

# Estimación del potencial de tormentas vía la combinación de imágenes satelitales e información meteorológica: caso de estudio al noroeste de México

• Fabiola Arellano-Lara\* • Carlos Escalante-Sandoval •  
Universidad Nacional Autónoma de México

\*Autor de correspondencia

## Resumen

Arellano-Lara, F., & Escalante-Sandoval, C. (septiembre-octubre, 2014). Estimación del potencial de tormentas vía la combinación de imágenes satelitales e información meteorológica: caso de estudio al noroeste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 39-61.

México sufre frecuentes inundaciones provocadas por tormentas generadas por los sistemas convectivos de mesoescala, por lo que es importante realizar su caracterización, a fin de estimar con cierto tiempo de antelación la cantidad de lluvia que producirán. Este trabajo presenta una metodología para la estimación del potencial de tormentas basada en el empleo de patrones antecedentes de éstas, obtenidos al acoplar datos medidos en superficie e información interpretada de imágenes de satélite, la cual fue aplicada a una región del noroeste de México. Los resultados mostraron que la información meteorológica puede ser empleada de manera aislada y eficiente en la estimación del potencial de tormentas con una anticipación de 12 horas.

**Palabras clave:** tormentas convectivas, imágenes de satélite, estimación potencial de tormentas.

## Introducción

En la república mexicana existe una gran variedad de climas y condiciones hidrometeorológicas que en muchas ocasiones dan lugar a la ocurrencia de tormentas extremas e inundaciones, con los consecuentes daños a la población. En general, las regiones costeras son las más afectadas por esta clase de fenómenos.

En México, gran parte de las tormentas de alta peligrosidad son originadas por los sistemas convectivos de mesoescala (SCM), definidos

## Abstract

Arellano-Lara, F., & Escalante-Sandoval, C. (September-October, 2014). Estimation of Storm Potential by Combining Satellite Images and Meteorological Data: A Case Study in Northwestern Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 39-61.

Mexico frequently experiences floods due to storms generated by Mesoscale convective systems. It is therefore very important to determine their characteristics in order to estimate in advance the amount of rain they will produce. This work presents a methodology to estimate potential storms based on their previous patterns by combining measured surface data and information interpreted from satellite images. This study was conducted in a region in northwestern Mexico. The results showed that meteorological information can be effectively used in isolation to estimate potential storms 12 hours in advance.

**Keywords:** Convective storms, satellite images, estimate of storm potentiality.

---

Recibido: 19/10/12  
Aprobado: 13/02/14

---

como un tipo especial de estructura nubosa de gran cobertura espacial (extensión de 100 km o más en una sola dirección).

Con el objetivo de generar acciones preventivas y de mitigación contra los efectos de estas lluvias extremas, es necesario realizar una caracterización del fenómeno, que permita estimar con cierto tiempo de antelación la cantidad de lluvia que se pudiera generar.

Una estimación eficiente de la lluvia para el pronóstico de escurrimientos requiere de la correcta medición de la distribución espacial y

temporal de la lluvia. Se ha considerado que el empleo de datos de lluvia registrados sólo por redes pluviométricas o radares meteorológicos no tiene la capacidad de observar por completo la evolución y magnitud de las tormentas convectivas debido a la cobertura espacial del fenómeno. Las alternativas empleadas para salvar esta condición han sido basadas en el uso de imágenes de satélite o en la combinación con datos de radar, superficie y modelos atmosféricos (Moses & Barret, 1986; Clark & Morris, 1986; Creutin, Lacomba, & Obled, 1986; Milford, Dugdale, & McDougall, 1994; Carn, 1994; Hubert & Toma, 1994; Laurent, 1994; Touré & N'Diaye, 1994; Ravelo & Santa, 2000; Rojas & Eche, 2005; Feidas *et al.*, 2005; Feidas *et al.*, 2008; Sawunyama & Hughes, 2008).

En este trabajo se presenta una metodología para la estimación del potencial de tormentas basada en el empleo de patrones antecedentes

de éstas, obtenidos del acoplamiento de datos medidos en superficie e información interpretada de imágenes de satélite.

### Zona de estudio

El análisis se realizó en la región noroeste de México, que abarca los estados de Chihuahua, Durango, Sonora y Sinaloa, la cual se caracteriza por su gran variabilidad hidrológica espacio-temporal (figura 1).

El estado de Chihuahua se localiza en la parte central del norte del país y abarca una superficie de 247 455 km<sup>2</sup>, distribuida en 67 municipios, y con una población de 3 640 000 habitantes. El territorio de Chihuahua pertenece a dos grandes provincias fisiográficas que dividen al estado en dos mitades: la provincia de Cuencas y Sierras al este, y la Sierra Madre Occidental al oeste. Los recursos

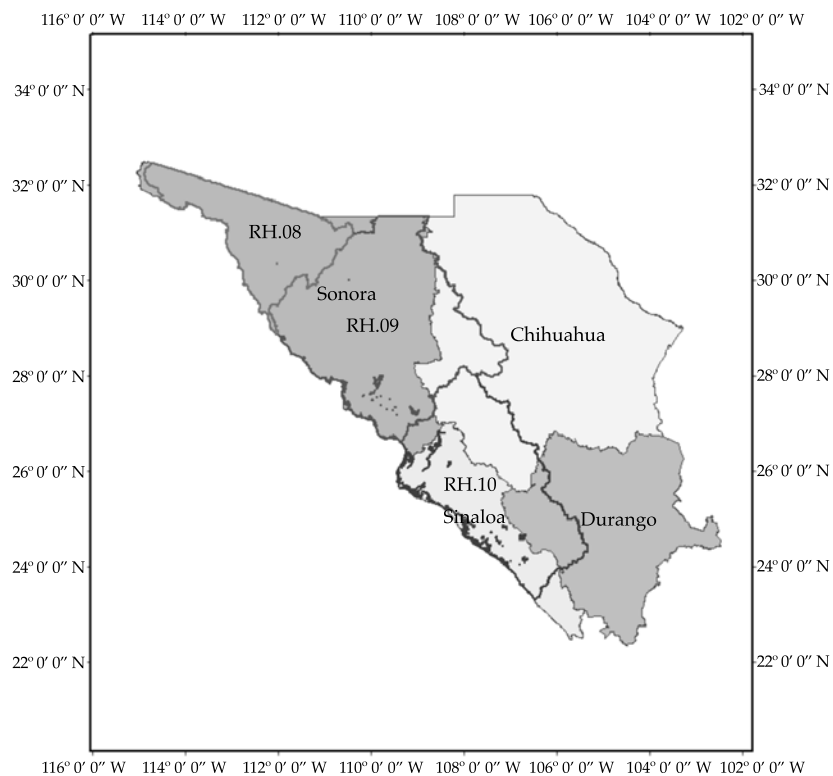


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

hidrológicos de Chihuahua se alimentan de una precipitación media anual de 470 mm. El potencial hidrológico del estado lo integran los tributarios de los ríos Yaqui, Mayo, Fuerte y Sinaloa, los cuales alimentan las cuencas que dan su riqueza agrícola a Sonora y Sinaloa; sin embargo, su velocidad y encajonamiento impiden el aprovechamiento local. También son aprovechables las aguas del río Conchos, que nace en las estribaciones de la Sierra Tarahumara y aquellos de la vertiente interna, como son el de Casas Grandes, Santa María y del Carmen, que desembocan en lagunas de escaso almacenamiento debido a las filtraciones y la rápida evaporación. Los climas predominantes en el estado son el muy seco templado (26%), semiseco templado (16%) y muy seco semicálido (15%). La presencia de los eventos hidrometeorológicos extremos, aun y cuando contribuye a incrementar el almacenamiento en presas y lagos, también puede causar daños a la población, infraestructura, servicios y sistemas productivos. Al respecto, las inundaciones de 1990 en la entidad provocaron la muerte de 200 personas y daños económicos de 2.5 millones de dólares. La presencia en 2001 del huracán *Iris* generó pérdidas valuadas en 14.9 millones de dólares, en tanto que para los eventos extremos del año 2006, las pérdidas sumaron 163.8 millones de dólares (Cenapred, 2013).

El estado de Durango colinda con dos de los estados de la región en estudio: Chihuahua y Sinaloa. La superficie es de 123 181 km<sup>2</sup>, divididos en 39 municipios, en los cuales viven cerca de 1 730 000 habitantes. La altitud promedio es de 1 775 msnm y el aspecto físico de la superficie de la entidad está definido por cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, sierras y llanuras del norte, Sierra Madre Oriental y mesa del centro. La hidrografía está representada por las corrientes principales de los ríos Nazas, Aguanaval, Baluarte, Mezquital, Acajoneta, Tepehuanes, Ojo Caliente y Tamazula, sobre los cuales se han ubicado las presas Francisco Zarco, Lázaro Cárdenas (El Palmito), Peña de Águila, San Bartoleo y la Guadalupe Victoria, todas

ellas para riego y uso piscícola. Los climas en Durango pueden variar del semitropical, con temperaturas generalmente altas, al francamente seco en la parte oriente del estado. La ocurrencia de lluvias torrenciales en el estado ha dejado a su paso la pérdida de vidas y daños económicos, que se han incrementado con el tiempo. El evento de septiembre del año 2000 generó pérdidas económicas de alrededor de 620 000 dólares; las de 2002 sumaron 800 000 dólares, con 20 000 personas afectadas y 4 000 viviendas dañadas. Aunque en el año 2006 las pérdidas fueron de sólo 8 000 dólares, se tuvo que lamentar la pérdida de 12 personas. Finalmente, en agosto del año 2008, las lluvias provocaron pérdidas por 32.1 millones de dólares (Cenapred, 2013).

El estado de Sinaloa se localiza al noroeste de la república mexicana, colindando al norte con los estados de Sonora y Chihuahua, al este con Durango, al sur con Nayarit, y al oeste con el océano Pacífico y Golfo de California. Tiene una extensión territorial de 58 092 km<sup>2</sup> y una población 2 950 000 habitantes asentados en sus 18 municipios. El sistema orográfico de Sinaloa consiste en un conjunto de unidades montañosas que se desprenden de la Sierra Madre Occidental, introduciéndose a la entidad por los municipios que colindan con los estados de Nayarit, Durango, Chihuahua y Sonora. La mayor parte del territorio sinaloense está constituido por terrenos planos, el resto lo forma una pequeña porción montañosa. Aproximadamente el 80% de los terrenos de la entidad se localiza por debajo de los 600 msnm y más de la mitad de la superficie del territorio se ubica por debajo de los 150 msnm, dando por resultado una elevación media de 344 msnm. En el estado, menos del 1% de la superficie sobrepasa los 1 820 metros de altitud. Posee 11 ríos que surten agua a sus presas, mismas que generan la energía eléctrica y conforman la infraestructura básica de riego, gracias a la cual se ha desarrollado la mejor agricultura tecnificada del país. Los climas predominantes en el estado son el cálido subhúmedo con lluvias en verano (36%), semiseco muy cálido (21%) y

el seco muy cálido (18%). En el estado se han presentado dos eventos hidrometeorológicos muy importantes: el primero ocurrió en el año 2002, cuando las inundaciones provocaron la pérdida de 20 000 ha de cultivos y cuyo monto ascendió a 5.5 millones de dólares; en el año 2006, las pérdidas económicas se estimaron en 163.8 millones de dólares y seis decesos (Cenapred, 2013).

El estado de Sonora se localiza en el extremo noroeste del país. Cuenta con una extensión territorial de 184 934 km<sup>2</sup> y una población al año 2013 de unos 2 850 000 habitantes. Está dividido políticamente en 72 municipios. La orografía se compone de montañas, lomeríos y zonas planas; estas dos últimas son las que dominan el estado. Los principales ríos con que cuenta el estado son los siguientes: Colorado, Concepción, San Ignacio, Sonora, Mátepe, Yaqui y el Mayo. Asimismo, cuenta con importantes presas, como Álvaro Obregón, Adolfo Ruiz Cortines, Plutarco Elías Calles, Abelardo Rodríguez y Lázaro Cárdenas. En 90% del estado su clima es seco y semiseco y, en general, predomina la poca disponibilidad del agua y la sobreexplotación de sus mantos acuíferos. De los cuatro estados involucrados en la zona de estudio, Sonora es el que más ha resentido los efectos adversos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. En octubre del año 2000, la presencia del huracán *Keith* afectó la quinta parte de la superficie estatal y generó daños por 5.2 millones de dólares. En el año 2001, el huracán *Juliette* provocó la muerte de siete personas, afectó a 16 365 habitantes y dañó 15 344 viviendas y 44 210 km de caminos, con un monto de pérdidas de 72.4 millones de dólares. En el año 2006 hubo 14 personas muertas y cerca de 72 000 dólares en daños. En 2008, las tormentas tropicales de septiembre y octubre impactaron económicamente por un monto de 33.5 millones de dólares. Por último, en el año 2009, la ocurrencia del huracán *Jimena* generó pérdidas por 78.8 millones de dólares (Cenapred, 2013).

A los efectos sociales y económicos que se han generado en los últimos diez años habrá

que sumarle los provocados en el mes de septiembre de 2013 por la presencia simultánea del huracán *Ingrid* y la tormenta tropical *Manuel*.

Los daños asociados con la ocurrencia de inundaciones se han incrementado de manera importante debido a los asentamientos humanos ubicados de forma irregular en áreas próximas a los ríos, al no respeto al ordenamiento territorial y, principalmente, al proceso acelerado de deforestación de la parte alta de las cuencas, cuyo efecto se refleja en un incremento en el escurrimiento superficial, y el transporte de suelos y sedimentos hacia las planicies.

La reducción de daños por efecto de las inundaciones consiste en adoptar medidas estructurales y no estructurales. Este trabajo se inserta en esta última, ya que pretende contar con una herramienta que pueda establecer la magnitud de la lluvia que es susceptible de precipitarse en cierto sitio con un periodo de antelación de 12 horas, de tal forma que permita generar mecanismos de respuesta por parte de las autoridades de protección civil para salvaguardar la vida de los habitantes y de sus bienes.

## Materiales y métodos

En la región en estudio, la temporada del monzón está directamente asociada con la ocurrencia de tormentas severas producidas por la combinación de diversos factores, como condiciones de inestabilidad atmosférica, características del relieve debidas a la barrera orográfica creada por Sierra Madre Occidental y distintos tipos de climas inmersos en la zona.

El periodo de tiempo de información disponible de imágenes de satélite para el estudio fue del año 2004 al 2006; por lo tanto, en este lapso fue realizado el acoplamiento de ambos tipos de datos. A continuación se describen los dos diferentes análisis mencionados, además del estudio de acoplamiento de datos de tormentas entre éstos.



Se crearon bases de datos a partir de los registros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA), con la finalidad de obtener las condiciones meteorológicas antecedentes a la ocurrencia de tormentas moderadas ( $10 < Hp$  (mm)  $< 20$ ) y fuertes ( $20 < Hp$  (mm)  $< 50$ ). Dado que en julio se presenta la mayor acumulación de la precipitación en la región (figura 2), se decidió considerar sólo las lluvias disponibles de este mes en el periodo 1999-2006.

En particular, las estaciones de medición empleadas en la zona montañosa del estado de Chihuahua se listan en el cuadro 1 (figura 3).

La información recolectada de cada tormenta corresponde a las condiciones climáticas prevalecientes 12 horas antes de la ocurrencia de la tormenta y cuatro horas posteriores a ésta. Las variables consideradas son: dirección del viento (Dir), dirección de la ráfaga de viento (WSMDir), velocidad del viento (WSK),

velocidad de la ráfaga de viento (WSMK), temperatura (Temp), humedad relativa (HR), precipitación, presión barométrica (BP) y radiación solar (RS).

La información fue procesada en promedios horarios sobre las variables registradas, excepto para la precipitación, donde los registros fueron acumulados. Con la información así preparada se obtuvieron las curvas del comportamiento en el tiempo para cada variable asociada con los rangos de tormentas en cuestión, meses y sitio de estudio. A su vez, estas curvas de evolución permitieron la identificación de aquellas variables cuyos patrones son más significativos para el acoplamiento con la información de imágenes de satélite. Se emplearon 105 tormentas moderadas y 44 tormentas fuertes distribuidas de acuerdo con el cuadro 2.

A partir de la información recolectada y procesada, se seleccionaron aquellas variables

Lluvia medio mensual región NW de México

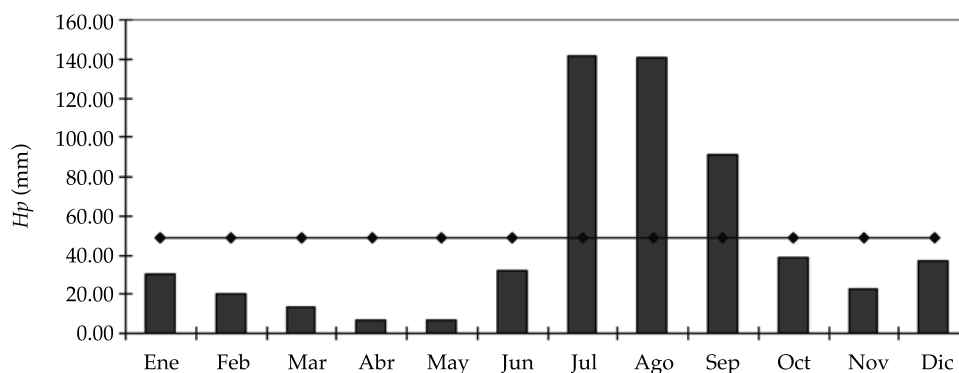


Figura 2. Distribución de la lluvia mensual en la zona de estudio.

Cuadro 1. Características generales de las EMA dentro de la zona de estudio.

Estado	Nombre	Fecha-inicio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Chihuahua	Basesachi	07-may-99	28° 11' 57"	108° 12' 32"	1 973
	Chinatú	04-jun-99	26° 13' 46"	106° 46' 14"	1 982
	Chinipas	24-may-99	27° 23' 34"	108° 32' 11"	431
	Guachochi	31-may-99	26° 48' 49"	107° 04' 23"	2 390
	Maguarichi	10-jun-99	27° 51' 30"	107° 59' 40"	1 663
	Urique	15-abr-99	27° 12' 56"	107° 55' 1"	577

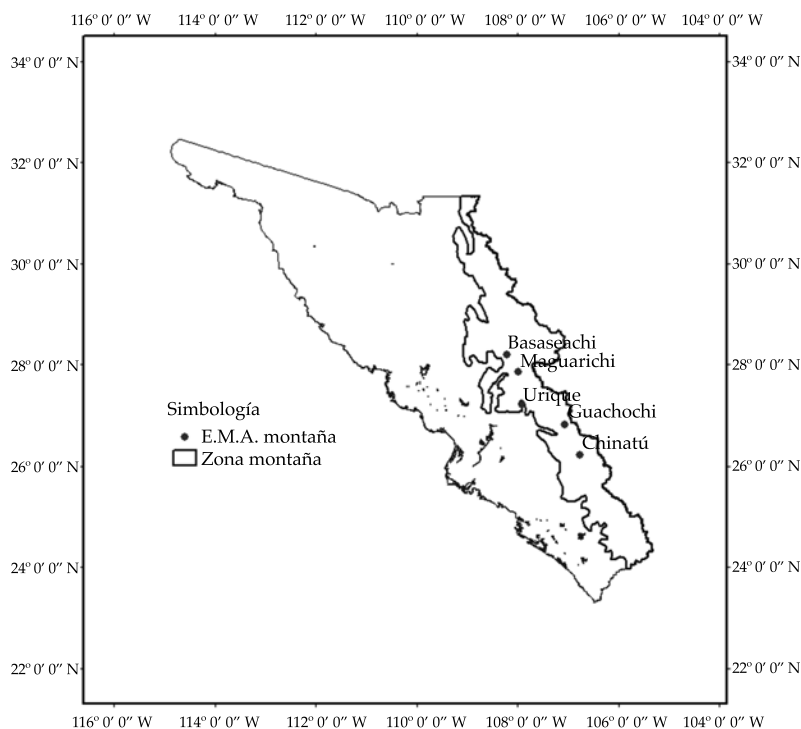


Figura 3. Ubicación de las EMA dentro de la zona montañosa analizada.

que presentaron los comportamientos promedios (zona de montaña) en el tiempo más perceptibles en 12 horas previas a la ocurrencia de la lluvia. Tales variables son la temperatura y la humedad relativa. Se evaluaron los coeficientes de correlación entre todas las variables mencionadas por rango de tormenta y los valores más altos concordaron con la correlación entre temperatura y humedad relativa de -0.996 y -0.988 para tormentas moderadas y fuertes, lo cual se

puede observar en los cuadros 3 y 4. Así, fue seleccionada la variable de temperatura promedio en superficie para efectuar el análisis de acoplamiento con las temperaturas interpretadas de imágenes de satélite por tratarse del mismo tipo de variable, asegurando así mayor certeza.

Se observó además que la mayoría de las variables presentó diferencias sensibles entre los dos rangos de tormentas del estudio (moderadas y fuertes), excepto por la presión barométrica, que no mostró variaciones. La dirección del viento (Dir) no exhibió un patrón evidente antecedente a la ocurrencia de la lluvia en los casos mencionados, por lo contrario del resto de las variables.

Con base en los resultados comentados, se continuó con el análisis de acoplamiento entre las temperaturas promedio en superficie y las temperaturas obtenidas de imágenes de satélite entre los casos de estudio identificados previamente con este propósito.

Cuadro 2. Tormentas de montaña empleadas para el análisis climático antecedente en superficie.

EMA	Tormentas moderadas	Tormentas fuertes
Basesachi	19	10
Chinatú	21	9
Guachochi	23	10
Maguarichi	22	6
Urique	20	9
<b>Total</b>	<b>105</b>	<b>44</b>

Cuadro 3. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie para tormentas moderadas.

	Dir_10	WSK_10	Tmont_10	HR_10	BP_10	SR_10
Dir_10	1	0.156	-0.158	0.214	-0.081	-0.409
WSK_10		1	0.758	-0.729	-0.854	0.517
Tmont_10			1	<b>-0.996</b>	-0.82	0.929
RH_10				1	0.82	-0.941
BP_10					1	-0.6
SR_10						1

Cuadro 4. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie para tormentas fuertes.

	Dir_20	WSK_20	Tmont_20	RH_20	BP_20	SR_20
Dir_20	1	0.026	-0.143	0.192	-0.244	-0.454
WSK_20		1	0.7	-0.679	-0.836	0.493
Tmont_20			1	<b>-0.988</b>	-0.857	0.896
RH_20				1	0.839	-0.925
BP_20					1	-0.599
SR_20						1

Para el estudio de las tormentas a través de las temperaturas de brillo obtenidas de las imágenes de satélite, se identificaron aquellas tormentas registradas en superficie comprendidas dentro del periodo 2004-2006, lapso con imágenes satelitales disponibles.

Las imágenes de satélite fueron proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México. Se utilizaron las imágenes correspondientes al espectro infrarrojo (IR) en la banda 10.7  $\mu\text{m}$  (canal 4), provenientes de los satélites GOES-11 y GOES-12, los cuales observan al territorio mexicano.

En general, el procesamiento de las imágenes IR consistió en la transformación de los valores de píxeles de las imágenes (0 a 255) a temperaturas de brillo en  $^{\circ}\text{C}$ . La formulación utilizada para la estimación de las temperaturas de nubes frías en esta investigación fue la correspondiente a la Curva Estándar de la NOAA (NOAA, 1975; Weinreb *et al.*, 1997), desarrollada propiamente para imágenes IR en formato de 8 bits provenientes de los satélites GOES (NASA, 2005).

Las temperaturas de brillo obtenidas bajo éste u otros procedimientos son empleadas

en la inferencia de precipitación a través de diversas técnicas indirectas relacionadas con datos infrarrojos. De acuerdo con Barret y Martin (1981), las técnicas de estimación de lluvia basadas en datos infrarrojos y visibles se dividen en: índice de nube, historia de vida, métodos bi-espectrales, y en técnicas de modelos de nubes. Asimismo, métodos que emplean datos infrarrojos y la combinación de visibles e infrarrojos son Barret (1970); Arkin (1979); Dittberner y Vonder Haar (1973); Lovejoy y Austin (1979); Tsonis e Isaac (1985); Stout, Martin y Sikdar (1979); Griffith-Woodley Technique (Griffith *et al.*, 1976); Gruber (1973); Wylie (1979); Técnica Convectiva-Estratiforme de Adler y Negri (1988), y el esquema de Scofield y Oliver (1977).

Las ecuaciones de conversión de temperaturas de brillo de la NOAA consideran como umbral inicial de temperatura para nubes frías los  $-32^{\circ}\text{C}$ . Estas conversiones hacen que las nubes y otros cuerpos fríos aparezcan en tonos blancos en una imagen, por el contrario de los cuerpos cálidos, como el terreno, que se muestran en tonos oscuros. De esta manera, las imágenes en canales IR son transformadas a

imágenes en canales visibles. Las expresiones para la transformación de valor de píxel a temperatura de brillo son las siguientes:

Nubes frías: si  $B > 176$ , entonces  $T = 418 - B$

Nubes tibias: si  $B \leq 176$ , entonces  $T = 330 - (B/2)$

Donde  $B$  es el valor de píxel.

De acuerdo con la literatura, han sido establecidos diferentes umbrales para las temperaturas de nubes frías relacionados con diferentes latitudes y tipos de satélites; por lo tanto, las ecuaciones de transformación a temperaturas de brillo presentan variaciones. La zona de estudio está localizada dentro de la región de América del Norte, hecho que permitió la aplicación de las formulaciones mencionadas sin modificaciones. En este contexto se utilizaron los conjuntos de imágenes cada 15 minutos, conformados por 12 horas previas y 4 horas posteriores a la ocurrencia de la lluvia para el rango de tormentas moderadas y fuertes. En los cuadros 5 y 6 se listan las tormentas moderadas y fuertes nombradas por una clave compuesta por la fecha, hora de inicio y hora de término de la lluvia.

La extensión superficial de todas las imágenes IR analizadas corresponde exactamente con la zona montañosa en superficie. Con este propósito se extrajeron de cada una de las imágenes IR los datos pertenecientes al área de estudio mencionada. Se procesaron las imágenes IR satelitales desde su formato nativo comprimido (valores de brillantez por píxeles en formato .PCX) hasta la transformación en formato espacial raster (mapas térmicos) con valores de temperaturas en °C. Para facilitar el manejo de las imágenes, a cada una le fue asignado el sistema de coordenadas NAD 27. Posteriormente, los mapas térmicos que de manera original se tenían en intervalos de 15 minutos fueron condensados a intervalos horarios que permitieran el acoplamiento con la información en superficie analizada por horas.

Cuadro 5. Lista de tormentas moderadas empleadas en el análisis.

Número	Fecha y hora de la tormenta	Lluvia (mm)
1	01/07/2004 23:10 - 23:50	10.66
2	07/07/2004 21:00 - 21:30	11.42
3	08/07/2005 21:30 - 22:00	18.04
4	08/07/2006 00:00 - 00:30	14.48
5	08/07/2006 20:50 - 21:20	12.2
6	14/07/2006 00:00 - 00:40	19.55
7	22/07/2005 17:50 - 18:30	15.49
8	24/07/2004 00:10 - 01:00	11.68
9	24/07/2005 01:20 - 02:10	19.3
10	28/07/2004 23:10 - 23:50	11.94

Cuadro 6. Lista de tormentas fuertes empleadas en el análisis.

Número	Fecha y hora de la tormenta	Lluvia (mm)
1	02/07/2004 22:00 - 22:50	32.76
2	03/07/2005 21:00 - 21:40	20.07
3	04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05
4	04/07/2006 22:20 - 23:20	23.11
5	05/07/2006 02:20 - 03:00	22.86
6	09/07/2006 01:20 - 02:00	26.66
7	20/07/2004 20:20 - 20:50	21.33
8	22/07/2004 04:00 - 04:40	20.58
9	22/07/2004 21:40 - 22:10	21.33
10	27/07/2005 22:10 - 22:50	22.11

La naturaleza de los datos en superficie, es decir, las series horarias de temperaturas, determinaron la discretización de los mapas térmicos en datos concretos estadísticos, esto es, series de valores promedios, máximos y mínimos de temperaturas horarias sobre la zona de estudio, las cuales son denominadas series de satélite. Una vez unificadas las series de tiempo de temperaturas en superficie y satelitales fue realizada la comparación entre ambos datos con base en la evolución temporal de los patrones promedios y la correlación entre ambas variables tanto para el rango de tormentas mo-

deradas como fuertes. Así fueron obtenidos los coeficientes de correlación entre los datos en superficie y las series paramétricas de satélite sobre ambos rangos de tormentas. La evolución temporal de las series paramétricas satelitales, al igual que la serie de temperaturas en superficie para cada rango de tormentas analizadas se muestran en las figuras 4 y 5, donde PromT\_Mont\_10, 20 = temperatura promedio en superficie, tormentas moderadas/fuertes Med\_min/max/med = temperaturas promedio de brillo mínimas, máximas y promedios asociadas con tormentas moderadas/fuertes.

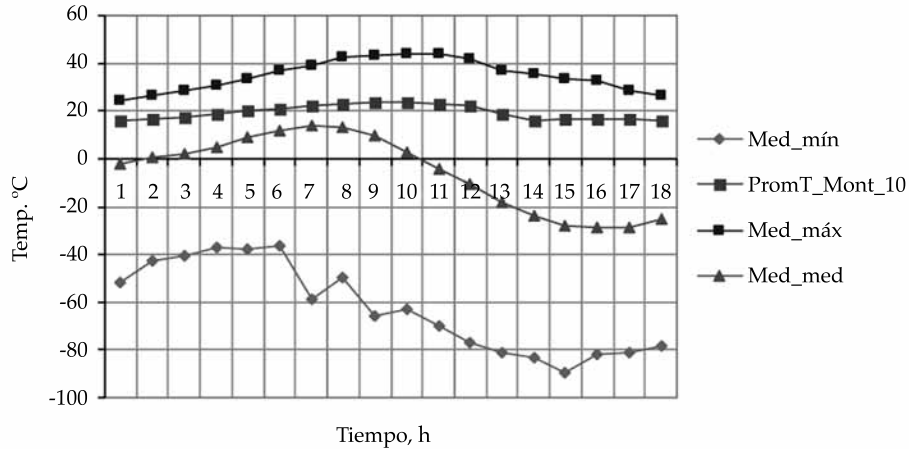


Figura 4. Curvas de temperaturas promedio, tormentas moderadas.

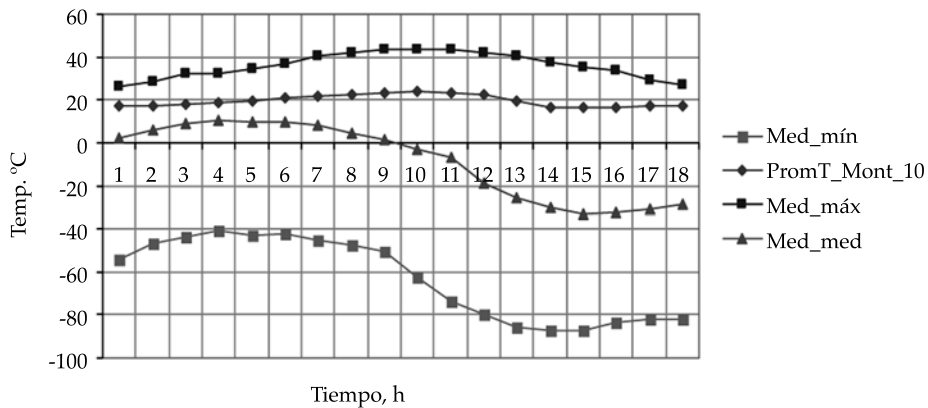


Figura 5. Curvas de temperaturas promedio, tormentas fuertes

En ambos tipos de tormentas, los coeficientes de correlación más altos correspondieron a las temperaturas de satélite máximas obtenidas a partir de los mapas térmicos. Este hecho es evidente en las curvas respectivas mostradas en las figuras 4 y 5, por rango de tormentas. Los resultados de los coeficientes de correlación se presentan en el cuadro 7.

La diferencia entre los patrones de las clases de temperaturas por tipo de tormentas es apenas perceptible debido a la extensa cobertura espacial del análisis correspondiente a la zona montañosa completa. Sin embargo, la gran correlación identificada entre los valores de temperaturas en superficie y de satélite en las 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia sustentó la realización posterior de este mismo análisis de acoplamiento de temperaturas en las regiones circundantes de influencia a las estaciones meteorológicas automáticas localizadas en la zona de montaña, como son Basesachi, Chinatú, Guachochi, Maguarichi e Urique.

Con base en los resultados anteriores se realizó la extracción de información sobre imágenes IR para los mismos grupos de tormentas en estudio (moderadas y fuertes), esto de acuerdo con cada una de las regiones influenciadas por las EMA localizadas en la zona montañosa. La delimitación de estas regiones parciales se llevó a cabo según los siguientes criterios: las fronteras oriente y poniente de cada una de las regiones parciales corresponden a los bordes oriente y poniente de la zona montañosa; las divisiones transversales entre cada EMA son líneas aproximadamente perpendiculares al litoral, trazadas a las distancias centrales entre EMA. En los casos

de las estaciones en los extremos (Basesachi y Chinatú), los límites externos regionales y transversales a la zona montañosa se encuentran en sus respectivas distancias medias interiores. Estas condiciones son indiscriminadas, ya que la finalidad de este segundo ensayo fue obtener resultados con menor dispersión entre clases de temperaturas, sujetos a áreas de influencia asociadas con las estaciones en superficie. La distribución de las regiones de muestra en la figura 6.

#### *Tormentas fuertes (rango 20-50), zona montañosa*

Se realizó el procedimiento descrito del análisis en la zona de montaña para la obtención de los conjuntos de mapas térmicos parciales asociados con los casos de estudio de tormentas medidas en superficie. También se determinaron las condiciones en superficie. Del análisis de los coeficientes de correlación sobre las series de temperaturas en superficie y las series de temperaturas de brillo (máximas, mínimas y promedio) de las respectivas imágenes infrarrojas, ambas asociadas con la muestra de tormentas fuertes obtenidas 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia en la zona de montaña, se encontró lo siguiente:

1. De acuerdo con los coeficientes de correlación correspondientes a temperaturas de brillo mínimas (más frías) y temperaturas promedio en superficie, sólo cuatro de las tormentas presentaron valores entre  $\pm 0.6$  y  $1.0$ , es decir que solamente el 40% de la muestra guarda estrecha relación entre estas temperaturas, pero no es significativa para el análisis, como se observa en la figura 7a. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de  $-0.821$ .
2. En cuanto a los coeficientes  $r$  entre temperaturas de brillo máximas (más cálidas) y temperaturas promedio en superficie, se observó que el 80% de tormentas de la muestra tuvo valores entre  $\pm 0.6$  y  $1$ . Este comportamiento resulta muy

Cuadro 7 Coeficientes de correlación entre superficie y satélite, 12 h previas a la precipitación.

Temperatura	Tormentas moderadas	Tormentas fuertes
Mínima	-0.652	-0.53
Media	0.178	-0.542
Máxima	0.984	0.989



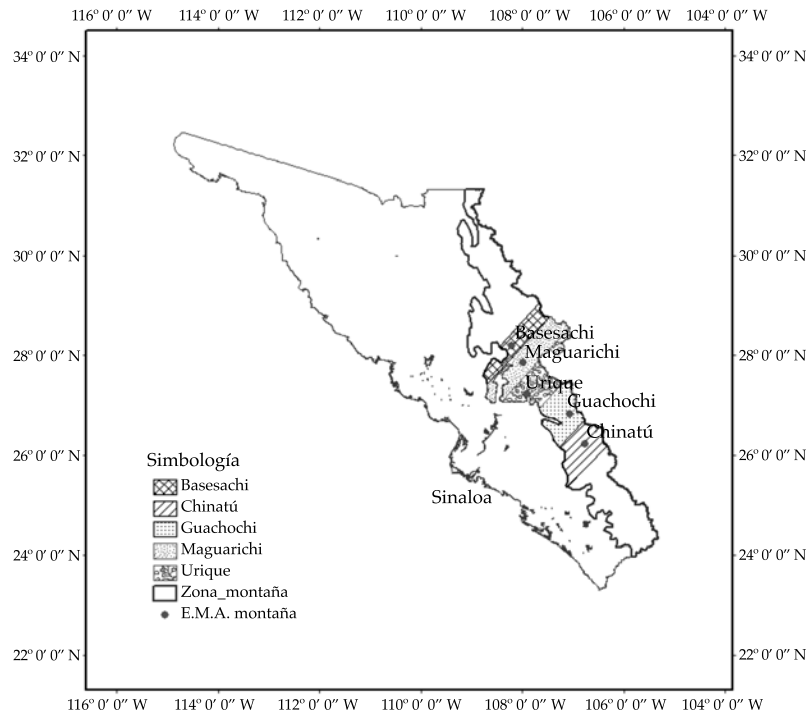


Figura 6. Cobertura de las regiones parciales dentro de la zona de montaña.

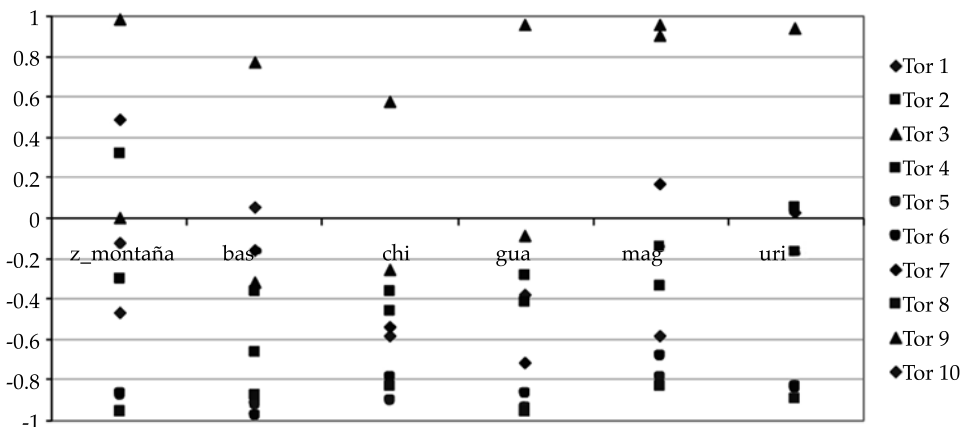
importante e implica una fuerte relación entre tales valores, como se observa en la figura 7b. El valor promedio de correlación para las ocho tormentas es de 0.835.

3. El 40% de las tormentas de la muestra presentó valores entre temperaturas de brillo medias y temperaturas promedio en superficie, oscilando en el rango  $\pm 0.6$  y 1, lo cual significa que no hay buena relación entre tales variables, como se observa en la figura 7c. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.772.

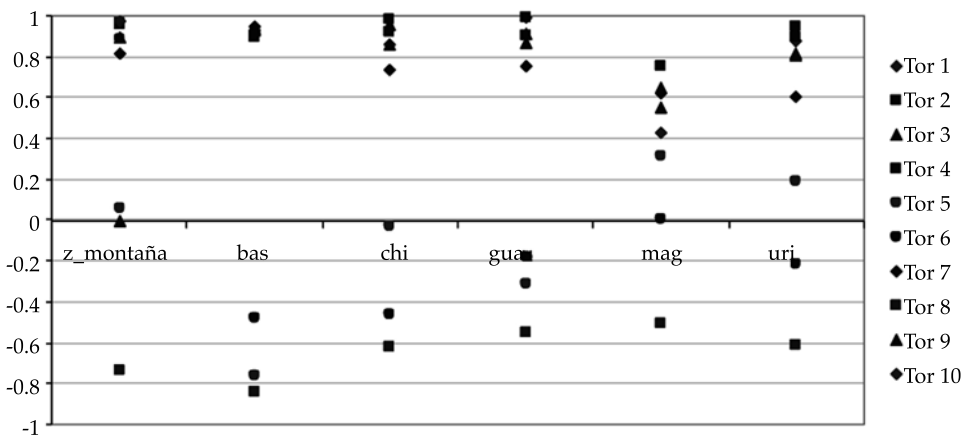
De estas observaciones, la relación más representativa para las tormentas de la muestra se obtuvo entre las temperaturas promedio en superficie y las temperaturas de brillo máximas correspondientes. Sin embargo, no se obtuvo una marcada diferencia entre los coeficientes de correlación obtenidos en la zona de montaña extensa y aquellos para las regiones parciales relativas a las EMA.

Con el objetivo de evaluar en mayor detalle la relación encontrada entre temperaturas de superficie y temperaturas de brillo máximas se determinaron los siguientes parámetros: diferencias entre temperaturas de superficie y satélite  $\Delta ssi$ , gradientes de evolución entre estas diferencias  $\delta ssi$ , gradiente interno de evolución entre las temperaturas de satélite  $\delta sat\_i$  y gradiente interno de evolución entre las temperaturas de superficie  $\delta sup\_i$ . Estos parámetros se obtuvieron a partir de las respectivas series horarias tanto para la zona de montaña como para las zonas de influencia de las estaciones automáticas comprendidas dentro de ella y utilizando las series de temperaturas de brillo máximas correspondientes.

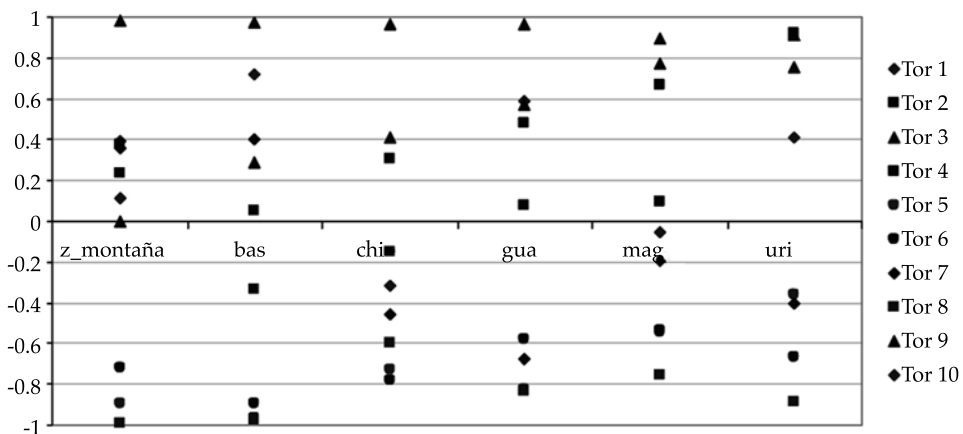
Las curvas de  $\delta ssi$  para cada región parcial del estudio mostraron menores ordenadas que aquellas correspondientes a la curva de  $\Delta ssi$  (figura 8), es decir que la disminución de áreas de influencia interviene claramente en



a) T. Superficie/T. de brillo mínimas



b) T. Superficie/T. de brillo máximas



c) T. Superficie/T. de brillo medias

Figura 7. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.

la reducción de las diferencias de ambos tipos de temperaturas. Esto se evidenció al obtener una baja desde los  $-15.14$  °C promedio en la zona de montaña hasta  $-6.92$  °C promedio en las zonas parciales de montaña. Además, las curvas  $\delta_{ssi}$  mostraron que en las tres horas previas a la ocurrencia de la lluvia, los valores  $\Delta_{ssi}$  (diferencias entre las temperaturas de sat y sup) son insignificantes. Es decir, que los resultados entre las curvas  $\Delta_{ssi}$  y las series de  $\delta_{ssi}$  fueron consistentes. En conjunto, estos parámetros evaluados demostraron la mejoría en las dispersiones entre ambas mediciones de temperaturas, al considerar las áreas parciales para cada una de las estaciones, en lugar de la zona extensa de montaña.

Con base en los valores  $\Delta_{ssi}$  (diferencias de temperaturas de brillo máximas y temperaturas medias en superficie), medidos por cada una de las áreas parciales inscritas en la zona de montaña en un periodo de 12 horas previas a la ocurrencia de la lluvia, fueron determinadas las dispersiones con respecto a las mediciones obtenidas sobre la zona de montaña completa. Se encontró que, en efecto, al reducir espacialmente las áreas de estudio, se obtienen importantes disminuciones entre ambos tipos de temperaturas; sin embargo, aunque las reducciones no son constantes a lo largo del tiempo, éstas comienzan en 20% aproximadamente y a partir del instante 10, en todos los casos de regiones parciales, las diferencias en la aproximación a la hora de lluvia disminuyen en promedio un 80%. Esto es, que las temperaturas son idénticas en alto grado durante este lapso. Se concluye, por lo tanto, que relacionando el área de influencia a la estación de medición se obtiene gran disminución sobre las dispersiones entre clases de temperaturas y, por ende, el empleo de las mediciones meteorológicas en superficie es significativamente más confiable.

#### *Tormentas moderadas (rango 10-20), zona montañosa*

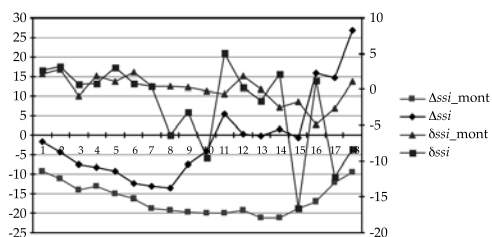
Se llevaron a cabo los análisis entre los mismos pares de temperaturas registradas en superficie y por satélite, tal como en el caso anterior, pero

en esta ocasión sobre las tormentas moderadas. A continuación se presentan los hallazgos:

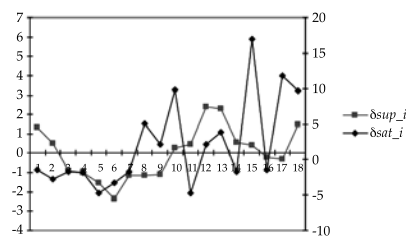
1. De acuerdo con los coeficientes de correlación correspondientes a temperaturas de brillo mínimas (más frías) y temperaturas promedio en superficie, sólo cuatro de las tormentas presentaron valores entre  $\pm 0.6$  y  $1.0$ , es decir que solamente el 40% de la muestra guarda estrecha relación entre estas temperaturas, pero no es significativa para el análisis, lo cual se muestra en la figura 9a. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de  $-0.722$ .
2. En cuanto a los coeficientes  $r$  entre temperaturas de brillo máximas (más cálidas) y temperaturas promedio en superficie, se observó que el 80% de tormentas de la muestra tuvo valores entre  $\pm 0.6$  y  $1$ . Este comportamiento resulta muy importante e implica una fuerte relación entre los valores, lo cual se muestra en la figura 9b. El valor promedio de correlación para las ocho tormentas es de  $-0.812$ .
3. El 40% de las tormentas de la muestra presentó valores de correlación, oscilando en el rango  $\pm 0.6$  y  $1$  entre temperaturas de brillo medias y temperaturas promedio en superficie, lo cual significa que no hay buena relación entre tales variables (figura 9c). El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de  $0.724$ .

Se observó que los mejores coeficientes de correlación entre los grupos de variables descritas nuevamente correspondieron a la relación entre temperaturas promedio en superficie y temperaturas de brillo máximas, hecho consistente con el caso de estudio anterior para tormentas fuertes. Por lo tanto, se procedió con el análisis específico de los parámetros internos del grupo de series en cuestión, al igual que se hizo para las tormentas fuertes.

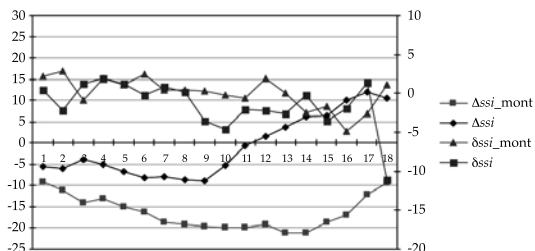
A partir de los parámetros obtenidos se observa que se cumple la mejoría de aproximación entre los dos tipos de temperaturas, al



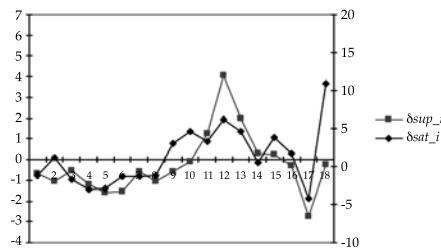
Basesachi  $\Delta ssi$  y  $\delta ssi$



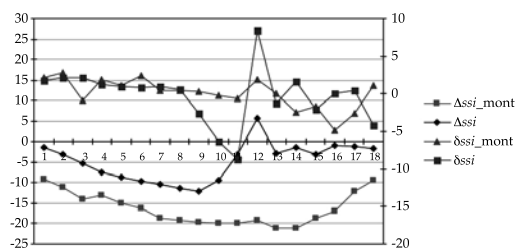
Basesachi  $\delta sup_i$  y  $\delta sat_i$



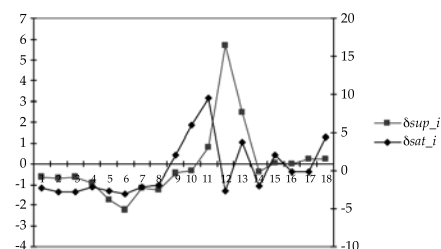
Chinatú  $\Delta ssi$  y  $\delta ssi$



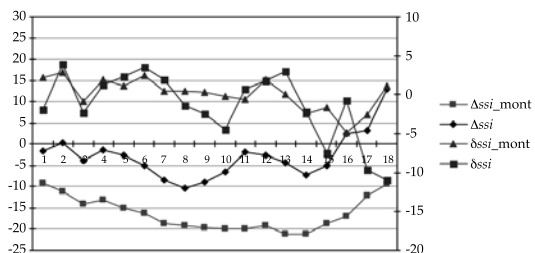
Chinatú  $\delta sup_i$  y  $\delta sat_i$



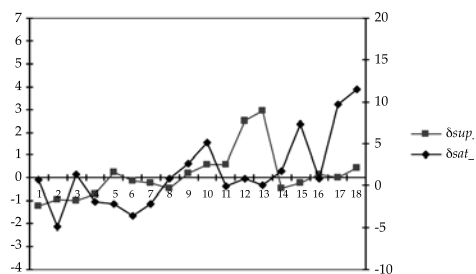
Guachochi  $\Delta ssi$  y  $\delta ssi$



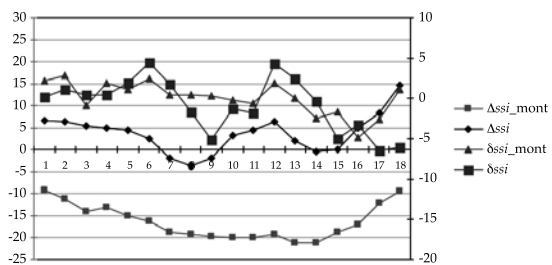
Guachochi  $\delta sup_i$  y  $\delta sat_i$



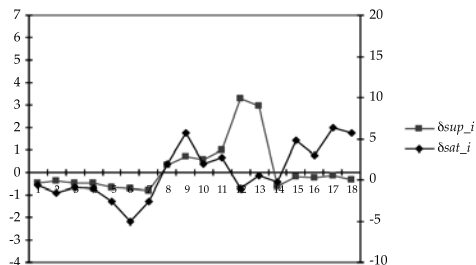
Maguarichi  $\Delta ssi$  y  $\delta ssi$



Maguarichi  $\delta sup_i$  y  $\delta sat_{ii}$

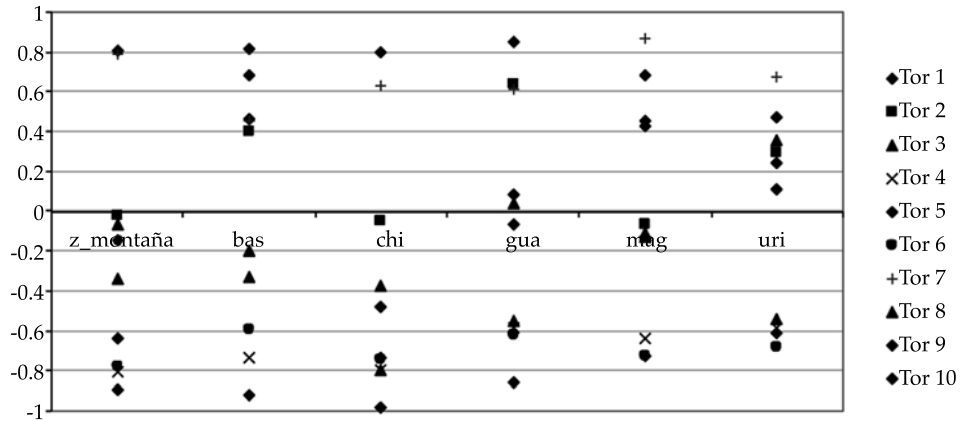


Urique  $\Delta ssi$  y  $\delta ssi$

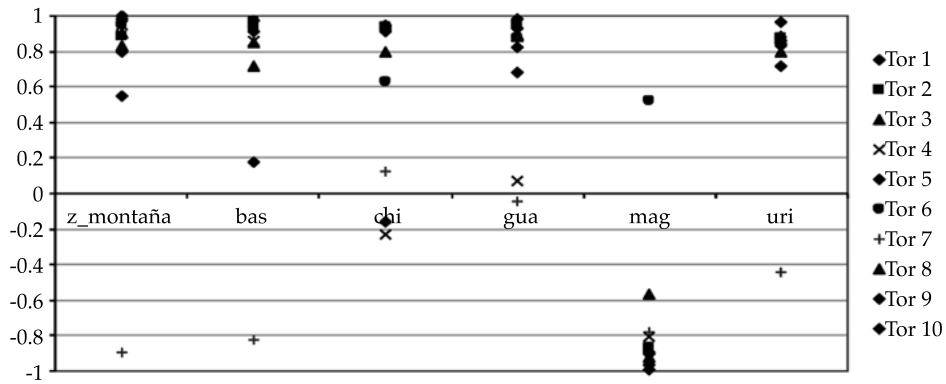


Urique  $\delta sup_i$  y  $\delta sat_i$

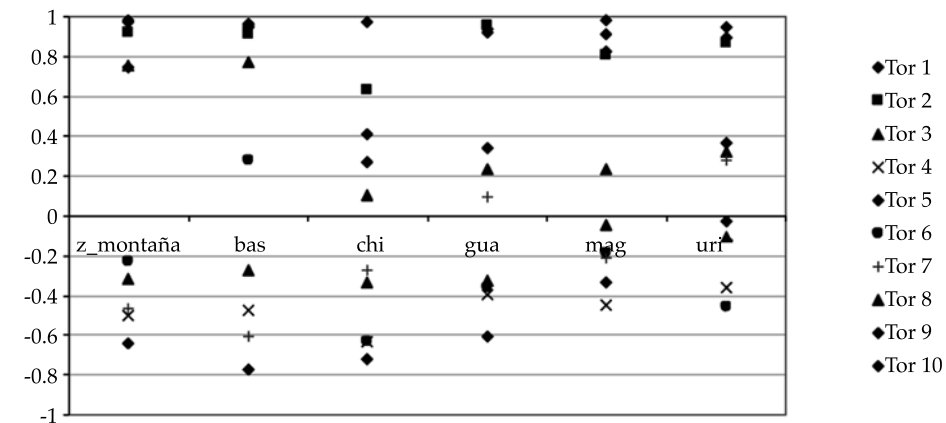
Figura 8. Curvas  $\Delta ssi$  (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas  $\delta ssi$  (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas  $\delta sat_i$  (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas  $\delta sup_i$  (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.



a) T. Superficie/T. de brillo mínimas



b) T. Superficie/T. de brillo máximas



c) T. Superficie/T. de brillo medias

Figura 9. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.

reducir la zona de estudio en zonas de influencia parciales para cada estación meteorológica

automática, ya que se obtuvo una disminución desde  $-14.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  promedio en la zona de monta-

ña, a  $-5.82$  °C promedio en las zonas parciales de montaña. Sin embargo, a diferencia del caso de tormentas fuertes, las tormentas moderadas presentan durante las primeras tres horas previas a la lluvia diferencias entre las temperaturas en superficie y las de satélite de alrededor de cinco grados de temperatura, donde para los instantes similares en tormentas fuertes, las diferencias fueron casi insignificantes. Por otro lado, en relación con los valores de las curvas  $\Delta ssi$  (series de diferencias entre temperaturas sup y sat) para la zona de montaña (figura 10), se encontró que, en promedio, los valores correspondientes a las zonas parciales alcanzaron una mejoría del 70%; la mayor similitud se presentó en las primeras 10 horas. Se debe precisar que las disminuciones instante a instante presentan variaciones a lo largo de las 12 horas de estudio. Este comportamiento también muestra que las condiciones atmosféricas previas a la lluvia, correspondiente a las tormentas fuertes, presentan ligeramente mejores patrones entre ambas mediciones (superficie y satélite); la mejoría promedio encontrada es del 10% aproximadamente.

También se hicieron análisis sobre las tendencias  $\delta_{sup\_i}$  (cambios en el tiempo de las series de datos en superficie), así como  $\delta_{sat\_i}$  (cambios en el tiempo de las series de datos obtenidas de satélite, temperaturas de brillo máximas). Con respecto a las tormentas fuertes, las curvas  $\delta_{sup\_i}$  y  $\delta_{sat\_i}$  para cada una de las zonas parciales y la zona de montaña mostraron alineamientos muy similares, en especial para las primeras nueve horas de las series.

En el caso de tormentas moderadas, la gran concordancia se presentó en las primeras 10 horas de las series. En este contexto, los  $Cv$  calculados sobre las series de temperaturas en superficie y satélite en tormentas fuertes obtenidas en las zonas parciales guardan una diferencia de  $-0.066$  unidades en promedio, una desviación de  $0.042$  y con un factor de proporción entre  $Cv$  de aproximadamente 2 para ambas mediciones.

En relación con las tormentas moderadas, estos  $Cv$  calculados mostraron una diferencia promedio de  $-0.078$  unidades,  $0.064$  de desviación estándar y un factor de proporción entre  $Cv$  de aproximadamente 1.76, valores calculados para las zonas parciales.

Las variaciones en el tiempo de  $\delta_{sup\_i}$  y  $\delta_{sat\_i}$  poseen tendencias con gran similitud para los dos tipos de tormentas analizadas, y  $Cv$  con alta aproximación entre las series, como se demostró. No obstante, las curvas  $\delta_{sup\_i}$  y  $\delta_{sat\_i}$  para las tormentas moderadas se aproximan mejor entre ellas, debido a que la inestabilidad en las condiciones atmosféricas es menor que el estado de la dinámica atmosférica relacionado con tormentas fuertes. En ambos casos, alrededor de la hora número 10, los valores de las curvas  $\delta_{sup\_i}$  y  $\delta_{sat\_i}$  son drásticos, a diferencia del comportamiento gradual en las horas anteriores, lo cual se debe a la cercana ocurrencia de la precipitación.

Los altos coeficientes de correlación encontrados entre las series de temperaturas medidas en superficie y las series de temperaturas máximas de brillo tanto para los rangos de tormentas fuertes y moderadas focalizadas sobre las áreas parciales de montaña, las diferencias entre los cambios internos en las series ( $\delta_{sup\_i}$  y  $\delta_{sat\_i}$ ), y las diferencias entre ambas series de temperaturas ( $\Delta ssi$ ), representan (resultados en conjunto) la señal de lluvia a través de diferentes dispositivos de medición y con un margen muy cercano entre ambos tipos de datos, tal como se demostró. Este especial comportamiento permite el empleo de uno u otro sistema de medición para la observación y estimación de la ocurrencia del fenómeno, obteniendo alta certidumbre.

En este sentido, la disponibilidad de mediciones meteorológicas en superficie es accesible en mayor grado que las mediciones indirectas a partir de imágenes de satélite en tiempo real, por lo cual los patrones de 12 horas de temperaturas promedio, previas a la ocurrencia de lluvia, cobertura nubosa de parcial a completa y las ecuaciones de las



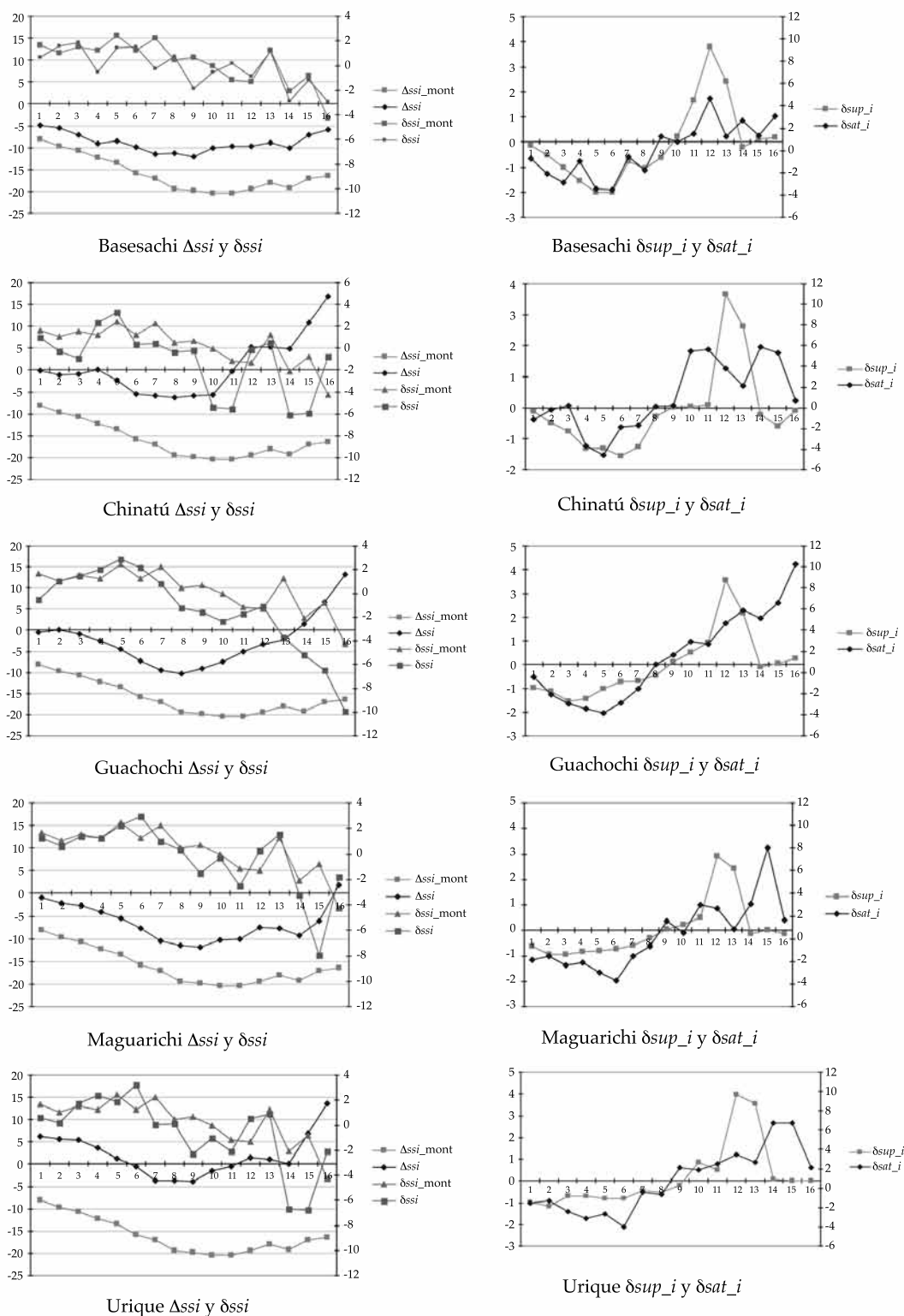


Figura 10. Curvas  $\Delta ssi$  (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas  $\Delta ssi$  (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas  $\Delta sat_i$  (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas  $\Delta sup_i$  (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.

tendencias de humedad relativa relacionadas con cada una de las EMA usadas en este estudio son herramientas que pueden emplearse con éxito en la estimación de la ocurrencia de tormentas fuertes y moderadas en los meses de julio dentro de las zonas parciales montañosas. La correlación entre temperaturas y humedades relativas es 0.996 y 0.989, respectivamente, de las tormentas moderadas y fuertes. Estas ecuaciones se presentan en las figuras 11 y 12.

#### *Aplicación de patrones de temperaturas en la estimación del rango de lluvia*

Con el propósito de mostrar el ajuste de los patrones de temperaturas y humedades relativas antecedentes, obtenidos para la estimación del rango de precipitación en las diferentes regiones de estudio, fueron seleccionadas tormentas no incluidas en el análisis con imágenes de satélite, que además estuvieran conformadas dentro de la muestra de tormentas registradas por las EMA. De esta manera se extrajeron los registros de dos tormentas registradas por la EMA Basesachi (cuadro 8) y se graficaron los valores de temperaturas de 12 horas previas a los eventos de lluvia sobre las curvas de tendencia promedio y límites estimados de temperaturas de Basesachi. Se procedió de la misma manera con los datos de humedades relativas (figura 13). Los valores de la tormenta 05/07/2000 ajustaron en un 90% a las tendencias antecedentes en cuestión. En el caso de la tormenta 22/07/2001, el ajuste fue de 85%.

Estos ajustes encontrados son aceptables dentro del contexto de esta primera aproximación del estudio realizado. Tales resultados indican que las variables de temperatura y humedad relativa de dichas tormentas en efecto presentan patrones de comportamiento correspondientes a eventos de lluvia en el rango de tormentas fuertes de 20 a 50 mm, obtenidos de una manera sencilla, con base en registros en superficie, con antelación de 12 horas. Por otro lado, se seleccionó una

tercera tormenta con la finalidad, adicional a la mencionada antes, de permitir la comparación de la estimación de la precipitación basada en imágenes IR con la estimación indirecta, a través de las tendencias antecedentes. Esta tormenta se denominó 04/07/2004. Sus variables Temp y HR se graficaron sobre las curvas de las tendencias; el ajuste observado fue del 75%.

La estimación de lluvia basada en imágenes IR para esta misma tormenta se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en Arellano *et al.*, (2010), correspondiente a una adecuación-simplificación del método auto-estimador (Vicente, Scofield, & Menzel, 1998). En la figura 14 se presenta la lluvia estimada para la zona-montaña y el detalle de la distribución espacial de lluvia en la sección de Basesachi.

#### **Conclusiones**

La amplia extensión de la zona de estudio implica importantes variaciones espaciales del relieve. Este comportamiento se vio reflejado en los resultados de comparación de los acoplamientos entre patrones meteorológicos antecedentes a tormentas basados en temperaturas superficiales promedio y temperaturas máximas de nubes frías obtenidas de imágenes de satélites para 10 tormentas fuertes y 10 moderadas, respectivamente. Los mejores  $C_v$  entre tales series mencionadas fueron los más precisos, resultando de 0.835 y -0.812, respectivamente, a eventos fuertes y moderados. Para el acoplamiento se usaron las series de temperaturas promedio en superficie debido a que presentaron un alto coeficiente de correlación con los registros de humedades relativas de -0.996 y -0.989 mutuamente a tormentas moderadas y fuertes, así como también a que la variable obtenida de las mediciones satelitales era temperatura.

Como se mencionó, el  $C_v$  de variación promedio entre ambos tipos de series de tiempo fue de 0.835 para tormentas fuertes y de -0.812 sobre tormentas moderadas,

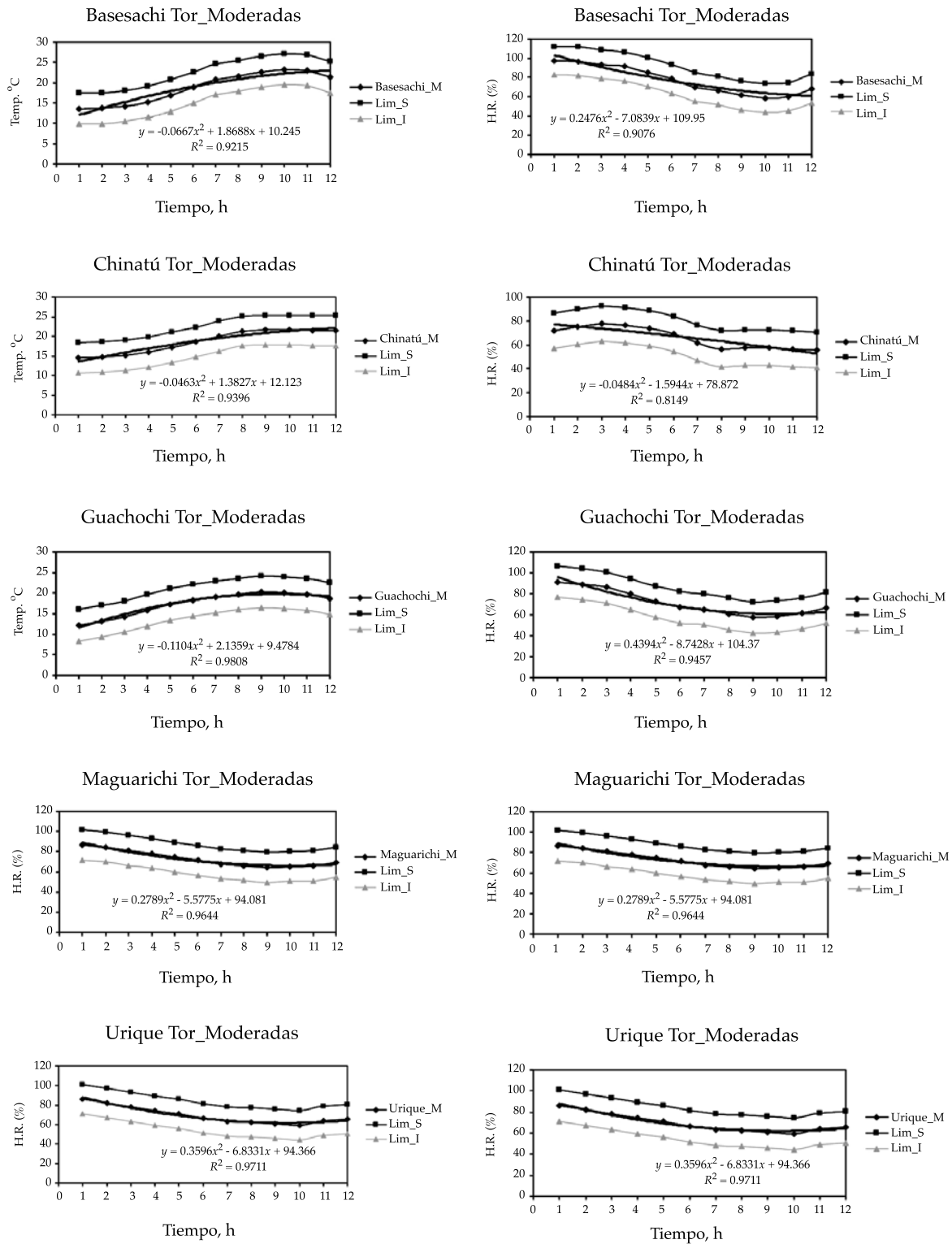


Figura 11. Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas moderadas.

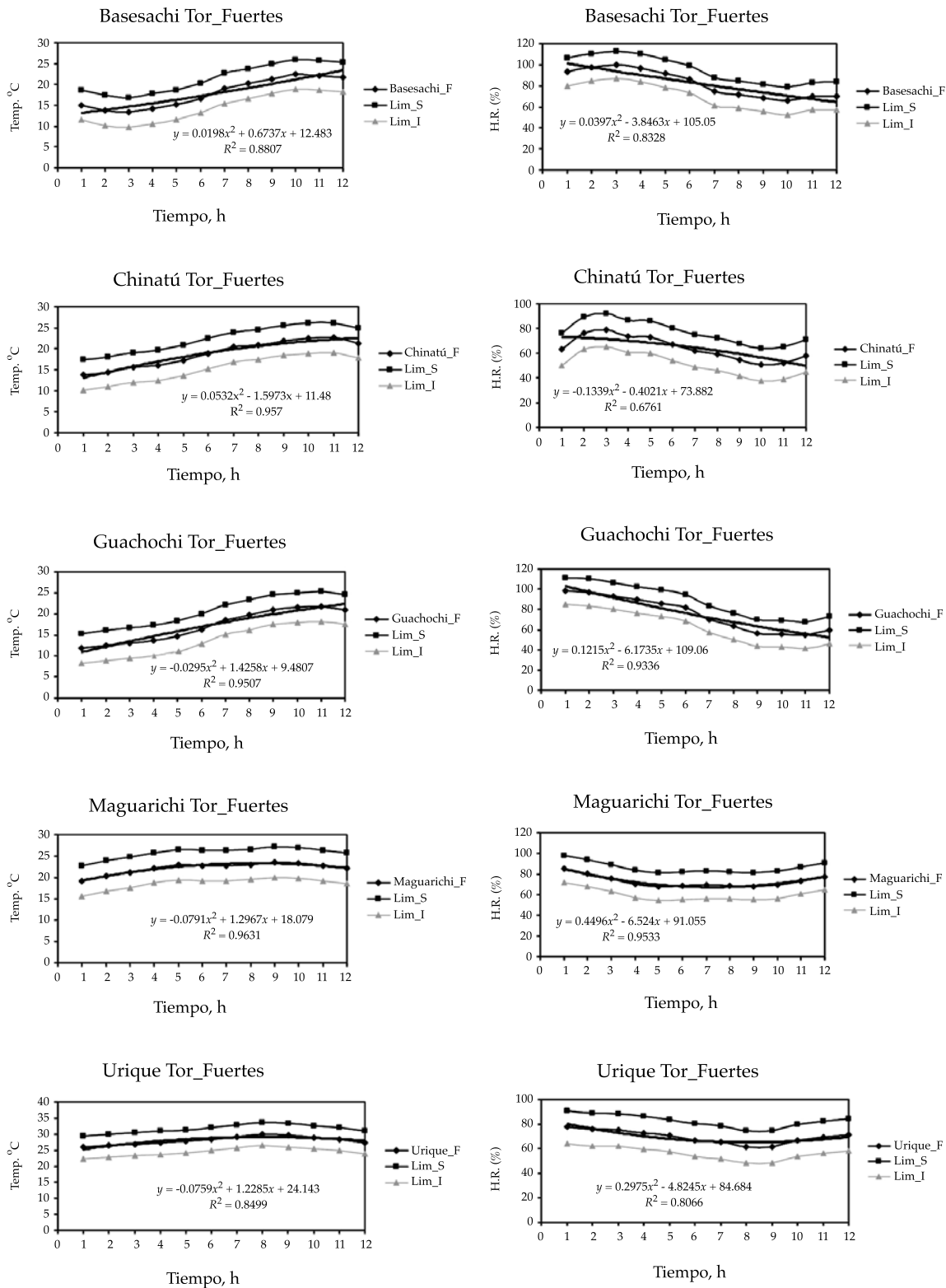


Figura 12. Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas fuertes.

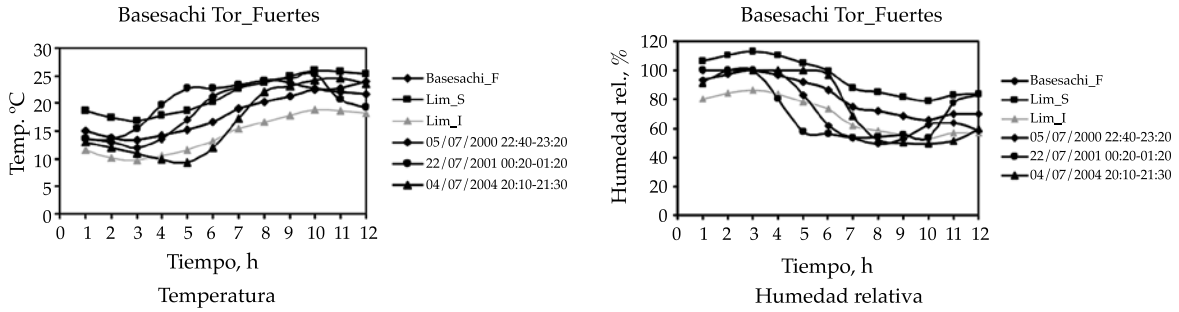


Figura 13. Curvas de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie. Tormentas de prueba.

Cuadro 8. Tormentas de prueba de tendencias antecedentes.

Tormenta (día y hora)	Lámina (mm)
05/07/2000 22:40 - 23:20	37.58
22/07/2001 00:20 - 01:20	27.92
04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05

despreciando extensiones superficiales. Sin embargo, el empleo de las zonas de influencia para las estaciones meteorológicas en lugar de la zona de montaña disminuyó notablemente las dispersiones entre las tendencias de estas temperaturas desde un 20% hasta un 80% cerca de la hora número 10 de las series de tiempo en tormentas fuertes, y hasta un 70% para el caso de tormentas moderadas. Es decir, que el acoplamiento de mediciones aplicado a las zonas de influencia derivó en una mejoría en las relaciones entre tales series. Estos resultados se observan en las curvas  $\Delta_{ssi}$  y curvas  $\delta_{ssi}$ , para tormentas fuertes y moderadas.

Otros parámetros empleados para evaluar el acoplamiento entre ambos tipos de temperaturas antecedentes fueron los valores de las curvas  $\delta_{sup\_i}$  y  $\delta_{sat\_i}$ , donde la evolución de los cambios de temperaturas internas a cada una de las series mostró tendencias bastante semejantes en las primeras 9 horas de las series correspondientes a las tormentas fuertes y en las 10 horas iniciales a las respectivas series de tormentas moderadas. De esta manera, la

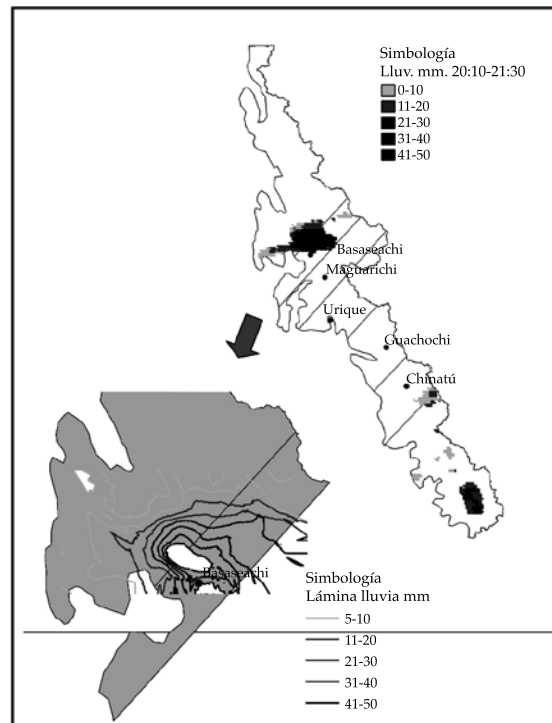


Figura 14. Distribución espacial de lluvia estimada para la tormenta 04/07/2004.

diferencia entre las series  $C_v$  calculadas para las series de temperaturas promedio en superficie y series de temperaturas máximas de satélite es de  $0.066 \pm 0.04$  promedio para tormentas fuertes y  $-0.078 \pm 0.064$  para tormentas moderadas.

De esta manera, demostrada la alta relación entre las series de temperaturas superficiales y de satélite antecedentes a la ocurrencia de

lluvia presentada para eventos de tormentas tanto fuertes como moderadas en la zona de estudio permite la aplicación de las tendencias en el tiempo de temperaturas superficiales, en combinación con las respectivas curvas de humedades relativas, ambas asociadas con las zonas de influencia de las EMA localizadas en el sitio y con la nubosidad, la estimación del potencial de lámina de precipitación durante los meses de julio, con un horizonte de 12 horas de previsión. Asimismo, las formulaciones en cuestión son susceptibles de ser incorporadas de manera exitosa a un sistema de alerta de tormentas en tiempo real.

### Agradecimientos

Agradecemos al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por el suministro de las imágenes de satélite empleadas en la investigación, así como a los doctores Michael Weinreb y Dejiahn Han, investigadores de la NOAA.

### Referencias

- Adler, R. F., & Negri, A. J. (1988). A Satellite Infrared Technique to Estimate Tropical Convective and Stratiform Rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27(30), 30-51.
- Arellano, L. F., Gutiérrez, L. A., & Arellano, L. H. (2010). Comportamiento de tormentas extremas de Querétaro en base a imágenes de satélite. Casos de estudio. *Extensión Nuevos Tiempos, Universidad Autónoma de Querétaro*, 17, 39-46.
- Arkin, P. A. (1979). The Relationship between Fractional Coverage of High Cloud and Rainfall Accumulations during GATE over the B-Scale Array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382-1387.
- Barret, E. C. (1970). The Estimation of Monthly Rainfall from Satellite Data. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 322-327.
- Barrett, E. C. & Martin, D. W. (1981). *The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring* (340 pp.). London: Academic Press.
- Carn, M. (1994). *Apport de la Télédétection Satellitaire à la Pluviométrie de Bassin d'un Flueve Sahélien: Le Sénégal. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.). Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Cenapred (2013). *Publicaciones. Características e impactos socioeconómicos de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [www.cenapred.gob.mx](http://www.cenapred.gob.mx).
- Dittberner, G. J., & Vonder Haar, T. H. (1973). Large Scale Precipitation Estimates using Satellite Data; Application to the Indian Monsoon. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B.*, 21, 317-334.
- Feidas, H., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Cartalis, C. (2005). Application of Three Satellite Techniques in Support of Precipitation Forecasts of a NWP Model. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5393-5417.
- Feidas, H., Kokolatos, G., Negri, A., Manyin, M., Chrysoulakis, N., & Kamarianakis, Y. (2008). Validation of an Infrared-Based Satellite Algorithm to Estimate Accumulated Rainfall over the Mediterranean Basin. *Theo. Appl. Clim.*, 95, 91-109.
- Griffith, C. G., Woodley, W. L., Browner, S., Teixeira, J., Martin, M. D. W., Stout, J., & Sikdar, D. N. (1976). *Rainfall Estimation from Geosynchronous Satellite Imagery during Daylight Hours* (106 pp.). NOAA Tech. Rep. ERL 356-WMPO 7. Boulder, USA: NOAA.
- Gruber, A. (1973). *An Examination of Tropical Cloud Clusters using Simultaneously Observed Brightness and High Resolution Infrared Data from Satellites* (22 pp.) NOAA Tech. Memo. Ness 50. Washington, DC: NOAA.
- Hubert, P., & Toma, C. A. (1994). Étude des Cumulus de Pluie Sahéliens. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Laurent, H. (1994). *Validation des Estimations de Précipitation à Grande Échelle. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Lovejoy, S., & Austin, G. L. (1979). The Delineation of Rain Areas from Visible and IR Satellite Data for GATE and Mid-Latitudes. *Atmosphere-Ocean*, 17, 77-92.
- Milford, J. R., Dugdale, G., & McDougall, V. D. (1994). *Rainfall Estimation from Cold Cloud Duration: Experience of the TAMSAT Group in West Africa. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Moses, J. F. & Barrett, E. C. (1986). Interactive Procedures for Estimating Precipitation from Satellite Imagery. In Hydrologie Application of Space Technology. Ed. Johnson, A. I. *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.*, 160, 25-40.
- NASA (2005). *The Importance of Understanding Clouds*. National Aeronautics and Space Administration. Available Online at <http://icp.giss.nasa.gov/education/cloudintro/>.
- NOAA (1975). *Central Processing and Analysis of Geostationary Satellite Data* (155 pp.). NOAA Tech. Memo. NESS 64, U.S. Washington, DC: Department Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.



- Ravelo, A. C. & Santa, J. A. (2000). Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *AgriScientia*, 17, 21-27.
- Sawunyama, T., & Hughes, D. A. (2008). Application of Satellite-Derived Rainfall Estimates to Extend Water Resource Simulation Modelling in South Africa. *Water SA*, 34, 1-9.
- Scofield, R. A., & Oliver, V. J. (1977). *A Scheme for Estimating Convective Rainfall from Satellite Imagery* (47 pp.). NOAA Tech. Memo. NESS 86. Washington, DC: NOAA.
- Stout, J. E., Martin, D. W., & Sikdar, D. N. (1979). Estimating GATE Rainfall with Geosynchronous Satellite Images. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 585-598.
- Touré, A., & N'Diaye, N. (1994). *Estimation des Pluies au Sénégal par L'approche TAMSAT. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.). Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Tsonis, A. A., & Isaac, G. A. (1985). On a New Approach for Instantaneous Rain Area Delineation in the Midlatitudes using GOES Data. *J. Climate Appl. Meteor.*, 24, 1208-1218.
- 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.
- Weinreb, M. P., Jamieson, M., Fulton, N., Chen, Y., Johnson, J. X., Bremer, J., Smith, C., & Baucom, J. (1997). Operational Calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 Imagers and Sounders. *Applied Optics*, 36, 6895-6904.
- Wylie, D. P. (1979). An Application of a Geostationary Satellite Rain Estimation Technique to an Extratropical Area. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1640-1648.

## Dirección institucional de los autores

Dra. Fabiola Arellano-Lara  
Dr. Carlos Escalante-Sandoval

Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, Ciudad  
Universitaria  
04510 México, D.F., México  
fabi\_arelara@yahoo.com.mx  
caes@unam.mx