

Caracterización de las tormentas por radar y recursos nubosos para el incremento artificial de la lluvia por siembra de nubes en las regiones occidental y centro-oriental de Cuba

Characterization of storms by radar and cloud resources for artificial rainfall enhancement by cloud seeding in western and central-eastern regions of Cuba.

Lic. Omar Puentes Ledesma | omar.puentes@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Dr. Sadiel Novo Cuervo | sadielnovo@gmail.com | Universidad Autónoma de México, D.F., México

Dr. Daniel Martínez Castro | daniel.martiez@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Recibido: enero 15 de 2015; aceptado: marzo 30 de 2015.

Resumen

Se presenta la caracterización de las tormentas convectivas a partir de datos de radar; se hace énfasis en los recursos nubosos con miras al incremento artificial de la lluvia mediante la siembra dinámica con yoduro de plata. Los datos consisten en observaciones volumétricas y fueron obtenidos durante los períodos lluviosos comprendidos entre 2005 y 2008. Se utilizó un sistema automático para la identificación y el seguimiento de las tormentas, el cual aporta estadísticas de las propiedades de los radioecos de nubes convectivas observados por los radares de Camagüey (CMG) y Casablanca (CSB). En las regiones del occidente (cubierta por el radar de CSB) y el centro-oriental de Cuba (radar de CMG) se diferenciaron las tormentas originadas sobre el mar de las surgidas en tierra. Para las tormentas desarrolladas sobre tierra se obtuvo las 16 horas como el momento de mayor actividad de tormentas convectivas, mientras que el número de tormentas con sus topes propicios para la siembra alcanza su máximo 1 h antes (las 15 horas). En la región occidental, el número mayor de tormentas se registró en junio y septiembre.

PALABRAS CLAVE: Tormentas convectivas, reflectividad de radar, seguimiento de tormentas, siembra de nubes, Cuba.

Abstract

A characterization of convective storms is presented, with particular emphasis on those properties that are of interest for precipitation enhancement. For this reason, the radar observations of Casablanca (CSB) and Camagüey (CMG) were used. These volumetric observations were taken during the rainy season between 2005-2008. An automatic system for convective storms identification and tracking was used to make a statistical description of properties of convective clouds observed by Camagüey (CMG) and Casablanca (CSB) radars stations. In the western region (covered by CSB radar) and the central-eastern Cuba (CMG radar) the storms originating over the sea and land were divided in two group. Over land we obtained a peak in the number of convective storms around 16 hours, while the number of storms with its echo tops good for cloud seeding have a peaks one hour before (15 hours). For the western region the highest number of storms was recorded during the months of June and September.

KEYWORDS: convective storm, radar reflectivity, storm tracking, cloud seeding, Cuba.

Introducción

Durante la última década, la red de radares cubana se ha modernizado progresivamente y se ha ido acumu-

lando una gran cantidad de observaciones de radar (Rodríguez et al. 2005). Asimismo, se han realizado trabajos de siembra de nubes convectivas en respuesta a la sequía que ha estado afectando el país (Martínez et al., 2011), los cuales han impulsado el empleo de la información de radar con vistas a estudiar las propiedades de los ecos observados (Novo, 2009; Puentes, 2010).

Los radares meteorológicos constituyen una de las herramientas primarias para el estudio de las tormentas convectivas (Sauvageot, 1992; Collier, 1996). Con ayuda del radar, Byers y Braham (1949) fueron los primeros en realizar un estudio detallado de las tormentas en las inmediaciones de Orlando (Florida) y Wilmington (Ohio), en los Estados Unidos. Asimismo, Houze y Cheng (1977), durante el proyecto GATE (Atlantic Tropical Experiment), realizaron un estudio de significativo al caracterizar la convección en el trópico en función del área que ocupan los ecos de radar, sus respectivos valores de reflectividad y velocidades de movimiento. Además, con la automatización de los radares comenzó a desarrollarse nuevas técnicas de identificación y seguimiento de tormentas, que permiten el análisis de grandes volúmenes de información y la creación de estadísticas sobre las propiedades de los radioecos. TITAN (Dixon y Wiener, 1993) y SCIT (Johnson et al., 1998), en los Estados Unidos; TRACE3D (Handwerker, 2002), en Alemania; TRT (Hering et al., 2004), en suiza; SWIRLS (Li y Lai, 2004a), en Hong Kong; y CellTrack (Kyznarova y Novak, 2005), en la República Checa, son ejemplos de sistemas automáticos que permiten la identificación de tormentas. De igual modo, Henry (1993), MacKeen et al. (1999), Handwerker (2000), Potts et al. (2000), Terblanche et al. (2000), Li y Lai (2004b), Novak y Kyznarova (2006), y Hering et al. (2007) son autores que han dado aplicación a los sistemas mencionados y han arribado a conclusiones acerca del tiempo de vida, el ciclo diurno, la intensidad y la dirección de movimiento de las tormentas convectivas.

En Cuba, la mayor parte de los estudios sobre tormentas convectivas se ha efectuado en la provincia de Camagüey y sus alrededores. En estas regiones se realizaron los trabajos correspondientes al Programa Cubano de Modificación Artificial del Tiempo (PCMAT) en los años ochenta y noventa del siglo xx, los cuales aportaron la mayor cantidad de información existente sobre observaciones de aire superior y radares, así como de aviones instrumentados. Martínez Castro et al. (1990, 1995), Martínez Castro (1995) y Pérez Sánchez et al. (1994) estudiaron algunas características de la microestructura y la turbulencia en el interior de las nubes convectivas, mientras que Batista et al. (1989a y 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. Otro de los radares del país que tributa una gran cantidad de datos es el de Casablanca. Ambas estaciones de radar (Casablanca y Camagüey), en general, realizan 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. Además, en determinados períodos y durante los trabajos de siembra de nubes, se han registrado observaciones con una resolución temporal alta (5 min).

Valdés et al. (1978), Batista et al. (1989), Córdoba et al. (1986) y Córdoba (1992) utilizaron la información de los radares meteorológicos para estudiar las propiedades de las tormentas convectivas en el país. Sin embargo, el único estudio sistemático que empleó datos de radar con vistas a obtener las propiedades de las nubes en las zonas centro-oriental y occidental de Cuba, es el reportado por Núñez et al. (1999), en el cual se utilizaron datos trihorarios de los radares de Camagüey y Casablanca durante seis años (1990-1995) para obtener las distribuciones estacional y diaria de la nubosidad, y sus propiedades. Todos estos estudios realizados hasta la década de los noventa del siglo xx siempre estuvieron limitados

por la necesidad de procesar los datos de radar plasmados en negativos fotográficos utilizando lectores de microfilme o los contornos de radioecos calcados directamente de la pantalla del radar, por lo cual, necesariamente, las muestras fueron pequeñas y el procesamiento tuvo una carga de subjetividad importante. El presente trabajo responde a la necesidades de caracterizar las propiedades de la nubosidad convectiva observada con los radares de Camagüey y Casablanca, y actualizar los estudios de recursos nubosos con miras al programa de incremento artificial de la lluvia en las zonas centro-oriental y occidental del país.

Materiales y métodos

Los radares y sus datos

Los radares de Casablanca y Camagüey son del tipo MRL-5; su estrategia de exploración está diseñada para realizar 16 exploraciones planas (PPI) desde 0.5° hasta 21.2° en la vertical, cada exploración plana

consiste en 256 exploraciones radiales cada 1.4° en azimuth, 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 para ambos radares se limitó a un círculo de 180 km de radio, centrado en cada uno de estos (Fig. 1). La tabla 1 relaciona los parámetros de operación para ambos radares.

Los datos obtenidos a partir del radar de Camagüey corresponden a 61 días del período lluvioso cubano entre 2005 y 2007, durante los cuales el radar realizó observaciones volumétricas cada 5 min, desde el momento en que se detectó el primer eco meteorológico, hasta que no se observó ningún otro radioeco en su alcance. Los datos del radar de Casablanca corresponden a observaciones horarias realizadas durante cuatro años (2005-2008) entre abril y octubre (Tabla 2); en este caso, los meses de treinta días tienen 720 observaciones, mientras que los de treinta y un días, poseen 744. El mes más incompleto del período fue abril de 2008, con 381 observaciones (53 % de eficiencia), y los más completos fueron julio de 2006 y mayo de 2008, con 743 ob-



Fig. 1 Regiones de estudio. Los círculos alrededor de cada radar tienen 180 km de radio: CSB es el radar de Casablanca, La Habana, y CMG es el radar de Camagüey.

TABLA 1

Parámetros de operación para los radares meteorológicos de Casablanca y Camagüey*

Tipo de Radar	MRL-5
Diámetro de la antena	4.5 mts
Ancho del haz	1.50
Velocidad de rotación de la antena	4 rpm
Longitud de la onda (λ)	10.4 cm
Potencia pico de transmisión	510 W
Duración del pulso	2 μ s
Frecuencia de repetición de pulso	250 Hz (pulso largo) o 500 Hz (pulso corto)
Cubrimiento en distancia	500 km (pulso largo) o 200 km (pulso corto)

TABLA 2

Cantidad de observaciones (NOBS) horarias realizadas por el radar de Casablanca

Año	Mes							Total	Eficiencia (%)
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.		
2005	717	736	673	729	734	683	712	4 984	97.0
2006	714	714	693	743	480	408	553	4 305	83.8
2007	602	612	614	567	479	670	722	4 266	83.1
2008	381	743	621	719	691	601	713	4 469	87.0
Total	2 414	2 805	2 601	2 758	2 384	2 362	2 700	18 024	87.7

Nota: *Adaptados de Peña et al. (2000).

servaciones cada uno. En total, se procesaron 18 024 observaciones de radar. La última columna indica la eficiencia operativa promedio del radar para los siete meses de datos.

Metodología de identificación y seguimiento de las tormentas

Las observaciones volumétricas de reflectividad efectiva se obtuvieron en un formato propietario binario (.obs) y se procesaron, inicialmente, con los software propietarios Vesta|Proceso, ver. 5.3.13.0 (Pozas 2007), y Vesta|Distribuidor, ver. 1.2.7.0 (Pozas 2003), con miras a obtener los productos de radar en formato netcdf siguientes:

1. Reflectividad máxima *ZM* en la columna 2.5 km a 20 km.
2. Tope *TM*, como la mayor altura alcanzada por una reflectividad de 10 dBZ entre 2.5 km y 20 km.
3. Altura de la reflectividad máxima *HZM*, como la altura donde se alcanzó *ZM*.

Cada producto se obtuvo como una malla de 241x241 puntos espaciados entre sí 1.5 km, con centro en el radar y abarcando una zona cuadrada de lado 360 km. Se escogió esta resolución espacial para estable-

cer comparaciones con otros estudios (Novo, 2009; Puentes, 2010).

A partir del producto *ZM* se obtuvo la posición de cada eco convectivo (tormenta) de la forma descrita por Novo (2009). Una tormenta se define como un conjunto de píxeles conectados por, al menos, un lado, cuyos valores de reflectividad exceden (todos) 24 dBZ. Además, la reflectividad máxima de este conjunto de píxeles debe exceder 34 dBZ y su área 6.75 km² (3 píxeles); de no cumplirse estas condiciones, se desecha el conjunto. Esta definición permite detectar tormentas desde sus etapas tempranas de desarrollo y, a la vez, discernir tormentas que se localizan muy cercanas una de otra; luego de identificar cada tormenta, se guarda su posición, área, reflectividad máxima y la hora (instante) en que se detectó. Posteriormente, en las mallas de *T* y *HZM* se busca el valor máximo dentro del área de cada tormenta, y se definen el tope y la altura de su reflectividad máxima para cada instante.

En los casos en que se contó con dos o más observaciones de radar, cada 5 min se realizó el seguimiento de cada tormenta, lo cual consiste en buscar la continuidad de una tormenta perteneciente al instante *t* (tormenta padre) en el siguiente instante *t+Δt* (tormenta hija) y obtener la evolución de sus

propiedades durante su ciclo de vida (trayectoria). El seguimiento de las tormentas se desarrolló según la metodología descrita por Novo (2008, 2009), que considera como tormenta hija de una tormenta perteneciente a un instante anterior aquella que se encuentra a la menor distancia de la posición estimada para la tormenta padre, siempre que no exceda el valor típico de 4.5 km.

De acuerdo con lo anterior, todas las estadísticas obtenidas a partir de los datos del radar de Casablanca se refieren a tormentas, mientras que las conseguidas con el radar de Camagüey describen las trayectorias; por ello, para la región occidental no se muestran resultados del tiempo de vida ni la velocidad y el rumbo de las tormentas. Las tormentas y trayectorias fueron estratificadas en *marítimas* o *terrestres*; en el caso de las tormentas, solo fue necesario conocer sobre cuál de los medios se localiza su área. Sin embargo, para las trayectorias se siguió la metodología siguiente: se considera que una trayectoria pertenece a un medio (mar o tierra) siempre que su primer eco haya sido detectado sobre este y, además, 75 % de su tiempo de vida también lo haya desarrollado sobre ese medio. Otras clasi-

ficaciones para las trayectorias clasifican los días según el tipo de convección (en *fuertes* o *débiles*) y la velocidad de desplazamiento (en *rápidos* o *lentos*). Se consideró como día lento (rápido) aquel cuya velocidad más frecuente fuera menor o igual (mayor) a 20 km/h. Para clasificar la intensidad de la convección durante cada día se utilizó la distribución de las alturas del tope máximo de las trayectorias. Se definió como día de convección débil (fuerte) aquel cuyo tope máximo más probable fuese menor o igual (mayor) a 10 km.

Entre los principales errores presentes en el conjunto de observaciones primarias estuvieron la medición con un solo ángulo de elevación de la antena y la propagación anómala. Con el objetivo de disminuir los efectos de estos errores se eliminaron las tormentas con tope por debajo de 2.5 km y con miras a evitar la detección de áreas de lluvia estratiforme se excluyeron también las tormentas con un área mayor de 225 km² y con una reflectividad máxima inferior a 45 dBZ.

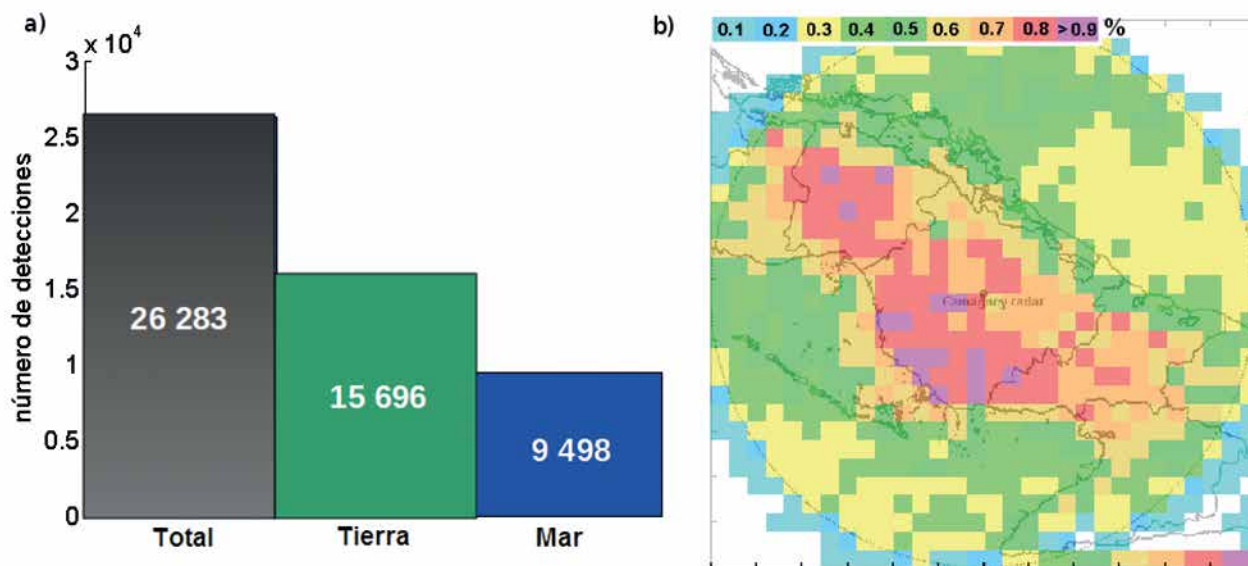


Fig. 2 a) Relación entre la cantidad de tormentas terrestres y marítimas con respecto al total; b) distribución espacial sobre la región centro-oriental de Cuba.

Resultados y discusión

Zona centro-oriental (radar de Camagüey)

Distribución espacial

Se identificaron y guardaron 26 283 trayectorias de tormentas sobre la región de estudio (Fig. 2a). La mayor parte de las tormentas terrestres se ubicó entre el eje central de la isla y su costa sur (Fig. 2b), debido quizá a la influencia del centro subtropical de altas presiones del Atlántico Norte, el cual produce vientos sobre Cuba del este al noreste durante esta época del año (julio-septiembre), más el típico calentamiento hacia el interior de la isla, que provoca la activación del sistema de brisas marinas; solo 38 % de las trayectorias identificadas se localizaron sobre el mar.

Tiempo de vida y área máxima

la figura 3 muestra las distribuciones del número de tormentas (en *porcentaje* del total dentro de cada grupo, mar o tierra) con respecto a la duración total y el área máxima alcanzada por cada trayectoria. El número de tormentas disminuye exponencialmente, tanto con el aumento de su duración, como con el incremento del área máxima alcanzada. Esto había

sido reportado por Cruz *et al.* (1973) para tormentas en el norte de Venezuela; Dixon y Wiener (1993) para tormentas en Colorado, los Estados Unidos; y por Handwerker (2000) para tormentas en el valle del Rin, Alemania. La figura 3b muestra que existe un reducido número de trayectorias en las cuales su área máxima se mantiene en el valor umbral (6.75 km^2); la tendencia en las tormentas durante su trayectoria es al aumento de sus áreas hasta valores medios de 18 km^2 . El tiempo de vida medio para las celdas convectivas fue de 19 min, coincidiendo con el determinado por Handwerker (2000) para Alemania, y por Novo (2009) para Camagüey. No se observaron diferencias significativas en cuanto al medio donde se desarrollaron las tormentas, lo cual concuerda con el reporte de May y Ballinger (2006) para celdas originadas durante situaciones sinópticas diferentes.

Ciclo diurno

A partir de las 12 HL (hora local), el número de tormentas se incrementa rápidamente hasta alcanzar el máximo absoluto del día a las 16 HL, como indica la línea negra en la figura 4a, la cual representa el aporte de todas las tormentas en el área estudiada. Como es de esperar, el aporte fundamental a este máximo

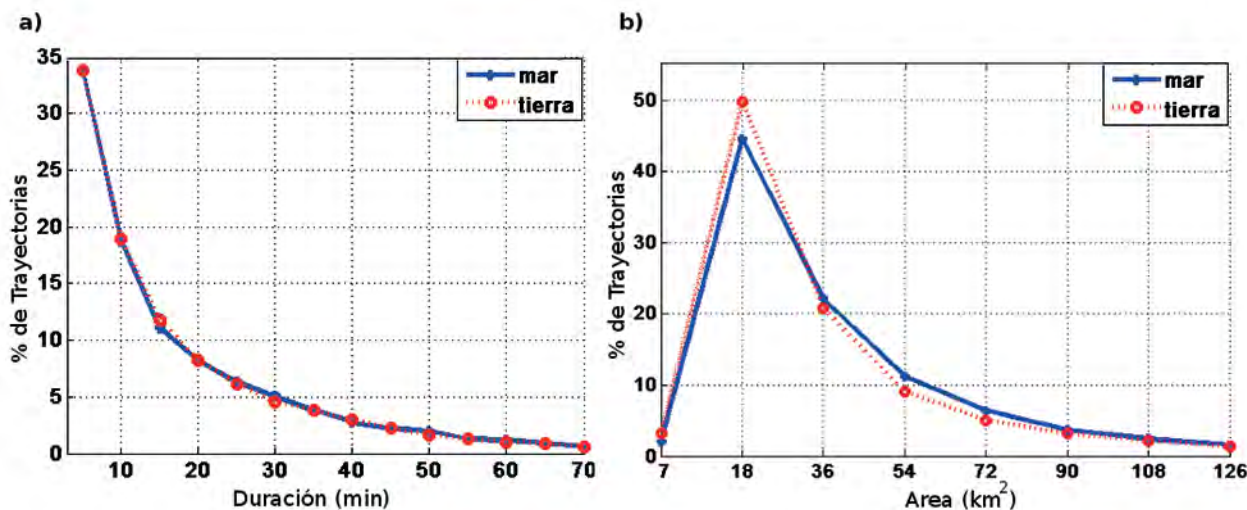


Fig. 3 a) Tiempo de vida y b) área máxima alcanzada por las tormentas en cada medio.

proviene de las tormentas terrestres (en rojo). Sobre el mar, el horario más favorable para la convección es alrededor de las 20 HL, tal vez por la mayor capacidad calorífica del agua. El máximo de tormentas a las 16 HL ha sido también observado por Núñez *et al.* (1999) y Álvarez (2006), aunque ninguno de ellos

discriminó entre tierra y mar. Estos mismos estudios señalan el período entre 01 y 12 HL como el de menos convección para la región de Camagüey, aunque aquí se observa, a las 09 HL, un máximo secundario sobre el mar.

Según los resultados del PCMAT (Koloskov *et al.*,

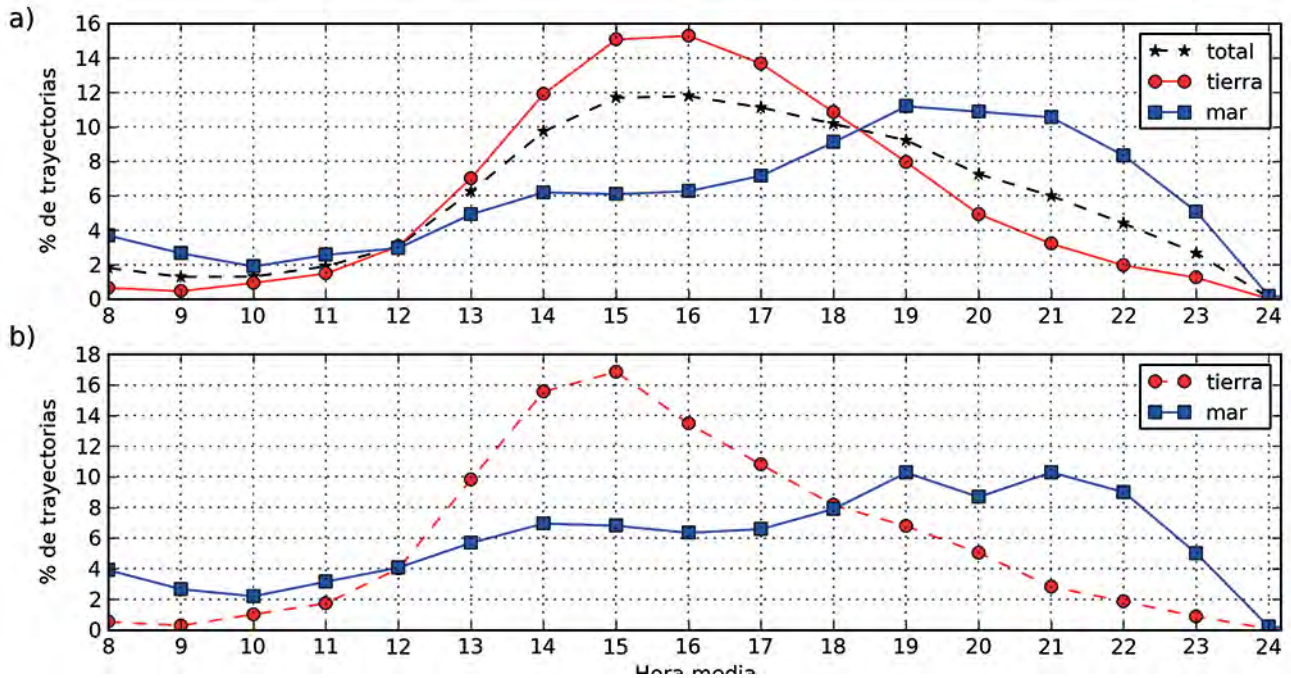


Fig. 4 Distribución de la hora media: a) para cada trayectoria. Con línea discontinuas se presenta el aporte de las tormentas presentes en el área de estudio, mientras en línea con círculos (cuadrados) se indica el aporte de las tormentas terrestres (marítimas); b) marcha diaria del número de tormentas con topes entre 6 km y 8 km.

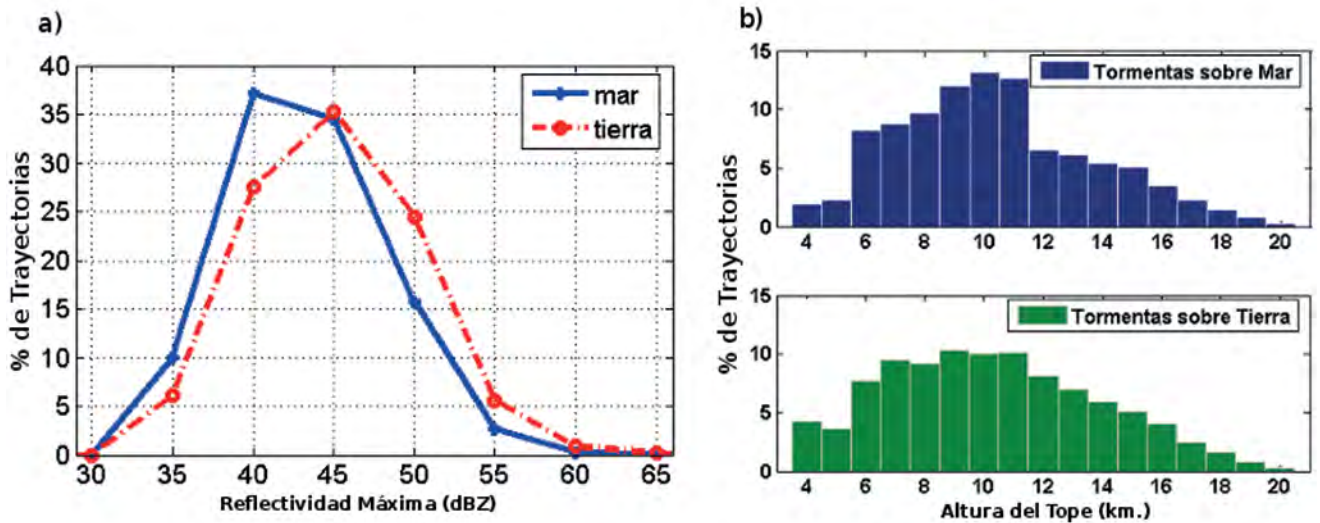


Fig. 5. Distribuciones: a) de la reflectividad máxima alcanzada por trayectorias de tormentas; b) de la altura de los topes máximos.

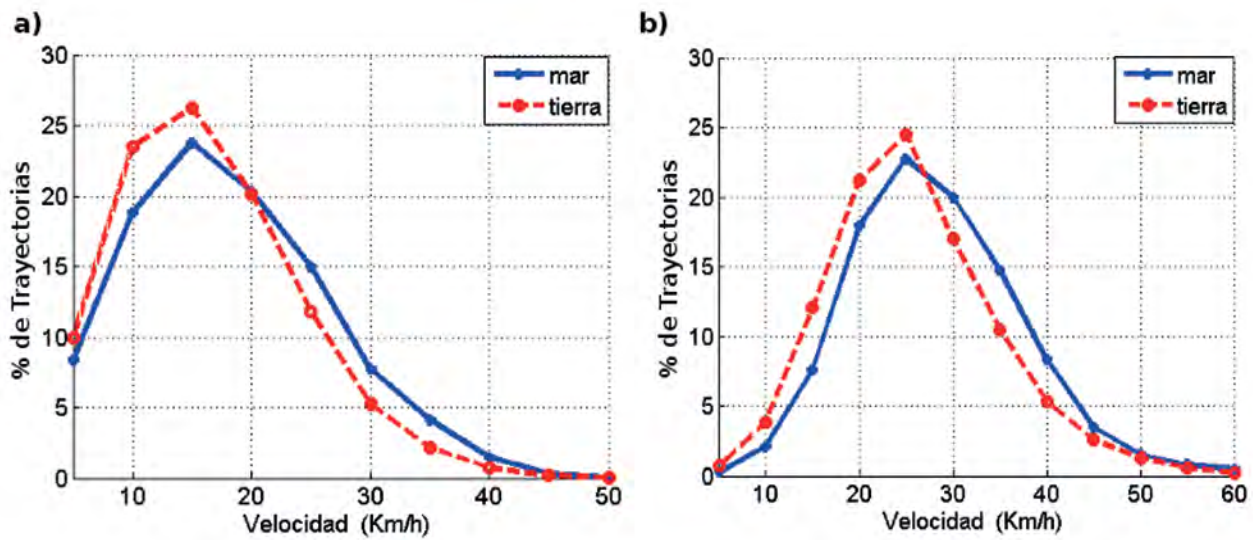


Fig. 6 Velocidad media de desplazamiento de las tormentas sobre el mar y la tierra: a) durante días lentos; b) durante días rápidos.

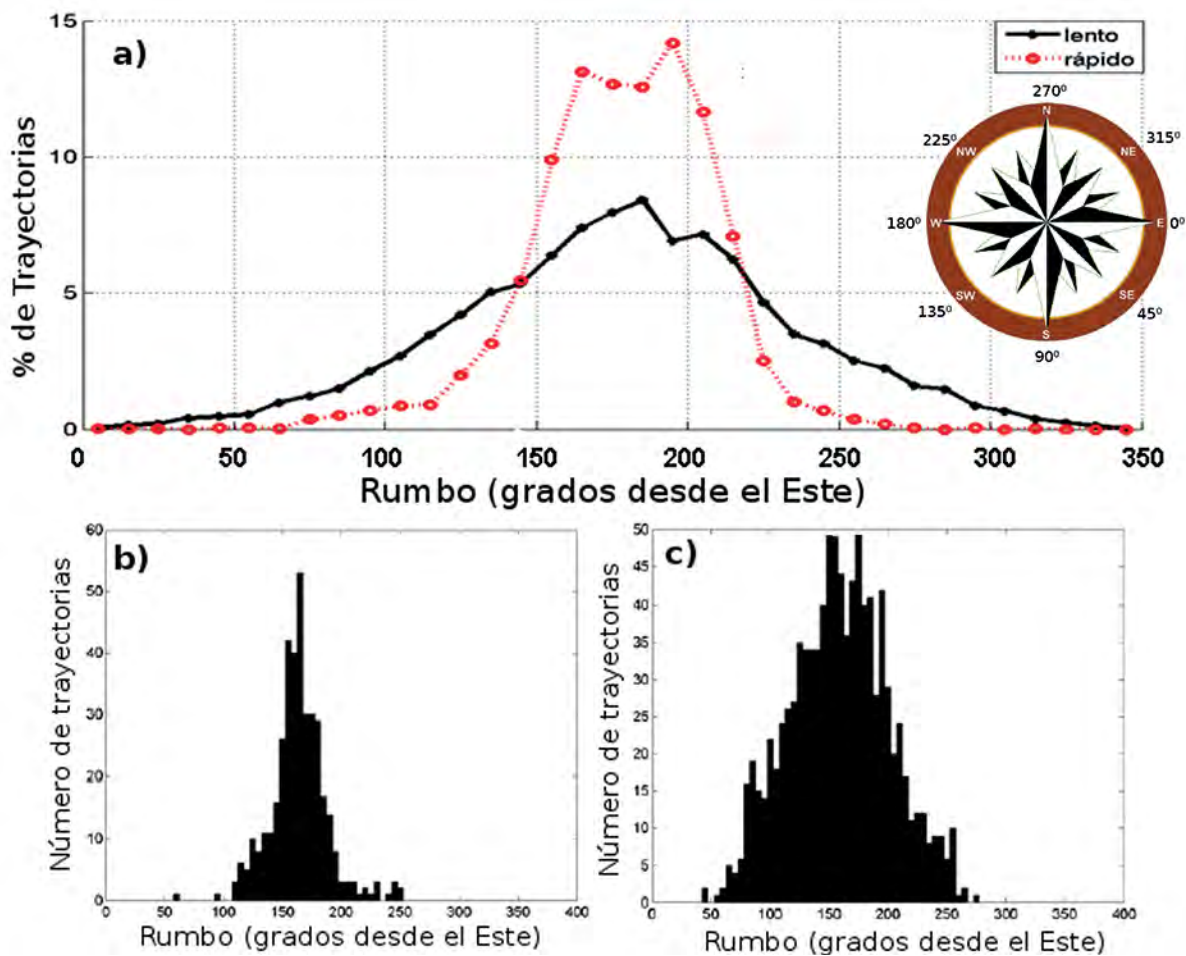


Fig. 7 Rumbo medio (medido en grados desde el este, en contra de las agujas del reloj) que siguieron las trayectorias detectadas: a) en tierra (los días de rápido (lento) movimiento denotados con líneas de puntos (continuas)); b) distribución de los rumbos medios de las tormentas para un día rápido; c) distribución de los rumbos medios de las tormentas para un día lento.

1996), las nubes cúmulos que presentan topes entre 6 km y 8 km de altura son las que mejor reaccionan a la siembra dinámica con pirocartuchos de yoduro de plata en las condiciones cubanas, lo que se debe a que en este intervalo de alturas, la temperatura varían, aproximadamente, entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Martínez Castro *et al.*, 2002 y 2011). La figura 4b presenta la marcha diaria del número de tormentas detectadas por radar con estas características; se aprecia que sobre tierra, el momento más propicio para la siembra de nubes es a las 15 HL, o sea, 1 h antes de que se alcance el máximo número de tormentas sobre ese medio (Fig. 4a).

Reflectividad y tope máximos

La figura 5 muestra las distribuciones de los valores de reflectividad y tope máximos alcanzados por las tormentas durante sus ciclos de vida, diferenciando

entre mar y tierra. Sobre tierra son más probables los valores de ZM superiores a 45 dBZ, indicando, como promedio, una intensidad mayor de las tormentas sobre este medio; los valores más frecuentes de topes máximos están entre 9 km y 11 km para cualquier medio, con la mayor frecuencia de topes por encima de 12 km, también sobre tierra.

Velocidad y rumbo medios

La muestra total de 61 días se clasificó en cuanto a la velocidad media más frecuente de las tormentas cada día, magnitud esta que se relaciona directamente con la fuerza del viento medioambiental diario. Los días lentos (rápidos) tuvieron como velocidad media más frecuente el valor de 15 (25) km/h (Fig. 6a,b); además, como promedio, las tormentas sobre el mar se desplazan a mayores velocidades que sobre tierra, tal vez, a causa de la menor fricción sobre este medio.

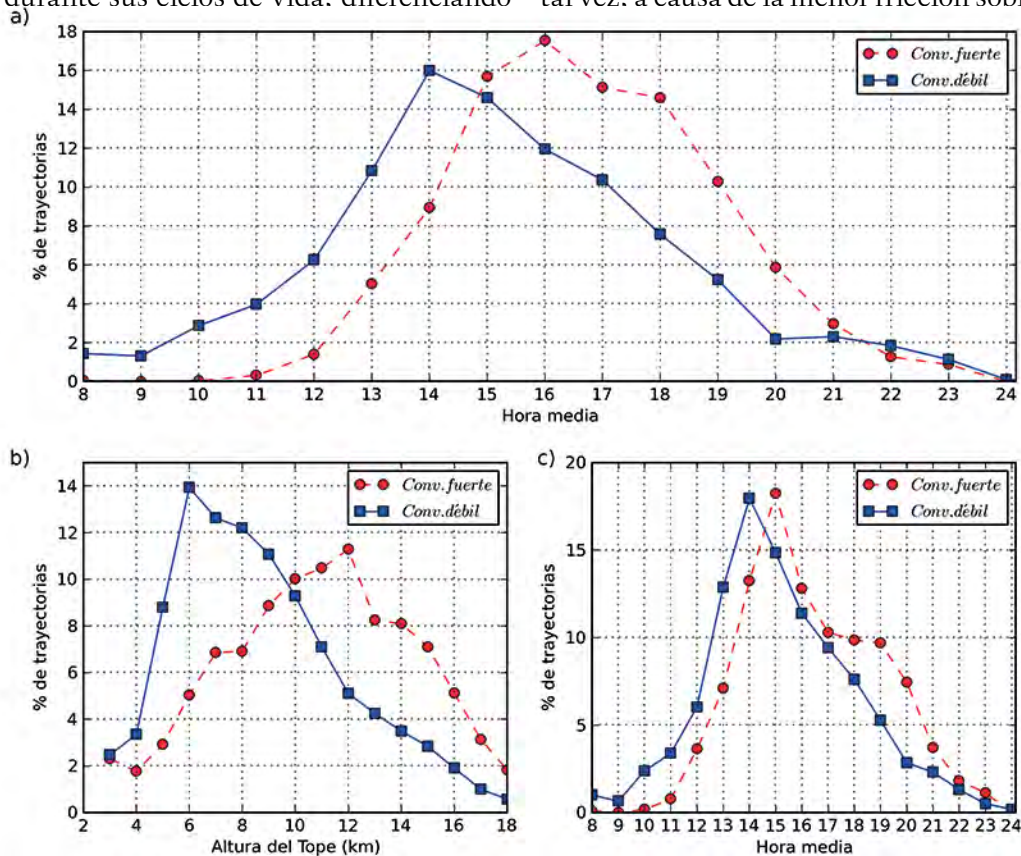


Fig. 8 Distribuciones: a) hora media de las trayectorias; b) tope máximo para las tormentas terrestres; c) número de tormentas con topes entre 6 km y 8 km, separando las condiciones de convecciones débil y fuerte.

El número máximo de tormentas durante días rápidos se alcanza, en promedio, a las 16 HL, o sea, 1 h que el mismo promedio para los días lentos (17 HL).

Tanto sobre la tierra, como sobre el mar, el rumbo predominante de las tormentas es del oeste (Fig. 7), lo cual se corresponde con el flujo medio del viento establecido por el Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte en la zona para esta época del año. Durante los días de baja intensidad del viento (lentos), el movimiento de las celdas de tormenta resulta más errático; por ello, en la figura 7a se observa la mayor variación. La figura 7(b y c) muestra ejemplos para días lentos y rápidos.

Variación con la intensidad de la convección

De los días con fuerte convección (CF), 77 % también fueron días lentos, lo cual sugiere que la mayor convección ocurrió como consecuencia del fuerte calentamiento diurno ante un débil gradiente barométrico.

La figura 8a muestra que, para los días con débil convección sobre tierra, la hora de formación de tormentas se adelanta con respecto a los días con fuerte convección; además, el máximo número de tormentas se alcanza, en promedio, 2 h antes, durante los

días con débil convección. El desarrollo de la convección desde horas tempranas los días de CD propicia que el número de tormentas con topes entre 6 km y 8 km se adelante con respecto a la distribución mostrada en la figura 4b; para estos días, se tiene un pico bien marcado a las 14 horas (Fig. 8c). Los valores de topes máximos que más a menudo se alcanzan durante los días de CD (Fig. 8b) son 6 km y 7 km, mientras que durante los días de CF, esos valores se hallan entre 11 km y 12 km. Esto es importante para la planificación de las actividades de siembra de nubes, puesto que establece una relación entre la velocidad del desplazamiento de los radioecos (que depende de la del viento), y la hora de desarrollo de la convección. Precisamente, los días de convección débil o moderada, suelen ser los más adecuados para la siembra dinámica de nubes convectivas (Martínez-Castro *et al.*, 2011).

Zona occidental (radar de Casablanca)

Para esta región, en solo siete meses, el total de tormentas (ecos de radar que cumplen los criterios convectivos) anual año ronda la cifra de 40 000 o más, lo cual se aleja bastante de lo reportado por Núñez

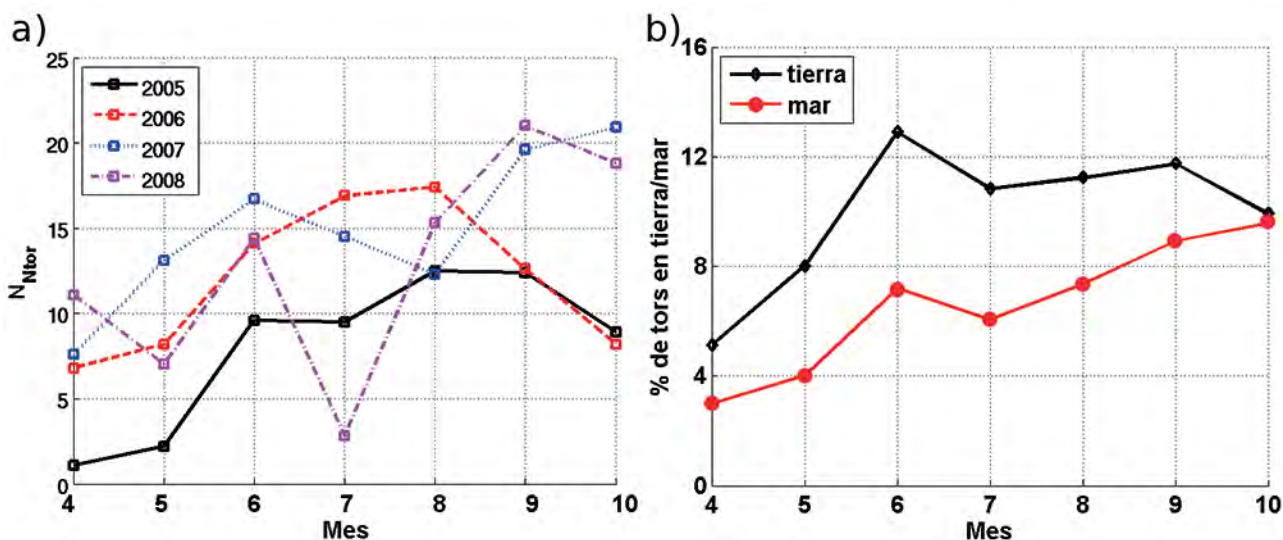


Fig. 9 a) Dependencia del número de tormentas normalizado con el mes del año; b) densidad de tormentas sobre tierra y mar para el año promedio.

et al. (1999), donde para cada uno de los seis años completos analizados, el total de ecos siempre estuvo por debajo de los 14 000, a pesar de que la eficiencia operativa promedio del radar en ese trabajo (90.3 %) fue similar a la de este (87.7 %) (ver Tabla 2). Lo anterior es consecuencia de la diferente resolución temporal de los datos y la forma distinta en que se definen los ecos que se han de detectar en cada trabajo.

Un estimador representativo de la cantidad de tormentas presentes por mes es el número de tormentas normalizado N_{Ntor} , definido de la manera siguiente:

$$N_{Ntor} = N_{TOR} / N_{OBS} \quad (1)$$

donde: N_{TOR} es el número de tormentas detectadas por mes y N_{OBS} es el número de observaciones procesadas por mes (ver Tabla 2).

La figura 9a presenta el comportamiento de N_{Ntor} para cada año de la muestra. Se observa la tendencia al incremento del número de tormentas en los meses de verano o período lluvioso (junio–octubre), lo cual, según Martínez Castro *et al.* (2004), corresponde con el período del año donde la energía y la humedad atmosférica disponibles para formar tormentas son mayores; una excepción notable de este criterio fue julio de 2008, cuando el número de tormentas resul-

tó muy bajo (Tabla 3). El mes presentó la mayor cantidad de observaciones de radar realizadas con un solo ángulo de elevación, por lo que más de la mitad de las tormentas detectadas (2 912 de 5 025) se eliminaron de la muestra. No obstante, 2005 y 2007 también presentaron mínimos relativos en meses de verano (julio y agosto, respectivamente), lo cual es consistente con la sequía de medio verano, presente en la mayor parte de la región del Caribe y, en particular, en las Antillas Mayores (Curtis y Gamble, 2007). Los años 2007 y 2008 se diferenciaron de 2005 y 2006 por la gran actividad tormentosa que presentaron al final de la temporada lluviosa (septiembre–octubre).

El área terrestre dentro del círculo de 180 km de radio que define la región de estudio centrada en el radar de Casablanca (ver Fig. 1), abarca 26 800 km², mientras que el área marítima mide 74 952 km². Para cualquier mes de cualquier año, la densidad de tormentas (definida como la cantidad de estas por unidad de área y expresada en *porcentaje*) sobre la tierra siempre fue mayor que sobre el mar, excepto octubre de 2007 y 2008. En julio de 2008 se obtuvo un mínimo pronunciado, que responde a las causas reflejadas en la figura 9a. La figura 9b muestra las curvas de densidad de tormentas sobre el mar y la tierra

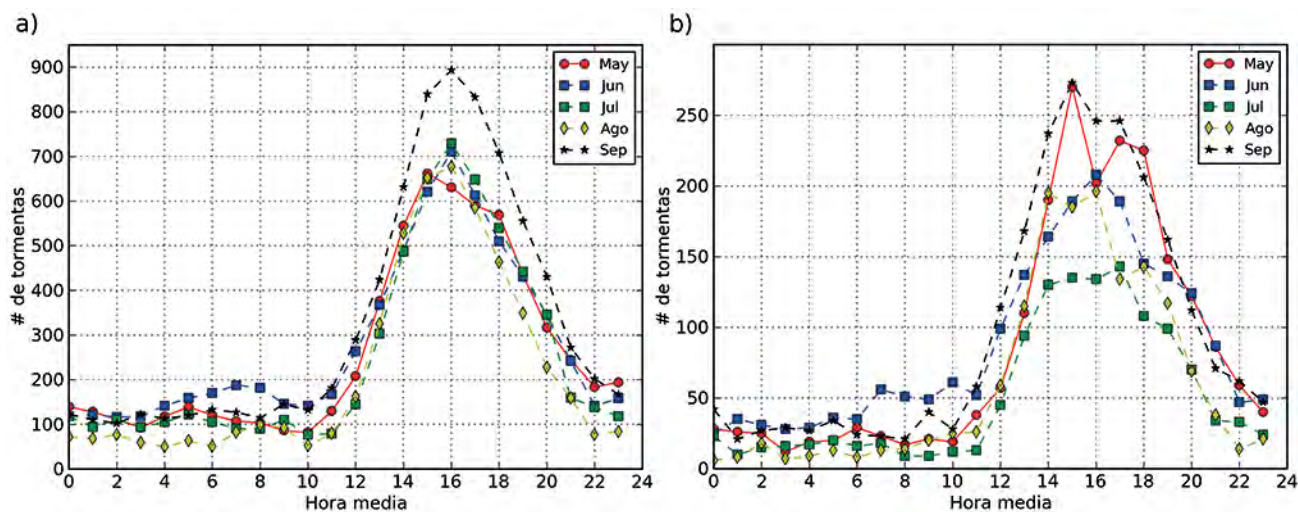


Fig. 10 Marcha diaria por mes para el año promedio: a) número de tormentas sobre la tierra; b) número de tormentas sobre la tierra con topes entre 6 km y 8 km.

para el año promedio. Semejante a lo documentado por Núñez *et al.* (1999), la densidad máxima sobre la tierra se alcanza en junio, seguido de septiembre, y existe un máximo secundario sobre el mar en junio. Sin embargo, el máximo absoluto sobre el mar no se alcanza ahora en septiembre, sino en octubre; debe tenerse en cuenta que el radio de observación en el estudio citado fue de 300 km, lo cual podría haber incidido en las diferencias observadas por la enorme área marina agregada.

Las curvas de mar y tierra para un año determinado presentan la misma forma general en cuanto a las posiciones de máximos y mínimos; la amplitud de la variación sobre tierra resulta siempre mayor, con excepción de 2007, aunque existe gran variabilidad entre años diferentes.

La figura 10b muestra el ciclo diurno por meses para el número de tormentas del año promedio. De igual modo a lo encontrado por Núñez *et al.* (1999), la mayor cantidad de ecos ocurrió entre las 13 HL y las 19 HL para cualquier mes entre mayo y septiembre, con el máximo absoluto a las 16 HL, excepto para mayo, cuando el máximo ocurre a las 15 HL, disminuyendo el número de tormentas más lentamente que en el resto de los meses (junio-septiembre). Du-

rante septiembre, el número de ecos, al pasar las 12 HL, supera las cifras registradas para el resto de los meses; los horarios comprendidos entre las 14 HL y las 19 HL, resultan los de mayor diferencia.

Dada la similitud de la altura media de las isotermas relevantes para la siembra de nubes en las regiones occidental y centro-oriental de Cuba (Martínez Castro *et al.*, 2004), para el occidente puede extrapolarse que las nubes con topes entre 6 km y 8 km resultan las más recomendadas con miras a realizar la siembra con yoduro de plata. La figura 10b presenta la marcha diaria del número de tormentas detectadas que cumplen esta propiedad; en la distribución por meses se evidencia que septiembre y mayo son los que presentan un mayor número de ecos con posibilidades de siembra en el intervalo de 13 a 19 horas. El máximo absoluto para estos dos meses se halla a las 15 horas, en el mismo horario que el máximo de la actividad convectiva para mayo, pero 1 h antes para septiembre, hecho que concuerda con lo registrado en la región centro-oriental. Para mayo es destacable el hecho de que, siendo uno de los meses de menor actividad convectiva, iguale con septiembre (el de mayor actividad) en relación con el número de ecos buenos para la siembra. Durante julio y agosto no

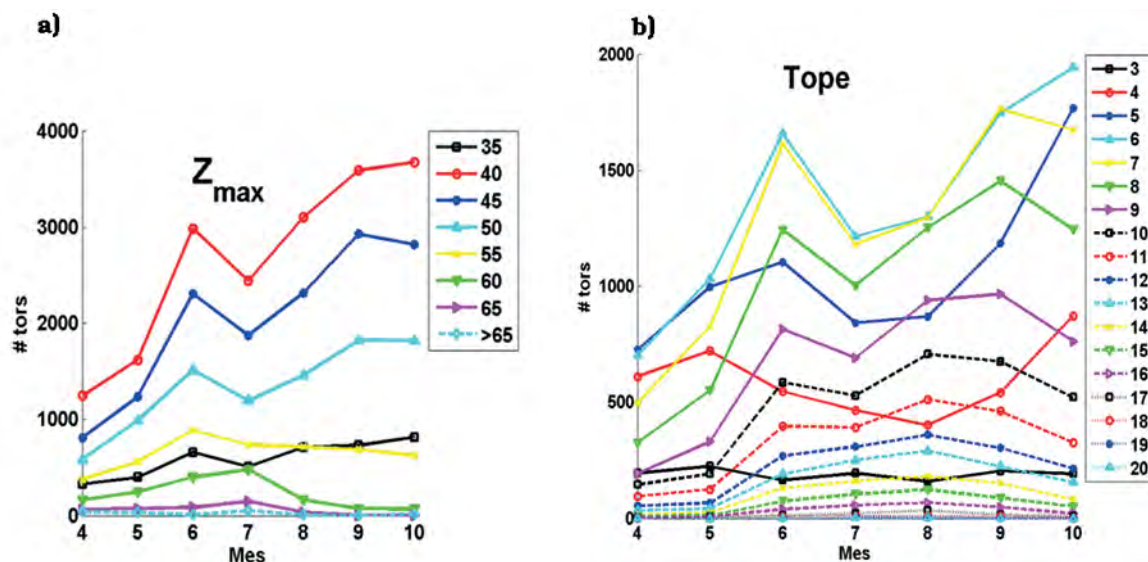


Fig. 11 Marcha anual: a) de la reflectividad máxima para el año promedio, b) de cada tope para el año promedio.

aparece un máximo bien definido, sino que permanece constante el número de ecos en el horario de la tarde.

La figura 11a muestra la marcha anual de las intensidades máximas ZM o Z_{max} obtenidas para el año promedio. Es evidente que la reflectividad máxima más frecuente en el período analizado (abril a octubre) es 40 dBZ, lo cual coincide con el reporte de 39 dBZ en Núñez *et al.* (1999). Sin embargo, allí reportaron 33 dBZ y 45 dBZ como la segunda y tercera intensidades máximas más frecuente en este mismo período, mientras que aquí ocupan esos lugares los valores de 45 dBZ y 50 dBZ, respectivamente, lo cual podría indicar una intensificación de las tormentas entre aquella fecha y esta, pero es probable que se deba a la diferencia entre las resoluciones y las metodologías de procesamiento.

Otra semejanza con Núñez *et al.* (1999) es que allí los tres valores de Z_{max} más frecuentes (33 dBZ, 39 dBZ y 45 dBZ) alcanzan sus mayores frecuencias en septiembre, mientras que en la figura 11a se evidencia que, de los tres más frecuentes, existen dos valores (45 dBZ y 50 dBZ) que consiguen sus mayores frecuencias también en septiembre, en tanto que la mayor frecuencia (40 dBZ) se logra en octubre. Las curvas de la figura 11a pueden dividirse en dos grupos: el primero, agrupa las Z_{max} entre 35 y 50 dBZ, con dos máximos bien definidos (absoluto en septiembre u octubre y secundario en junio) y un mínimo pronunciado durante el verano en julio; el segundo, incluye las Z_{max} entre 60 dBZ y > 65 dBZ, con un único máximo en julio y su mínimo absoluto en septiembre u octubre. La curva correspondiente a 55 dBZ constituye la transición entre ambos grupos.

La marcha anual de los topes TM (Fig. 11b) de las nubes para el año promedio indica que el tope más frecuente durante el período analizado es 6 km, lo cual coincide con el promedio de los topes más frecuentes obtenidos por Núñez *et al.* (1999) para este período. Las curvas de tope pueden agruparse en dos

grupos: el primero abarca los topes entre 5 km y 11 km, y presenta dos máximos bien definidos (el absoluto, que se corre de octubre a agosto a medida que aumenta el tope, y el secundario, que es siempre en junio), con un mínimo pronunciado en julio; el segundo, comprende los topes por encima de 11 km, con un único máximo en agosto o julio y sin mínimos durante el verano.

Conclusiones

Se obtuvo una caracterización estadística de las propiedades de los radioecos de nubes convectivas observados por los radares de Camagüey y Casablanca, en el primero de estos, mediante observaciones volumétricas cada 5 min. Para ello, se utilizaron los algoritmos de detección y seguimiento de tormentas descritos en Novo (2009).

En la región centro-oriental del país, las tormentas se ubican, preferentemente, sobre la tierra, hacia el centro y la costa sur del país. El ciclo diurno del número de tormentas indicó que el máximo de actividad convectiva se alcanza sobre la tierra, alrededor de las 16 **HL**, mientras que sobre el mar se obtiene sobre las 20 **HL**, con un máximo secundario cerca de las 9 **HL**.

Según los valores de la reflectividad máxima y los topes de las trayectorias, las tormentas convectivas son más intensas sobre la tierra, y su intensidad resulta inversamente proporcional a la velocidad media de desplazamiento para cada día. Durante los días de convección relativamente débil y con un movimiento relativamente rápido de las tormentas, el pico de mayor convección ocurre, como promedio, más temprano (entre las 15 y las 16 horas) que durante los días de fuerte convección (17 horas), lo cual se explica a partir de los perfiles verticales de la humedad relativa observados en cada grupo de días. Para que se produzca convección intensa, es necesario saturar y

hacer crecer hasta el tamaño de gotas de lluvia una capa troposférica seca más profunda en niveles medios, lo cual requiere de más tiempo. El horario en que aparece la mayor cantidad de topes entre 6 km y 8 km (momento propicio para la siembra) resultó el de las 15 horas.

La mayor cantidad de ecos se originan alrededor de las 16 horas; los meses de mayor convección son junio y septiembre, con un mínimo intraestival en julio para los horarios de mayor convección (entre las 13 horas y las 19 horas). Los topes y las reflectividades máximas más frecuentemente observadas están entre 5 km y 8 km, y entre 40 dBZ y 50 dBZ, respectivamente. Los años 2005 y 2006 se diferencian notablemente de 2007 y 2008 en cuanto a la distribución anual del número de tormentas, sobre todo al final de la temporada lluviosa.

Referencias bibliográficas

- 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.
- CÓRDOBA, L. 1992. *Patrones de reconocimiento para las nubes convectivas en el occidente de Cuba como base para el pronóstico a muy corto plazo, por radar*. Tesis presentada en opción al grado de doctor en Ciencias Geográficas, Instituto de Meteorología.
- CÓRDOBA, L., GONZÁLEZ, E. & 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.
- CRUZ, L. A. 1973. “Venezuelan rainstorms as seen by radar”, *J. Appl. Meteorol.*, 12, 119–126.
- CURTIS, S. & GAMBLE, D. W. 2008. “Regional variations of the Caribbean mid-summer drought”, *Theor. Appl. Climatol.*, 94, 25–34.
- DIXON, M. & WIENER, G. 1993. TITAN: “Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting –A radar-based methodology”, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 10, 785–797.
- 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.
- KOLOSKOV, B., ZIMIN, B., BELIAEV, V., SEREGIN, Y., CHERNIKOV, A., PETROV, V., VALDÉS, M., MARTÍNEZ, D., PÉREZ, C. & PUENTE, G. 1996. “Results of Experiments on Convective Precipitation Enhancement in the Camagüey Experimental Area. Cuba”, *Jour. Appl. Meteor.*, 45, 1524–1534.
- MARTÍNEZ, D., PÉREZ, C. A., BELIAEV, V. & 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. & PETROV, V. 1995. “Espectros de potencia de la velocidad del viento en las nubes convectivas tropicales sobre Cuba”, *Atmósfera*, 8, 65–80.
- MARTÍNEZ, D., RIVERO, I. & BÁEZ, R. 2002. “Caracterización estadística de los perfiles meteorológicos de Camagüey en horas de la tarde y su relación con la lluvia”, *Rev. Cub. Meteorol.*, 9.
- MARTÍNEZ, D., POZO, D., RIVERO, I., GAMBOA, F.,

- NOVO, S., BORRAJERO, I., BEZANILLA, A., PÉREZ, C., BÁEZ, R. & HECHAVARRÍA, E. 2004. *Aplicación de la simulación numérica y el análisis de mesoescala a la investigación de los procesos físicos en las nubes y la lluvia sobre Cuba*. Informe Científico del Instituto de Meteorología de Cuba, Biblioteca del INSMET, 259.
- MARTÍNEZ, D., PÉREZ, C., KOLOSKOV, B., KORNEEV, V., PETROV, V., STRUNIN, M., GAMBOA, F. & NOVO, S. 2011. “Randomized convective cloud seeding experiment in extended areas in Cuba (EXPAREX)”, *Rev. Bras. Meteorol.*, 26, 515–528.
- MAY, P. T. & BALLINGER, A. 2006. “The statistical characteristics of convective cells in a monsoon regime (Darwin, northern Australia)”, *Mon. Wea. Rev.*, 135, 82–92.
- NOVO, S., MARTÍNEZ, D., PÉREZ, C., KOLOSKOV, B. & GAMBOA, F. *Radar tracking method for cloud seeding experimental units over Cuba*. Proceedings of 15th International Conference on Clouds and Precipitation, 2008, Cancun, México.
- NOVO, S. 2008. “Seguimiento automático de tormentas convectivas por radar”, *Rev. Bras. Met.*, 23.
- NOVO, S. 2009. *Pronóstico inmediato del movimiento y crecimiento de radioecos de precipitación sobre Cuba: aplicación al seguimiento de áreas convectivas extensas*. Tesis de doctorado, Instituto de Meteorología, CITMA, 180 pp.
- NOVO, S. & PUENTES, O. *Propiedades de las tormentas convectivas observadas por el radar de Casablanca, La Habana*. Memorias del 6to. Congreso Cubano de Meteorología, 2011, La Habana, Cuba.
- NOVO, S., MARTÍNEZ, D. & PUENTES, O. 2013. “Tracking, analysis and nowcasting of Cuban convective cells as seen by radar”, *Meteorological Applications*.
- NÚÑEZ, O., GONZÁLEZ, A., CÓRDOBA, L., REGO, J., PÉREZ, M. & VALDÉS, R. 1990. *Caracterización macroscópica de las nubes sobre Cuba a partir de la información de radar*. Capítulo 1 del informe: “Caracterización general de las nubes convectivas sobre Cuba”, Instituto de Meteorología, Cuba, 50 pp.
- PEÑA, A., RODRÍGUEZ, O., PÉREZ, M., NARANJO, R., FERNÁNDEZ, L., BARREIRAS, A., MARTÍNEZ, A. & RODRÍGUEZ, M. D. 2000. “Modernization of the Cuban weather radar network”, *Phys. Chem. Earth (B)*, 25, 1169–1171.
- POZAS, W. 2003. *Vesta|Distribuidor versión 1.2.7.0. Distribuidor automático de productos Vesta para radar meteorológico*. Laboratorio de Desarrollo Técnico, Centro Meteorológico de Camagüey.
- POZAS, W. 2007. *Vesta|Proceso versión 5.3.13.0*. Laboratorio de Desarrollo Técnico, Centro Meteorológico de Camagüey.
- PUENTES, O. 2010. *Caracterización estadística de los ecos convectivos observados por el radar de Camagüey*. Tesis de diploma, Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas, CITMA, 85 pp.
- PUENTES, O. & NOVO, S. 2011. *Estudio de las tormentas convectivas observadas por el radar de Camagüey, Cuba*. Memorias del 6to. Congreso Cubano de Meteorología, La Habana, Cuba.
- RODRÍGUEZ, O., FERNÁNDEZ, L., NARANJO, R., BARREIRAS, A., PEÑA, A., DIEZ, M., POZAS, W., AGUIAR, M. & PEREZ, J. 2005. *The Cuban weather radar network: current status and trends*. Proceedings of 32nd International Conference on Radar Meteorology, Albuquerque, NM, USA, 24–28 oct.
- VALDÉS, M., MIRANDA, A & LOBODIN, V. 1978a. “Estudio de los radioecos de nubes cúmulos tropicales en Cuba”, *Boletín del INSMET* no. 1, Academia de Ciencias de Cuba, 6 pp.
- VALDÉS, M., MIRANDA, A., GARCÍA, J. 1978b. *La coalescencia en las nubes cúmulos superenfriadas*. Informe Científico-Técnico no. 51, Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, 6 pp.