

Estudio preliminar de la estructura en tormentas que provocaron tiempo severo, mediante las observaciones del radar de Casablanca

Preliminary study of the structure in storms that caused severe time, by observations of the radar of Casablanca

Jorge Félix Hernández-Capote[✉], Carlos Manuel González-Ramírez

¹ Centro Meteorológico Territorial Artemisa-Mayabeque, Instituto de Meteorología, Cuba

Resumen

En la investigación se realizó un estudio preliminar sobre la estructura de las tormentas que generan tiempo severo en las provincias de Artemisa, Mayabeque y La Habana, utilizando la información del radar meteorológico de Casablanca. Se analizó un total de 64 casos en el período de 2005-2014, donde estuvo presente el granizo, la lluvia intensa, las arovalanchas, los tornados y las trombas. Mediante el uso del software Vesta Proceso, se caracterizó las variables radáricas para cada manifestación de severidad. Con el análisis se obtuvo que el Núcleo de Máxima Reflectividad estuvo entre 51 -62 dBZ, Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad entre 1 -5 Km de altura y la Altura Máxima de la Nube entre 6-11km. También se identificaron las situaciones sinópticas y se relacionaron las distintas variables radáricas analizadas con los diferentes tipos de severidad.

Palabras clave: tiempo severo, radar meteorológico, tormentas, situaciones sinópticas

Abstract

This investigation is a preliminary study about the structure of the storms that cause severe weather in Artemisa, Mayabeque and La Habana provinces, using information from Casablanca's weather radar. They were analyzed a number of 64 study cases from the period 2005-2014 in wich reported hail, heavy rain, downburst, tornadoes and watherspouts. Using Vesta Proceso Software, it was characterized radar variables for each manifestation of severity. As a result, it was obtained the Core of Maximum Reflectivity between 1 and 5 km height and the Maximum of Cloud Height between 6 and 11 km. In addition, they were identified and related the synoptic situations and the analyzed radar variables with the different kinds of severity.

Keywords: severe weather, weather radar, storm, synoptic situations

✉ Autor para correspondencia: Jorge Félix Hernández-Capote. E-mail: jorge.hernandez@insmet.cu

Recibido: 27/1/2017

Aceptado: 14/7/2017

Introducción

Dada la forma estrecha y alargada del archipiélago cubano y su ubicación en la zona tropical, resulta frecuente la afectación de tormentas convectivas, fenómenos observados con reiteración en el periodo lluvioso ([Alfonso, 1994](#)). En algunas situaciones sinópticas que se combinan con las condiciones de la mesoescala, se pueden desarrollar tormentas que alcancen la severidad, produciendo fenómenos como granizos, tornados, trombas marinas y vientos lineales con rachas superiores a los 96 Km/h. Las Tormentas Locales Severas (TLS) fueron definidas en Cuba por [Alfonso \(1986\)](#).

Las TLS en Cuba se ha convertido en un tema de gran relevancia durante los últimos años y constituye una necesidad seguir investigando para incrementar y perfeccionar los conocimientos sobre la temática, para así lograr un efectivo pronóstico a muy corto plazo (conocido como pronóstico inmediato o “Nowcasting”) y para su realización es vital el uso del radar meteorológico.

El área de aplicación de los radares meteorológicos, consiste en brindar una descripción en tiempo real de los fenómenos presentes en la atmósfera ([Sauvageot, 1992](#)). Pero es mediante la realización de observaciones sistemáticas, de las distintas variables radáricas de los objetivos observados que se pueden desarrollar modelos conceptuales que permiten describir la estructura y dinámica de los fenómenos meteorológicos, así como realizar bases climatológicas que ayuden a su mejor estudio y comprensión. Las ventajas que proporciona el uso de los radares meteorológicos están dadas en la alta resolución espacial y temporal de sus datos, además de permitir la observación tridimensional directa del objetivo.

Los radares meteorológicos han constituido una de las herramientas principales en el estudio de las tormentas convectivas ([Sauvageot, 1992](#); [Collier, 1996](#)). [Byers & Braham \(1949\)](#), fueron pioneros en la utilización del radar meteorológicos para

realizar estudios detallados de las tormentas, entre los que se puede mencionar los desarrollados en las inmediaciones de Wilmington y en Orlando (Florida).

Como parte del proyecto GATE (Atlantic Tropical Experiment), [Houze & Cheng \(1977\)](#), caracterizan la convección en la zona tropical en función de las áreas que ocupaban los ecos del radar meteorológico y sus respectivos valores de reflectividad y movimiento, constituyendo una investigación de impacto.

Con el desarrollo y automatización de los radares meteorológicos se desarrollaron nuevas técnicas para el seguimiento de las tormentas, posibilitando el análisis de grandes volúmenes de información, dentro de estos sistemas se pueden mencionar, el TITAN ([Dixon & Wiener, 1993](#)) y SCIT ([Johnson et al., 1998](#)), en los Estados Unidos; TRACE3D ([Handwerker, 2002](#)), en Alemania.

Otro grupo de científicos se dedicaron a aplicar estos sistemas, llegando a conclusiones acerca del ciclo diurno, tiempo de vida y la intensidad de las tormentas convectivas entre los que se destaca, [Handwerker \(2000\)](#), [Terblanche et al., \(2000\)](#), [Li & Lai \(2004b\)](#), [Novak & Kyznarova \(2005\)](#), y [Hering et al., \(2007\)](#).

En Cuba desde el año 2005, concluye la tercera etapa de modernización de la red de radares y esto trajo consigo un mayor número de observaciones de los radares meteorológicos ([Rodríguez et al., 2005](#)). En el caso de los estudios desarrollados sobre las tormentas convectivas se han efectuado utilizando el radar meteorológico ubicado en la provincia Camagüey.

[Núñez et al. \(1999\)](#), ha sido de los pocos en desarrollar un estudio consecuente empleando datos de radar cada tres horas de los radares de Camagüey y Casablanca durante el periodo 1990-1995, con el objetivo de obtener las distribuciones estacional y diaria de la nubosidad así como sus propiedades.

Otras investigaciones desarrolladas por [Valdés et al., \(1978\)](#), [Córdoba et al., \(1986\)](#), y [Córdoba \(1992\)](#), utilizaron la información de los radares meteorológicos para estudiar las propiedades de las tormentas convectivas.

Resultan de interés las investigaciones desarrolladas por [Martínez et al. \(1990, 1995\)](#), [Martínez \(1995\)](#), y [Pérez et al. \(1994\)](#), los que estudiaron características de la microestructura y la turbulencia dentro de las nubes convectivas. Mientras que [Batista et al. \(1989a, b\)](#), realizaron los estudios de recursos nubosos para el incremento artificial de la lluvia a partir de datos de radar en la zona centro-oriental de Cuba.

Po otra parte [Novo \(2003\)](#), y [Novo et al. \(2004\)](#), estudiaron utilizando los observaciones del radar radar meteorológico de Camagüey, la evolución de las principales características de diferentes tipos de tormentas convectivas ocurridas durante dos días de Julio del 2001 y con la presencia de reportes de tiempo severo. También se utilizaron la información de los sondeos cercanos y el análisis de la divergencia en superficie. Esto les permitió asociar cada sistema a alguno de los modelos conceptuales existentes, resaltando los principales momentos de su evolución.

En el caso del radar Casablanca, es uno de los que en el país tributa una gran cantidad de datos. En la actualidad realiza una observación volumétrica completa cada 1 h siempre que no existan ecos convectivos en la zona de vigilancia y cada 15 min cuando aparecen los primeros ecos.

En el presente trabajo se analizan 64 tormentas que generaron tiempo severo en las provincias de Artemisa, Mayabeque y la Habana, en un periodo de nueve años, de ahí que el objetivo general es: Describir la estructura interna de las tormentas que generaron tiempo severo, en las provincias de

Artemisa, Mayabeque y la Habana durante el periodo 2005-2014, utilizando las observaciones del radar meteorológico de Casablanca; y como objetivos específicos se plantea:

1. Describir el comportamiento del Núcleo de Máxima Reflectividad (Zmax), Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad (HZmax) y la Altura Máxima de la Nube (TM).
2. Relacionar las distintas variables radáricas con la ocurrencia de los diferentes tipos de severidad.
3. Identificar las situaciones sinópticas que favorecieron la ocurrencia de los diferentes tipos de severidad.

Materiales y Métodos

A continuación se presentan los diferentes materiales empleadas y la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, así como una caracterización del área de estudio y las fuentes de información y extracción de los datos.

Radar meteorológico de Casablanca

Se utilizaron las observaciones del radar meteorológico de Casablanca localizado en 23.15 grados de latitud norte y los 82.35 grados de longitud oeste, a una altura de 50 m sobre el nivel del mar ([Tabla 1](#)).

Para la selección del área de estudio, se consideró el espacio que abarcan las provincias de Artemisa, Mayabeque y la Habana [figura 1](#), valorando además que se encuentran dentro de los 150 km de distancia, considerada como óptima para los análisis de las diferentes variables radaricas.

Características de los datos utilizados

La exploración del radar meteorológico de Casablanca está diseñada para realizar 16 exploraciones planas (PPI) desde 0.5° hasta

Tabla 1. Características del radar meteorológico de Casablanca

Nombre	Tipo	Potencia	Λ	Ancho del Haz	Alcance Máximo	Alcance efectivo
Casablanca	MRL-5	850 Kw	10 cm	1.5	450 km	Hasta 150 km

21.2° en la vertical, cada exploración plana consiste en 256 exploraciones radiales cada 1.4° en azimut, hasta 450 km en distancia desde la posición del radar, y cada una contiene 1 500 celdas de 300 m. Sin embargo, el área de estudio se limitó a 120 km de radio, centrado en cada uno de estos (Figura 1), que es lo suficientemente grande como para abarcar las provincias de Artemisa, Habana y Mayabeque.

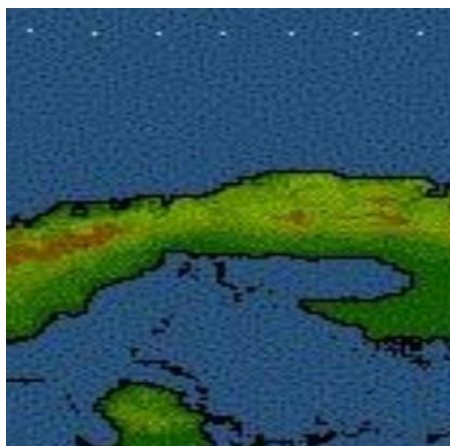


Figura 1. Área de observación del radar Casablanca, utilizada en el trabajo

Los datos corresponden a observaciones horarias y cada 15 minutos, realizadas durante 2006-2014, procesándose un total de 501 observaciones del radar (Tabla 2).

Procesamiento de la información

Se empleó el software Vesta Distribuidor versión 5.3.18.0 (Pozas, 2010). El software permitió convertir la información de radar, pre-procesada inicialmente y guardada en formato obs. , a los distintos productos que se resumen en la tabla 3. Cada producto posee la información de todos los ecos desarrollados dentro del área de estudio.

Se debe tener en cuenta que debido a la escala pequeña en que ocurren las TLS y el insuficiente número de estaciones meteorológicas existentes en la región, puede que hayan ocurrido fenómenos de tiempo severo en una localidad y sin embargo no se reportaran, de ahí la limitante en cuanto a la cantidad de datos utilizados.

Tabla 2. Cantidad de observaciones del radar de Casablanca analizadas

TIEMPO SEVERO	AÑOS						TOTAL
	2005	2006	2007	2012	2013	2014	
Granizos	0	9	2	55	24	90	180
Lluvia intensa	16	4	0	0	259	12	291
Tornados	0	0	0	0	11	0	11
Trombas	0	0	0	4	8	0	12
Aerovalanchas	0	0	0	6	1	0	7
TOTAL	16	13	2	65	303	102	501

Tabla 3. Productos de radar analizados en el trabajo

Nombre	Simbología	Definición	Unidad de Medidas
Reflectividad Máxima	Zmax	Reflectividad máxima en la columna entre 1500 y 20000 m	dBZ
Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad	HZmax	Altura a la que se alcanza Zmax	Km
Altura del Tope de la Nube	TM	Altura máxima alcanzada por una reflectividad de 10 dBZ	Km
Contenido de agua líquida verticalmente integrada	VIL		KG/M ²

Los estudios de casos fueron seleccionados de la Cronología de Fenómenos Severos, que forma parte del proyecto de Tormentas Locales Severas del Instituto de Meteorología. En un inicio se analizarían 180 casos de tiempo severo, pero la falta de información del radar meteorológico para días específicos, condujo a que se redujera a un total de 64 casos, donde estuvo presente la caída de granizos, lluvia intensas, arovalanchas y tornados.

Para extraer los reportes de lluvias intensas se utilizó la información de las estaciones meteorológicas, que pertenecen a la red del Instituto de Meteorología, además se consideró lluvia intensa cuando precipitan:

- 100 mm o más, en 24 horas
- 50mm en 12 horas
- 25mm en una hora

Para el análisis de los sistemas sinópticos se definieron las coordenadas 10° N-40° N y 60° W-110° W ([Figura 2](#)). El área es lo suficientemente amplia para observar con detalles todos los sistemas sinópticos que estuvieron presentes en la formación de las TLS y la lluvia intensa, en la región occidental,

considerando cinco niveles de la tropósfera (1000, 850, 700, 500, y 200 hPa) que constituyen los niveles básicos en el horario de las 12:00 UTC.

Método estadístico empleado

Para encontrar la correlación entre las distintas variables radáricas con los diferentes tipos de severidad, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple que permite estimar los coeficientes de la ecuación lineal, con una o más variables independientes, que mejor prediga el valor de la variable dependiente. La ventaja de este método es que en caso de que falte una de las variables se pueden determinar por la ecuación lineal y muestra la correlación entre las diferentes variables.

Para encontrar los parámetros se utiliza la técnica de ajuste por mínimos cuadrados empleando n datos muestrales. El método de ajuste para el caso multilineal es una generalización del caso lineal.

En la investigación se determinó como variable independiente el TM (Altura Máxima de la Nube) y las dos variables dependientes

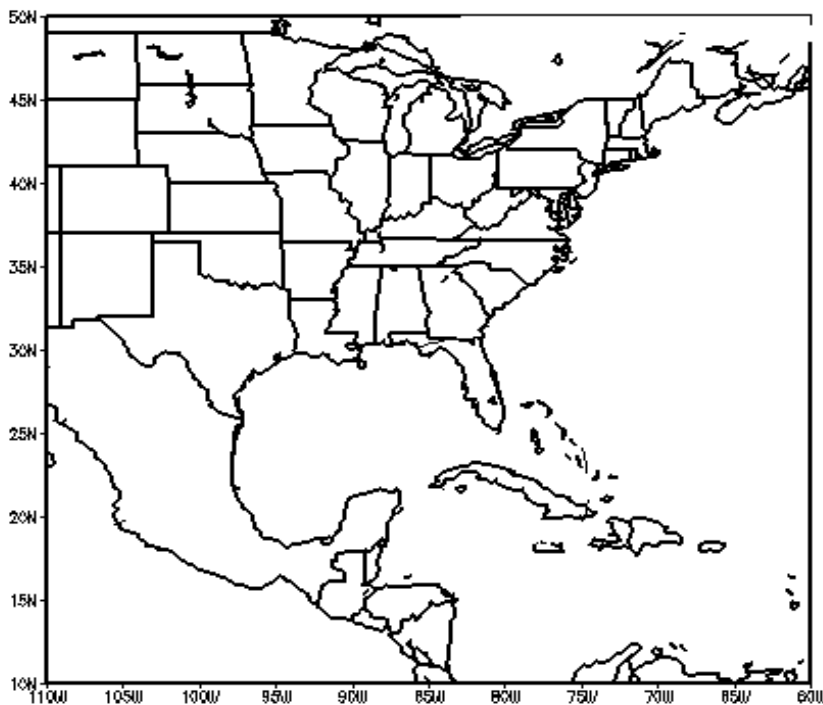


Figura 2. Área de escala sinóptica utilizada

fueron Z_{max} (Núcleo de Máxima reflectividad) y HZ_{max} (Altura del núcleo de Máxima Reflectividad).

Aerovalanchas:

Los coeficientes de la ecuación de regresión son $b_1=-0.659$, $b_2=-0.052$ y $a=16.568$

La ecuación de regresión múltiple queda $y=16.568+-0.659X_1+-0.052X_2$, donde $y= TM$, $X_1=Z_{max}$ y $X_2= HZ_{max}$

Granizos:

Los coeficientes de la ecuación de regresión son $b_1=0.925$, $b_2=-0.207$ y $a=18.343$

La ecuación de regresión múltiple queda $y=18.343+0.925X_1+-0.207X_2$, donde $y= TM$, $X_1=Z_{max}$ y $X_2= HZ_{max}$

Lluvia intensa:

Los coeficientes de la ecuación de regresión son: $b_1=1.619$, $b_2=0.042$ y $a=-0.999$

La ecuación de regresión múltiple queda: $y=-0.999+1.619X_1+0.042X_2$, donde $y= TM$, $X_1=Z_{max}$ y $X_2= HZ_{max}$

Tornados:

Los coeficientes de la ecuación de regresión son: $b_1=2.102$, $b_2=0.096$ y $a=-6.447$

La ecuación de regresión múltiple queda: $y=-6.447+2.102X_1+0.096X_2$, donde $y= TM$, $X_1=Z_{max}$ y $X_2= HZ_{max}$

Trombas:

Los coeficientes de la ecuación de regresión son: $b_1=1.192$, $b_2=-0.017$ y $a=8.003$

La ecuación de regresión múltiple queda: $y=8.003+1.192X_1+-0.017X_2$, donde $y= TM$, $X_1=Z_{max}$ y $X_2= HZ_{max}$

En la investigación se determinó como variable independiente al TM (Altura Máxima de la Nube) y las dos variables dependientes fueron Z_{max} (Núcleo de Máxima Reflectividad) y HZ_{max} (Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad).

Resultados y Discusión

Como se explicó anteriormente no todos los casos de tiempo severo reportados en el área de estudio pudieron ser analizados, debido a la falta de observaciones del radar meteorológico de Casablanca. En la [figura 3](#), se muestra la distribución por provincia de los casos de tiempo severo con los que se contó para el desarrollo del trabajo. La mayor cantidad de reportes se encuentra en la provincia Habana con 28, seguido por Artemisa con 22, mientras que la provincia de Mayabeque tiene 14, para un total de 64 casos.

Análisis del Núcleo de Máxima Reflectividad, Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad y la Altura Máxima de la Nube

Breve descripción de los casos en los que se reportó granizos

En la investigación se analizaron 37 casos

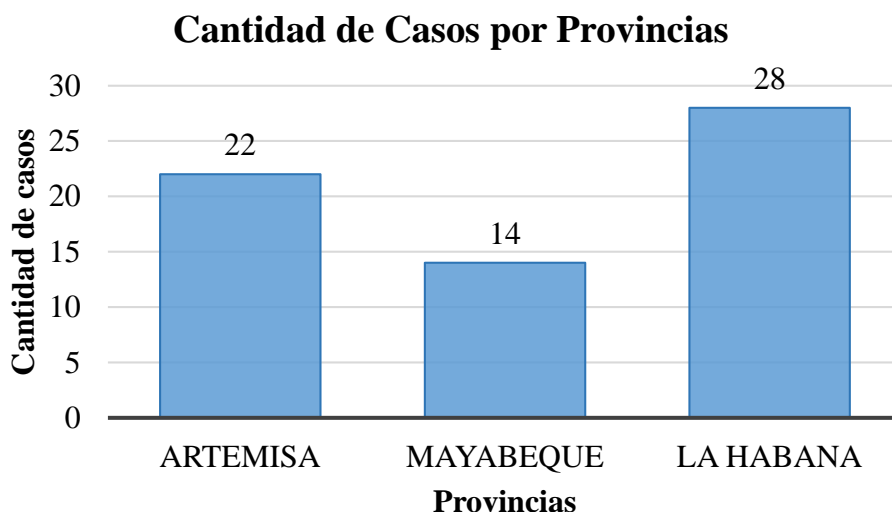


Figura 3. Distribución de los casos estudiados en las provincias de Artemisa, Mayabeque y La Habana en el período (2005-2014)

donde se reportaron granizos. Los valores de las variables radáricas se muestran en la [tabla 4](#), los casos se dividieron por los dos periodos climáticos, el Poco Lluvioso (PPLL) que en el archipiélago cubano se extiende desde abril hasta el mes de noviembre y el Lluvioso (PLL) que se extiende desde mayo a octubre ([Lecha et al., 1994](#)).

En PPLL, el valor medio del Zmax fue de 59.4 dBZ, mientras que HZmax tuvo como promedio 5.1 km y TM alcanzó aproximadamente los 10.5 km de altura. Estos valores alcanzan su máximo en el PLL, lo que pudiera estar relacionado con el fuerte calentamiento del día que se produce en esta época del año y el intenso desarrollo vertical que genera las nubes de tormentas.

Para el PLL, ([Tabla 4](#)) se observó que el núcleo de la tormenta estuvo cerca de los 58.4

dBZ, el valor más común es 52 dBZ, la altura de ese núcleo es de 6.1 km y el tope de la nube alcanza los 12km de altura, mientras que se reitera en varias ocasiones el valor de 13.6 km. Estos resultados coinciden con los obtenidos por [Puentes \(2010\)](#), el cual señaló que las tormentas que sobrepasaran este umbral eran más frecuentes en zonas terrestres que en zonas marinas, estas últimas no fueron analizadas en el trabajo.

Para analizar el ciclo de vida en las tormentas que generaron granizos se escogieron 10 casos de estudio, teniendo en cuenta la secuencia de observaciones del radar meteorológico de Casablanca y un plazo de tiempo de 30 minutos.

En la [figura 4](#), se muestran los valores de la Zmax superiores a los 44 dBZ en todos los casos, con el valor que más se repite de 57 dBZ

Tabla 4. Descripción de los casos de granizos por periodos

Variables radáricas	Periodo poco lluvioso		
	Media	Moda	Desviación Estándar
Zmax (dBZ)	59.4	58.0	6.1
HZmax (Km)	5.1	4.6	1.2
TM (Km)	10.5	10.4	1.7
Variables radáricas	Periodo lluvioso		
	Media	Moda	Desviación Estándar
Zmax (dBZ)	58.4	52.0	6.0
HZmax (Km)	6.1	3.8	2.3
TM (Km)	12.0	13.6	4.0

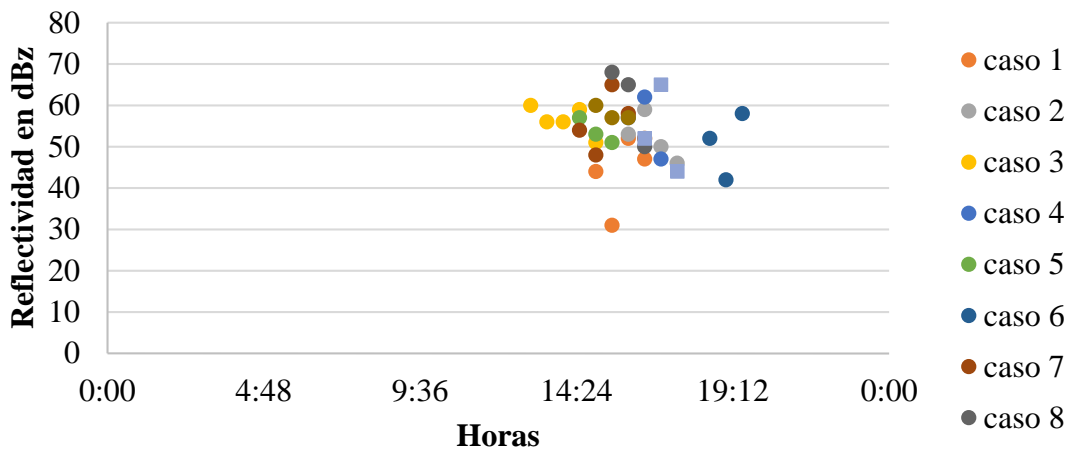


Figura 4. Comportamiento horario del Núcleo de Máxima Reflectividad (dBZ)

y un valor máximo de 68 dBZ. Los horarios de mayor desarrollo de tormentas se presentaron desde las 14:30 y 17:30 hora local.

La HZmax (Figura 5), es mayor a 1 km durante todo el ciclo de vida de las tormentas alcanzando valores de 13.8 km. Los horarios de mayor desarrollo coinciden con los obtenidos para la Zmax y estuvieron entre las 15:00 y 17:00 hora local.

El TM representado en la figura 6, muestra como los mayores valores estuvieron superiores a los 6 km para todos los casos analizados, alcanzando valores aislados de 19.8km y los valores más elevados coinciden con los obtenidos para la HZMax. En cuanto a la hora fueron similares entre las 15:00 y 17:00 hora local.

A pesar de la variabilidad presente debido a los periodos estacionales, se puede decir que los casos estudiados mostraron una similitud en cuanto a las variables radaricas analizadas, tanto en valores, como en los horarios en las que fueron observadas atendiendo a la disponibilidad de observaciones del radar meteorológico.

Breve descripción de los casos en los que se reportó aérovalanchas

Se analizaron cuatro casos: dos en Artemisa, uno en Mayabeque y uno en la Habana; dos reportados en junio y el resto en julio y en agosto.

Los mayores valores de Zmáx (Figura 7), se produjeron entre las 14:00 y las 16:00 hora

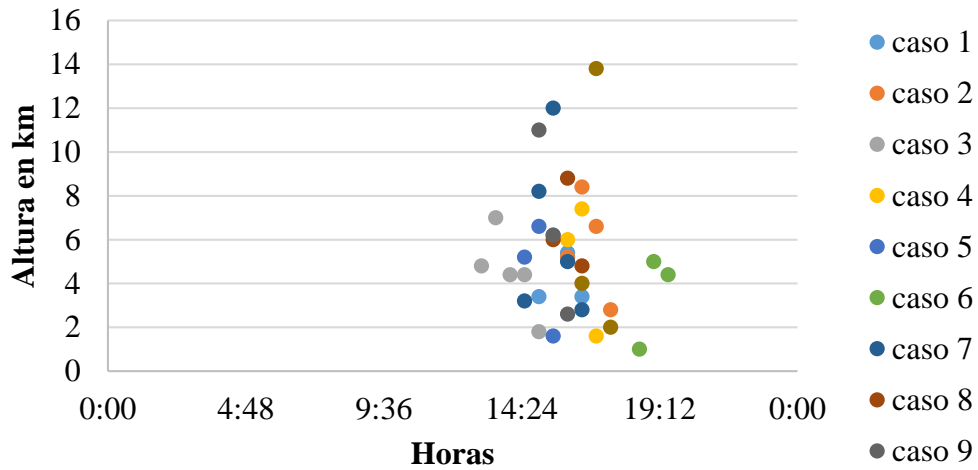


Figura 5. Comportamiento horario de la Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad (km)

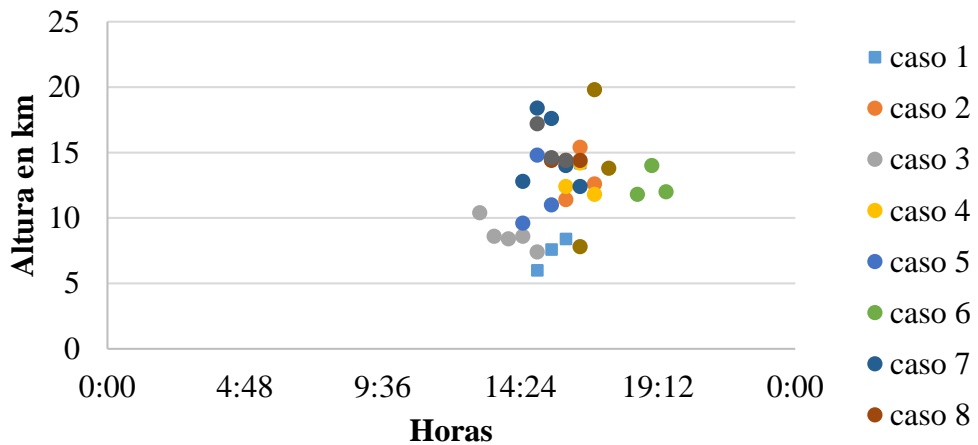


Figura 6. Comportamiento horario de la Altura Máxima de la Nube (Km)

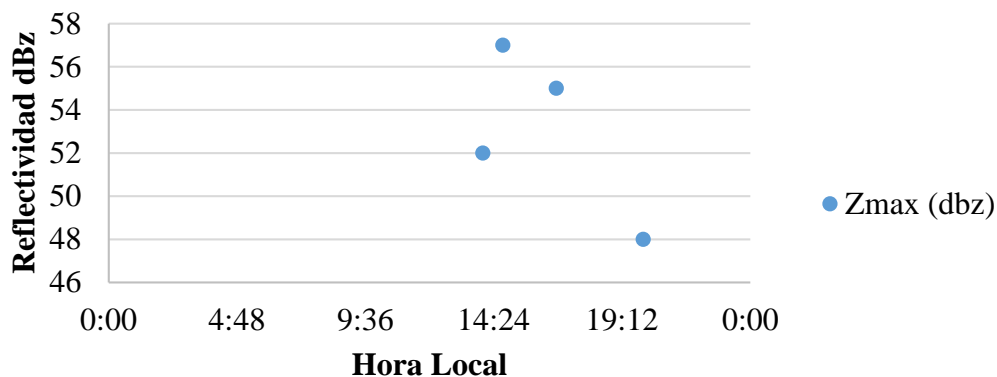


Figura 7. Comportamiento de la Zmax por horario

local, alcanzándose un máximo de 57 dBZ a las 14:45 hora local. Dicho comportamiento, está relacionada con las horas de máximo calentamiento diurno y como consecuencia mayor actividad convectiva. Hubo un caso que se produjo a las 18:00 hora local, con un máximo de reflectividad que no superó los 48 dBZ.

Para el caso de la TM (Figura 8), se observaron los mayores valores pasada las 14:00 hora local y estuvieron entre los 11 y 12 km, relacionadas con el comportamiento de la convección. De manera similar se comportó el núcleo de máxima reflectividad, en este caso las mayores altura se correspondieron con las tormentas que presentaron mayor desarrollo en la vertical, localizándose núcleo por encima de los 4 km de altura, a las 14:45 hora local.

El ciclo de vida de las tormentas que generaron aereoalanchas no pudo ser analizado, teniendo en cuenta que no hubo disponibilidad de observaciones del radar meteorológico de Casablanca para los casos analizados.

Breve descripción de los casos en los que se reportó tornados y trombas marinas

Se analizaron cinco casos de tornados y tres de trombas marinas: cuatro en Artemisa, tres en Mayabeque y uno en la Habana. Los reportes se corresponden al trimestre junio, julio y agosto.

La figura 9, muestra el comportamiento que tuvo la Zmax, en este caso se observó gran variación con valores que oscilaron entre los 55 y 64 dBZ, con un máximo de 64 dBZ a las 14:45 hora local. En cuanto al horario, coincide con

los observados con anterioridad, concentrándose entre las 14:45 y 17:30 hora local.

El comportamiento del TM (Figura 10), mostró valores entre 10 y 14 km de altura, no obstante se observaron valores relativamente bajos entre los 4 y 6 km, cuando se analizaron los mismos estaban relacionados con la presencia de trombas marinas. En este caso, el fenómeno se puede desarrollar en nubes de poco desarrollo en la vertical, como es el caso de cúmulos congestus.

En el caso de la HZmax su comportamiento respondió al de TM (a mayor TM, mayor HZmax). Los valores se concentraron entre los 3 y 6 km de altura, observándose valores inferiores que estuvieron relacionados con los casos de trombas marinas. Las horas de mayor actividad fue entre las 14:45 y las 18:00 hora local con un máximo de actividad a las 14:45 y las 16:45 hora local (Novo et al., 2014).

El ciclo de vida de las tormentas que generaron tornados no pudo ser analizado teniendo en cuenta que las observaciones del radar meteorológico de Casablanca son limitadas.

Breve descripción de los casos en los que se reportó lluvia intensa

Para los casos de lluvia intensa se dividieron los casos para el PPLL (Tabla 5). La Zmax estuvo cercana a los 35.2 dBZ, valores similares fueron encontrados por Gamboa (2004). En cuanto a la HZmax estuvo cerca de los 0.9 km y el TM alcanzó aproximadamente los 1.9 km.

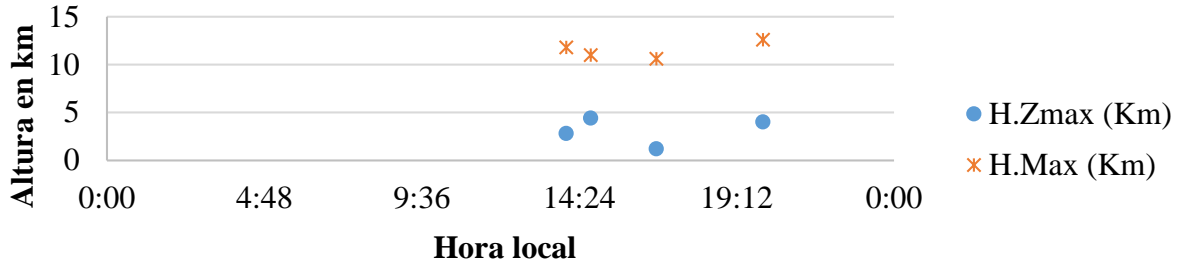


Figura 8. Comportamiento del TM y Hzmax por horario

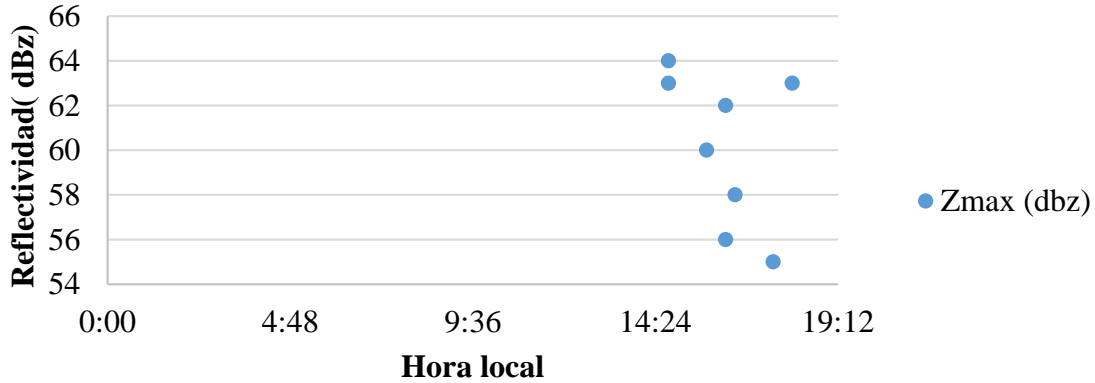


Figura 9. Comportamiento de la Zmax por horario para los casos analizados

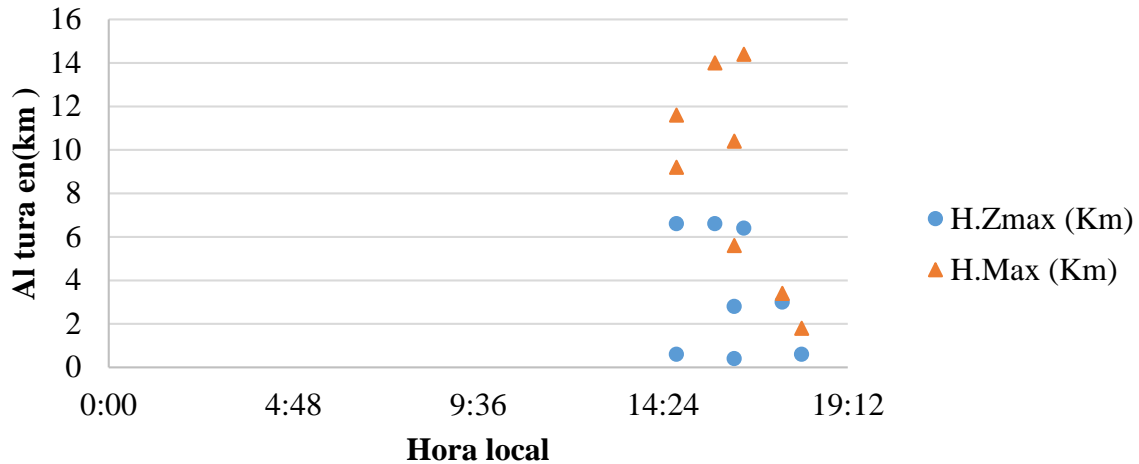


Figura 10. Comportamiento del TM y Hzmax por horario para los casos analizados

Tabla 5. Descripción de los valores observados para el periodo poco lluvioso

Variables radáricas	Periodo poco lluvioso		
	Media	Moda	Desviación Estándar
Zmax (dBZ)	35.2	33.0	7.3
HZmax (Km)	0.9	0.2	0.8
TM (Km)	1.9	1.2	1.6

En el PLL ([Figuras 11 y 12](#)), los valores de Z_{max} fueron de 57 dBZ y el valor más común fue 63 dBZ, en cuanto a la HZ_{max} y TM solo supera 1.0 y 5 km de altura respectivamente y el valor que más se repite es 0.2 km en la primera y 3 km en la segunda.

El ciclo de vida de las tormentas que generaron lluvia intensa durante el período lluvioso no pudo ser analizado teniendo en cuenta que las observaciones del radar meteorológico son limitadas. No obstante se muestra el corte vertical y el valor de VIL, realizado a las tormentas que produjeron lluvias fuertes el 22 de junio del 2005, en la Habana a las 21:17 UTC, momento en lo que se produjeron los reportes.

En la [figura 13a](#), se muestra el corte vertical de la reflectividad donde se aprecia el núcleo de máxima reflectividad con un valor de 55 dBZ y próximo a la superficie. En el caso del VIL [figura 13b](#), se observó valores superiores a los 20 kg/m², lo que eviendia la eficiencia que tuvo la preipitación. Características similares se observó para el resto de las tormentas analizadas

Relación de las variables radáricas con los distintos tipos de severidad

En la [tabla 6](#), se muestran los valores de las variables radaricas estudiadas y la manifestación de severidad. Se puede apreciar que los sistemas que poseen una mayor Z_{max} son los tornados, las trombas y los granizos, este último en los dos períodos con valores que están entre los 49.0 y 66.0 dBZ. Para los casos de la lluvia intensa en el PPLL, se manifiestan los valores más bajo que oscilan desde 24.8 hasta 38.4 dBZ, comportamiento que obedece a la influencia de los frentes fríos con un predominio de nubes estratificadas y poco desarrollo vertical, sin embargo son más eficientes a la precipitación. En el PLL, los valores del TM son más intensos alcanzan los 49 y 59 dBZ.

En cuanto a la HZ_{max} se puede observar que el máximo absoluto se manifiesta en los

granizos, severidad que durante el PPLL ronda desde los 3.2km hasta los 5.9 km y durante el PLL puede alcanzar los 13.8 km de altura, hecho que está relacionado con la formación del granizo y el valor mínimo se reporta en la lluvia intensa del PPLL donde rondan los 0.4 km hasta los 2.4 km de altura y durante el PLL puede llegar hasta los 5.3 km, resultado que está en concordancia con la eficiencia de la lluvia intensa.

El TM presenta el máximo absoluto en las granizos que pueden alcanzar durante el PLL los 19.8km, sin embargo las arovalanchas, son la severidad que tienen un mayor altura máxima de la nube ya que estas superan los 10.6 km de altura y el mínimo está en la lluvia intensa del PPLL donde ronda desde los 0.7 km hasta 5.0 km de altura.

Para comprobar la efectividad de estos valores se aplicó la regresión múltiple lineal para los diferentes tipos de severidad ([Tabla 7](#)), los mismos arrojaron valores por encima de 0.5, lo que demuestra la alta correlación que existe entre las variables radaricas utilizadas en la investigación y el tipo de severidad que se genera en los diferentes casos. Este resultado es de suma importancia, ya que puede ser utilizado para un pronóstico a muy corto plazo ayudado con la información del radar meteorológico de Casablanca.

Análisis de las situaciones sinópticas que favorecieron la ocurrencia del tiempo severo

En la [tabla 8](#), se exponen los sistemas sinópticos que favorecieron la ocurrencia de los diferentes tipos de severidad, siendo la Vaguada de Niveles Medios y Altos y las Bajas Frías Superiores las situaciones que más favorecen el tiempo severo en los casos de estudio con 22 y 13 casos respectivamente, además de ser las que más favorecen la ocurrencia de tormentas acompañadas por granizos con 12 y 11 casos respectivamente. Vale destacar que estos resultados son coherentes y se ajustan a los encontrados por [Aguilar et al. \(2005\)](#).

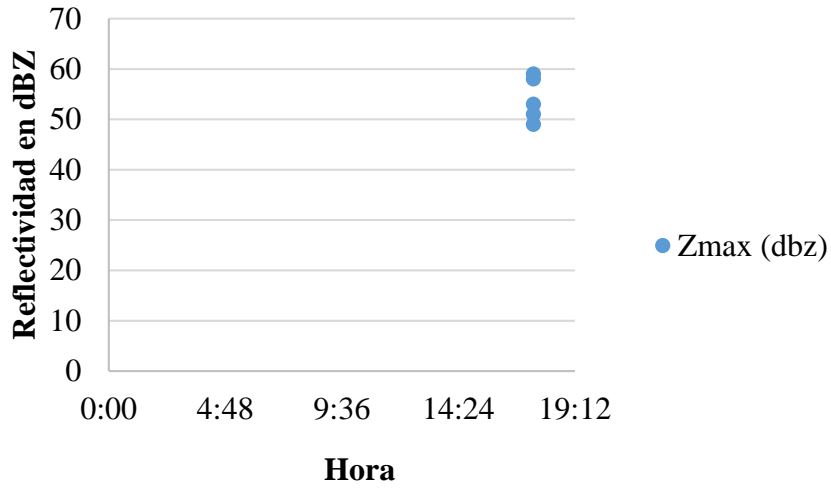


Figura 11. Comportamiento de la Zmax por horario para los casos analizados

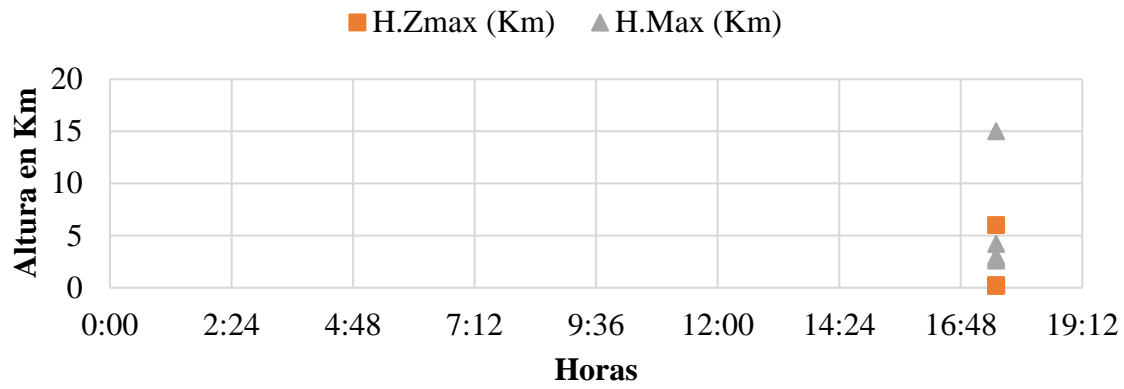


Figura 12. Comportamiento del TM y Hzmax por horario para los casos analizados

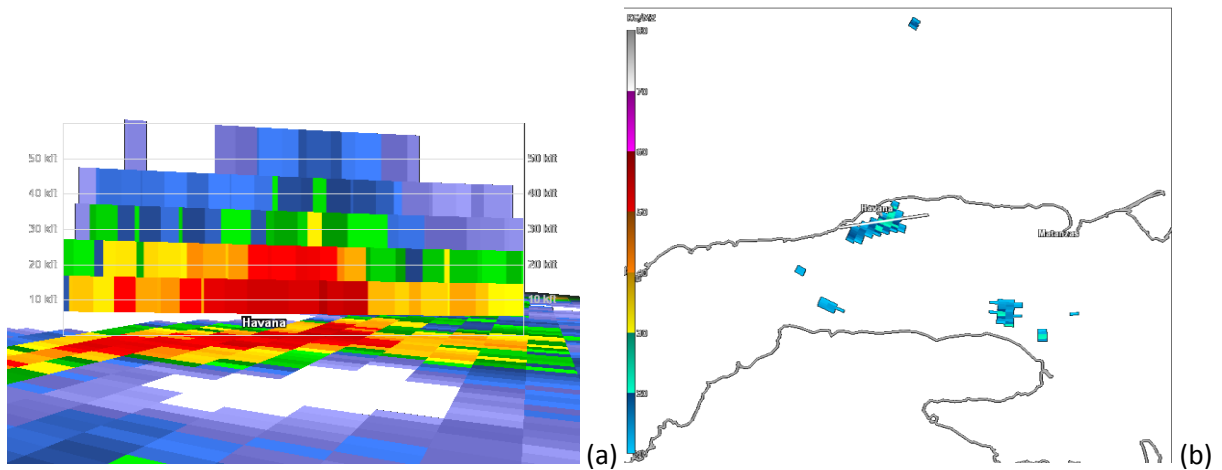


Figura 13. Corte vertical (a) y VIL (b) del 22 de junio del 2005 a las 21:17 UTC

Tabla 6. Relación de las distintas variables radáricas con los diferentes tipos de severidad

Zmax (dBZ)	HZmax (Km)	TM (Km)	Severidad
46.0 – 57.0	1.5 – 4.8	10.6 – 12.6	Aerovalanchas
56.0 – 66.5	0.4 – 4.0	7.0 – 11.8	Trombas
55.0 – 66.0	0.8 – 6.6	1.8 – 14.4	Tornados
Período Poco Lluvioso (PPLL)			
54.0 – 65.3	3.2 – 5.9	9.5 – 11.4	Granizo
24.8 – 38.4	0.4 – 2.4	0.7 – 5.0	Lluvia intensa
Período Lluvioso (PLL)			
49.0 – 66.0	3.2 – 13.8	3.4 – 19.8	Granizo
49.0 – 59.0	0.2 – 5.3	2.5 – 13.6	Lluvia intensa

Tabla 7. Regresión lineal múltiple para los diferentes tipos de severidad

Tipo de severidad	Regresión lineal múltiple
Aeroavalancha	0.5
Granizo	0.6
Lluvia intensa	0.7
Tornado	0.9
Trombas	0.6

Tabla 8. Sistemas sinópticos que favorecieron la ocurrencia del tiempo severo

Sistemas Sinópticos	Tipo de severidad				
	Granizos	Lluvia intensa	Tornados	Trombas	Aerovalanchas
Influencia Anticiclónica (IA)	8	0	2	0	0
Vaguada de Niveles Medios y Altos (VNM)	12	4	2	2	2
Bajas Frías Superiores (BF)	11	0	0	0	2
Ondas Tropicales (OT)	5	1	1	0	0
Onda Corta (OC)	1	0	0	0	0
Frentes Casi estacionarios (FCE)	0	6	0	0	0
Frente Frío-Onda Corta (FF-OC)	0	3	0	0	0
Frente Frío (FF)	0	1	0	0	0
Golfianas (G)	0	0	0	1	0

Estudio de caso correspondiente al 5 de mayo del 2015

Como un estudio de caso se escogió la TLS que se generó el día 5 de mayo del 2015 en la estación meteorológica de Bainoa en la provincia de Mayabeque, donde se reportó granizo entre la 13:30 y las 14:10 (hora local), en la [figura 14](#) se muestra el gráfico de la precipitación registrada por la estación automática, donde se acumuló 20.6 mm durante la tormenta. El análisis a escala sinóptica de esta severidad, permitió conocer que fue estimulada por la presencia de una vaguada en niveles medios.

En la [figura 15](#), se muestra el corte vertical de la tormenta cada 15 minutos, donde se puede observar como la tormenta comienza a desarrollarse a partir de las 14:05 (hora local) y reporta los valores más elevados de las tres variables a las 14:45 (hora local), alcanzando 63dBZ del Núcleo de Máxima Reflectividad (Zmax), mientras que la Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad (HZmax) y la Altura Máxima de la Nube (TM) rondan los 8.6 y 18.2 km de altura respectivamente. El análisis estadístico de este caso arrojó una media para la

Zmax de 57dBZ, 6.5km para la HZmax y 12.3 km para el TM. Vale destacar que estos valores se corresponden a los encontrados en esta investigación para la ocurrencia de granizos, además si se analiza teniendo en cuenta el sistema sinóptico que lo generó, se observa que los valores presentan concordancia con los umbrales encontrados para esta situación.

Estudio de caso correspondiente al 6 de mayo del 2015

Como un estudio de caso se escogió la TLS que se generó el día 6 de mayo del 2015 en la estación meteorológica de Santiago de las Vegas en la provincia de La Habana, donde se reportó granizo y lluvia intensa entre la 13:30 y las 15:40 (hora local), en la [figura 16](#) se muestra el gráfico de la precipitación de la estación, que acumuló 136.6mm durante la tormenta y hubo un máximo de 31.0 mm entre las 14:30 y 14:45 (hora local). El análisis a escala sinóptica de esta severidad, permitió conocer que fue estimulada por la presencia de una vaguada en niveles medios.

Teniendo en cuenta que en este caso se reportaron dos severidad de forma unisona se realiza un análisis teniendo en cuenta dos

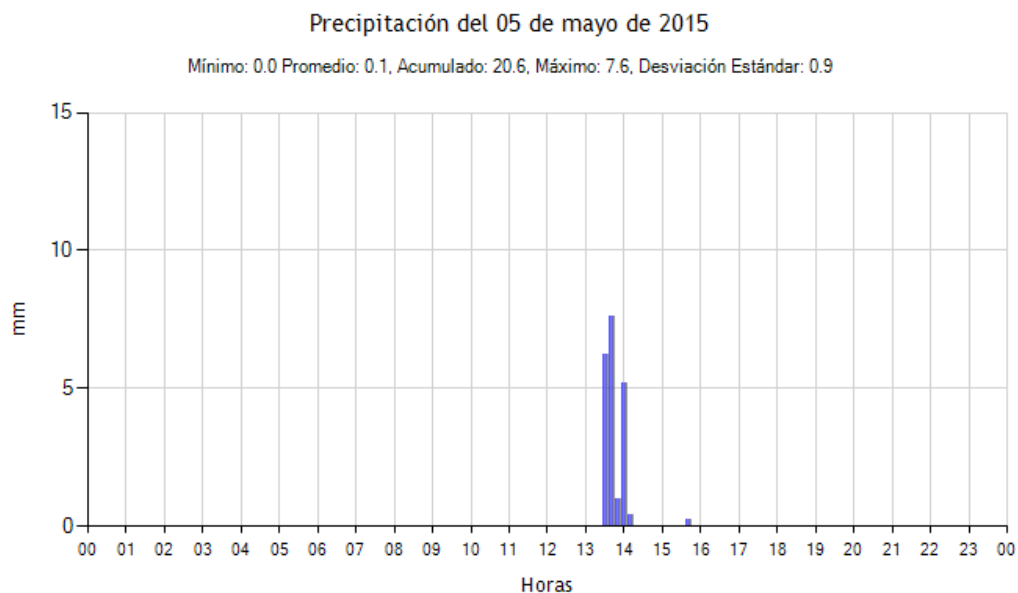


Figura 14. Gráfico de precipitación de la estación meteorológica automática de Bainoa, correspondiente al 5 de mayo del 2015

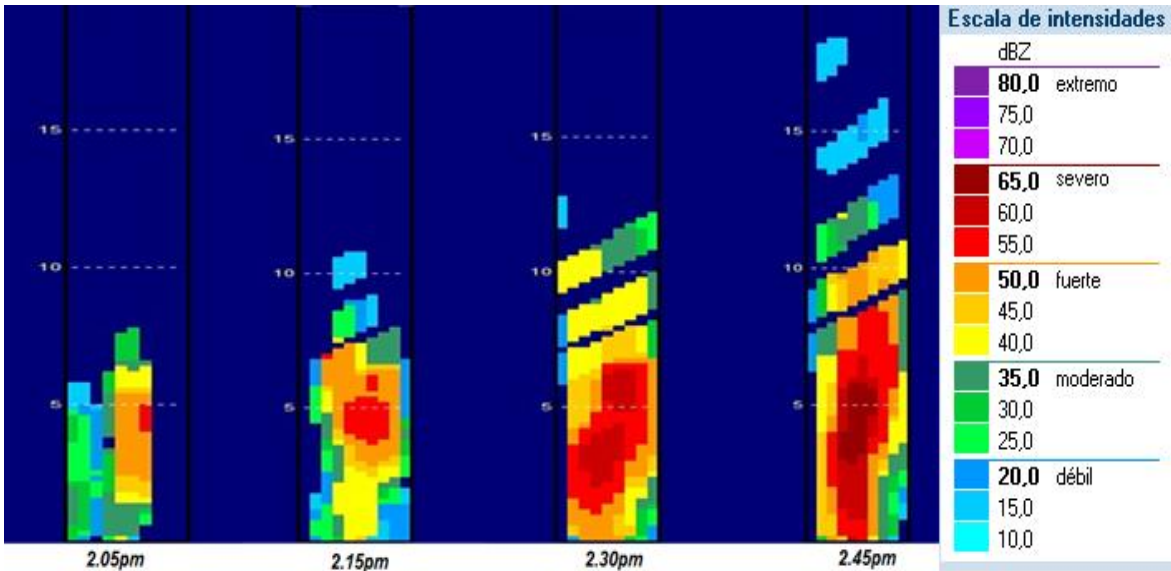


Figura 15. Corte vertical de la tormenta que generó granizos en Bainoa el 5 de mayo del 2015

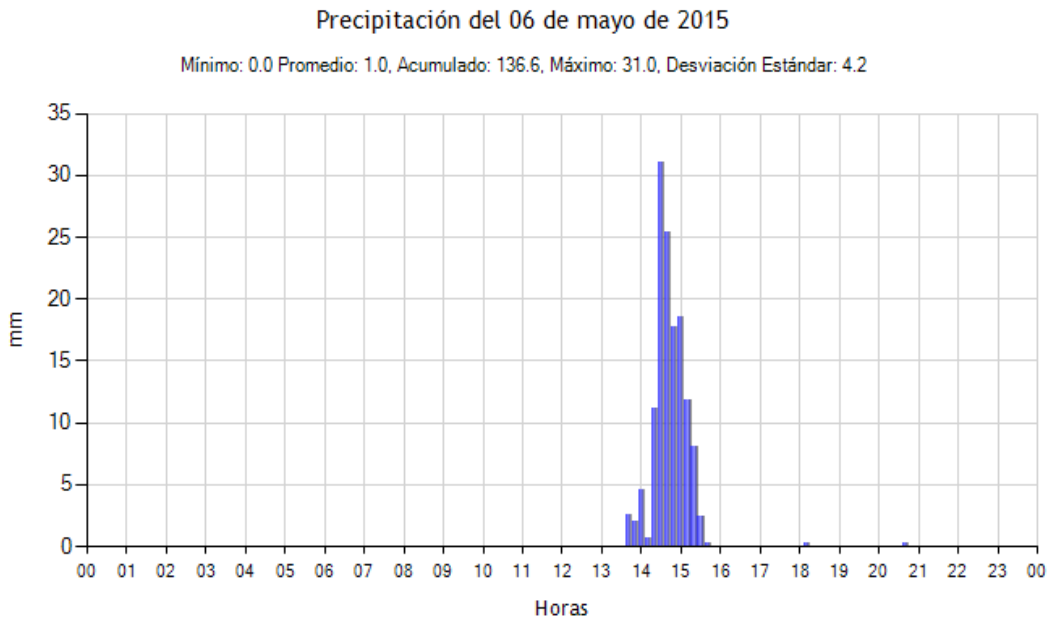


Figura 16. Gráfico de precipitación de la estación meteorológica automática de Santiago de las Vegas, correspondiente al 6 de mayo del 2015

períodos de tiempo, para explicar la ocurrencia de cada uno de los fenómenos y compararlos con los encontrados durante la investigación.

En la [figura 17](#) se muestra el corte vertical de la tormenta cada 15 minutos, donde se puede observar que entre 13:30 y 14:45 (hora local), la Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad no supera los 0.8km de altura, mientras que la Altura Máxima de la Nube presenta valores de

2.2 km hasta las 14:45 (hora local) donde alcanza los 7.4km de altura, mientras que la Z_{max} posee valores elevados superior a los 57 dBZ y alcanzando un máximo de 65 dBZ a los 14:00 (hora local). Teniendo en cuenta la intensidad de la Z_{max} y que la HZ_{max} está próxima a la superficie, se puede afirmar que durante este período de tiempo, se reportó la mayor precipitación, hecho que puede ser

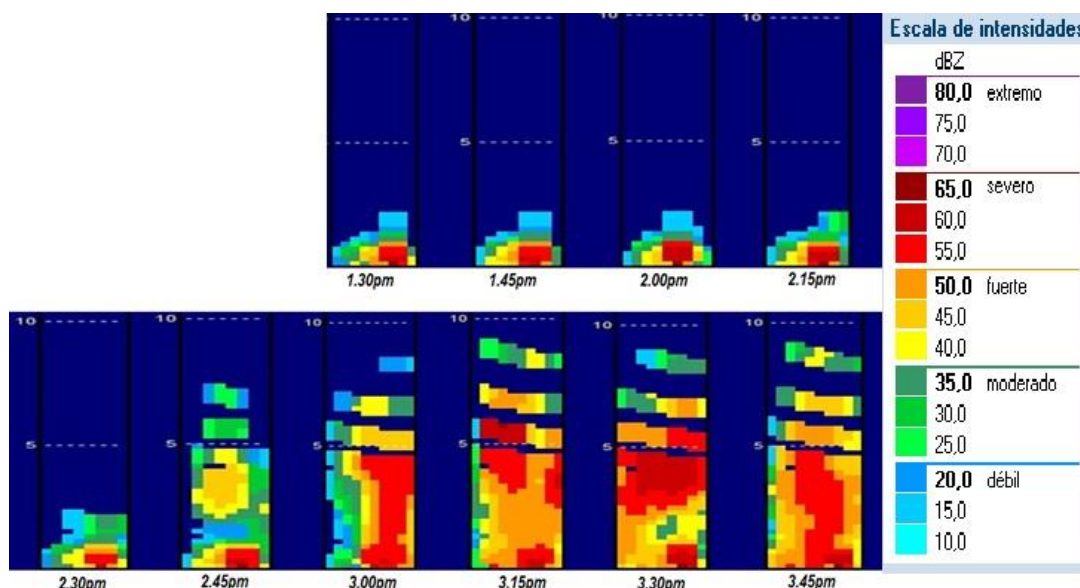


Figura 17. Corte vertical de la tormenta que generó granizos y lluvia intensa en Santiago de las Vegas el 6 de mayo del 2015

corroborado con la figura 3.24 donde se observa que hasta las 15:00 (hora local) está la mayor precipitación, además estos valores se corresponden a los resultados encontrados en esta investigación para la lluvia intensa y para el sistema sinóptico que lo generó. A partir de las 15:00 (hora local), la tormenta continua desarrollandose y presenta un mayor desarrollo vertical alcanzando a las 15:15 (hora local), los valores más elevados de la HZmax y TM con 5.8 y 9.2km de altura respectivamente, hecho que está en concordancia con la formación del granizo y con los resultados encontrados para este tipo de severidad, así como para el fenómeno que lo generó.

En este caso se puede observar en las observaciones correspondientes al radar meteorológico de Casablanca que desde la 1:30 pm se observó el núcleo de máxima reflectividad próximo a la superficie lo que que persistió hasta las 3:45 pm. Esto se pudo comprobar con otros radares meteorológicos de la región tal es el caso del caso del radar meteorológico de Key West. Situación que ratifica la eficiencia que tuvo la nube de tormenta, en generar fuerte precipitación en la localidad de Santiago de las Vegas en corto periodo de tiempo.

Conclusiones

- En el periodo poco lluvioso, el Núcleo de Máxima Reflectividad se ubicó por encima de los 50 dBZ, Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad superior a un Km y la Altura Máxima de la Nube superior a los 10 km.
- En el periodo lluvioso, el Núcleo de Máxima Reflectividad se ubicó por encima de los 55 dBZ, Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad superior a 3 Km y la Altura Máxima de la Nube superior a los 11 km.
- Las variables radaricas utilizadas y los tipos de severidad, mostraron una alta correlación, por encima del 0.5.
- Las situaciones sinópticas que más favorecieron la ocurrencia del tiempo severo en los casos de estudio fueron: Vaguada de Niveles Medios y Altos de la tropósfera, Bajas Frías Superiores, Influencia Anticiclónica y Frentes Casiestacionarios.

Recomendaciones

Realizar un análisis similar con otros radares meteorológicos cercanos a la zona de estudio y con una muestra mayor.

Referencias

- Alfonso, A. P., 1986: El brote de tiempo severo en Cuba del 8 de febrero de 1978. Descripción del brote y situación sinóptica. *Ciencia de la Tierra y el Espacio*, 10, 101-114.
- Alfonso, A.P., (1994): Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. *Cronología*, Ed. Academia, La Habana. 168 pp.
- Aguilar, G., L. Naranjo Y M. Carnesoltas (2005a): Informe de resultado científico. Creación de un sistema experto de condiciones a escala sinóptica favorables para la ocurrencia de tormentas locales severas para el período poco lluvioso en Cuba, del proyecto Condiciones sinópticas favorables para la ocurrencia de tormentas locales severas en Cuba. Un esquema para su predicción, Instituto de Meteorología, 35 pp.
- Aguilar, G., L. Naranjo Y M. Carnesoltas (2005b): Informe de resultado Científico. Establecimiento de condiciones de la circulación atmosférica a escala sinóptica en los alrededores de Cuba, favorables para la aparición de tormentas locales severas del proyecto Condiciones sinópticas favorables para la ocurrencia de tormentas locales severas en Cuba. Un esquema para su predicción, Instituto de Meteorología, 35 pp.
- Batista, L., Belikov, S., Beliaev, V., Danielian, B., Zimin, B., Koloskov, B., Melnichuk, Y. & Rudenko, Y. 1989b. Características de radar de las nubes convectivas y de las precipitaciones en la región del polígono de Camagüey en Cuba. *Memorias del IV Simposio Internacional de Meteorología Tropical*, Leningrado, URSS, 345-351.
- Batista, L., Belinski, O., Beliaev, V., Danielian, B., Zimin, B. & Koloskov, B. 1989a. Resultados de la evaluación de los recursos nubosos para la regulación de la lluvia en el polígono meteorológico de Camagüey. *Memorias del IV Simposio Internacional de Meteorología Tropical*, Leningrado, URSS, 330-336.
- Byers, H. R. and R. R. Braham, 1949: The Thunderstorm. Washington U.S. Gov. I printing office Washington, D.C 287 pp.
- Collier C.G. (1996). Applications of weather radar systems: a guide to uses of radar data in meteorology and hydrology. Segunda edición. John Wiley & Sons. 390 p.
- Córdoba, L., González, E. and Sánchez, A. 1986. Acerca de los criterios para la identificación de tormentas eléctricas y chubascos, con ayuda de los radares meteorológicos, en Cuba, Reporte de Investigación, no. 21, Instituto de Meteorología, CITMA.
- Córdoba, L. 1992. Patrones de reconocimiento para las nubes convectivas en el occidente de Cuba como basamento para el pronóstico a muy corto plazo, por radar. Tesis presentada en opción al grado de doctor en Ciencias Geográficas, Instituto de Meteorología.
- Dixon, M. and Wiener, G. 1993. TITAN: "Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting -A radar based methodology", *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 10, 785-797.
- Gamboa, F. (2004). Selección de indicadores radáricos como predictores de severidad. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Ciencias Meteorológicas, 55p.
- Handwerker, J. Studying the life cycles of convective cells in the upper Rhine valley. *Proceedings of 30th International Conference on Radar Meteorology*, 2000 Munich, Alemania.
- Hering AM, Ambrosetti P, Germann U, Senesi S. 2007. Operational nowcasting of thunderstorms in the Alpine area. 4th European Conference on Severe Storms, 10-14 September 2007, Trieste, Italy, Session 6, Paper 8.
- Hering AM, Morel C, Galli G, Senesi S, Ambrosetti P, Boscacci M. 2004. Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive

- thresholding scheme. Proceedings of the 3rd European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 6–10 September 2004, Visby, Sweden; 206-211.
- Houze, R. A. Jr. (1977). Structure and dynamics of a tropical squall-line system. *Mon. Wea. Rev.*, 105, pp. 1540-1567.
- Johnson J.T., P.L. MacKeen, A. Witt, E.D. Mitchell, G.J. Stumpf, M.D. Eilts y K.W. Thomas (1998). The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR- 88D algorithm. *Wea. For.* 13, pp. 263-276.
- Kyznarova H, Novak P. 2005. Development of cell-tracking algorithm in the Czech Hydrometeorological Institute. Proceedings of World Weather Research Program Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting , 5 – 9 September 2005, Toulouse, France; 6–11.
- Li PW, Lai EST. 2004a. Applications of radar-based nowcasting techniques for mesoscale weather forecasting in Hong Kong. *Meteorol. Appl.* 11: 253–264.
- Li PW, Lai EST. 2004b. Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong. *J. Hydrol.* 288: 189–209.
- Martínez, D., Pérez, C. A., Aroche, R., Beliaev, V. and Petrov, V. 1990. “Pulsaciones de temperatura en los cúmulos sobre Cuba”, *Rev. Cub. Meteorol*, 3, 20-25.
- Martínez, D. 1995. Caracterización de la turbulencia y la convección en las nubes convectivas sobre el Polígono Meteorológico de Camagüey. Tesis de doctorado, INSMET. 125 pp.
- Martínez, D., Pérez, C. A., Aroche, R., Beliaev, V. and Petrov, V. 1995. “Espectros de potencia de la velocidad del viento en las nubes convectivas tropicales sobre Cuba”, *Atmósfera*, 8, 65-80.
- Novo S. (2003): Estudio por radar de tormentas convectivas sobre Camagüey. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias Meteorológicas. Instituto de Meteorología, 53 p.
- Novo S., D. Martínez., D. Gamboa (2004): Estudio por radar de dos tormentas convectivas observadas sobre Camagüey, Cuba. Memorias del 1er Taller de Meteorología Tropical, Convención Trópico, La Habana, Cuba, 16p.
- Novo S., D. Martínez., O. Puentes (2014): Tracking, analysis and nowcasting of Cuban convective cells as seen by radar. *Royal Meteorological Society. Meteorol. Appl* 21:585-595
- Núñez O., A. González, L. Córdoba, J. Rego, M. Pérez y R. Valdés (1999). Caracterización macroscópica de las nubes sobre Cuba a partir de la información de radar. Capítulo 1 del Informe presentado por Martínez et al (1999). Instituto de Meteorología, 74 p.
- INSMET. 2013. Manual de Procedimientos Operacionales. 61 p.
- Pozas, W. (2010): Software Vesta|Distribuidor versión 5.3.18.0. Distribuidor automático de productos Vesta para radar meteorológico. Laboratorio de Desarrollo Técnico, Centro Meteorológico de Camagüey.
- Puentes, O (2010): Caracterización estadística de los ecos convectivos observados por el radar de Camagüey. Tesis en opción al grado de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 85p.
- Rodríguez, O., 2005: Automatización de los radares Meteorológicos En Cuba. Pasado, presente y futuro de un innovación tecnológica.
- Suavegot, H. (1992): Radar Meteorology. Reedited por Artech House, Paris, Francia.
- Terblanche DE, Steffens FE, Fletcher L, Mittermaier MP, Parsons RC. 2000. Toward the operational application of hygroscopic flares for rainfall enhancement in South Africa. *J. Appl. Meteorol.* 39: 1811–1821.
- Valdés M., A. Miranda y V. Lobondín (1978a). Estudio de los radioecos de nubes cúmulos tropicales en Cuba. *Boletín del INSMET. Academia de Ciencias de Cuba.* 6 p.