imágenes monocromáticas fijas son una función bidimensional de coordenadas espaciales (x, y) que representa la luminancia (z) de la ISD en el punto de coordenadas $f(x, y)$. Las variables x, y, z son valores numéricos reales, z es univaluada positiva

normalizada entre los valores 0 a 1 que corresponden a los colores negro y blanco respectivamente, siendo entonces que z representa un valor en la escala de grises [14].

Al interpretarse imágenes satelitales se dio inicio a un proceso de análisis manual de los fenómenos atmosféricos sujetos a una evaluación subjetiva, no obstante, la interpretación ha evolucionado con el uso de equipo de cómputo, generándose distintas técnicas para el análisis de imágenes satelitales digitales [22].

Las imágenes satelitales utilizadas en el estudio son proporcionadas por el área de Percepción Remota del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), las cuales carecen de tratamiento, tienen formato raw con compresión BZ2 de extensión PCX (Figura 2), la nomenclatura asignada para su control utiliza la fecha y hora de captura con el formato añosmesdiahoraminuto.pcx [19].

Dichas imágenes son generadas por la suite Yosemite de la compañía Marta utilizando la proyección WGS84 con origen en la posición de coordenadas 0°N , -75°W y altura aproximada de 36,000 km que corresponden a los parámetros orbitales del satélite GOES-13. La proyección con dichas características se denomina "Marta Software Projection".

Las imágenes dan cobertura al territorio nacional con resolución temporal de 15 minutos, referenciadas con las coordenadas 36.4768°N , $-122.2590^{\circ}\text{W}$ en la esquina superior izquierda y 14.1118°N , -79.0817°W en la esquina inferior derecha, con resolución de 8 bits y valores de brillo que van de 0 a 255 de acuerdo con su nivel digital, delimitadas por 1280 píxeles de longitud y 817 píxeles de latitud de tamaño 2.36 km por lado [20].

Para realizar el estudio de la tormenta del 27 de septiembre que afectó el estado de Querétaro, se seleccionaron 57 imágenes satelitales con resolución temporal de 15 min que corresponden al periodo de las 2:15 a.m. (201709270215.pcx) y hasta las 06:15 p.m.

(201709271815.pcx) de dicho día. Al revisar la información de 24 h previas a la misma no se cuenta con información del satélite que muestre precipitación, por lo que el periodo de análisis corresponde a 16 h.

Red CIAQ

En el estado de Querétaro y la ZMQ, el CIAQ opera y mantiene EMA, como actividad sustantiva atiende requerimientos tecnológicos del sector agua en el país. De la misma manera, forma parte actualmente de la Red de Caracterización de Riesgos Hidrometeorológicos, Fluviales y Costeros.

La red CIAQ empezó a operar a partir del mes de junio del 2012. Actualmente cuenta con 34 EMA (Tabla 1), las cuales realizan el monitoreo en tiempo real del territorio Queretano, permitiendo acceso a la información registrada a los sectores académico,

productivo, gubernamental y a la sociedad en general a través de la página web <https://hidroinformatica.uaq.mx> y respalda una aplicación de alerta para fines de protección a la ciudadanía.

Derivado de la importancia en las actividades académicas, económicas y sociales en el estado de Querétaro se ha incrementado el monitoreo en la ZMQ conformada por los municipios de Santiago de Querétaro, Corregidora, Juriquilla y El Marqués, sin dejar de lado regiones trascendentales y en búsqueda de incrementar la cobertura del estado.

La posición geográfica de las EMA en la red CIAQ (Figura 3) permite establecer la relación con los pixeles de las imágenes IR utilizadas en el presente estudio, permitiendo la lectura del nivel digital a partir de la cual se puede pronosticar la intensidad de precipitación con el HE.

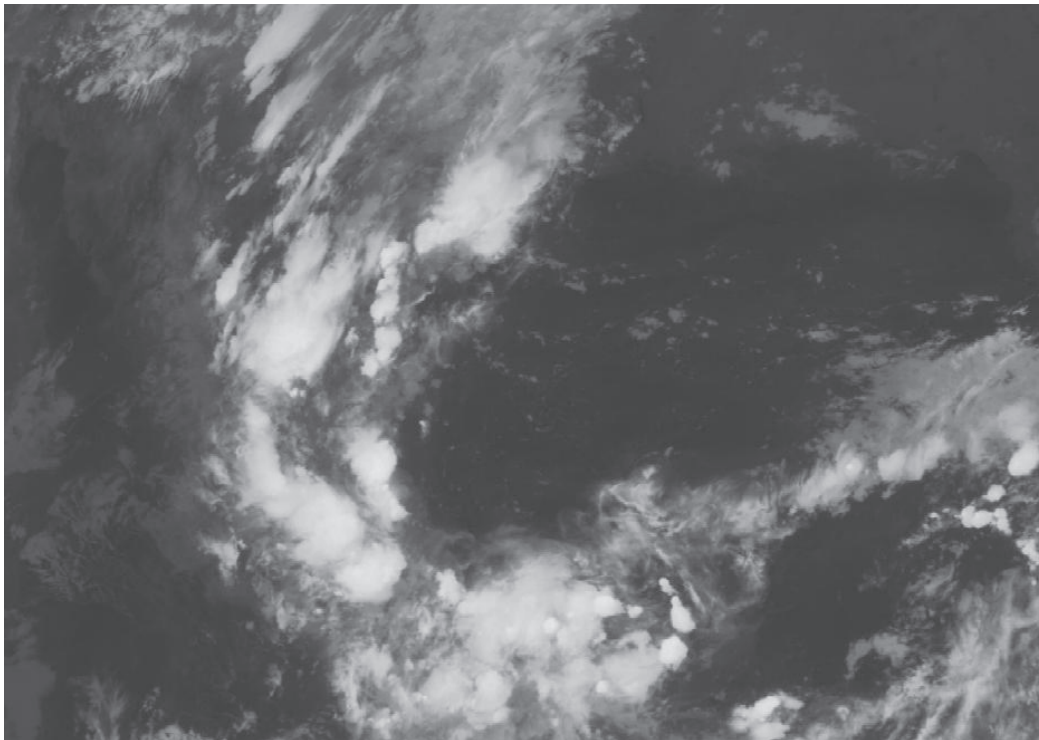


Figura 2. Imagen 201709270215.pcx de la tormenta del 27 de septiembre del 2017 sobre la ZMQ.



Tabla 1. Posición geográfica de EMAS de la Red CIAQ ubicadas en la ZMQ y el estado de Querétaro.

Estación	Nombre	Longitud ° W	Latitud ° N	Estación	Nombre	Longitud ° W	Latitud ° N
1	Chulavista	-100.470	20.631	18	Ezequiel Montes	-99.901	20.673
2	Belén	-100.408	20.653	19	Huimilpan	-100.273	20.374
3	Real del Parque	-100.404	20.611	20	Landa de Matamoros	-99.320	21.183
4	Candiles	-100.401	20.547	21	Pedro Escobedo	-100.139	20.501
5	Cimatario	-100.376	20.559	22	San Joaquín	-100.008	20.383
6	Centro Histórico	-100.388	20.594	23	San Juan del Río	-99.973	20.389
7	Milenio III	-100.346	20.595	24	Tequisquiapan	-99.915	20.611
8	San Gil	-100.444	20.701	25	Tolimán	-99.931	20.904
9	El refugio	-100.352	20.654	26	Viñedos	-100.489	20.608
10	COTAS Amazcala	-100.338	20.710	27	El esparrago	-100.008	20.383
11	Cerro de las Campanas	-100.412	20.590	28	Santa Rosa Jáuregui	-100.447	20.742
12	Amealco de Bonfil	-100.144	20.186	29	Unión de Ejidos Graciano Sánchez	-100.235	20.652
13	Pinal de Amoles	-99.628	21.135	30	Joaquín Herrera	-99.566	20.916
14	Arroyo seco	-99.688	21.547	31	Juriquilla	-100.453	20.722
15	Cadereyta de Montes	-99.812	20.701	32	UAQ Aeropuerto	-100.371	20.625
16	Colón	-100.052	20.782	33	Pasteur y 57	-100.383	20.578
17	Corregidora	-100.432	20.547	34	CICATA QRO IPN	-100.371	20.574

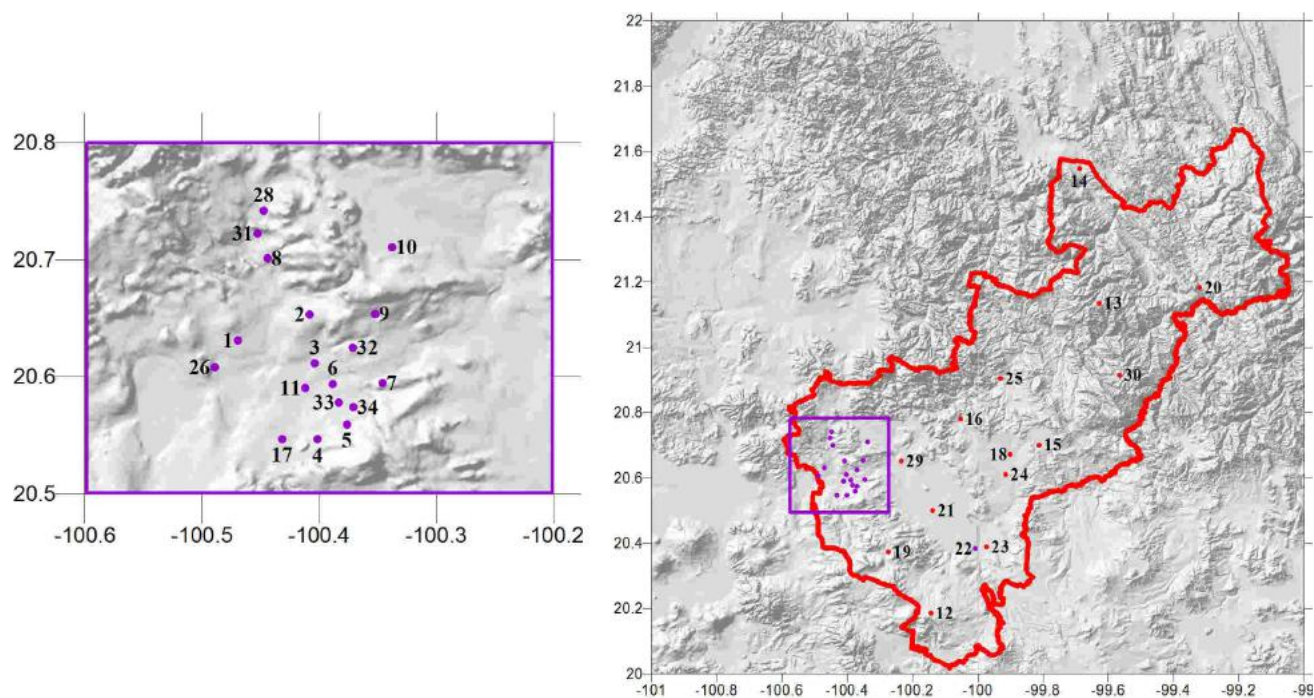


Figura 3. Posición geográfica de las EMA operando de la red CIAQ en la zona metropolitana (Morado) y el estado de Querétaro.

Método

Hidroestimador

La estimación de la intensidad de precipitación se realizó empleando la técnica Auto Estimador también denominada HE, basada en una ley de regresión que requiere correcciones para un mejor ajuste utilizando la humedad, el crecimiento y gradiente de temperatura de las nubes [23], la cual determina la razón de lluvia (R) en mm/h a partir de la temperatura tope de nube (T) en K , como función del brillo de pixel (B) en nivel digital.

$$R = 1.1183 * 10^{11} e^{-0.036382T^{1.2}} \quad (1)$$

$$T = \begin{cases} 418 - B & \text{para } B > 176 \\ 330 - \frac{B}{2} & \text{para } B \leq 176 \end{cases} \quad (2)$$

2.3.2 Escala de nivel digital

Para observar la evolución temporal y espacial de la tormenta se estableció una escala de valores de nivel digital que ayudó a definir 7 zonas de intensidad de precipitación, que van desde 0.00 mm/h hasta valores mayores de 711.81 mm/h al emplear las Ecuaciones 1 y 2. Lo anterior se detalla en la Tabla 2.

Automatización en lenguaje R

La sistematización de la lectura de información para la tormenta se realizó mediante dos códigos desarrollados en lenguaje R . El primero "pcx_to_jpg.sh" extrae las imágenes satelitales con formato pcx de su encriptado original para posteriormente cambiarla a formato jpg. El segundo "Get_info.R" lee la ISD como una matriz de pixeles, en la que se asocian las coordenadas geográficas de las EMA de la red CIAQ (Tabla 1) por medio de la corrección por curvatura y origen de toma del sensor para leer el valor de nivel digital correspondiente.

Posteriormente se calcula para cada uno de los pixeles la temperatura tope de nube (T) y con ello se determina la intensidad pronosticada (R) con el HE, guardándolos en archivos de registros cuya estructura matricial contempla n filas asociadas a la cantidad de imágenes satelitales que dan cobertura al fenómeno meteorológico y p columnas que son los pixeles acorde con las EMA de estudio (Figura 4).



Figura 4. Diagrama de flujo para la lectura de imágenes satelitales correspondiente a un fenómeno hidrometeorológico registrado en territorio nacional.

Tabla 2. Escala de nivel digital propuesta para la interpretación de las imágenes satelitales

Zona geométrica	Z6	Z5	Z4	Z3	Z2	Z1	Z0
Brillo (ND)	(100,125)	(126,150)	(151,175)	(176,200)	(201,225)	(226,235)	(236,255)
Intensidad (mm/h)	(0.00,0.01)	(0.01,0.07)	(0.08,0.36)	(0.39,8.65)	(9.83,205.12)	(232.44,711.81)	> 711.81



Una vez realizado el total de la lectura de los archivos de registro se generan con formato de datos separados por coma (csv), que ayudan a utilizar la información en Excel de manera que facilita el análisis cualitativo y cuantitativo. Esto permitió incorporar a este análisis herramientas geoestadísticas mediante el programa Surfer, lo cual dio los elementos necesarios para establecer el patrón de la tormenta y conocer espacialmente los antecedentes que dieron pie al comportamiento hidrológico en la ZMQ.

Método de Kriging

Kriging es un estimador insesgado de funciones lineales aleatorias de una región tomando la variabilidad espacial mediante la covarianza o el semivariograma de observaciones $Z(k)$, optimizando la variancia estimada [24] así como los valores puntuales y proporcionando una medida precisa de dichos valores. Esto permite diseñar mallas de medición [25]. Dichas mallas son denominadas retículas geoestadísticas que son aplicables a múltiples campos de conocimiento por su capacidad de generar mapas de tendencias en la información a partir de datos espaciales irregularmente, se caracterizan por su flexibilidad, precisión y adaptación a datos empleando la anisotropía y las tendencias subyacentes [26].

Es una metodología de medias ponderadas con asignación de pesos en la posición de $Z(k)$ que minimiza la variancia de la estimación calculada como función del variograma y las distancias relativas entre posiciones de observación, obteniéndose una estimación lineal no sesgada óptima [27]. Esta se fundamenta en describir mediante superficies estocásticas la variación espacial irregular de la variable ante la imposibilidad de modelarla matemáticamente por medio de funciones, para ello se deben identificar la tendencia o valor medio $m(k)$ llamada componente estructural, ε' que representa la componente aleatoria y el ruido ε'' que considera el error residual Gaussiano de media cero.

$$Z(k) = m(k) + \varepsilon'(k) + \varepsilon'' \quad (3)$$

La función que define $m(k)$ es el valor medio, de tal forma que la diferencia esperada de dos posiciones separadas por el vector de distancia h se define como:

$$E[Z(k) - Z(k + h)] \quad (4)$$

Así la variancia se limita únicamente a la distancia

$$E\{[Z(k) - Z(k + h)]^2\} = E\{[\varepsilon'(k) - \varepsilon'(k + h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (5)$$

En la Ecuación 5, $\gamma(h)$ representa la semivarianza obtenida mediante la construcción isotrópica o anisotropía del semivariograma de las posiciones muestreadas. Para ello se identifica la cantidad de combinaciones n con posiciones i y j separadas una distancia h , el primer tipo de semivariograma sería independiente de la dirección no así el segundo tipo.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum \{Z(i) - Z(j)\}^2 \quad (6)$$

La semivarianza presenta crecimiento en su valor al incrementarse la distancia hasta alcanzar una tendencia constante. Este comportamiento es representado por una curva que sigue una función comúnmente de tipo esférico, exponencial, gaussiano o lineal. Su representación gráfica tiene tres elementos el primero refiere a que puede iniciar en cero o en un valor denominado efecto nugget, el segundo es la tendencia que establece el valor máximo para grandes distancias y el tercero define la distancia a la cual se mantiene el valor máximo denominado umbral de autocorrección.

Para desarrollar la interpolación utilizando kriging se consideran las combinaciones ponderadas de las n posiciones muestradas, donde la suma de los pesos w_i es la unidad.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (7)$$

Su determinación involucra las covarianzas espaciales entre las posiciones muestreadas i, j (C_{ij}) y la posición i respecto del sitio de interés θ ($C_{i\theta}$) que son medidas de correlación espacial evaluadas mediante la función definida por el variograma para la distancia indicada, además de la varianza del error por medio del multiplicador de Lagrange (μ), a partir del sistema

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} & 1 \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{10} \\ d_{20} \\ \vdots \\ d_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C * W = D \quad (9)$$

Dado que se requiere la repetición de la interpolación para m sitios de interés se pre-multiplica la Ecuación 9 por la matriz inversa de C .

$$C^{-1} * C * W = C^{-1} * D \quad (10)$$

$$W = C^{-1} * D \quad (11)$$

Su principal ventaja es de tipo estocástico por el hecho de determinar para cada estimación la varianza esperada del error.

$$\gamma^* = \mu + \sum_{i=1}^n w_i \gamma_i \quad (12)$$

De acuerdo con la modelación de la componente estructural $m(k)$ existen variantes. Para el Kriging simple se adopta el valor cero, en el Kriging ordinario no se conoce y requiere un atributo adicional para filtrar el valor medio en el sistema de ecuaciones. Por su parte en el Kriging de factor externo se implementa una función externa para definirla [27].

La implementación de la interpolación espacial se realizó con el software Surfer 8.0 a partir de la base de datos generada con las intensidades pronosticadas en el pixel que corresponde a la posición geográfica de las EMA mediante el HE.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS.

Una vez realizada la lectura de las 57 imágenes que registraron la tormenta que afectó la ZMQ y el estado, se obtuvieron los datos del nivel digital de brillo en cada pixel que corresponde a la posición geográfica de las EMA de la red CIAQ. A continuación, se verificó la temperatura tope de nube fría a partir de los umbrales especificados en el HE. Finalmente, mediante la escala propuesta (Tabla 2), se calculó la intensidad de lluvia pronosticada para construir el registro temporal y espacial de la tormenta.

La implementación del rango de lectura de valores de nivel digital de brillo 100 a 255 permitió observar el origen y evolución acorde con la dinámica atmosférica de 7 zonas que afectaron territorio nacional y de manera particular el centro de México. Esto facilitó la identificación del patrón y el análisis temporal correspondiente (Figura 5). En la parte señalada se aprecian en color negro la posición de las EMA de la red CIAQ dentro del territorio del estado de Querétaro.

Establecida la correlación espacial de la ubicación de las EMA de la red CIAQ respecto a los pixeles que conforman la ISD, se realizó la lectura con la escala de nivel digital, generando para cada una de las EMA su serie temporal de intensidad de lluvia pronosticada (mm/h) y aplicando el HE.

Con ello se facilitó la identificación de las EMA que registraron la tormenta y verificó la intensidad del evento en las áreas de la ZMQ y los municipios del estado (Figuras de la 6-9). El t_0 corresponde al 27 de septiembre desde las 02:15 a.m. con una diferencia temporal de 15 minutos hasta llegar a t_{50} asociado al 27 de septiembre a las 18:15 p.m.

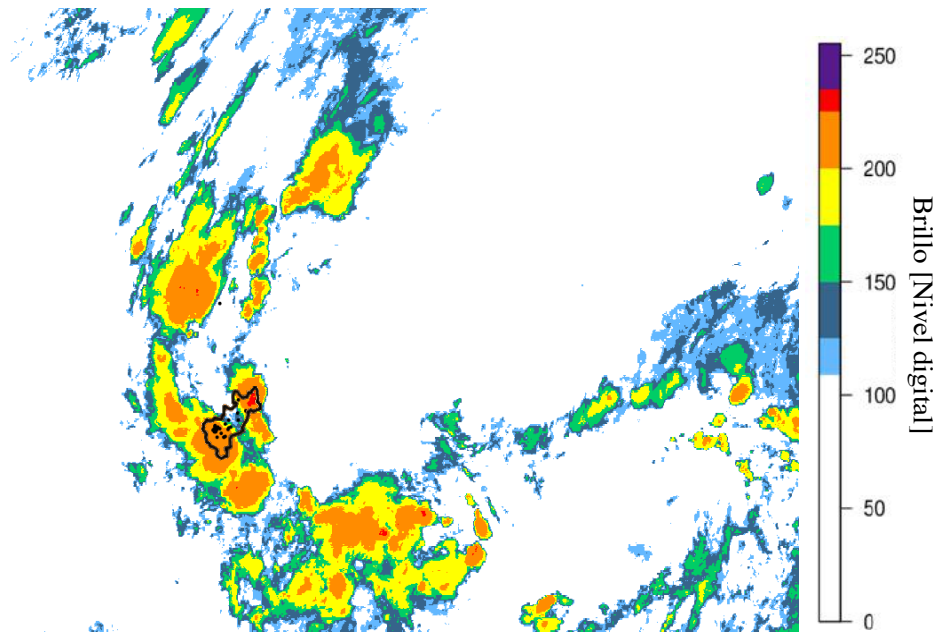


Figura 5. ISD 201709270215 interpretada con la escala propuesta sobre el territorio de Querétaro.

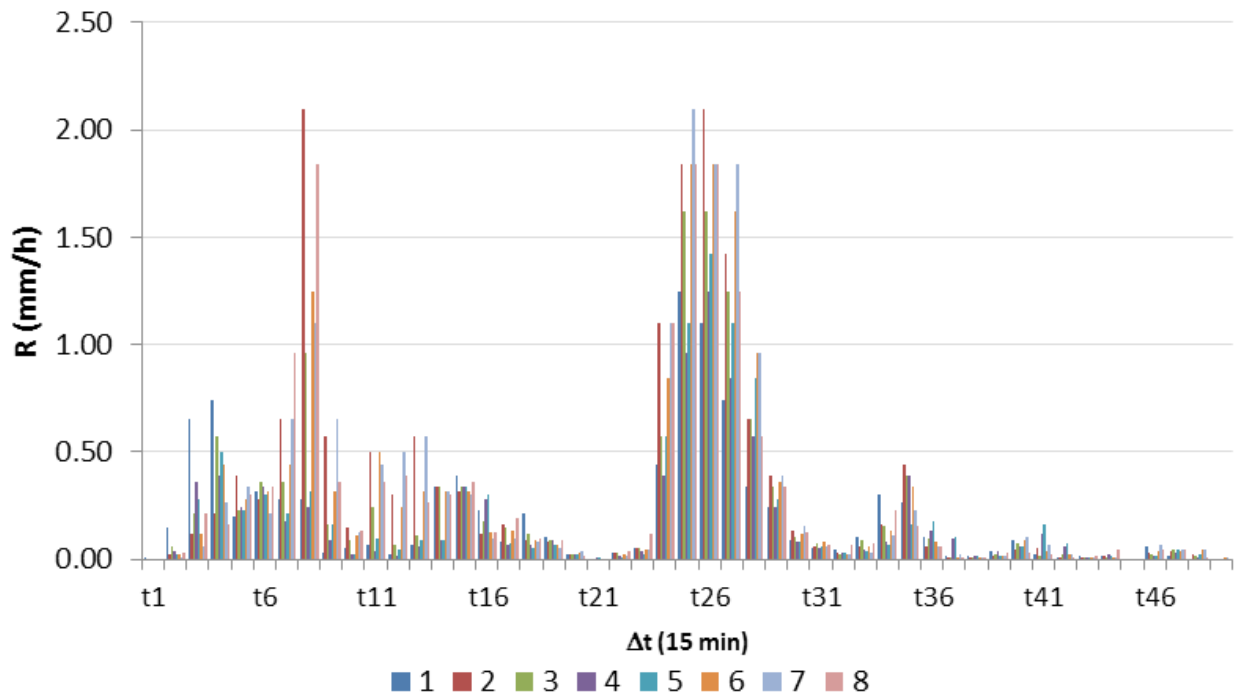


Figura 6. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones Chulavista (1), Belén (2), Real del Parque (3), Candiles (4), Cimatarío (5), Centro Histórico (6), Milenio III (7) y San Gil (8).

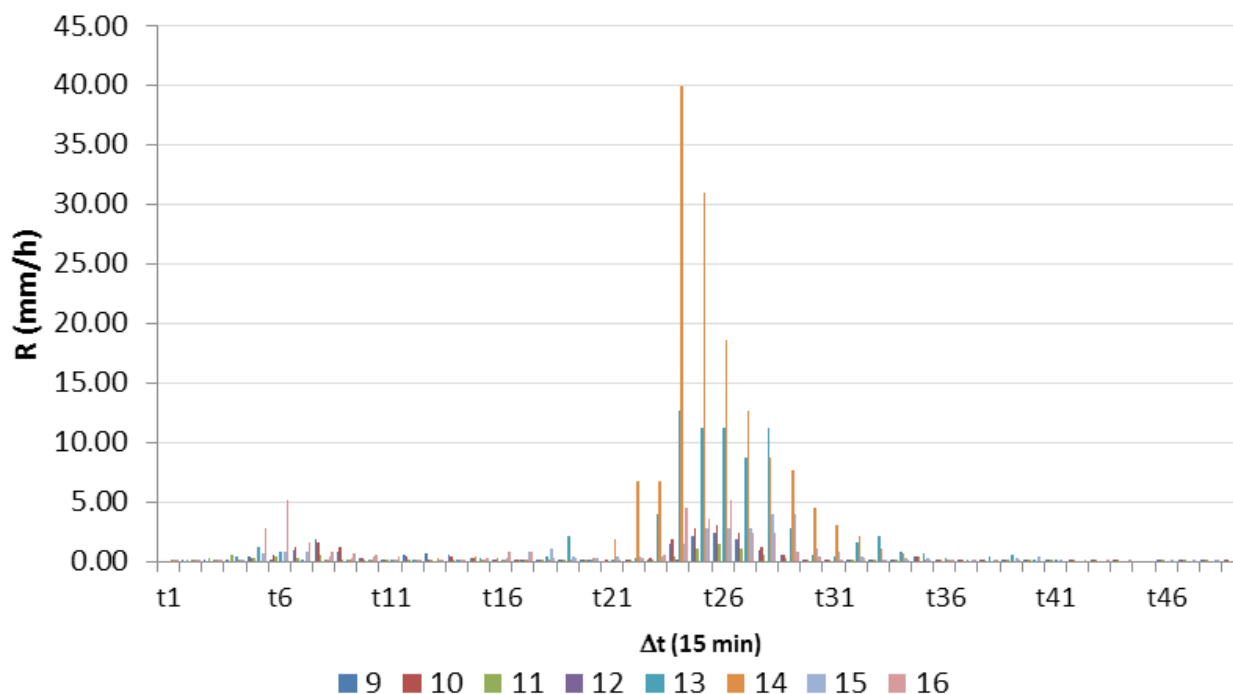


Figura 7. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones El Refugio (9), COTAS Amazcala (10), Cerro de las Campanas (11), Amealco de Bonfil (12), Pinal de Amoles (13), Arroyo Seco (14), Cadereyta de Montes (15) y Colón (16).

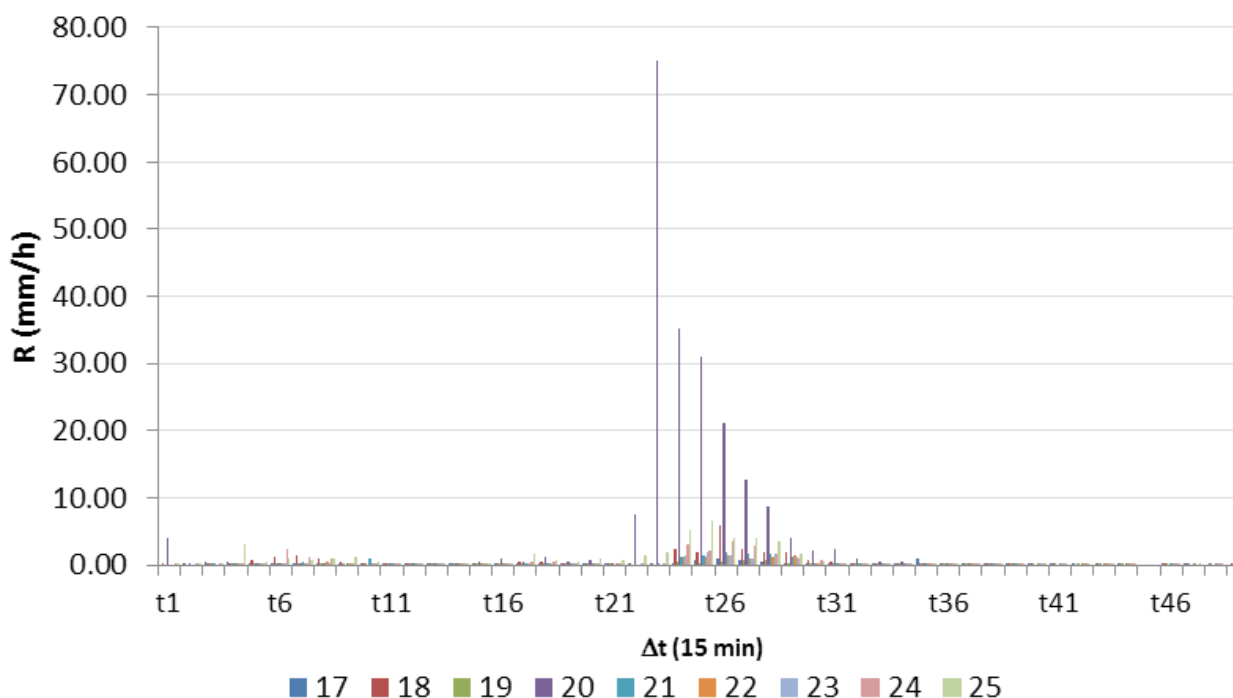


Figura 8. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones Corregidora (17), Ezequiel Montes (18), Huimilpan (19), Landa de Matamoros (20), Pedro Escobedo (21), San Joaquín (22), San Juan del Río (23), Tequisquiapan (24) y Tolimán (25).

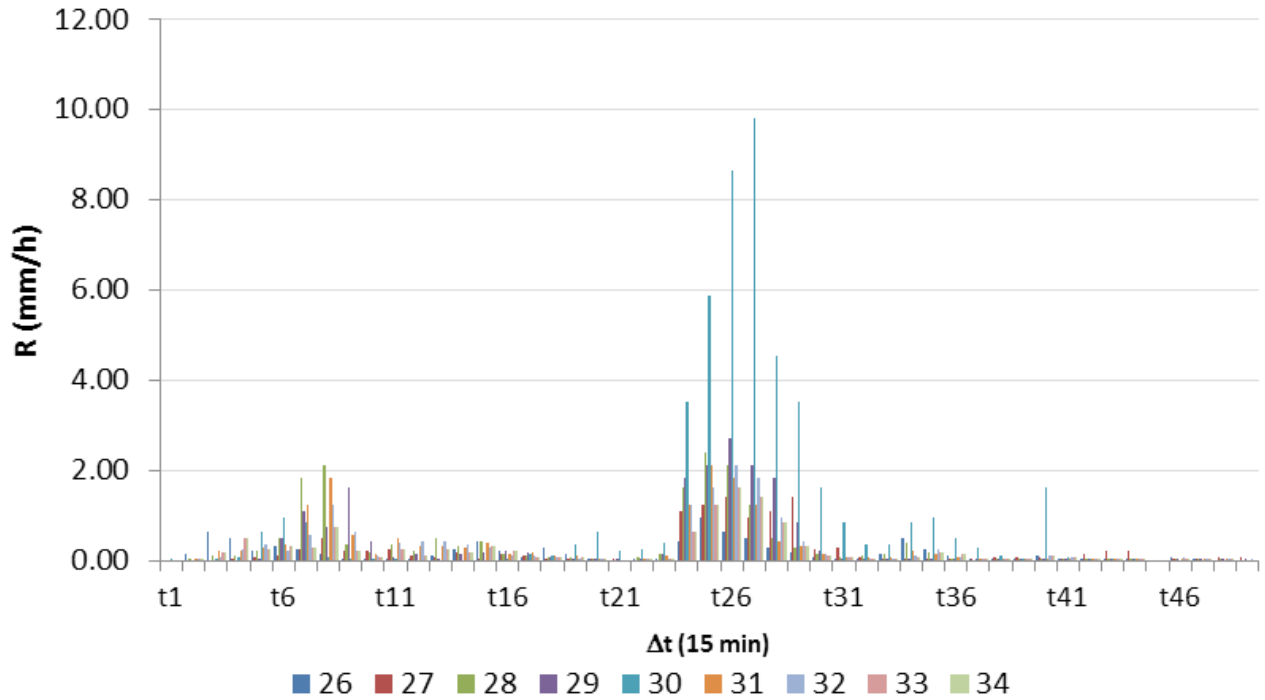
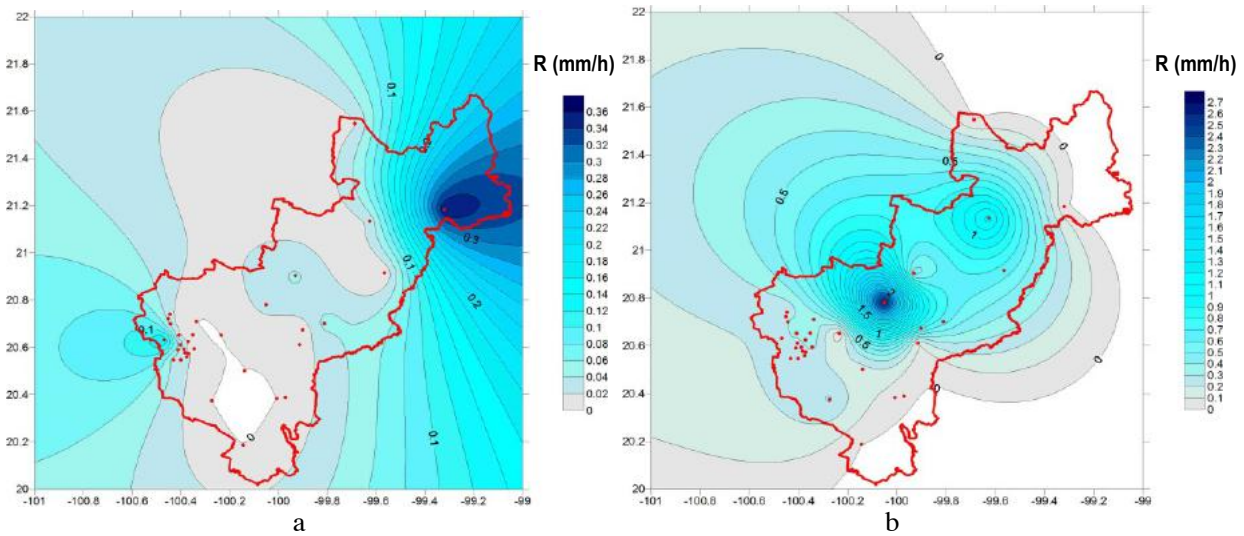


Figura 9. Intensidad pronosticada (R) mediante el HE para las estaciones Viñedos (26), El Esparrago (27), Santa Rosa Jáuregui (28), Unión de Ejidos Graciano Sánchez (29), Joaquín Herrera (30), Juriquilla (31), UAQ Aeropuerto (32), Pasteur y 57 (33) y CICATA IPN (34).

Una vez identificado el pronóstico mediante el HE en la posición geográfica de las EMA de la red CIAQ se procedió a realizar el mapeado de la intensidad (R), aplicando la in-

terpolación por Kriging ordinario sobre territorio queretano para cada hora durante el transcurso de la tormenta (Figuras 10-16).



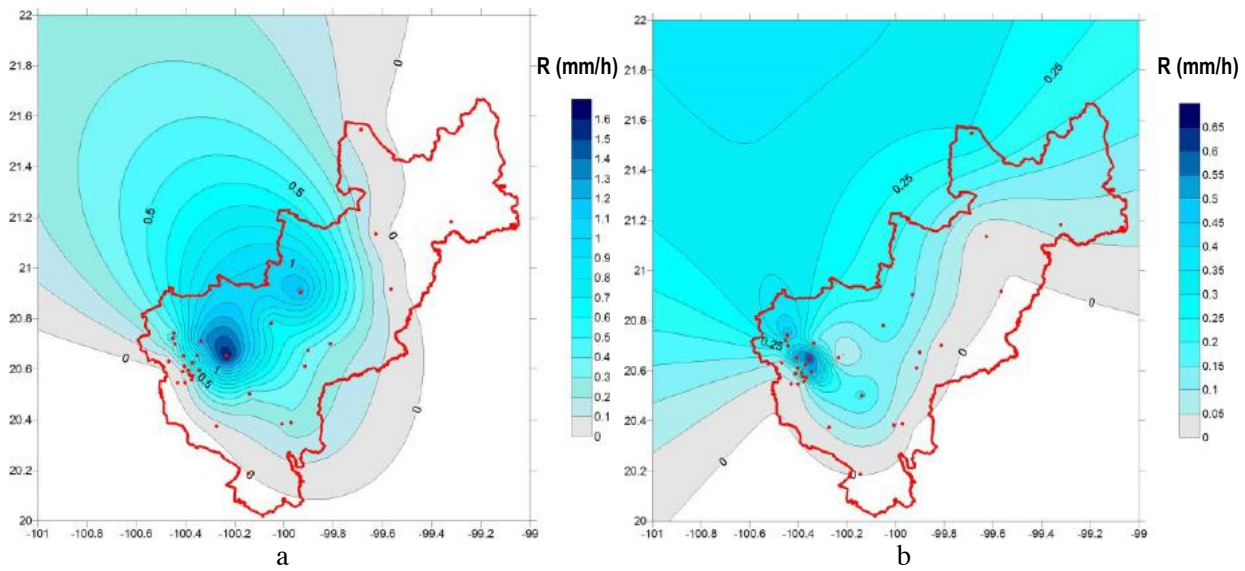


Figura 11. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 04:15 am (a) y a las 05:15 am (b).

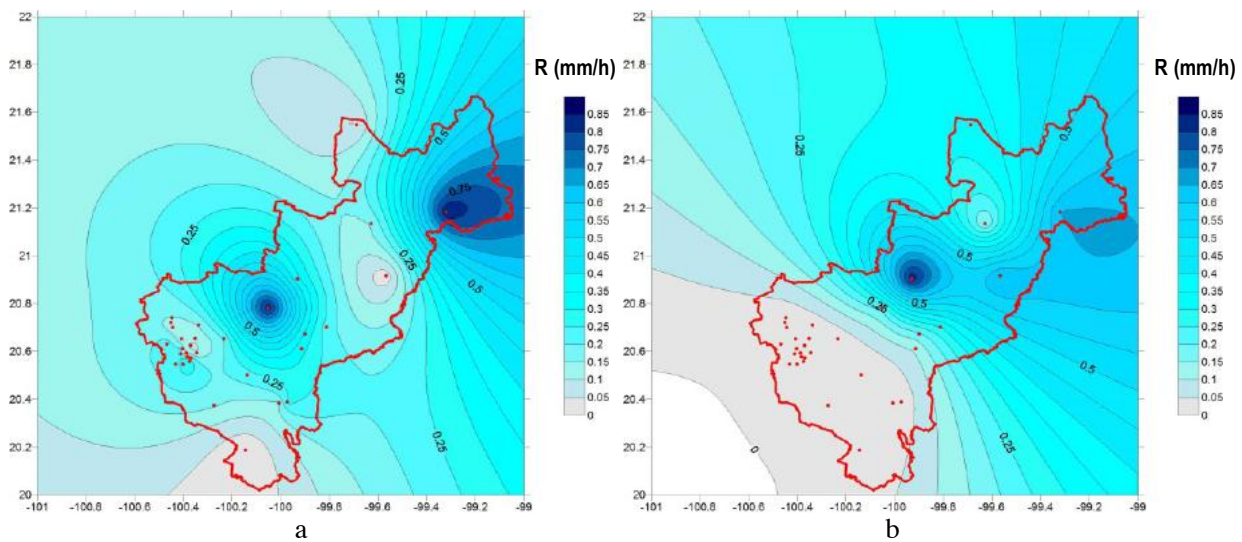


Figura 12. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 06:15 am (a) y a las 07:15 am (b).

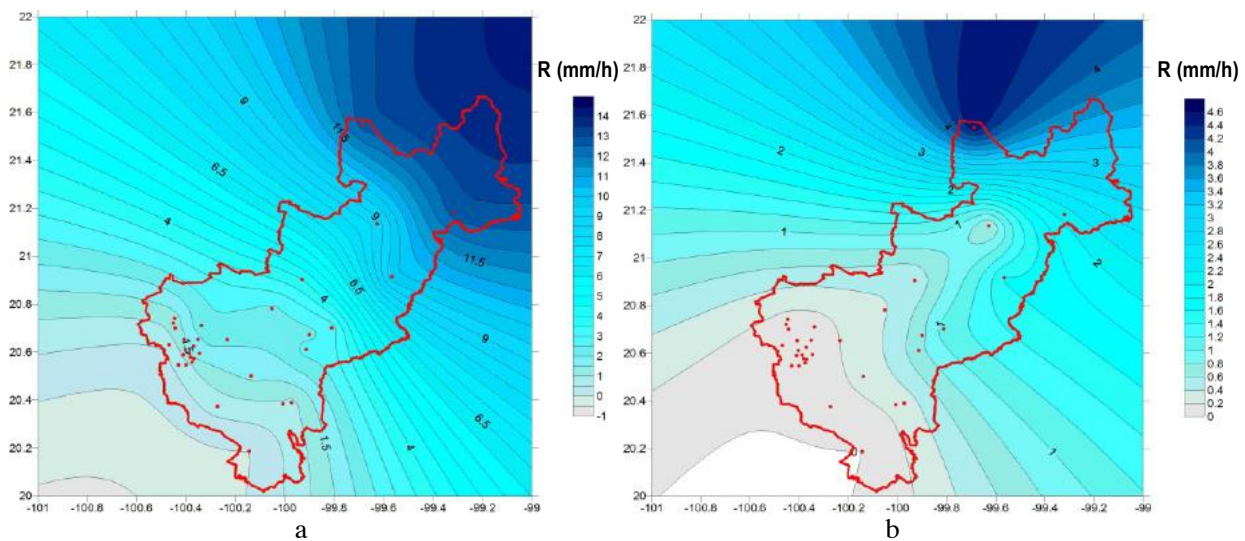


Figura 13. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 10:15 am (a) y a las 12:15 pm (b).

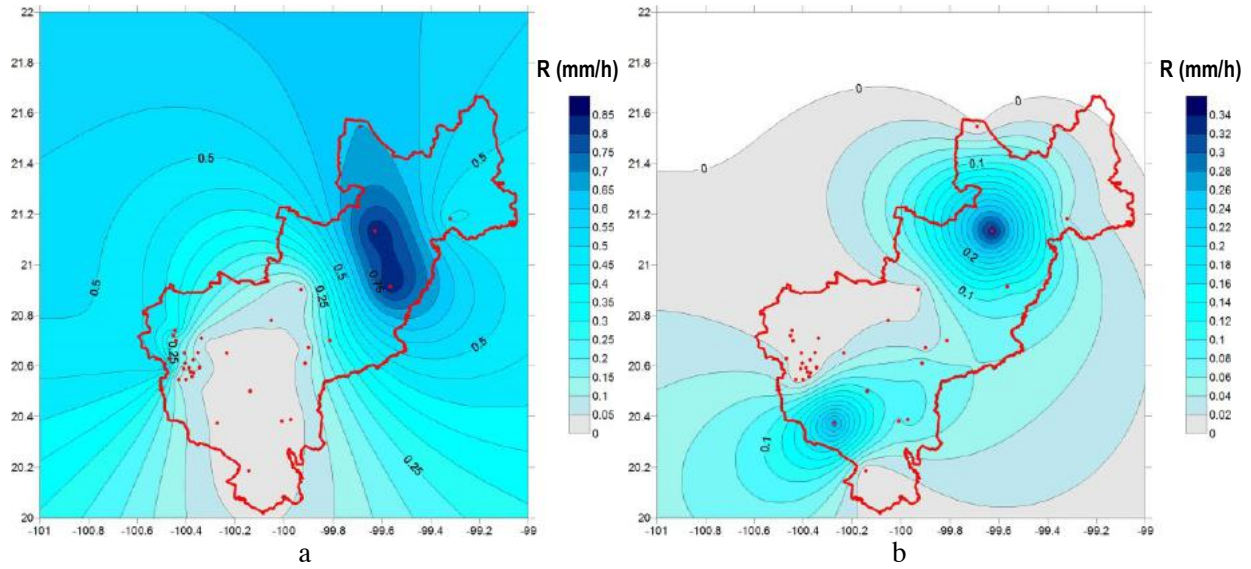


Figura 14. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 13:15 am (a) y a las 14:15 pm (b).

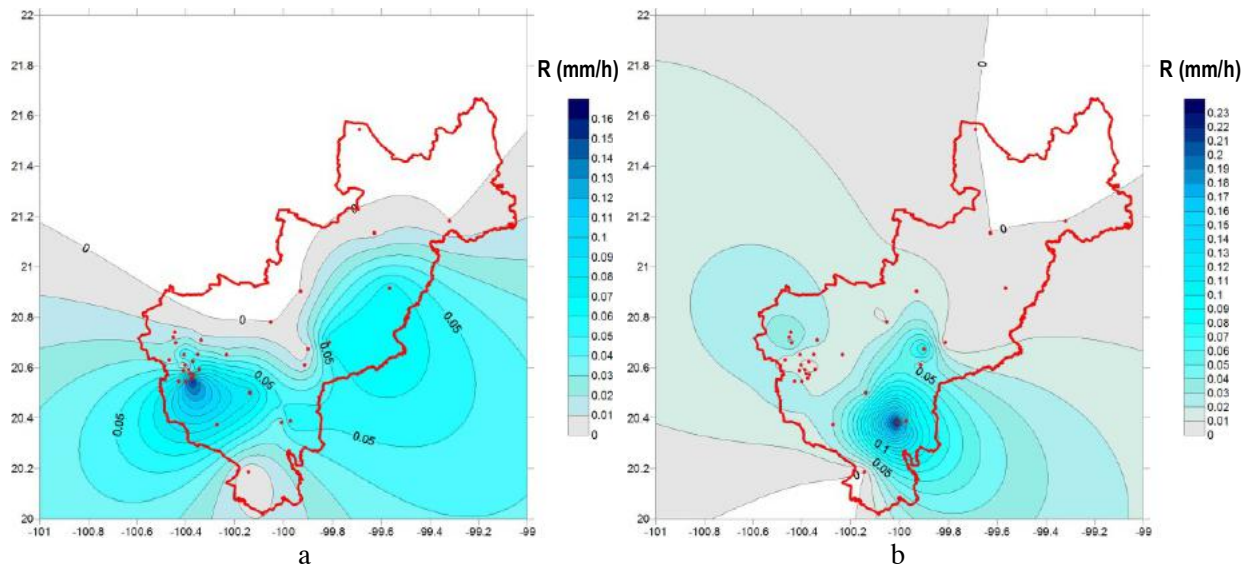


Figura 15. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 15:15 am (a) y a las 16:15 pm (b).

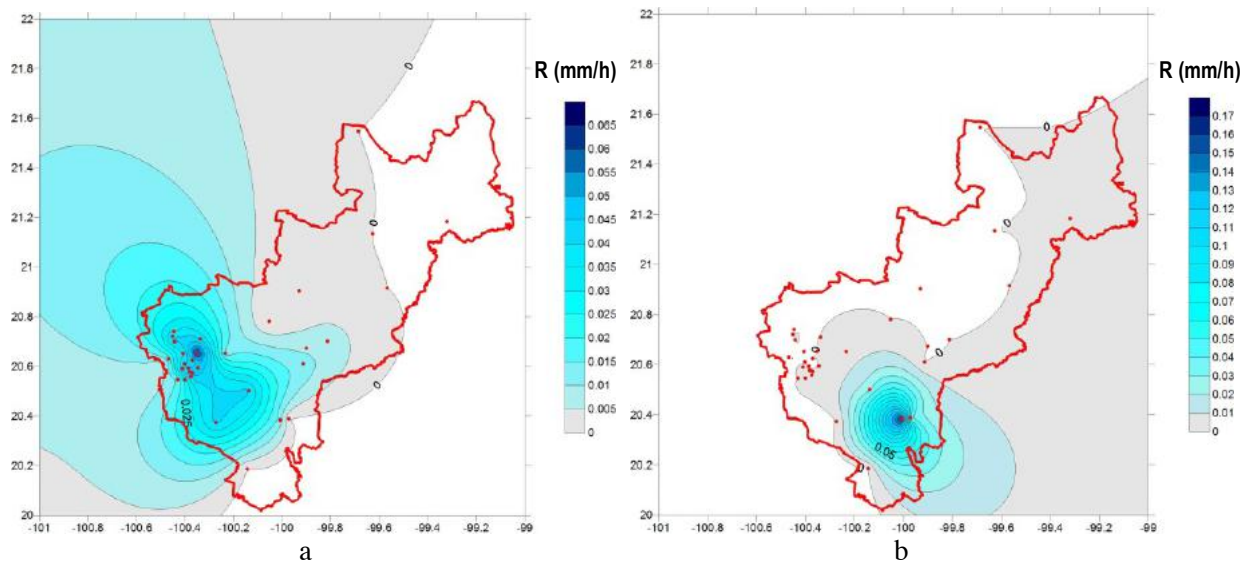


Figura 16. Distribución espacial de la tormenta el 27 de septiembre a las 17:15 am (a) y a las 18:15 pm (b).

Se puede apreciar en los hietogramas pronosticados de intensidad de lluvia (Figura 6) que toda la ZMQ estuvo afectada de manera constante por la tormenta del día 27 de septiembre con una primera secuencia lluviosa que alcanzó un máximo de 2 mm/h en la zona de Belén, parte alta al NNE del centro de la ciudad caracterizada por contar con vialidades de mucha pendiente, así como una media aproximada de 0.50 mm/h en el resto de ciudad. Además una segunda secuencia lluviosa homogénea de intensidad 2.00 mm/h ocurrió 5 horas después que cubrió la ZMQ, ocasionando que las zonas de mayor elevación que rodean el centro de la ciudad captaran lluvia de manera rápida y que derivado de la topografía urbana ocasionó una rápida acumulación de flujo superficial que se dirigió a la red de drenaje hidrológica conformada por el río Querétaro y los drenes el arenal y Cimatarío. Esto generó que se saturaran y al perder la capacidad hidráulica derivó en inundaciones súbitas a lo largo de la ciudad.

Ante la primera secuencia lluviosa (t0 a t21) y debido a los caudales en la red de drenaje hidrológica, producto de las lluvias que antecedieron las del día 27, el escurrimiento en la zona urbana concluyó con el llenado y, al presentarse la segunda secuencia lluviosa, el agua ocupó espacios topográficos de cotas bajas iniciándose durante la madrugada las inundaciones a lo largo de la ZMQ e incrementándose los niveles por el tiempo de retraso en la cuenca para los flujos superficiales, aunado a que se mantuvo una lluvia ligera durante las siguientes 5 horas contribuyendo al volumen precipitado.

En la Figura 7 pueden observarse ambas secuencias lluviosas en las EMA El Refugio y la zona universitaria en el Cerro de las Campanas, pero se distingue de manera importante una fase de lluvia intensa para t26 que coincide con la segunda secuencia en la zona urbana, pero ésta fue 4 veces más intensa y se localizó en la región NE del estado que conforma la zona montañosa alcanzando intensidades de 40 mm/h particularmente en Arroyo Seco y 30 mm/h en Colón.

Como puede apreciarse, se trató de una lluvia de corta duración pero gran intensidad, lo cual ocasionó una acumulación inmediata de escurrimiento superficial, que generó problemas inundaciones y deslaves en la zona, potenciado con un remanente de lluvia de aproximadamente tres horas con un promedio de 5.00 mm/h en la madrugada.

De manera similar fue el comportamiento de la lluvia hacia la zona E del territorio Queretano al mantenerse una segunda secuencia lluviosa que osciló entre 5 y 10 mm/h con una intensificación puntual que alcanzó los 75 mm/h en Landa de Matamoros, como se aprecia en la Figura 8, se presentó la misma secuencia inicial de precipitación de intensidad ligera pero con un marcado incremento desde t20 y manteniéndose la intensidad de fuerte a moderada las 3 horas posteriores de alcanzado el máximo de lluvia.

La Figura 10 expone que la lluvia mostró dos zonas de desarrollo: una en la ZMQ de baja intensidad y otra de mayor magnitud hacia el NE. Ambas cubrieron en aproximadamente un 85% el territorio estatal. Una hora después la precipitación empezó a acumularse en la zona centro del estado intensificando en la ZMQ, tendencia que se mantuvo desde las 3:15 hasta las 6:15 a.m. (Figuras 11 y 12).

Al mismo tiempo se aprecia un centro de intensificación al NE, el cual se desarrolló con dirección NW sobre la región montañosa, lo que ocasionó las fuertes intensidades descritas en las localidades Arroyo seco, Colón y Landa de Matamoros, así como en las localidades vecinas para finalmente volver a concentrar la evolución de la tormenta en la región de los municipios de Santiago de Querétaro, San Juan del Río, El Marqués y Corregidora.

Por su origen, el HE muestra diferencia en la intensidad pronosticada respecto de la intensidad medida en las EMA, por ello se requiere en trabajos posteriores calibrar los parámetros con los registros de la ZMQ, para optimizar los pronósticos al emplear las imágenes satelitales IR.



CONCLUSIÓN

Las ISD IR permiten el monitoreo climático de los municipios del estado de Querétaro, incluyendo algunos de ellos que carece de EMA, permite la reconstrucción temporal y espacial de eventos meteorológicos para conocer su desarrollo y establecer acciones de prevención social o trabajos de resiliencia en zonas afectadas.

La interpolación espacial realizada a partir de la lectura de nivel digital en los píxeles de las imágenes IR en escala horaria reconstruye adecuadamente la tormenta. Adicionalmente es posible acceder a ISD con resolución temporal de 15 minutos incrementando significativamente el conocimiento de su evolución temporal y espacial mediante la metodología descrita.

La tormenta del 27 de septiembre del 2017 se trató de un evento hidrometeorológico extremo, que cubrió prácticamente todo el territorio estatal, aunado con las lluvias ordinarias registradas en días previos se generaron escurrimientos superficiales iniciales que se concentraron en la red de drenaje hidrológica y saturaron el terreno. Ambos factores potenciaron nuevos escurrimientos y con ello la insuficiencia de la red presentándose inundaciones súbitas a lo largo de la ZMQ y municipios del centro del estado.

La topografía jugó un papel trascendental en las inundaciones al tenerse urbanizadas las zonas de mayor pendiente, siendo un factor detonante ante la falta de zonas de infiltración, lo cual ha incrementado significativamente el coeficiente de escurrimiento de la ZMQ. Por otro lado, el tiempo de concentración de la lluvia disminuye considerablemente por el desnivel que incrementa la velocidad, con la cual los escurrimientos se trasladan hacia las zonas bajas de la ciudad que se encontraban saturadas por su aportación propia.

El hidrograma de esta lluvia fue de duración muy corta con un gasto pico muy elevado para lo cual la infraestructura hidráulica se colapsó, a causa de la invasión de los drenajes naturales en aras de urbanizar con

finés comerciales y de vivienda. Ello representa un riesgo adicional ante la presencia de estas lluvias intensas que generan elevados volúmenes precipitados y ocasionan el reconocimiento nativo de los arroyos y ríos aun con estructuras, lo que llevará a fuertes erosiones, socavones, fisuras, hundimientos en perjuicio de la ciudadanía con los daños económicos, sociales y de salud que representa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al área de Percepción Remota del Servicio Meteorológico Nacional por el acceso a las imágenes satelitales. De igual manera a los revisores por los comentarios y sugerencias realizadas para el enriquecimiento del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] S. D. Espín and D. A. Romero, "Génesis de tormentas severas y su incidencia en la región de Murcia". *Investigaciones Geográficas*, no. 62, pp. 67-81. Jul-Dic, 2014.
- [2] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Estudio de la OCDE sobre el sistema nacional de protección civil en México, Resumen Ejecutivo, OECD Publishing, 2013.
- [3] Organización Meteorológica Mundial, Glosario Hidrológico Internacional, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. Primera edición, 2012, WMO/OMM/BMO – No 385.
- [4] Centro Nacional de Prevención de Desastres, Serie fascículos: Inundaciones. Secretaría de Gobernación. México, 2014
- [5] J. R. M. Rodríguez, C. A. Benito and L. A. Portela, *Meteorología y climatología: Unidad didáctica*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, 2004.
- [6] A. V. García, *Estrategias adaptativas y amenazas climáticas. Más allá del cambio*

climático. Las dimensiones sociales del cambio ambiental global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Psicología, 2006.

[7] O. D. Cardona, *The need for Rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. Mapping Vulnerability*. Londres: Earthscan Publisher, 2013.

[8] C. M. Rebella and R. Díaz, "Tendencia de lluvias y rendimiento de maíz en el área maicera típica argentina", III Congreso Nacional del Maíz, Pergamino, 1984.

[9] C. Rebella, S. Carballo, T. Hartmann and P. Mercuri, "Evento NIÑO 1997-98: Utilización de información satelital en la evaluación del impacto de las inundaciones sobre las producciones agropecuarias y forestales", *La CONAE y el aprovechamiento de la información espacial*, 1999.

[10] S. R. Kalsi, *Satellite based weather forecasting, Satellite remote sensing and GIS applications in meteorology*. Dehra Dun, India: World Meteorological Organization, 2004.

[11] C. M. Kishtawal, *Meteorological satellites. Satellite remote sensing and GIS applications in meteorology*. Dehra Dun, India: World Meteorological Organization, 2004.

[12] R. A. Rozumalski, "A quantitative assessment of NESDIS AutoEstimator", *Weather and Forecasting*, Vol. 15, pp. 397-415, 2000.

[13] W. G. Rees, *Physical principles of remote sensing*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[14] V. S. Ormeño, *Teledetección Fundamental*. Madrid: Universidad Politécnica, 2006.

[15] M. J. Martínez, *Percepción Remota: Fundamentos de Teledetección Espacial*. México: Comisión Nacional del Agua, 2005.

[16] R. Houze, *Cloud dynamics*. San Diego, California: Academic press, 1993.

[17] S. Nesbitt, E. Zipser and D. Cecil. "A census of precipitation features in the tropics using TRMM: radar, ice scattering, and lightning observations", *Journal of climate*, pp. 4087-4106.

[18] A. D. F. Campos, *Procesos del ciclo hidrológico*, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1998.

[19] M. A. Gutiérrez, L. F. Arellano, "Estudio de tormentas tipo en la ciudad de Querétaro". *ciencia@uaq*, vol. 3, no. 1, pp. 62-79, 2010.

[20] R. M. Meza, H. L. Curiel, T. D. González and M. C. Álvarez, "Imágenes satelitales y distribución espacial de la lluvia en el estado de Querétaro. Caso: Tormenta del 18 de agosto de 2014", Red universitaria de caracterización de riesgos Hidrometeorológicos, fluviales y costeros. Nthe. *Revista eléctrica de difusión científica, tecnológica y de información del estado de Querétaro*, no. 14. pp. 21-29, 2016.

[21] M. Kumar, "Digital image processing". *Satellite remote sensing and GIS applications in meteorology*. Dehra Dun, India: World Meteorological Organization, 2004.

[22] M. J. Badder, G. S. Forbes, J. R. Grant, R. B. E. Lilley and A. J. Waters, *Images in weather forecasting: A practical guide for interpreting satellite and radar imagery*, N.Y.: Cambridge University Press, 1995.

[23] G. A. Vicente, R. A. Scofield and W. P. Menzel, "The operational GOES infrared rainfall estimation technique". *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, pp. 1883-1898, 1998.

[24] P. K. Kitadinis, *Introduction to Geostatistics. Applications in Hydrogeology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[25] G. Herrera-Zamarrón, "Aplicación al acuífero del Valle de Querétaro de una metodología nueva para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea". Informe interno. Proyecto TH-2006. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000.

[26] A. G. Journel, *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*. Washington D.C.: American Geophysical Union, 1989.

[27] E. H. Issaks, R. M. Srivastava, *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford: Oxford University Press Inc., 1989.