

Evaluación espacial del pronóstico de precipitación del modelo ARPS, para la campaña de incremento artificial de la lluvia en el occidente de Cuba

Space evaluation of the pronostic of the ARPS model, for the rain artificial increment campaign in eastern Cuba

Nivian Quintana Rodríguez

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología de Cuba
nivian.quintana@insmet.cu

Maibys Sierra Lorenzo

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología de Cuba
maibys.lorenzo@insmet.cu

Entregado: 11 de octubre 2012; aceptado: 3 de noviembre 2012.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el pronóstico de precipitaciones realizado por el modelo tridimensional de microfísica parametrizada ARPS (Advanced Regional Prediction System), el cual se utilizó en la Campaña de Incremento Artificial de la Lluvia en el Occidente de Cuba, del 23 de agosto de al 3 de octubre de 2011. El enfoque de evaluación seleccionado fue el espacial, con la metodología orientada a objetos. Como método para la identificación de los objetos se utilizó el detector de bordes de Canny, que suaviza la imagen original mediante una convolución Gaussiana; luego, al campo suavizado se le aplicó el operador de Sobel con énfasis en las regiones de frecuencias espaciales altas, y para agruparlas se utilizó la envoltura convexa con el algoritmo QuickHull (Bradford *et al.*, 1996). Entre los resultados principales se obtuvo que las simulaciones realizadas representan correctamente las características de los sistemas convectivos que provocaron la precipitación, como son las líneas de convección organizada, los conglomerados nubosos y las formaciones de celdas simples. Además, los horarios comprendidos entre las 1600 horas y las 1700 horas resultaron los de mayor correspondencia entre las áreas calculadas, y mostraron mayor similitud en los cuadrantes I y II. El

modelo pronosticó bien las áreas de precipitaciones, aunque en varias ocasiones experimentó cierto desfase en el momento de ocurrencia de estas, que osciló entre 30 min y 3 h, y un desplazamiento del área, en general, hacia el sur de la zona real observada.

PALABRAS CLAVE: Evaluación espacial, envolturas convexas, precipitaciones, pronóstico.

Abstract

The current work's purpose is to evaluate the precipitation forecast made by the 3 dimensional model ARPS (Advanced Regional Prediction System) with parameterized microphysics that was used during the artificial rain enhancement campaign held in the Western region of Cuba from August 23rd 2011 until October 3rd the same year. A spatial evaluation approach was chosen with an object oriented methodology. As a method for the identification of objects the Canny borders detector was used, which smoothen the original image by means of a Gaussian convolution, followed by a Sobel operator that highlights the regions with high spatial frequencies, then the QuickHull (Bradford *et al.* 1996) convex envelope algorithm was used to group regions. Among the main results stands that the simulations made reproduced correctly the characteristics of the con-

vective systems that yielded precipitation such as organized convection lines, cloud clusters and simple cells. Also forecasts between 16:00 and 17:00 hours held the greatest correspondence between calculated areas, which showed greatest resemblance on quadrants I and II. The model forecasted correctly most precipitation areas, though it occasionally had a time shift that ranged between 30 minutes and 3 hours and some space shift generally Southward of the observed zones.

KEYWORDS: Spatial assessment, convex hull, precipitation, forecast.

Introducción

En los últimos años, los métodos para evaluar los pronósticos numéricos se hacen cada vez más complejos y se han aplicado a modelos que pronostican a escalas cada vez más pequeñas. Lamentablemente, los enfoques tradicionales para la verificación de los pronósticos espaciales, incluidos los métodos de evaluación cuantitativos de los pronósticos de precipitación y la convección, son insuficientes para satisfacer las necesidades actuales. Por lo general, las técnicas de verificación se han basado, fundamentalmente, en observar de forma sencilla si una malla de datos pronosticados se corresponde con una red de observación o con un conjunto de puntos de observación. A partir de estas superposiciones se determinan los casos en que coinciden o no las observaciones y los pronósticos, y se obtiene una tabla estándar de contingencia de 2 x 2 de las pruebas fallidas y acertadas (si o no) (Wilks, 1995). Estos resultados pueden utilizarse para calcular una variedad de medidas de verificación que caracterizan las muestras, tales como la probabilidad de detección, la proporción de falsas alarmas y el índice crítico de éxito (Doswell *et al.*, 1990; Wilks, 1995). Estas estadísticas, que representan un método de verificación con un “enfoque orientado a las medidas”, proporcionan los números

que pueden emplearse para supervisar el rendimiento del sistema en el tiempo; sin embargo, no aportan información específica sobre la forma en que el pronóstico fue o no erróneo. En este trabajo se utilizó un método de evaluación del pronóstico que identifica las áreas de precipitación y todos sus atributos con un mayor grado de especificidad, lo cual se conoce como método de evaluación orientado a objetos.

Ebert y McBride, en 2000, fueron los primeros en explorar la definición y la verificación de las precipitaciones identificando entidades contiguas, o sea, determinando áreas; de este modo, identificaron las áreas de lluvia, tanto en los pronósticos, como en las observaciones, y determinaron los errores de desplazamiento y otros parámetros para las regiones contiguas. Las estadísticas acumuladas por los errores de posición pueden obtenerse calculando estadígrafos, tales como la media, el error, etc. El método elaborado por ellos permite descomponer los errores de acuerdo con sus fuentes (el desplazamiento, la orientación, etc). Los métodos de evaluación orientados a objetos son, especialmente, relevantes dado el impulso que se ha dado hacia los pronósticos de mayor resolución y su posterior verificación, puesto que los procesos representados tienen una gran influencia de los fenómenos locales, como son las precipitaciones, que son muy localizadas y episódicas, la turbulencia, etc. Davis *et al.*, 2005, desarrollaron un método para delimitar las zonas de lluvia con la finalidad de evaluar la precipitación y evaluaron el desempeño del WRF en una cuadrícula de 22 km que cubre los Estados Unidos (la parte continental), en el período julio-agosto de 2001 con los datos de precipitaciones observadas extraídos de la página NCEP. En su trabajo definen los objetos o áreas de la precipitación en los pronósticos y las observaciones sobre la base de una convolución (suavizado) y un procedimiento de umbral. Otros intentos de verificación orientados a objetos han aparecido en la literatura; por ejemplo, Smith y Mullen (1993) quienes lo utilizaron para

evaluar pronósticos de ciclones tropicales; Case *et al.*, 2004, para las brisas marinas; Nachamkin (2004), Nachamkin *et al.* (2005), Rife y Davis (2005), para el flujo inducido por el terreno; y Fowle y Roebber (2003), para los pronósticos de convección profunda y la humedad. Los estudios más recientes se centran, en lo fundamental, en modelos de mayor resolución, enfrentando el reto de la complejidad de los procesos físicos que estos modelos son capaces de representar.

Pozo (2003) adaptó el modelo tridimensional ARPS (Xue *et al.*, 1995, 2000, 2001), RAMS (Cotton *et al.*, 1982; Flatau *et al.*, 1989, Tremback, 1990), etc., para simular la formación y desarrollo de sistemas convectivos de mesoescala en condiciones tropicales. En la actualidad, se utiliza el modelo ARPS (en su versión 5.2.12) de forma operativa en el Centro de Física de la Atmósfera para determinar las zonas más probables de formación de nubosidad convectiva y la posible ocurrencia de precipitaciones sobre las provincias occidentales, dentro del proyecto de Incremento Artificial de las Precipitaciones, contexto en el cual se desarrolló la Campaña Operativa de Incremento Artificial de la Lluvia en las Provincias Occidentales, en 2011, y donde se utilizó por vez primera este modelo de forma experimental para el pronóstico. Este artículo presenta un método de evaluación orientado a objetos que está dirigido a verificar la habilidad del modelo ARPS para pronosticar fenómenos de escala local, como la lluvia. Por tanto, su objetivo es evaluar espacialmente el pronóstico de precipitación del modelo ARPS a partir de los datos estimados por el radar meteorológico en el occidente del país, durante la Campaña de Incremento Artificial de la lluvia de 2011. Con miras a lograr este objetivo, será necesario comparar las salidas del modelo para el campo de las precipitaciones con los datos obtenidos sobre la base de las observaciones del radar meteorológico de Casa Blanca, y calcular las envolturas que delimiten las áreas de precipitaciones pronosticadas y observadas.

Materiales y métodos

El ARPS se corrió utilizando un dominio para las simulaciones de 203 x 101 puntos en la horizontal por 35 niveles verticales con 1 km de resolución espacial; el paso de integración fue cada 6 s y las salidas se escribieron cada 30 min. El dominio fue centrado en los 22,80 grados norte y los -82,05 grados oeste. En la configuración utilizada para esta investigación no se tuvieron en cuenta las condiciones de fronteras dinámicas, por la complejidad del procedimiento de implementación; se utilizaron la advección de momento de segundo orden y una parametrización de la turbulencia a escala de subrejilla (del orden de 1.5), que se realiza mediante la solución de una ecuación de pronóstico adicional para la energía cinética turbulenta. Se incluyó, además, el esquema de parametrización de la microfísica de Kessler (1969) para la fase líquida y de Lin *et al.* (1983) para los procesos de fase sólida y mixta; este último utiliza una variante de la parametrización de Berry (1967) para la autoconversión de la lluvia. Se tuvieron en cuenta los procesos radiativos, el terreno y el uso de suelos, y se introdujo un campo tridimensional como condición inicial para realizar las corridas; en este caso, se utilizaron los datos de salida del modelo MM5V3, que es corrido en el centro de Física de la Atmósfera de manera operativa, y la salida del dominio 3, la cual presenta una resolución de 9 km, con una malla de 97 x 187 nodos que extiende entre los 18 y 25°N y entre los 75 y 87°W, donde se incluyen Cuba y los mares adyacentes. Se inició el ARPS con la salida de las 12Z del MM5v3 que, a su vez, fue inicializado con la salida de las 00Z del modelo global GFS.

Evaluación del pronóstico de precipitación, evaluación orientada a objetos

El primer paso en este enfoque evaluativo es la identificación de los objetos, tanto en las observaciones,

como en el pronóstico realizado; en nuestro caso, se propone el método de detección de bordes desarrollado por Canny (1986), el cual reduce considerablemente la cantidad de información en una imagen y, a un tiempo, mantiene la estructura de los bordes de los objetos más significativos de la misma. Este algoritmo es muy utilizado en la detección de patrones en imágenes. El detector de bordes de Canny, primeramente, suaviza la imagen original mediante una convolución Gaussiana, con lo cual se obtiene una imagen difuminada que, en nuestros datos, se traduce en una aproximación más suavizada de estos y, por ende, se eliminan los detalles y el ruido en los datos, entretanto permite agrupar áreas de precipitación. Luego, al campo suavizado se le aplicó el operador de Sobel, que calcula el gradiente espacial bidimensional enfatizando las regiones con frecuencias espaciales altas, las cuales se corresponden con los bordes; el resultado es un conjunto de datos reducido, con una variación fuerte del gradiente. Con el objetivo de reducir a una línea delgada los bordes encontrados, se realiza un proceso de eliminación de los puntos que no son máximos y a los cuales se les da valor cero (0), en cuyo proceso se utiliza el método de histéresis para evitar la creación de falsos bordes; por último, se obtiene una matriz binaria donde los puntos con valor uno (1) corresponden con los bordes.

El siguiente paso en nuestra metodología fue dividir el área estudiada en cuatro sub-áreas (Fig. 1), con la finalidad de hacer una evaluación más local teniendo en cuenta diferencias en el terreno y sus características físico-meteorológicas. En cada subregión, con los objetos identificados mediante el detector de bordes de Canny, se calculó la envoltura convexa con vistas a encontrar el polígono convexo que contenga los puntos de los bordes; entre los algoritmos existentes para hallar la envoltura convexa de un conjunto de puntos, se seleccionó el QuickHull (Bradford *et al.*, 1996). La idea esencial es descartar los puntos que no pertenecen a la envoltura lo más

rápido posible, para lo cual se calcula la arista extrema que puede formarse en el conjunto de puntos iniciales, es decir, los dos puntos con coordenadas x e y máximas, y mínimas; luego se encuentra un tercer punto que maximice el área del triángulo, que se forma entre este y los dos anteriores (se descartan todos aquellos que están contenidos en el triángulo). Seguidamente, se toma una arista con los puntos que quedan a su izquierda y se repite el proceso anterior; este paso se realiza con cada arista del triángulo. Para el tratamiento de las imágenes y con miras a realizar los cálculos de las envolturas convexas se utilizó el *Toolbox* de Matlab desarrollando un software que calcula las áreas de precipitación en ambos campos.

I	II
III	IV

Fig. 1 La figura muestra la forma en que fue dividida el área de estudio para facilitar el cálculo y realizar de forma más objetiva las comparaciones entre las áreas de precipitaciones observadas con las estimadas por el radar.

Una vez encontrados los polígonos para cada juego de datos (observado y pronosticado) por cada subregión, se calcularon las propiedades que se explican a continuación.

Propiedades de los objetos

Según el propósito de la evaluación realizada se calcularon las siguientes propiedades para cada par de objetos (o envoltura convexa) encontrado:

1. **Área:** Medida del tamaño del objeto. Como en el mismo polígono convexo existen distintas áreas agrupadas, también existen espacios vacíos.
2. **Centroide:** Centro de masa del objeto. Se utiliza para tener una medida de la distancia entre objetos.
3. **Orientación:** Permite conocer la dirección de cada objeto.

4. *Distancia*: Se define con la distancia entre los centroides de los objetos. Proporciona una idea del desplazamiento que existe entre los objetos pronosticados y observado.
5. *Razón de aspecto*: Razón entre el área de los objetos observado y pronosticado.
6. *Diferencia*: Indica la diferencia en tamaño.
7. *Intersección*: Permite conocer el solapamiento entre los objetos.

Datos utilizados

La evaluación del modelo se realizó con los datos de precipitación estimados por el radar meteorológico de Casa Blanca, utilizando como herramienta el Vesta/Proceso (Pozas 2007), los cuales se representan en una malla de puntos distribuidos espacialmente en celdas de 1 km², y se corresponden con los puntos de la rejilla que da como salida el modelo ARPS. Para su obtención se tomaron las observaciones del radar cada 5 min, en el período comprendido entre el 23 de agosto y el 3 de octubre de 2011, exceptuando 17 días en que no se contó con la información del radar meteorológico por deficiencias en su funcionamiento, o sea, de los 40 días comprendidos en esta etapa se trabajó con 26. La comparación se efectuó con las salidas de los acumulados de precipitación cada 0,5 h que realiza el modelo en corridas desde las 18 Z hasta las 00Z (1400-2000 hora local).

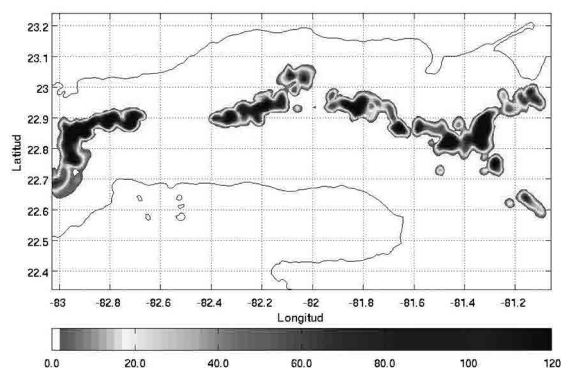
Análisis de los resultados

Se estudiaron los días en los cuales, durante la campaña, pudo observarse la existencia de condiciones para la ocurrencia de precipitaciones a causa, fundamentalmente, de la convección local; los procesos de lluvias fueron incentivados en su mayoría por fenómenos mesoescalares, aun cuando existía la influencia de sistemas sinópticos que perturbaran en cierta medida el ambiente.

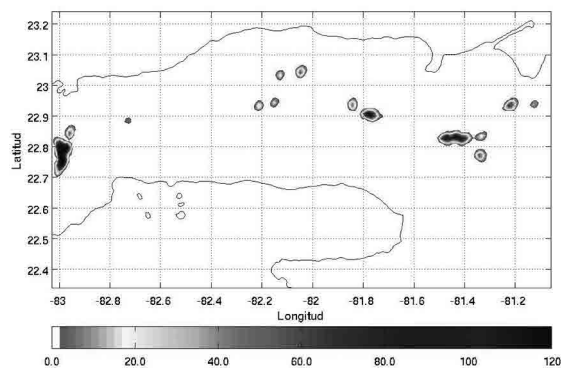
El modelo ARPS erró en el pronóstico 4 días de los 26 estudiados (5, 10 y 20 de septiembre, y 1ro. de octubre de 2011); en este sentido, se consideró como error cuando se pronosticó la precipitación y no se observó por el radar, así como cuando no la pronosticó y se produjo. Se definió como día de acierto cuando el modelo fuera capaz de pronosticar, al menos, un área de precipitaciones que se pudiera asociar en cuanto a ubicación a las áreas de precipitaciones estimadas por el radar, aunque estas no coincidieran en tamaño y horario de ocurrencia.

De los días acertados se encontró que el modelo identifica bien las áreas de acumulados de precipitación que tienen lugar por la formación de líneas de convección organizada, conglomerados nubosos y nubes aisladas o celdas simples (Fig. 2). No obstante, el modelo presentó deficiencias para pronosticar la convección marítima que se traslada hacia el polígono en horarios intermedios del pronóstico, lo cual está relacionado con la configuración utilizada para realizar las simulaciones, que no considera condiciones de fronteras dinámicas, o sea, estas condiciones no se van actualizando a medida que se integran las ecuaciones del modelo. Además de los errores que se pueden introducir al aumentar la resolución de 9 km que tenían los datos del MM5 a 1 km con que se corrió el ARPS, destacando también que el modelo tarda aproximadamente una hora de corrida en ajustarse.

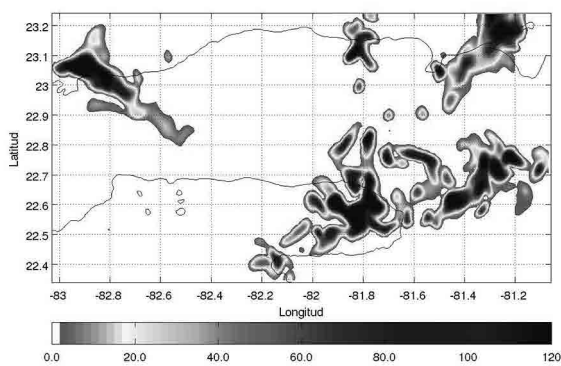
Del análisis del resto de los días se encontró que el modelo experimentó un desfase en el tiempo con respecto a lo observado por las imágenes del radar; este desfase varió desde 30 min hasta 3 h, donde los períodos más usuales fueron de 1 h y 2 h de corrimiento en el tiempo. Cabe destacar que en la mayoría de los casos ocurrió un retraso respecto a las observaciones, lo cual puede estar relacionado con la capacidad del modelo de autoajustarse y estabilizarse una vez que pasa el tiempo y asimila las condiciones de inicialización. Por tanto, se estableció que un pronóstico puede considerarse acertado cuando el



a) Patrones de línea



b) Celdas simples



c) Conglomerados

Fig 2. Áreas de precipitaciones pronosticadas por el ARPS asociadas con la formación de líneas de convección organizada (a), con nubes aisladas o celdas simples (b) y con conglomerados nubosos (c).

desfasaje en el tiempo respecto de lo realmente observado por el radar meteorológico es menor o igual a 2 h, bien sea de retraso o adelanto. Esto se definió teniendo en cuenta que la mayoría de los procesos físicos responsables de la ocurrencia de las precipitaciones que se estudian en este trabajo tienen un período de duración aproximado de 1 h y considerando el tiempo de autoajuste del modelo. Asimismo, es importante resaltar que los horarios de pronóstico que mejores resultados arrojaron en cuanto a coincidencia de áreas fueron los comprendidos entre las 1600 horas y las 1700 horas. La figura 3 muestra un caso representativo de 80.7 % de los días del experimento (15 de septiembre de 2011), donde se aprecian, con las barras de color rojo, las áreas calculadas con los datos del ARPS y, con las barras azules, las áreas calculadas a partir de los datos estimados por el radar; se escogió un ejemplo porque resultó muy engorroso representar por cuadrantes cada día de la muestra por todos los plazos temporales de corrida.

También se calcularon los valores medios por días para las áreas de intersección de las envolturas convexas calculadas para los datos pronosticados y los observados en cada cuadrante, y los valores medios por días de las distancias entre estas áreas por cuadrantes, los cuales muestran los desplazamientos por cuadrantes, o sea, las distancias entre las envolturas observadas y las pronosticadas. Esta tarea se realizó haciendo coincidir los horarios de las observaciones y los pronósticos; por ello, en muchos casos se observaron diferencias notables superiores a 50 km, lo cual se mejoró al realizar una corrección considerando el desfase de los pronósticos (estos valores estuvieron inferiores a 40 km).

Se determinó que en el primer cuadrante la mayor distancia entre las áreas fue 75.111 km (observada el 27 de septiembre, a las 1700 horas), mientras que el valor más bajo, o sea, el menor desplazamiento fue de 1.24 km. En el segundo cuadrante, el mayor desplazamiento se observó el 25 de septiembre, a las 1730 horas,

y fue de 68.202 km; entretanto, el más pequeño fue de 3.819, el día 24 de septiembre, a las 1730 horas (más adelante, en los casos de estudio, este día se analiza en detalle). Por su parte, en el tercer cuadrante, el mayor desplazamiento fue de 70.627 km y se observó el 11 de septiembre, a las 1530 horas, mientras que el menor fue de 1.2548 km (el 23 de agosto, a las 1830 horas). Por último, en el cuarto cuadrante, el mayor desplazamiento observado fue de 93.543 km (el 3 de septiembre, a las 1800) y resultó el mayor de toda la muestra; el más pequeño fue de 2.906 km, correspondiente al 23 de agosto, también a las 1800 horas.

De igual forma, se calculó la *razón de aspecto*, índice que relaciona las áreas pronosticas y las observadas, o sea, determina la razón de las áreas pronosticadas que fueron observadas en la realidad; valores muy cercanos a la unidad (1) indican la gran similitud entre de las envolturas pronosticadas y las observadas, mientras que valores muy elevados (superiores a 1) sugieren la deficiencia del modelo al subestimar en los pronósticos las áreas de precipitación; entretanto, para valores muy pequeños (inferiores a 1) el modelo sobrestima las precipitaciones (Tabla 1). Este índice resultó de suma importancia puesto que aunque las áreas pronosticadas no se interceptaran con las observadas por presentar desplazamientos o cambios en su orientación, estas coincidían en forma, tamaño y cuadrante, lo cual evidencia que el modelo no está totalmente errado.

Otro aspecto importante que se encontró fue una variación en la orientación de las áreas encontradas, hecho que se establece al observar patrones de áreas que presentaban la misma forma y que, sin embargo, no coincidían al realizar la superposición de los campos; no obstante, las zonas donde se pronosticó la precipitación en estos casos siempre fueron bien identificadas, como es el caso del 28 de agosto de 2011.

Una característica significativa fue el corrimiento en las zonas donde se pronosticaron las áreas de acumulados de precipitación; el modelo, por lo general,

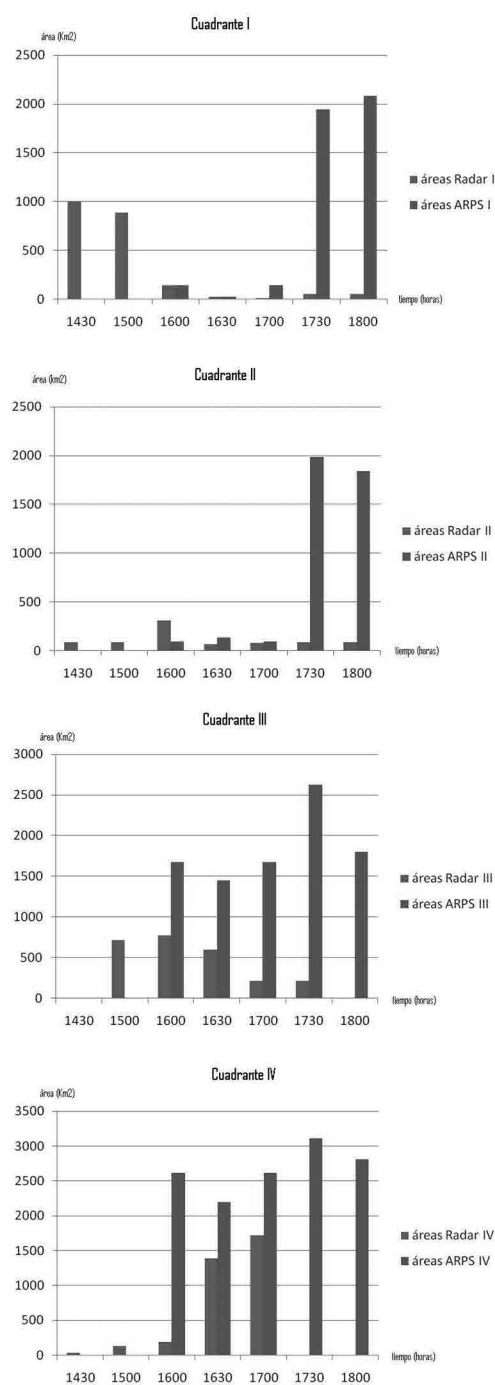


Fig. 3. Se muestra el ejemplo del 15 de septiembre de 2011. Se graficaron las áreas pronosticadas (en color rojo) y las observadas por cuadrantes (en color azul). Puede observarse que los valores de las áreas pronosticadas en los horarios intermedios (1600 horas a 1700 horas) son más cercanos a los valores de las áreas estimadas por el radar. La imágenes están organizadas por cuadrantes (I - a), (II - b), (III - c) y (IV - d).

Tabla 1 Valores medios por días de la razón de aspecto por cuadrantes

Días	radiomed1	radiomed2	radiomed3	radiomed4
23/08/2011	61.4893174	27.15	0.62289837	8.77041847
24/08/2011	4.4464	0.93581	1.14520011	-
26/08/2011	0.92738454	0.94082184	0.97105339	1.88782815
28/08/2011	0.42071229	2.25434455	0.47964145	1.94272241
03/09/2011	19.8972942	123.485047	15.75	10.2770719
05/09/2011	7.51751708	3.14705607	0.95525972	-
08/09/2011	80.9545739	1.03664801	-	3.6552
09/09/2011	0.91539043	1.21815806	0.015805	0.85924363
10/09/2011	198.998624	10.2017578	360.83	0.7151668
11/09/2011	166.12	129.851036	11.1864316	0.11755213
13/09/2011	2.77841433	0.80790153	0.20232408	0.34806567
15/09/2011	0.14416449	0.56707416	0.22145516	0.10824423
17/09/2011	11.5	3.22050377	253.336843	1.76326858
18/09/2011	-	296.5	-	2.9091
19/09/2011	12.3742895	10.1168672	1.01219629	0.85650556
20/09/2011	-	-	-	-
21/09/2011	7.50482311	79.4646786	-	1.57
22/09/2011	6.33782244	0.88166298	-	2.56581697
23/09/2011	1.02867398	2.95937894	-	0.43695984
24/09/2011	4.20692645	2.31114331	0.68109896	1.15240695
25/09/2011	4.0367	6.54476105	-	0.11701787
26/09/2011	2.16701851	1.27504153	0.45597544	0.10695591
27/09/2011	4.47496159	0.30715229	198.92	10.6578107
30/09/2011	0.7918955	0.95037984	0.85120351	10.7666384
01/10/2011	1.41354117	0.15959373	0.101084	1.24705482
03/10/2011	2.80636079	0.15606063	1.25529949	0.37525727

Nota: El término **radiomed1** se corresponde con los valores de la razón media por día para el cuadrante I y, de forma similar, **radiomed2**, **radiomed3** y **radiomed4** se corresponden con la razón media por día para los cuadrantes II, III y IV.

identificó más áreas al suroeste, sur y sureste de lo que realmente ocurrieron, y fue observado por el radar. Además, se observó una zona de falso reiterada sobre la Ciénaga de Zapata, pronosticando precipitaciones que no ocurrieron en la realidad, lo cual puede estar relacionado con las características físico-geográficas de esta zona, y las deficiencias con la configuración del modelo y sus condiciones de fronteras explicadas. Por este motivo, la mejor correspondencia entre las áreas calculadas se observó en los cuadrantes I y II, y los mayores errores en el pronóstico se encontraron en el cuarto y tercer cuadrante; en

este último, por ser la zona con mayor porcentaje de área marítima del polígono estudiado.

Estudio de casos

Se realizan dos estudios de casos de días que son representativos de los criterios generales planteados, como son las áreas de precipitaciones, su ubicación, desplazamientos y horario de ocurrencia.

24 de agosto de 2011

Este día constituye las condiciones fueron propicias para la ocurrencia de la convección, motivada por procesos locales y dado el calentamiento del día, puesto que el área de estudio se encontraba bajo la influencia de un centro de altas presiones que imponía un régimen de viento débil del este-norte. El contenido de vapor de agua era abundante, por lo cual la humedad en niveles medios y bajos era superior a 85 % y el *shear* tenía valores inferiores a 10 m/s. Los modelos de pronóstico (GFS, ETA, WRF, RUC Y MM5) mostraban la posible ocurrencia de la convección y la caída de precipitaciones para el oeste (W) del polígono sobre la provincia de Artemisa, pronóstico que coincidió con el modelo ARPS y que incluía, además, el sur de Mayabeque y la Ciénaga de Zapata. El ARPS mostró el comienzo de la convección a las 1530 horas y la convección, ya más fuerte, con acumulados de precipitación importantes, a partir de las 1600 horas (Fig. 4).

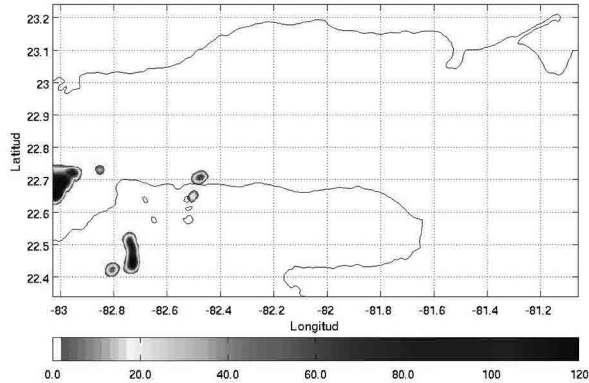
Esta información se comparó con las observaciones del radar meteorológico y, a simple vista, pudo comprobarse que la zona donde se obtuvieron los acumulados significativos de precipitaciones coincidió con la pronosticada (Fig. 5).

Este día se observó un desplazamiento de 2 hs en el tiempo, o sea, el modelo pronosticó las precipitaciones 2 h después de lo que realmente sucedieron; esto es, el modelo experimentó un retraso. No obstante, las propiedades de objetos se calcularon haciendo coincidir los horarios de pronóstico y de observación de radar meteorológico, por lo que, aun

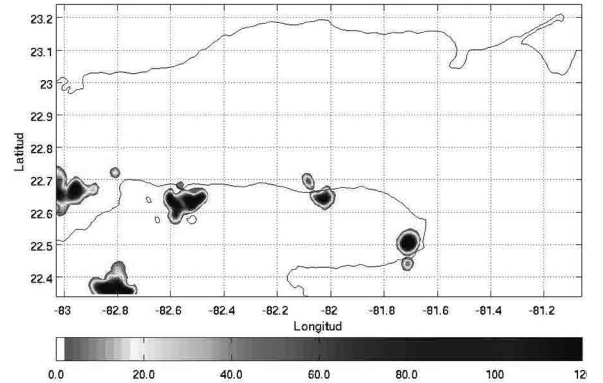
cuando se obtuvieron coincidencias entre las áreas de precipitaciones de ambos campos, estos resultados no son totalmente justos con la capacidad real del modelo para identificar las áreas de precipitaciones correctamente, teniendo en cuenta los errores que se introducen a la hora de correr el modelo con una

configuración predeterminada.

En el momento de realizar el cálculo de los parámetros que caracterizan el pronóstico espacial del modelo se utilizaron los pronósticos y observaciones del radar del mismo horario; por ello, debido al desfase mencionado, se muestra un error significativo en los

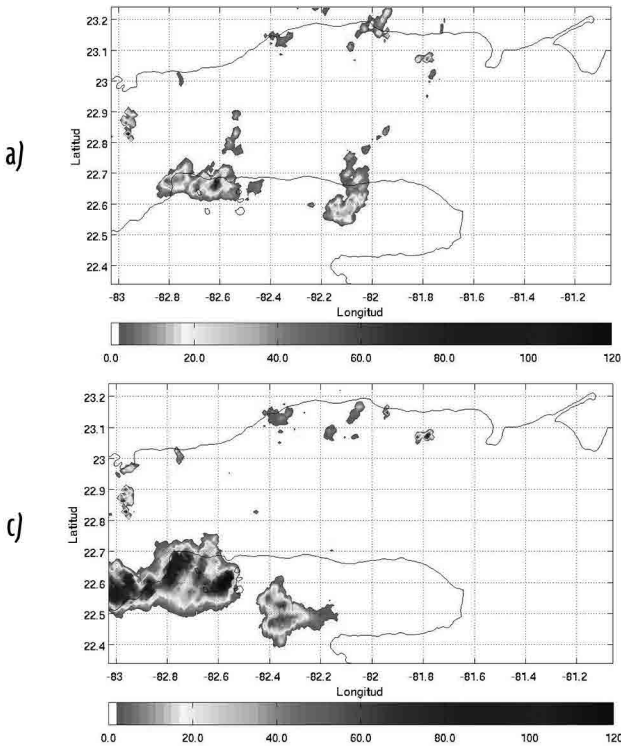


a) 24-8-2011-1530 ARPS

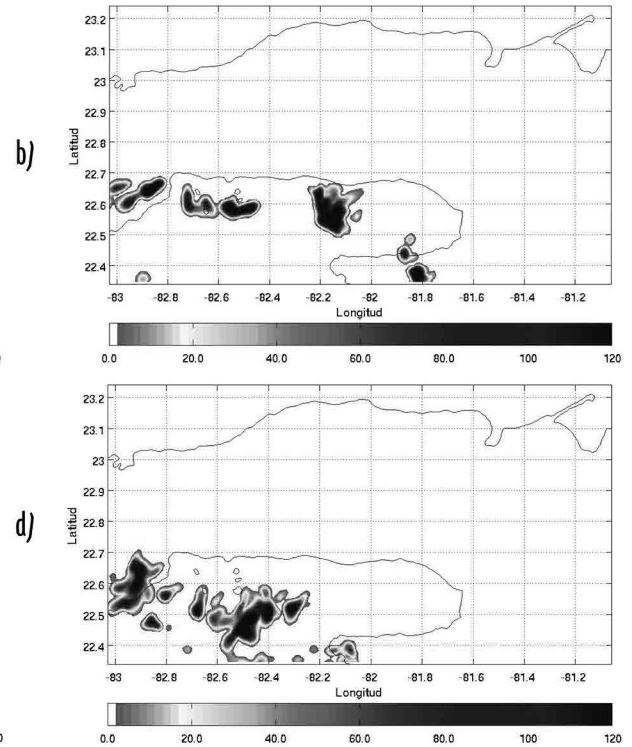


b) 24-8-2011-1600 ARPS

Fig. 4. Acumulados de precipitaciones del modelo ARPS para las 1530 horas (a) y las 1600 horas (b), donde se muestran las zonas de convección al oeste y el sur de polígono.



a)



b)

c)

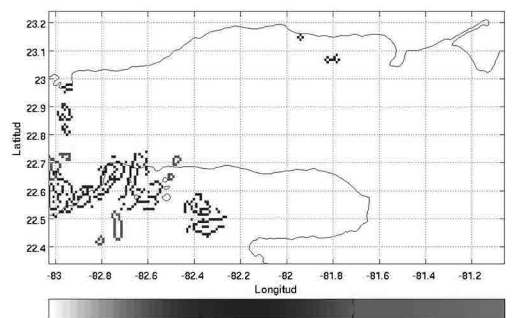
d)

Fig. 5. Las observaciones de radar muestran los productos de los acumulados de las precipitaciones del 24 de agosto de 2011, cada 30 min (a, c) para los horarios de las 1430 horas y las 1530 horas. Además, se aprecian las simulaciones del ARPS (b, d) para las 1630 horas y las 1730 horas, evidenciando una coincidencia en los patrones de las áreas de precipitaciones pronosticadas y observadas, 2 h después a la observadas, con lo cual se constata el desfase en tiempo del pronóstico (en este caso, un retraso de 2 h).

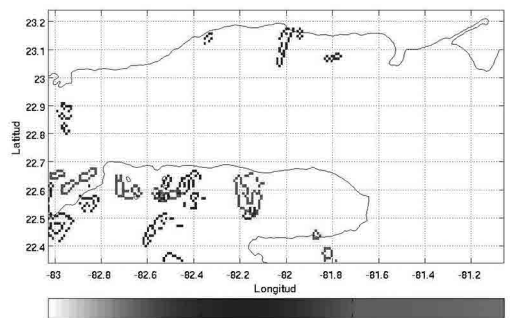
valores de acumulados y las áreas de las envolturas en contradas; no obstante, se hallaron coincidencias en algunos puntos del tercer cuadrante. Una vez determinado el período de desfasaje, otra vez se calcularon las envolturas convexas haciendo coincidir las observaciones y los pronósticos en los horarios donde fueran similares los patrones de las áreas de acumulados, disminuyendo significativamente los errores al superponer las áreas. La figura 6 muestra los campos observados y filtrados por el algoritmo de bordes de Canny. Los objetos representados en rojo se corresponden con los elementos encontrados en el campo pronosticado con el ARPS y los representados en azul conciernen a los elementos estimados en el campo considerado por el radar meteorológico; los objetos de color morado representan aquellos puntos donde coincidieron los campos observado y pronosticado, mostrando una mayor coincidencia en el tercer y cuarto cuadrantes.

Este día pudo observarse que las envolturas convexas en las observaciones de radar se obtuvieron en

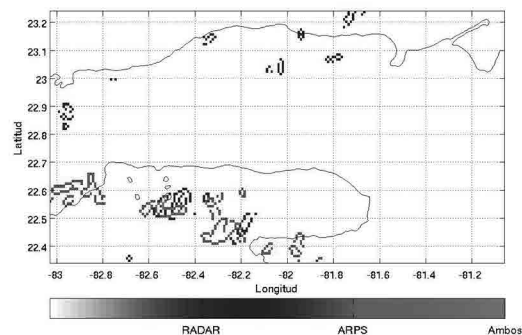
el primer, tercer y cuarto cuadrantes, mientras que en el ARPS solo se observaron en el tercer y cuarto cuadrantes; no obstante, cabe destacar que las áreas de precipitación significativas se observaron en el radar en el tercero y el cuarto cuadrantes, al igual que pronosticó el modelo (Fig. 7). Es importante señalar que aun cuando se obtienen envolturas con áreas significativas en el primer y segundo cuadrantes del campo observado por el radar meteorológico, las áreas de precipitaciones observadas no fueron significativas en estos cuadrantes, y este resultado se obtiene por las características del método de calcular las envolturas por cuadrante, que determina las áreas entre los puntos de igual valor más externos dentro de un campo; por ello, en ocasiones, se introducen áreas significativas que, en realidad, están fragmentadas en zonas de con precipitaciones pequeñas. Para eliminar este error en futuros estudios se recomienda subdividir más el dominio estudiado, de modo que las áreas calculadas estén más acorde con las que



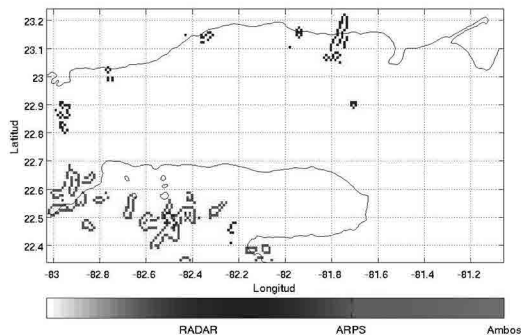
a) Bordes 1530 horas.



b) Bordes 1630 horas.



c) Bordes 1700 horas.



d) Bordes 1730 horas.

Fig. 6. Datos filtrados por el algoritmo de bordes del 24 de agosto de 2011, para las 1530 horas (a), las 1630 horas (b), las 1700 horas (c), y las 1730 horas (d); en cada figura se superponen los campos observado (azul) y pronosticado (rojo).

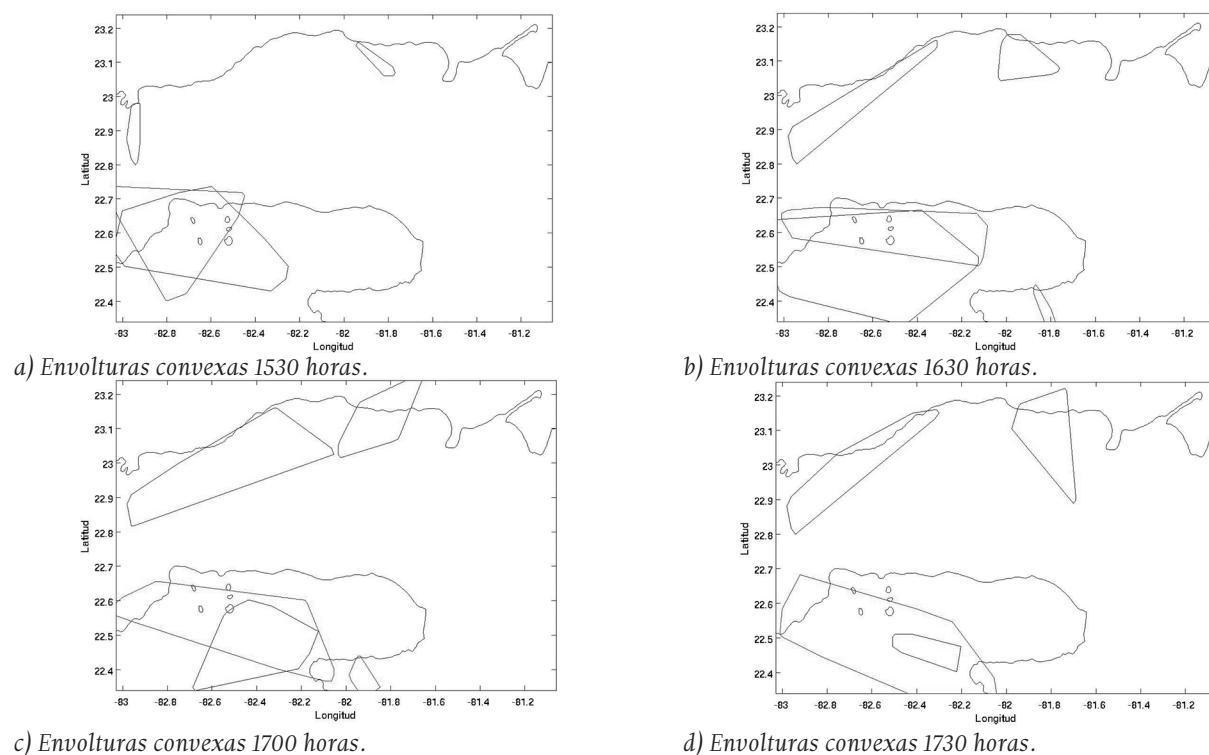


Fig. 7. Envolturas convexas encontradas en cada cuadrante del 24 de agosto de 2011. Las envolturas de color rojo corresponden con los pronósticos del ARPS, mientras que las de color azul, con los datos observados por el radar meteorológico.

realmente reflejan los campos de precipitaciones.

24 de septiembre de 2011:

Este día, Cuba se encontraba bajo la influencia de débiles gradientes barométricos y se observaba una hondonada al norte de Haití, reflejo de una baja fría en la altura sobre la región central, situación que provocó la persistencia del flujo húmedo del sureste en niveles bajos. El modelo pronosticó la ocurrencia de precipitaciones dispersas desde las 1530 horas por el centro del polígono, desde el oeste, hasta el este; luego comenzó a formarse una línea bien delimitada con la misma orientación que, posteriormente, se dispersó y generó grandes acumulados de precipitaciones (Fig. 8).

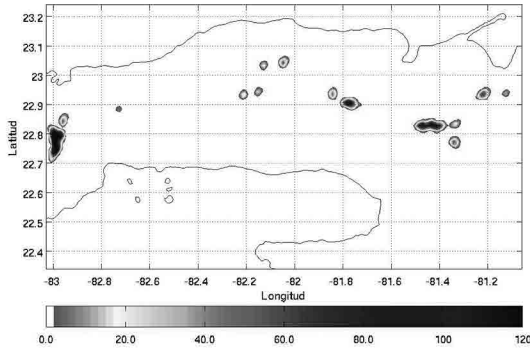
Por su parte, las observaciones de radar corroboraron lo mencionado y mostraron la efectividad del modelo este día, facilitando las condiciones del trabajo para la campaña (Fig. 9).

El cálculo de los parámetros que caracterizan el pronóstico arrojó que este día las condiciones pro-

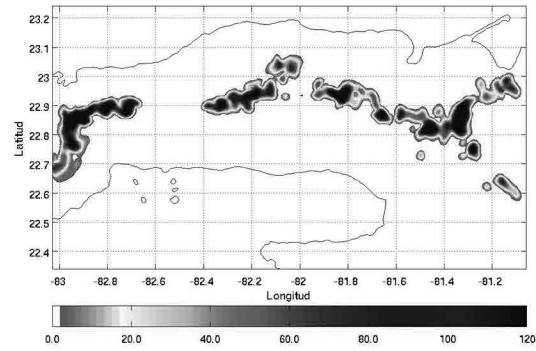
nosticadas coincidieron en tiempo y área con las observaciones del radar, aunque cuando se filtraron los datos para trabajar con los más significativos sin importar el valor del acumulado y se dividió el área por cuadrantes para que no se introdujera tanto ruido a la hora de calcular las envolturas, se observan zonas donde no hubo coincidencia, aun cuando fueron en menor cuantía en este caso (Fig. 10).

En algunos horarios se observaron envolturas convexas en los diferentes cuadrantes, que variaron en el tamaño del área y su orientación. Esto se debe a que las envolturas son calculadas teniendo en cuenta todos los valores que son diferentes de cero (0), aunque no sean valores intensos de precipitación y estén alejados de la zona de máximos; por tanto, estos se incluyen en la envoltura y crece su área. Además, se observó que las áreas de las envolturas convexas de los campos pronosticado y observado mostraron mayor similitud en cuanto forma, tamaño y ubicación, en los cuadrantes I y II (Fig. 11).

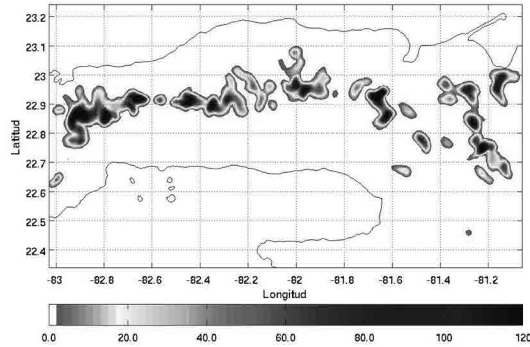
*Evaluación espacial del pronóstico de precipitación del modelo ARPS,
para la campaña de incremento artificial de la lluvia en el occidente de Cuba*



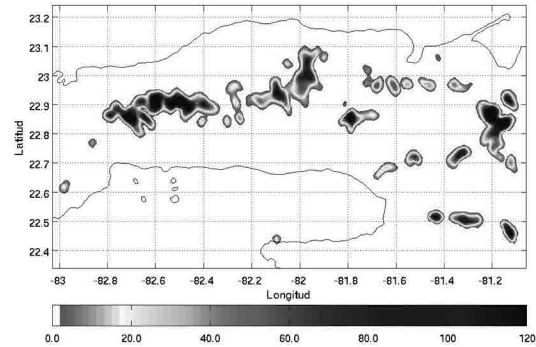
a) 24-9-2011-1530 ARPS.



b) 24-9-2011-1600 ARPS.

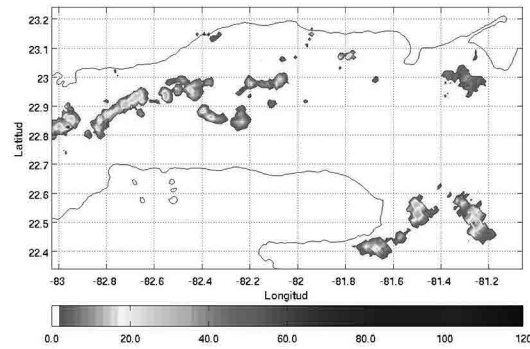


c) 24-9-2011-1630 ARPS.

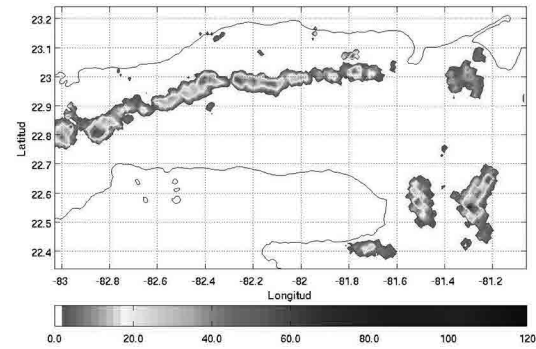


d) 24-9-2011-1700 ARPS.

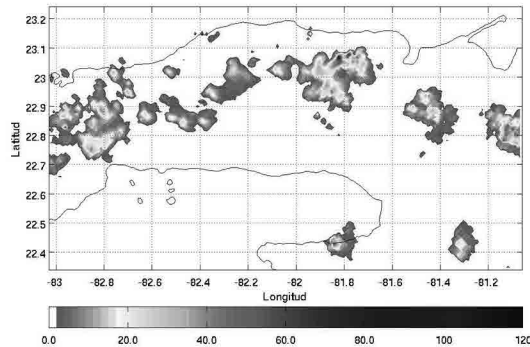
Fig. 8. Simulaciones del modelo ARPS para el 24 de septiembre de 2011. Se observan las áreas de precipitaciones organizadas en forma de líneas en los horarios iniciales y una desorganización de este patrón en la medida que pasa el tiempo.



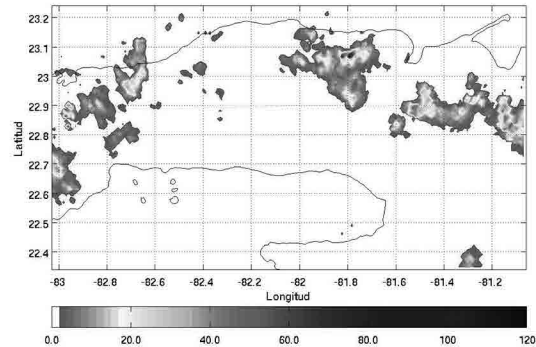
a) 24-9-2011-1530 RADAR.



b) 24-9-2011-1600 RADAR.

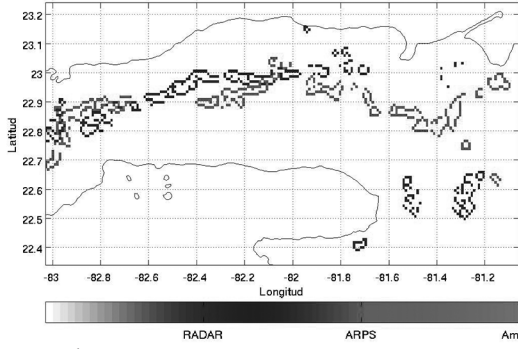


c) 24-9-2011-1630 RADAR.

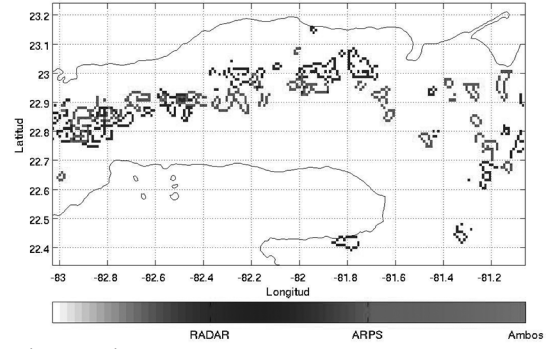


d) 24-9-2011-1600 RADAR.

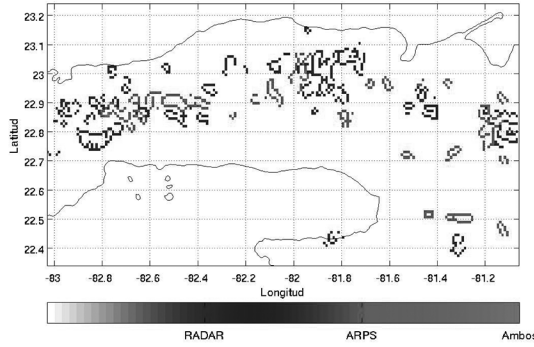
Fig. 9. Observaciones de radar que muestran los productos de los acumulados de las precipitaciones del 24 de septiembre de 2011. Se aprecia cómo las áreas de precipitaciones en los horarios iniciales estaban organizadas en una línea y luego se observa un patrón desorganizado sobre todo el polígono, coincidiendo con lo pronosticado por el ARPS.



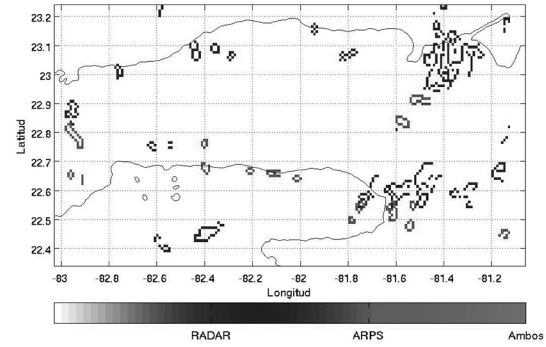
a) Bordes 1600 horas.



b) Bordes 1630 horas.

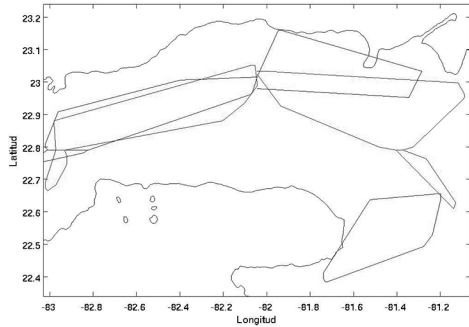


c) Bordes 1700 horas.

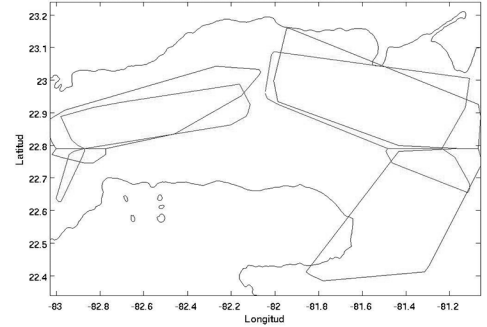


d) Bordes 1730 horas.

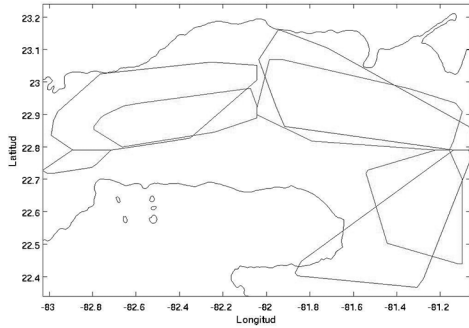
Fig. 10. Datos filtrados por el algoritmo de bordes del 24 de septiembre de 2011, para las 1600 horas (a), las 1630 horas (b), las 1700 horas (c), y las 1730 horas (d); en cada figura se superponen los campos observado (azul) y pronosticado (rojo).



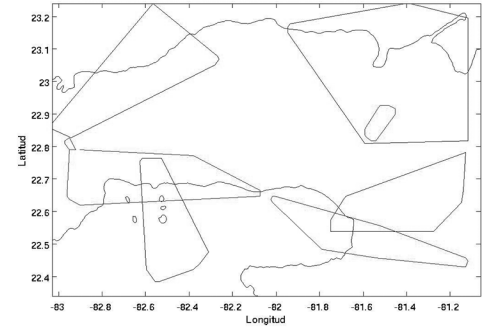
a) Envolturas convexas 1600 horas.



b) Envolturas convexas 1630 horas.



c) Envolturas convexas 1700 horas.



d) Envolturas convexas 1730 horas.

Fig. 11. Envolturas convexas encontradas en cada cuadrante del 24 de septiembre de 2011 para las 1600 horas (a), las 1630 horas (b), las 1700 horas (c), y las 1730 horas (d). Las envolturas de color rojo corresponden con los pronósticos del ARPS, mientras que las de color azul, con los datos observados por el radar meteorológico.

Conclusiones

1. El modelo ARPS, utilizando el esquema de la micro-física de Kessler, es capaz de representar correctamente las áreas de precipitaciones más intensas.
2. Las simulaciones realizadas representaron correctamente las características de los sistemas convectivos que propiciaron la precipitación, como son las líneas de convección organizada, los conglomerados nubosos y las formaciones de celdas simples.
3. Los horarios comprendidos entre las 1600 horas y las 1700 horas resultaron los de mayor correspondencia entre las áreas calculadas, y mostraron mayor similitud en los cuadrantes I y II.
4. Las simulaciones representaron correctamente las áreas de precipitación, aunque, en varias ocasiones, mostraron un desfase en el momento de su ocurrencia, el cual osciló desde 30 min hasta 3 h, y un desplazamiento del área, en general, hacia el sur de la zona real observada.
5. Las envolturas convexas agruparon correctamente las zonas de precipitación, aunque incorporaron zonas de falsos positivos, dadas las características geométricas del método.

Recomendaciones

1. Aumentar la cantidad de días de análisis, con el objetivo de realizar una caracterización más completa del funcionamiento del modelo.
2. Realizar una evaluación cuantitativa de los valores de los acumulados de precipitaciones.
3. Efectuar más simulaciones que empleen la parametrización de Lin *et al.* (1983) con vistas a representar mejor las precipitaciones asociadas con sistemas sinópticos.
4. Incorporar las condiciones de fronteras dinámicas a la configuración del modelo e iniciar las corridas 2 h antes para tener mayor tiempo de pronóstico y, de este modo, eliminar los errores introducidos por

el tiempo que se demora el modelo en asimilar las condiciones iniciales.

Referencia bibliográficas

- Berry, E. X., 1967, Cloud droplet growth by collection, *J. Atmos. Sci.*, 24, 688-701.
- Bradford, C. Dobkin, D. P., Huhdanpaa, H. 1996, The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 22, No. 4, Pages 469-483.
- Canny, J., 1986, A Computational Approach to Edge Detection *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 6, 679 - 698
- Case, J. L., J. Manobianco, J. E. Lane, C. D. Immer, and Merceret, F. J., 2004, An objective technique for verifying sea breezes in high-resolution numerical weather prediction models. *Wea. Forecasting*, 19, 690-705
- Cotton, W. R., M. A. Stephens, T. Neherkorn, and Tripoli, G. J., 1982, The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model - 1982. Part II: An ice-phase parametrization. *J. Rech. Atmos.*, 16, 295-320.
- Davis, C., Brown, B., Bullock, R., 2005, Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part I: Methodology and Application to Mesoscale Rain Areas, *Mon. Wea. Rev.*, vol 134, 1772-1784, 2005
- Doswell, C. A., R. Davies-Jones, and Keller, D. L., 1990, On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Wea. Forecasting*, 5, 576-585.
- Ebert, E., and McBride, J. L., 2000, Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrol.*, 239, 179-202.
- Fowle, M. A., and Roebber, P. J., 2003, Short-range (0-48 h) numerical prediction of convective occurrence, mode, and location. *Wea. Forecasting*, 18, 782-794.

- Kessler, E., 1969, On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteorol. Monogr.* 10.
- Lin, Y. L., Farley, R. D., and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 22, 1065–1092.
- Nachamkin, J. E., 2004, Mesoscale verification using meteorological composites. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 941–955.
- Nachamkin, J. E., S. Chen, and Schmidt, J., 2005, Evaluation of heavy precipitation forecasts using composite-based methods: A distributions-oriented approach. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 2163–2177.
- Pozas, W., 2007, Software Vesta/Proceso versión 5.3.13.0, Laboratorio de desarrollo técnico, Centro Meteorológico de Camagüey.
- Pozo, D., 2003, Simulación numérica de la formación y evolución de sistemas nubosos convectivos de mesoescala sobre Camagüey con ayuda de un modelo tridimensional, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas.
- Rife, D. L., and Davis, C. A., 2005, Verification of temporal variations in mesoscale numerical wind forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 3368–3381.
- Smith, B. B., and Mullen, S. L. 1993, An evaluation of sea level cyclone forecasts produced by NMC's nested-grid model and global spectral model. *Wea. Forecasting*, 8, 37–56.
- Tremback, C. J., 1990, Numerical simulation of a mesoscale convective complex: Model development and numerical results. Ph.D. Dissertations. Colorado State University. Atmospheric Science Paper 465, 247 pp.
- Wilks, D. S., 1995, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.
- Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V., Shapiro, A., and Brewster, K., 1995, ARPS Version 4.0 user's guide. Center for Analysis and Prediction of Storms, Univ. of Oklahoma, 380 pp. [Available from CAPS, 100 E. Boyd St., Norman, OK 73019.]
- Xue, M., Droegemeier, K.K. and Wong, V., 2000, The Advanced Regional Prediction System (ARPS) – A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification. *Meteorol. Atmos. Phys.* 75, 161–193.
- Xue, M., Droegemeier, K.K., Wong, V., Shapiro, A., Brewster, K., Carr, F., Weber, D., Liu, Y. and Wang, D., 2001, The Advanced regional predictio System (ARPS)–A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part II: Model physics and applications. *Meteorol. Atmos. Phys.* 76, 143–165.