

# DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE TORMENTAS Y LAS CONDICIONES DE SEVERIDAD ASOCIADAS MEDIANTE EL EMPLEO DE IMÁGENES IR DE LOS SATÉLITES GOES

AUTORES: EUGENIO MOJENA LÓPEZ  
LUIS YÁÑEZ TRUJILLO  
ANTONIA ORTEGA GONZÁLEZ  
CLAUDIO A. SÁNCHEZ PEDROSO  
REYNALDO BÁEZ ALTAMIRANO  
JULIA LEYVAS SANTO  
VÍCTOR HUGO BASTIDA VILLALOBOS  
GLORIA RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ

Centro de Pronósticos del Tiempo. Instituto de Meteorología. E-mail: emoje@yahoo.com

## Resumen

Dentro del marco de colaboración entre Universidad Autónoma Metropolitana a través del Laboratorio de Percepción Remota y Sistema de información Geográfica (SIGPER) de México y el Departamento de Satélites del Instituto de Meteorología de Cuba se desarrollo el presente trabajo. El mismo esta encaminado a esclarecer las particularidades de las áreas de nubes con condiciones de severidad, así como las que tienen el potencial para alcanzar dicha condición, este documento presenta también el desarrollo de un conjunto de algoritmos que nos permiten determinar de forma cuantitativa los parámetros principales asociados a estas áreas de convección, empleando para ello herramientas como la Percepción Remota (PR), las técnicas del Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), La Radiolocalización (RL) y mediciones in situ a través de observaciones de estaciones de la Red Regional de Estaciones de Superficie (RRES), soportada esta información sobre las técnicas de la Estadística Multivariada (EM).

El estudio y monitoreo sistemático de las áreas de tormentas y tormentas locales severas es de trascendental importancia por los daños que las mismas causan al hombre y sus bienes. Es de interés señalar que el desarrollo de un solo tornado deja en cuestión de minutos una estela de destrucción y muerte, las aerovalanchas son causantes de muchos desastres aéreos que cobran centenares de vidas, las granizadas causan pérdidas considerables a la agricultura, siendo no menos importantes las inundaciones instantáneas que causan las tormentas locales severas, siendo consideradas como la principal causa de muerte por fenómeno meteorológico algunos países de Latinoamérica y en Cuba. El área del presente de estudio cubre totalmente la isla de Cuba con sus cayos, incluyendo a la isla de la Juventud, el caribe mexicano (Península de Yucatán) y el Sudeste del Golfo de México. Los algoritmos desarrollados fueron implementados para el desarrollo del software *SpotSat* (Sistema de pronóstico de tormentas por Satélite) quien a partir de la imagen primaria del satélite GOES va generando imágenes de las áreas probables de tormentas, tormentas locales severas y los fenómenos de severidad asociados así como de los principales parámetros vinculados a las áreas de nubosidad, realizándose todo de forma cuantitativa.

## INTRODUCCIÓN

El estudio y monitoreo sistemático de las áreas de tormentas y tormentas locales severas es de trascendental importancia, pero para poder comprender este fenómeno en su conjunto es prioritario esclarecer las particularidades de las áreas de nubes con condiciones de severidad, así como las que tienen el potencial para alcanzar dicha condición.

Cabe mencionar que la temperatura del tope de las nubes convectivas está relacionada con su altura y con

la intensidad de las corrientes ascendentes dentro de las celdas de nubes a través de la expresión:

$$W = \left( \frac{\partial T}{\partial Z} \right)^{-1} \frac{dT_{bb}}{dt} \quad (1)$$

Donde la temperatura de brillo  $T_{bb}$  es convertida a velocidad vertical  $W$ , y el gradiente vertical de temperatura  $T$  es obtenido a partir del perfil vertical de temperatura, elaborado en base de mediciones de radiosonda o

de sondeos infrarrojos de satélite a través de la expresión (1) (Adler . R. F. And Fann , D . D. ,1979). De aquí podemos apreciar que la temperatura del tope de las nubes se vincula también a otros parámetros de las mismas como son , la reserva de agua y la cantidad e intensidad de las precipitaciones. (James F . Purdom . W. 1995).

Para este estudio se utilizaron imágenes de IR en la banda de 10.2-11.2 micrones ( IR térmico), para la determinación de la temperatura del tope de las nubes, y para la ubicación geográfica de las áreas de nublados.

Las imágenes obtenidas de los satélites geoestacionarios han posibilitado una amplia comprensión de los procesos de mesoescala y particularmente de la actividad convectiva, ya que entre otras cosas estas imágenes con su alta frecuencia temporal permiten un monitoreo sistemático de las tormentas y especialmente de aquellas con condiciones de severidad (David W. Raynolds, 1980), de igual forma se monitorean aquellas áreas de nublados productoras de lluvia que tienen el potencial para convertirse en áreas de tormenta.

Esto ha permitido determinar muchas de las características de mesoescala de las nubes de tormenta, determinantes en la formación y desarrollo de la actividad convectiva severa, tales como: líneas de convergencia de humedad a bajos niveles, que aparecen como líneas organizadas de convección a lo largo de estas, que comúnmente aparecen antes del desarrollo de las tormentas, otro caso es el margen delantero de la salida del aire frío de las tormentas que aparece como una línea de nubosidad curvada, un tercer fenómeno es la unión ó intercesión de líneas de nubosidad convectiva, otro fenómeno son las líneas curvadas con fronteras como los frentes y líneas secas que identifican la localización de tormentas intensas y el desarrollo potencial de tornados, También las dimensiones del escudo cirroso y su orientación, brindan información sobre la intensidad y localización de las tormentas.

No obstante el potencial de los satélites geoestacionarios se pueden emplear también en el estudio y monitoreo de otras formaciones nubosas productoras de lluvias que no presentan tormentas, o aquellas que tienen el potencial para convertirse en áreas de tormentas.

Otro enfoque del problema que es precisamente el que nos ocupa en este trabajo se fundamenta en el análisis de las imágenes infrarrojas digitales de los satélites geoestacionarios, las que permiten la determinación del ritmo de crecimiento vertical de las nubes convectivas, y el análisis de la estructura térmica de su tope, y su relación con la ocurrencia de tormentas y tormentas locales severas (Mojena E. y Núñez I. 1986).

Uno de los métodos mas usados consiste en extraer directamente de las imágenes del espectro infrarrojo, la temperatura del tope de las nubes y analizar conjuntamente con esta su ritmo de crecimiento. Para este trabajo

nos limitamos a la determinación de la estructura térmica del tope de las nubes no valoramos el ritmo de crecimiento.

## Materiales y Métodos

Para el desarrollo de este trabajo se elaboraron dos ficheros de datos de tormentas y áreas de convección :

**1. Tor.Est.st.** 160 Filas 10 Columnas

**2. Tsevera.Est.** 130 Filas 11 Columnas

Se emplearon en total 290 observaciones de formaciones nubosas, determinándose el tipo de fenómeno asociado, tormenta o tormenta severa, tornado, granizada, aerovalancha, cantidad de lluvia y tiempo de duración obtenida a partir de la RRES, altura del tope de las nubes medida por radar (Fig. 1) y temperatura del tope de las nubes medida a partir de las imágenes IR de los satélites GOES (Fig.2).

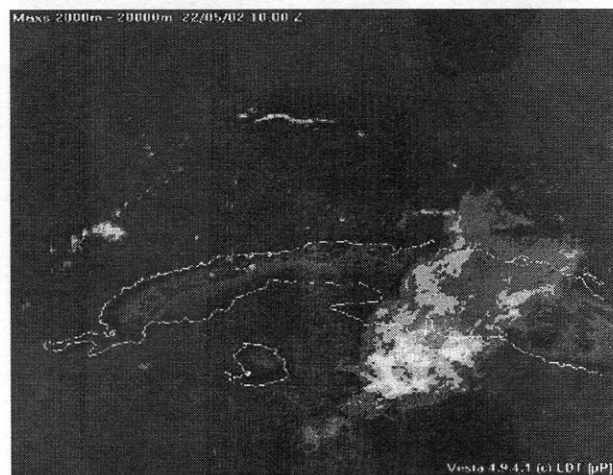


Fig. 1 Imagen digitalizada de radar empleada para La estimación del altura del tope de las nubes.

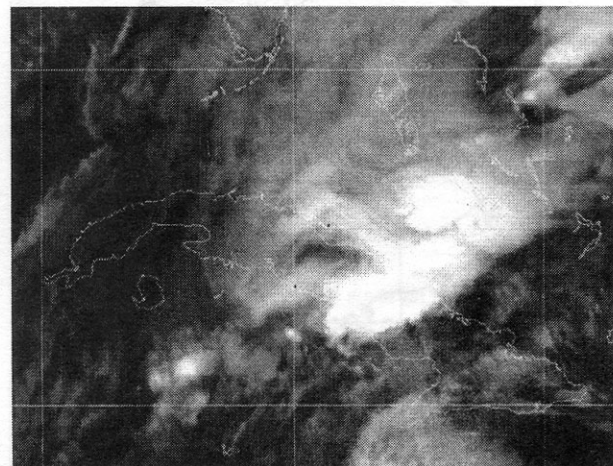


Fig. 2 Imagen IR GOES empleada para la determinación de la temperatura del tope de las nubes.

Se desarrollaron un conjunto de algoritmos que permiten la determinación de parámetros tales como:

- Altura del tope de las nubes.
- Cantidad de lluvia.
- Intensidad de la lluvia.
- Tiempo de duración de la lluvia.

Así como los fenómenos de severidad asociados, sobre el área de estudio, que como se dijo anteriormente cubre la isla de Cuba con sus cayos, la Isla de la Juventud así como el caribe mexicano (Península de Yucatán) y la porción sudeste del Golfo de México. Esta área es totalmente cubierta por las imágenes del GOES -8 (Fig.3) y por la red de Radares de Cuba ( Fig 4 ), no obstante la experiencia en la aplicación del **SpotSat** demuestra que estos resultados pueden ser generalizados a otras áreas del Caribe con características similares.

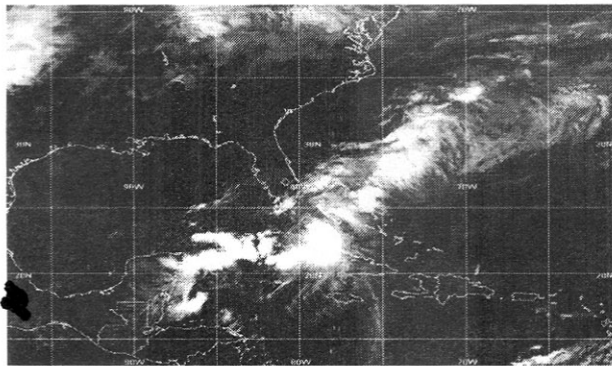


Fig 3 . Imagen. IR GOES-8 2145UTC donde se observa el área de estudio

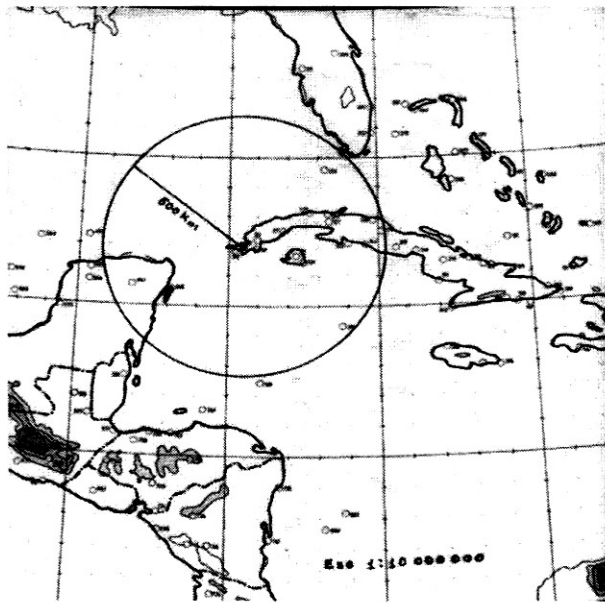


Fig. 4 Muestra la zona de radiovisión del Radar RC32 B de la Bajada Pinar de Río CUBA.

Sobre la base de la georeferenciación de las áreas de actividad convectiva intensa por medio de imágenes de satélite y técnicas de Radiolocalización. Se determinó la temperatura del tope de las nubes de las áreas correspondientes, se hicieron las mediciones de la lluvia caída, su intensidad y el tiempo de duración, las observaciones de la presencia de tormentas y tormentas locales severas y de los fenómenos de severidad asociados. La información fue incorporada a los ficheros **Tor.Est.st** y **Tsevera.Est**.

El empleo de las técnicas de la estadística multivariada, regresión no lineal con punto de ruptura, diagramas de dispersión etc. se realizaron a través del paquete estadístico Statistic, lo que nos permitió establecer el vínculo entre la temperatura del tope de las nubes  $T_n$  y la ocurrencia o no de tormentas y tormentas locales severas, así como el tipo de fenómeno de severidad asociados, y la determinación de los parámetros antes señalados.

### Análisis de las Tormentas Severas

El procesamiento estadístico de la muestra indica la existencia de valores de temperaturas críticas para el desarrollo de las condiciones de severidad en las tormentas. Para estos fines se elaboraron diagramas de dispersión de  $T_n$ ,  $V$ ,  $T_n$  que mostraron que las  $T_n$  se distribuyen de forma tal que la ocurrencia de este evento está relacionado con la temperatura de  $-60^\circ\text{C}$  encontrándose 104 casos con temperatura  $T_n < -60^\circ\text{C}$  determinándose el valor de

$T_n = -60^\circ\text{C}$ ., como la temperatura máxima para la ocurrencia de condiciones de severidad (Fig 4). Se dividió la muestra tomando como temperatura crítica el valor de  $-60^\circ\text{C}$  en diferentes rangos de temperatura, encontrándose que el intervalo  $-60 > T_n \geq -66^\circ\text{C}$  se forman tanto tormentas como tormentas locales severas, y que para los valores de  $T_n < -66^\circ\text{C}$  en todos los casos ocurren condiciones de severidad. Conjuntamente con esto se analizaron las temperaturas umbrales para los distintos fenómenos de tiempo severo, encontrándose que las granizadas se producen con  $T_n \leq$  que  $-66^\circ\text{C}$  y las aerovallanchas y tornados con  $T_n \leq -60^\circ\text{C}$ .

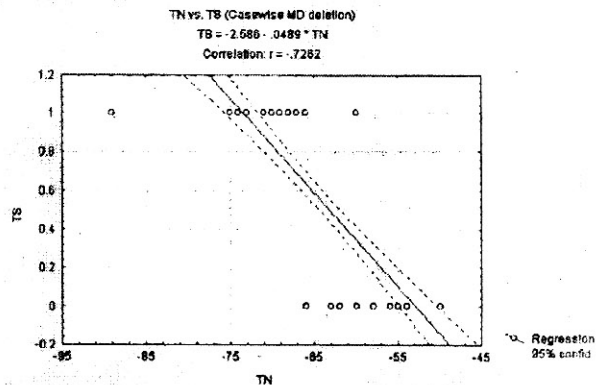


Fig. 4 Muestra el Diagrama de dispersión para las tormentas Locales Severas, donde se observa además que el evento se produce en el rango de temperaturas inferiores a menos 60 grados centígrados, ocurriendo en el intervalo de menos 60 a menos 66 grados, tanto Tormentas como Tormentas locales Severas.

### Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de las Tormentas Locales Severas

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia de las condiciones de severidad para los distintos intervalos de temperatura establecidos anteriormente arrojó los siguientes resultados:  $-60 \leq T_n \leq -66$  la probabilidad de ocurrencia del evento es de 30 % para  $T_n \leq -66$  la probabilidad de ocurrencia es de 85 % y para temperaturas  $T_n < -66$  la probabilidad de ocurrencia de tiempo severo es mayor o igual 90%

### Análisis de las Tormentas

Para el análisis de las tormentas (Tor) se siguió un proceso similar al de las tormentas severas, determinándose la temperatura crítica para la ocurrencia de este evento, observándose que no se producen tormentas con temperaturas  $T_n > -50$  °C, en el diagrama de dispersión de Tor Vs  $T_n$  se aprecia la no ocurrencia de tormentas para temperaturas  $T_n > -50$  °C (Fig 5), determinándose además que el rango de temperatura para la ocurrencia del fenómeno se extiende hasta  $T_n \leq -66$  °C.

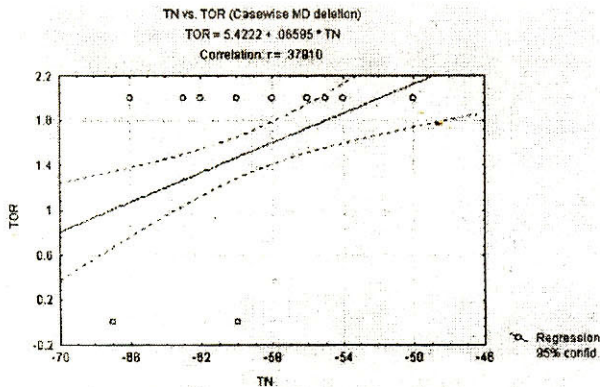


Fig. 5 Muestra el diagrama de dispersión de las Tormentas, donde se aprecia la no ocurrencia del evento para temperaturas mayores a -50 grados centígrados.

Rangos de $T_n$	Prob. De $T_s$ (%)
$-50 \geq T_n \geq -60$ (verde)	-
$-60 \geq T_n \geq -66$ (rojo)	30
$T_n < -66$ (azul)	> 90

3.1 Cálculo de la Altura del tope de las nubes ( Km ) a partir de su temperatura.

Para $T > -40$	$R = 0.88$
	$Es = 0.8 \text{ Km}$

$$Ht = -3.1730 - (0.269445) T_{tn}$$

Para  $T < -40$

$$R = 0.95$$

$$Ht = -9.5705 - (0.4198) T_{tn} \quad Es = 1.1$$

Para la determinación del error de estimación de la altura del tope de las nubes medido por Radar a partir de su temperatura se empleó una muestra independiente de 10 situaciones de áreas de actividad convectiva intensa sobre el área de estudio, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 1, donde se comparan con las especificaciones establecidas por la OMM (Organización Meteorológica Mundial) (WMO 2001) para las aplicaciones a la Meteorología Sinóptica.

Tabla 1. Muestra los errores de estimación Es obtenidos para el calculo de la altura del tope de las nubes, comparados con los rangos establecidos para la Meteorología Sinóptica.

$T_{tn}$	Es.Km	Rango OMM/Km
$T > -40$	0.88	0.5 - 2
$T < -40$	1.1	0.5 - 2

### 3.2 Calculo de la Cantidad de Lluvia ( mm ) a partir de la temperatura del tope de las nubes.

Para $T > -30$	$R = 0.88$	$Bp = 7.41 \text{ Conf. } 95\%$
	$Es = 4 \text{ mm}$	$Bpt = 23 \text{ C}$
	$E_{max} = 10 \text{ mm}$	
1 - $Llu = 1.011257 - (0.032964) T_{tn}$		
2 - $Llu = -8.73036 - (1.18750) T_{tn}$		Para $T < -23$ evaluar la ecuac. 2
$T < -30$ y $T > -40$	$R = 0.93$	$Bp = 9.16 \text{ Conf. } 95\%$
	$Es = 4 \text{ mm}$	$Bpt = 36 \text{ C}$
	$E_{max} = 10 \text{ mm}$	
1 - $Llu = 15.29223 + (0.380583) T$		
2 - $Llu = -176.415 - (5.46139) T_{tn}$		Para $T < -36$ evaluar la ecuac. 2
Para $T < -40$ y $T > -50$	$R = 0.9$	$Bp = 7.02 \text{ mm Conf } 95\%$
	$Es = 4 \text{ mm}$	$Bpt = 42 \text{ C}$
	$E_{max} = 10 \text{ mm}$	
1 - $Llu = 3.525064 + (0.029540) T_{tn}$		
2 - $Llu = 7.359296 - (0.206281) T_{tn}$		Para $T < -42$ evaluar la ecuac. 2
Para $T < -50$	$R = 0.90$	$Bp = 22.31 \text{ mm Conf } 95\%$
	$Es = 4 \text{ mm}$	$Bpt = 52 \text{ C}$
	$E_{max} = 10 \text{ mm}$	
1 - $Llu = -5.83396 - (0.228123) T_{tn}$		
2 - $Llu = 12.55390 - (0.404685) T_{tn}$		Para $T < -53$ evaluar la ecuac. 2

### 3.3 Cálculo de la intensidad de la lluvia en ( mm/min ) a partir de la temperatura del tope de las nubes.

Para $T < -50$	$R = 0.72$	$Bp = 0.18 \text{ mm/min Conf } 95\%$
	$Es = 0.05 \text{ mm/min}$	$Bpt = -36 \text{ C}$
	$E_{max} = 0.23 \text{ mm/min}$	
1 - $I = 0.075655 + (0.000315) T_{tn}$		
2 - $I = 0.687778 + (0.00600) T_{tn}$		Para $T < -36$ evaluar la ecuac. 2

Para T < -50	R = 0.92 Es = 0.01 mm/min Emax = 0.23 mm/min	Bp = 0.22 mm/min Conf 95 % Bpt = .64 C
1 - I = - 0.021630 - ( 0.001142 ) Ttn		
2 - I = 2.691667 + ( 0.0350 ) Ttn		Para T < - 64 evaluar la ecuac. 2

Donde Ttn = T es la temperatura del tope de las nubes.

Para la determinación de los errores de estimación en cuanto a la cantidad e intensidad de la lluvia se utilizó la misma muestra independiente que para la altura del tope de las nubes, obteniéndose los resultados siguientes. Tabla 2 y 3 .

Ttn	Es.mm
T > -30	4
T < -30 Y T > -40	4
T < -40 y T > - 50	4
T < -50	

Tabla 2 Muestra los errores de estimación *Es* obtenidos para el Calculo de la cantidad de lluvia.

Ttn	Es. mm/min	OMM mm/min
T < -50	0.01	0.001-0.01
T > -50	0.05	0.001-0.01

Tabla 3 Muestra los errores de estimación *Es* obtenidos para el Calculo de la intensidad de la lluvia con los rangos establecidos para la Meteorología Sinóptica

En relación con los errores obtenidos con respecto a la cantidad de lluvia Tabla 2 no es posible hacer comparación, pues las especificaciones de la OMM (WMO 2001) para este parámetro están establecidas solamente para la intensidad tabla 3, donde se puede apreciar que para las nubes mas caliente el error obtenido, esta por encima del rango, no así para las nubes frías que es nuestro principal objetivo.

### 3.4 Cálculo del tiempo de duración de la lluvia ( min. ) a partir de la temperatura del tope de las nubes

Para T < - 50	R = 0.86 Es = 5 min. Emax = 25 min	Bp = 74.6 min Conf 95 % Bpt = 38 C
1 - LLi = 21.24868 - ( 0.528861 ) Ttn		
2 - LLi = - 315852 - ( 4.43569 ) Ttn		Para T < - 38 evaluar la ecuac. 2
Para T < - 50	R = 0.93 Es = 4 min. Emx = 30 min.	Bp = 147.5 min Conf 95 % Bpt = - 65 C
1 - LLi = 118.6702 + ( 0.930305 ) Ttn		
2 - LLi = 470.2643 + ( 3.778672 ) Ttn		Para T < - 65 evaluar la ecuac. 2

Donde T = Ttn = Tbb ( Temperatura de brillo )

Los errores de estimación en cuanto al tiempo de duración de la lluvia para la muestra independiente son respectivamente: para T > -50, Es= 5 min. Computándose un error máximo de 25 min., para T < -50 es de 4 min. Con un error máximo de 30 min.

Es de interés señalar que este parámetro no aparece dentro de las especificaciones de la OMM (WMO 2001) para la Meteorología Sinóptica, además consideramos que los resultados obtenidos deben verse con discreción por la existencia de mucha ambigüedad en las mediciones in situ de dicho parámetro.

## CONCLUSIONES

Los algoritmos obtenidos durante el desarrollo de este trabajo permiten determinar las áreas de Tormentas y de Tormentas locales Severas dentro de un conglomerado nuboso, así como el fenómeno de severidad asociado a las mismas. También permiten la estimación de un conjunto de parámetros relevante asociado a estas áreas de convección como son : la altura del tope de las nubes, la cantidad de lluvia caída, la intensidad de la lluvia , y el tiempo de duración parámetro este que debe verse con discreción dada la existencia de muchas ambigüedades en las mediciones.

La precisión de los resultados obtenidos es buena y los errores obtenidos se encuentran dentro de los rangos internacionalmente aceptados. Los algoritmos desarrollados fueron implementados en el Software SpotSat el cual a partir de la imagen primaria IR del Goes determina las áreas de tormentas y tormentas severas y va generando imágenes de cada uno de los parámetros establecidos de forma rápida.

Consideramos que los resultados alcanzados son una contribución al campo de la Meteorología de Predicción al permitir de forma rápida y eficaz el monitoreo de los conglomerados nubosos potencialmente peligroso y las áreas de tormentas desarrolladas, También puede ser de gran utilidad en la caracterización de las áreas de nubes convectivas.

## Bibliografía

Adler . R. F. And Fann , D. D.. ( 1979 ) Thunderstorn Intensity as Determined from Satellite . Data . Journal of Applied Meteorology . Vol. 18. No.4 . Apr. 1979 .

David W. Raynolds, (1980) Observations of Damaging Hailstorms from Geosynchronous Satellite Digital Data . Reprinted from Monthly Weather Review . Vol. 108 .No.3 . March 1980

James F . Purdom . W. ( 1995 ) Advanced Atmospheric Studies Using GOES - 8 . Multichannel Imagery - Regional and Mesoscale Meteorology Branch Office of Research and Applications NOAA / Nesdis . 1995 .

Mojena E. Núñez I. ( 1986 ) Radiación del tope de las nubes y ocurrencia de turbonadas y turbonadas severas . Rev. Orbita , tom . 2 , abril 1986 .

**WMO (2001) Statement of guidance regarding how well satellite and in situ sensor capabilities meet WMO user requirements in several application areas. Technical document WMO/TD No 1050.**

**ABSTRACT**

*Within the frame of the collaboration between Metropolitan Independent University through the Laboratory of Remote Perception and Geographic Information System (SIGPER) of México and the Department of Satellites of the Meteorology Institute of Cuba development the present work. Same it is directed to clarify the particularities of the cloud's areas with condition of severity, or that has the potential to reach this condition, as well as the development of a set algorithms that allows us to determine of quantitative form the associated main parameters to these convection's areas using for it tools like Remote Perception, The Techniques of Digital Processing of Images, The Radiolocation and Measurements in situ through Observations of Stations of The Regional Network of Surface, supported this information on The Techniques of The Multivariate Statistic.*

*The study and systematic monitoring of the areas of storms and severe local storms have transcendental main die the damages that the same ones to the man and their doods.*

*Is interesting to indicate that the development of only one tornado leaves in a few minutes a wake of destruction and death, the aerovallanchas are causes of many aerial disasters that receive hundreds of lives, th hail storms cause considerable losses to agriculture, but isn't less important the flash floods, that are cause for severe local storms sometimes, and the same ones considered like the main cause of death by meteorological phenomena in some countries of latinamerica, Cuba too.*

*The extension area in this study covers to Cuba, their keys, the Island of The Youth, The Mexican Caribbean (The Yucatan Peninsula) and The Southeast of the Gulf of Mexico. The developed algorithms were implemented for the development of the software (SpotSat) that from the primary image of satellite GOES is generating images of the probable storm's areas, local severe storms and the phenomena of severity associate as well as of the main parameters to the areas of cloudiness, being made everything of quantitative form.*

**Palabras Clave:**

Tormenta, Satélite.