

# ESTUDIO DE LAS LLUVIAS INTENSAS OCURRIDAS EN LA PROVINCIA LA HABANA LOS DÍAS 29 Y 30 DE NOVIEMBRE DE 2013. CARACTERÍSTICAS SINÓPTICAS Y MESOESCALARES.

*Yinelys Bermúdez Souza, Armando Caymares Ortíz.*

Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, [yinelysb.souza@insmet.cu](mailto:yinelysb.souza@insmet.cu)  
Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, [armando.caymares@insmet.cu](mailto:armando.caymares@insmet.cu)

## RESUMEN

Las lluvias intensas son fenómenos meteorológicos peligrosos que con frecuencia afectan a Cuba y en cualquier época del año, debido a la combinación de sistemas a escala sinóptica y de mesoescala, que en algunas ocasiones favorecen la rápida evolución de eventos hidrometeorológicos extremos. De manera operativa en el Centro de Pronósticos del Tiempo del Instituto de Meteorología, se han presentado situaciones complejas sobre la provincia de La Habana durante el período poco lluvioso, los que han tenido como característica común, la existencia de nubosidad convectiva poco profunda, para su estudio fue analizado el caso del 29 y 30 de noviembre de 2013. La metodología empleada se basa en el análisis de la evolución de los sistemas sinópticos en superficie y en el aire superior (850, 700, 500 y 200 hPa), la humedad relativa en la capa baja y media, la dirección y fuerza del viento en 925 hPa y el flujo en 1000 hPa; además de los índices termodinámicos, observaciones de radar e imágenes de satélite; mediante las mismas se caracterizó a escala sinóptica y mesoescala las condiciones que imperaron; también se evaluó la efectividad del modelo de predicción numérico WRF (Weather Research and Forecasting) en la simulación de la persistencia y cantidad de la lluvia caída. Se determinó la formación de una línea de convección moderada con una estructura casi-estacionaria y la existencia de ecos centroide de máxima reflectividad en la capa baja de la nube, elementos fundamentales para la eficacia de la precipitación.

**Palabras claves:** Lluvia Intensa, Sistema Convectivo de Mesoescala, Frente casi-estacionario.

## INTRODUCCIÓN

Cuba se encuentra situada muy próxima al Trópico de Cáncer y, aunque gran parte del año es influenciada por el anticiclón subtropical del Atlántico Norte, durante el período lluvioso intervienen todos los sistemas meteorológicos propios de latitudes tropicales como las ondas del Este, vaguadas u hondonadas superiores, ciclones tropicales, entre otros. En cambio, en el período poco lluvioso, son los sistemas propios de latitudes medias que se profundizan hasta las latitudes tropicales e intervienen en el tiempo y el clima del país.

Entre los sistemas de latitudes medias que actúan de manera bien definida sobre Cuba están, los sistemas frontales, las líneas de tormentas pre-frontales y otros sistemas de menor escala. Algunos de ellos pueden causar notables precipitaciones, que en ocasiones llegan a ser fuertes y hasta localmente intensas con acumulados de lluvias superiores a los 100 mm en 24 horas.

El período poco lluvioso en Cuba comprende los meses desde noviembre hasta abril, no obstante los meses mencionados se asocian a los periodos de transición, invierno/primavera, respectivamente. Ellos presentan características propias significativas, lo que incide y hace compleja la confección de los pronósticos meteorológicos para corto plazo y en su habilidad. Entre las dificultades que están presentes se hallan las situaciones meteorológicas devenidas de la interacción océano - atmósfera y el comportamiento del flujo troposférico desde la superficie a nivel del mar hasta la alta tropósfera. Y una de esas situaciones son los frentes casi-estacionarios, en las que desempeñan un rol importante los elementos térmicos y dinámicos que contribuyen o no a los procesos generadores de las lluvias, incluyendo aquellas que pueden llegar a ser intensas y provocar un evento hidrometeorológico extremo.

La predicción de las lluvias intensas continúa siendo un reto para los pronósticos a corto plazo, sobre todo cuando están asociadas a sistemas meteorológicos de rápida evolución, situación en la

que entra a jugar la pericia y experiencia del pronosticador. Por si fuera poco, las precipitaciones intensas, en la mayoría de las ocasiones son fenómenos que ocurren a escala local y pueden acarrear desde pérdidas socio-económicas hasta de vidas humanas, sobre todo en ciudades importantes y con alta densidad poblacional, además de problemas urbanísticos y constructivos, como es el caso de la provincia La Habana. En este punto es necesario añadir que la capital del país es altamente vulnerable a la ocurrencia de lluvias intensas, ya que la precipitación que ocurre fuerte y en cortos intervalos de tiempo provocan inundaciones súbitas, entre otras consecuencias.

Los trabajos que se han realizado sobre intensas lluvias a nivel internacional han estado enfocados al estudio de casos. Caracena *et al.* (1979), Maddox *et al.* (1979), Olmedo y Villacreces (2008); Sempere *et al.* (2000) y Quintero y Suárez (2016), hicieron un estudio detallado de las condiciones que a mesoescala dieron lugar a varias situaciones de eventos de intensas y eficientes precipitaciones. En Cuba, los estudios de Lecha y Fernández (1982), González (1984), Alfonso y Florido (1992), Rubiera y Caymares (1998), Fernández y Díaz (2005), Mursulí (2006), Orbe (2009), González, M (2014), entre otros autores, han estado enfocados en la búsqueda de configuraciones sinópticas que favorecen las grandes precipitaciones, entre los que se encuentran los frentes casi-estacionarios. Sin embargo, en ninguno de ellos se plantea que la formación de un SCM próximo a un frente casi-estacionario es un factor crucial en la ocurrencia de las precipitaciones eficientes. Es por ello que para lograr una mayor comprensión de los factores favorables para la ocurrencia de lluvias intensas, sea necesario analizar las condiciones mesoescalares relacionadas con la formación de un Sistema Convectivo de Mesoescala próximo a un frente casi-estacionario que produjeron las lluvias intensas en la provincia de La Habana, tomando como caso de estudio la situación meteorológica de los días 29 y 30 de noviembre de 2013.

Dada esta situación problemática, y para lograr una mayor comprensión de los mecanismos capaces de generar lluvias intensas y eficientes sobre la provincia La Habana, es necesario resolver el siguiente **problema científico**: ¿Cuáles son las condiciones mesoescalares que propician la ocurrencia de lluvia intensa sobre la provincia La Habana en presencia de un frente casi-estacionario oscilando sobre el estrecho de la Florida?

En este trabajo se propone como **objetivo general**: Determinar las condiciones mesoescalares que produjeron las lluvias intensas en la provincia La Habana en presencia de un frente casi-estacionario en los días 29 y 30 de noviembre de 2013, y como **objetivos específicos**:

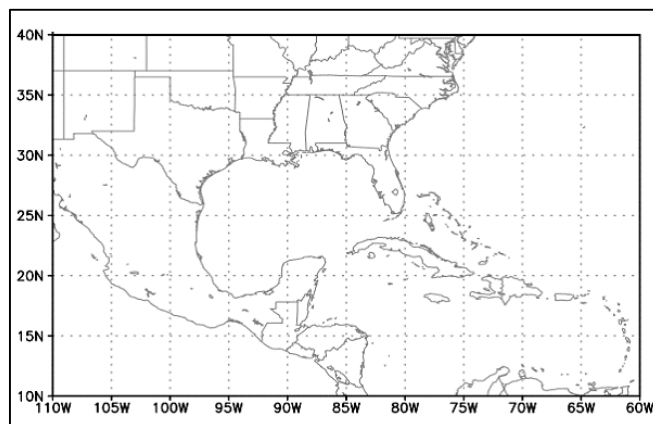
1. Describir las características del frente casi-estacionario que, a escala sinóptica, generaron las lluvias intensas en la provincia La Habana.
2. Caracterizar los rasgos mesoescalares a partir de las imágenes de satélite, radar y el perfil termodinámico de la tropósfera.
3. Evaluar la efectividad de las salidas del modelo de predicción numérica WRF para el evento a mesoescala objeto de estudio.

La **novedad científica** de la investigación radica en la detección de las condiciones de fondo sinóptico que intervienen en la generación de lluvias intensas sobre la provincia de La Habana en presencia de un frente casi-estacionario oscilando sobre el estrecho de la Florida, y en el reconocimiento del papel que juega la formación de un Sistema Convectivo de Mesoescala próximo de la zona frontal, en la alta eficiencia de las precipitaciones. Los resultados obtenidos en este estudio podrán utilizarse en la elaboración de las predicciones del tiempo a corto plazo que contribuirán al perfeccionamiento del Sistema de Alertas Tempranas y a la elaboración de Avisos Especiales que se emiten en el Centro de Pronósticos del Tiempo del Instituto de Meteorología.

## **MATERIALES Y METODOS**

Se seleccionó el estudio de un caso como vía para realizar un proceso de indagación en profundidad de una situación o fenómeno complejo. El estudio de un caso se basa en el entendimiento de dicha situación, que se obtiene a través de su descripción y análisis. Implica un entendimiento comprensivo, una descripción extensiva y un análisis de la situación.

Para los análisis de la escala sinóptica se definió un entorno geográfico limitado en el plano horizontal por las coordenadas 10° N-40° N y 60° W-110° W, suficientemente amplio para considerar la evolución a corto plazo (24-36 horas) de los diferentes sistemas que a esa escala intervienen en las condiciones del tiempo sobre Cuba. En la figura 1 se muestra el espacio sinóptico utilizado.



*Fig. 1: Dominio sinóptico utilizado.*

Los campos utilizados en la investigación fueron: presión atmosférica en la superficie a nivel medio del mar y la altura geopotencial en cuatro niveles de la tropósfera (850, 700, 500 y 200 hPa), la humedad relativa y la temperatura en el nivel de 850, 700 y 500 hPa para mostrar la advección de aire húmedo y cálido en los niveles bajos y la intrusión de aire frío y seco en niveles medios de la tropósfera, además de la variable del viento en el nivel de 925 hPa para determinar los máximos de intensidad del viento en la capa baja o la presencia del chorro de los bajos niveles. Fue empleada la base de datos diarios del Re-análisis del Nacional Center of Environmental Predicción (NCEP) disponibles en el sitio web <http://www.cdc.noaa.gov>, con una rejilla de 2,5 grados de resolución en los horarios de las 0000 UTC y 1200 UTC, para describir la evolución de los sistemas a escala sinóptica. Para mostrar el flujo en los bajos niveles en el nivel de 1000 hPa a las 1200 UTC de cada día estudiado, se utilizó la base de datos del Re-análisis del European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), con una rejilla de 0,75 grados de resolución disponibles en el sitio web [www.ecmwf.int/datasets/data/interim-ful/daily](http://www.ecmwf.int/datasets/data/interim-ful/daily)

El análisis de las estructuras convectivas fueron analizadas a partir de las imágenes de satélite y las observaciones de radar, con el objetivo de profundizar el estudio de caso basado en la formación de la estructura nubosa, topes de la nubes, formación de los ecos de reflectividad, máximos de reflectividad, flujo en las capas bajas y cortes verticales. Las imágenes de satélite del GOES 13 en los canales 1 correspondiente al espectro visible con resolución de 1 km, fueron obtenidas del sitio web <http://www.nsof.clases.noaa.gov/sala/productos/welcome>. Un total de 96 observaciones diarias del radar de Casablanca durante de 23 horas y 45 minutos con un intervalo de 15 minutos entre ellas, fueron analizadas a través de la utilización del software Vesta Proceso en su versión 5.3.18.0 desarrollado por especialistas del Centro de Radares de Camagüey.

Se analizó los sondeos de Casablanca obtenidos por las salidas del modelo de predicción numérico WRF, mediante el cual se pueden obtener el perfil termodinámico en diferentes horarios del día; para este caso de estudio se utilizó el sondeo de las 0900 UTC, 1200 UTC y 2100 UTC del día 29 de noviembre, 0000 UTC y 1200 UTC del 30 de noviembre y las 0000 UTC de 1ro de diciembre. Con el fin de evaluar la efectividad del modelo de predicción numérica WRF disponible en el Centro de Pronósticos, y cómo estimó el evento de lluvia intensa 24 horas antes de su ocurrencia, se hace un análisis de las condiciones meteorológicas y la evolución de los sistemas que a escala sinóptica simulaba el modelo.

## **ANALISIS Y RESULTADOS**

En general, los eventos de precipitaciones son causados por una gran variedad de sistemas meteorológicos, no obstante tanto a escala sinóptica como a mesoescala en ocasiones tienden a

combinarse una serie de elementos que en un momento determinado son capaces de generar un evento hidrometeorológico extremo. Algunas de estas situaciones que generan condiciones tiempo adverso comienzan a gestarse días antes del suceso, lo cual puede seguirse a escala sinóptica. Sin embargo, no siempre un mismo sistema sinóptico que se conozca como generador de severidad en cuanto a las condiciones meteorológicas generales se refiere, es capaz de provocarlo y es justo donde al analista debe tener en cuenta si otros elementos a menor escala pueden estar asociados o actuar como fenómeno disparador de esas condiciones extremas o severas, lo cual hace muy difícil su pronóstico, pues los modelos de predicción numérica no siempre reflejan la combinación perfecta de sistemas sinópticos y mesoescalares, que muestre si las lluvias pueden llegar a ser intensas o extremas en un lugar específico.

- **Evolución del ambiente sinóptico**

A las 0000 UTC del 28 de Noviembre, el cuarto frente frío de la temporada invernal 2013-2014 cruzaba la provincia de Sancti Spíritus, transitando lentamente al este hasta ubicarse a las 0600 UTC sobre la provincia de Camagüey. La onda polar asociada al mismo se amortiguaba en 850 y 700 hPa por debajo de los 25°N; en 500 hPa y 200 hPa aparecía fraccionada, con un segmento sobre la costa oriental de los EE.UU hasta la Florida y otro segmento sobre el golfo de México. Esta situación en la altura, propició que el sistema en superficie tuviera poco movimiento al este, con tendencia a quedar casi-estacionario en las inmediaciones de las provincias de Camagüey y Las Tunas, donde mantuvo las áreas de nublados y algunas lluvias, mientras el anticiclón migratorio invadía todo el sur de los EE.UU, el Atlántico adyacente, el golfo de México y Centroamérica. A las 0000 UTC del 29 de Noviembre, el sistema anticiclónico migratorio de origen continental estaba representado por dos centros de 1035 hPa sobre los estados de Alabama y Carolina del Norte; imponiendo sobre Cuba y mares adyacentes un fuerte gradiente de presión, principalmente entre la Florida y la región occidental del archipiélago cubano, y marcadas condiciones invernales en la mitad occidental de la mayor de las Antillas. El anticiclón subtropical del Atlántico norte se retiraba al este disminuyendo su influencia en el Caribe, típico en este mes de transición.

La onda polar asociada al frente frío perdía identidad en el aire superior sobre el Atlántico, favoreciendo la penetración o extensión de una amplia dorsal de alto valor geopotencial en los 700 y 500 hPa, desde el Atlántico occidental hasta Las Bahamas, el noroeste del mar Caribe y el golfo de México, provocando que el sistema frontal comenzara a retroceder hacia las provincias centrales de Villa Clara y Cienfuegos. En 850 hPa, una vaguada invertida tenía su eje cruzando la porción oriental del golfo de México, la provincia de Artemisa y el mar Caribe, interactuando con una onda corta en los 500 y 200 hPa que se desplazaba en el flujo del oeste sobre la Florida y el estrecho del mismo nombre.

Una faja de humedad con valores superior al 70 % asociado con el sistema frontal, se extendía sobre la provincia de Matanzas hasta Ciego de Ávila, mientras en el occidente predominaba una masa de aire seca asociado con la marcada influencia continental. La intensidad del viento en 925 hPa con valores entre 12 y 14 m/s (43 y 50 km/h) sobre Las Bahamas, el estrecho de La Florida y Cuba, indicando la existencia de un chorro de bajos niveles. A las 1200 UTC el sistema frontal se había desplazado al oeste, forzado por la penetración de la amplia dorsal anticiclónica en los niveles medios, orientada zonalmente que provocó el levantamiento de la zona frontal en su porción sur, retrocediendo hacia la región occidental de Cuba y quedando el sector cálido oscilando sobre el estrecho de La Florida, entre las provincias de Mayabeque y Matanzas hasta la isla de la Juventud. La franja de humedad en los niveles bajos también avanzaba hacia el oeste y extendiéndose a la región occidental cubana, el estrecho de La Florida y sudeste del golfo de México.

La interacción como un todo, del sistema frontal, la onda corta en niveles medios profundizando sobre el golfo y la vaguada invertida en los 850 hPa, propició una atmósfera más inestable, dando continuidad al evento de grandes precipitaciones que se iniciaba en horas de la madrugada del día 29 de noviembre.

El anticiclón continental migratorio se intensificaba a medida que se desplazaba en el flujo del Oeste hacia las inmediaciones de los Grandes Lagos con un valor de 1036 hPa; imponiendo un régimen de vientos fuertes del nordeste al este sobre el archipiélago cubano. El viento en 925 hPa mostraba valores sobre Cuba entre 11 y 12 m/s (42 y 44 km/h). A las 0000 UTC del día 30 (Anexo V), el frente casi-estacionario mantenía su influencia sobre el área de estudio, aunque mostraba una tendencia a curvarse anticiclónicamente a medida que el centro del anticiclón migratorio transitaba hacia la porción norte-oriental de los Estados Unidos. Se intensificaba el chorro de bajos niveles (925 hPa) del nordeste al este entre 13 y 15 m/s (46 y 54 km/h) desde Las Bahamas septentrionales hasta el mar Caribe occidental, con altos valores de humedad de 80 % en 850 hPa, la que disminuyó sobre las provincias de Matanzas y Mayabeque, mientras la zona frontal se curvaba o levantaba hacia el estrecho de La Florida. La dorsal de alto valor geopotencial estaba mejor estructurada desde 850 hPa hasta 500 hPa, y aparecía una vaguada inducida en los 700 hPa sobre la región oriental hasta Jamaica y una onda corta mejor definida en los 500 y 200 hPa sobre La Florida y el sudeste del golfo de México, generando un flujo inestable del suroeste en la rama ascendente de la vaguada.

Los sistemas que a escala sinóptica intervinieron en la génesis del evento hidrometeorológico extremo estudiado se debilitaban a partir de las 1200 UTC del día 30. La vaguada inducida en los 700 hPa se desplazó hacia las provincias centrales, profundizándose hasta los niveles bajos y la onda corta avanzaba al este con su eje orientado nordeste-suroeste sobre La Florida. El sistema frontal se disipaba sobre el estrecho de La Florida, disminuyendo de manera gradual el contenido de humedad en la capa baja, pero persistía la rapidez del viento en el nivel de 925 hPa entre 11 y 12 m/s (42 y 44 km/h).

- **Comportamiento del perfil termodinámico**

En ambos perfiles pronóstico de la estación de Casablanca del 29 de noviembre a las 0900 UTC y 1200 UTC (figura 2a y b), se observa como el viento cambia de dirección y fuerza entre los niveles bajos y medios, del nordeste al este en la tropósfera baja (1000-850 hPa) al suroeste y oeste en la tropósfera media (700-500 hPa), con un debilitamiento de la intensidad con la altura y apreciándose una moderada a fuerte cizalladura vertical del viento en los primeros 6 km.

En la capa baja, el viento presentó máximos de velocidad de 10 m/s (37 km/h), lo que se puede asumir como la presencia de un chorro de los bajos niveles inducido por forzamiento o empuje del intenso anticiclón continental migratorio, lo que desempeñó un rol decisivo en el constante aporte de humedad sobre el estrecho de la Florida y la costa norte occidental de Cuba; mientras en la capa media el giro del viento al tercer cuadrante disminuyendo su intensidad a 1 m/s (4 km/h) estuvo asociado con la presencia de la onda corta en 500 hPa alejada al oeste sobre la región central del golfo de México.

El aumento de la temperatura ambiental cerca del nivel de 750 hPa, generó una inversión térmica de tipo frontal que inhibió el desarrollo de las tormentas en la vertical, dado por el levantamiento de la porción sur del sistema frontal sobre el occidente y quedando el sector cálido sobre el área de estudio, lo que provocó el ascenso de una masa de aire más cálida por encima de una masa de aire más fría y densa cerca del suelo. Sin embargo, la nube convectiva ya existente pero con valores significativos de humedad en la capa baja (850 hPa) superior al 90 %, pudo desarrollar tormentas próximas a la superficie, es decir, convección poco profunda donde el tope de la nube solo alcanzaba la altura de la inversión. A esta capa húmeda se le superpuso una capa muy seca en los niveles medios con valores inferiores al 30 %; estas diferencias significativas y cambio brusco del contenido de humedad entre 850 hPa y 700 hPa favorecieron los movimientos descendentes y forzó al entorno circundante a liberar toda la energía y humedad almacenada en la tropósfera baja, desarrollando núcleos convectivos de forma explosiva.

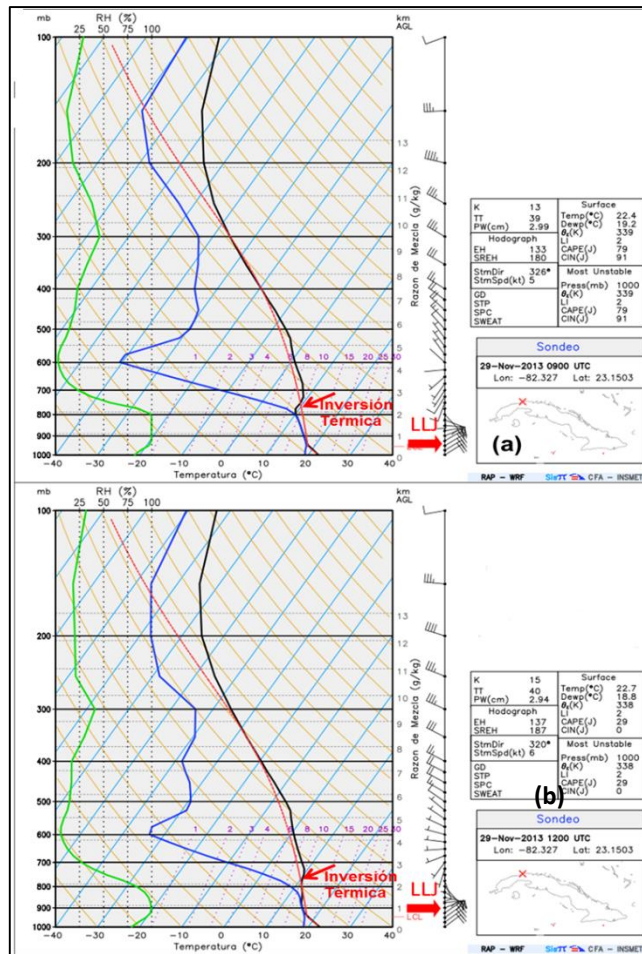


Fig. 2: Sondeo de Casablanca 0900 UTC (a) y 12 UTC (b) del 29 de noviembre.

El gráfico de precipitación de la estación automática de Casablanca del día 29 (figura 3) refleja el incremento de las lluvias a intervalos desde la madrugada, con una mayor intensidad de 2 mm por minuto en las primeras horas de la mañana entre 1300 UTC y las 1400 UTC (las 8 am y las 9 am hora local).

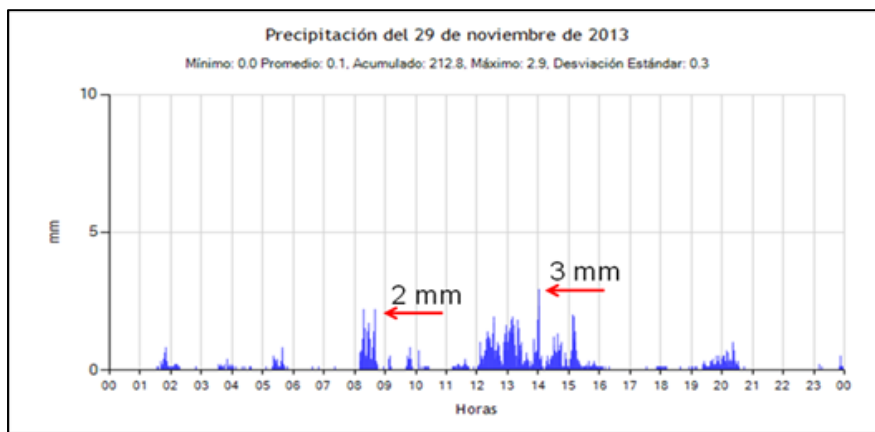
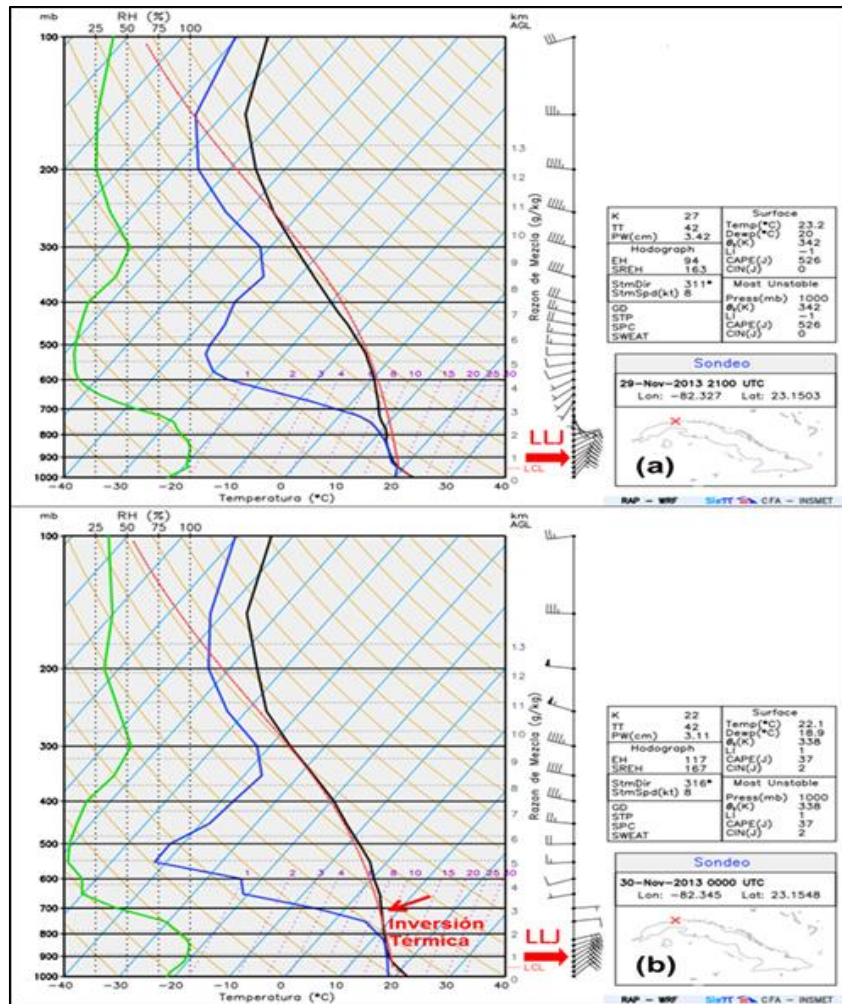


Fig. 3: Precipitación registrada en Casablanca 29 de noviembre de 2013.

Los datos obtenidos por las predicciones de los radiosondas en el horario vespertino 2100 UTC del día 29 y 0000 UTC del día 30 muestran con claridad la evolución temporal de los parámetros e índices termodinámicos con respecto a la madrugada y la mañana. La inversión térmica desapareció en el sondeo de la tarde (figura 4a) mostrando cambios en los índices de inestabilidad. Si se comparan los parámetros entre las 0900 UTC (figura 2a) y las 2100 UTC (figura 3a), se

puede apreciar que el índice de levantamiento (LI) pasó de 2 a -1, el índice K aumentó de 13 a 27 y la Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) aumentaba a 526 J/Kg, pero no era suficiente para generar tormentas convectivas de fuertes corrientes ascendentes, lo cual se demuestra en la altura de los topes máximos de las nubes obtenidos por el radar meteorológico. El contenido de agua precipitable de 29.9 mm a las 0900 UTC se incrementó a 34.2 mm a las 2100 UTC, estos valores no eran significativos, pero mostraban un incremento de la probabilidad de lluvias en la tarde, registrándose entre las 1700 UTC-2100 UTC (12:00 pm-4:00 pm) las lluvias más intensas, alcanzando los 3 mm por minuto (figura 3).



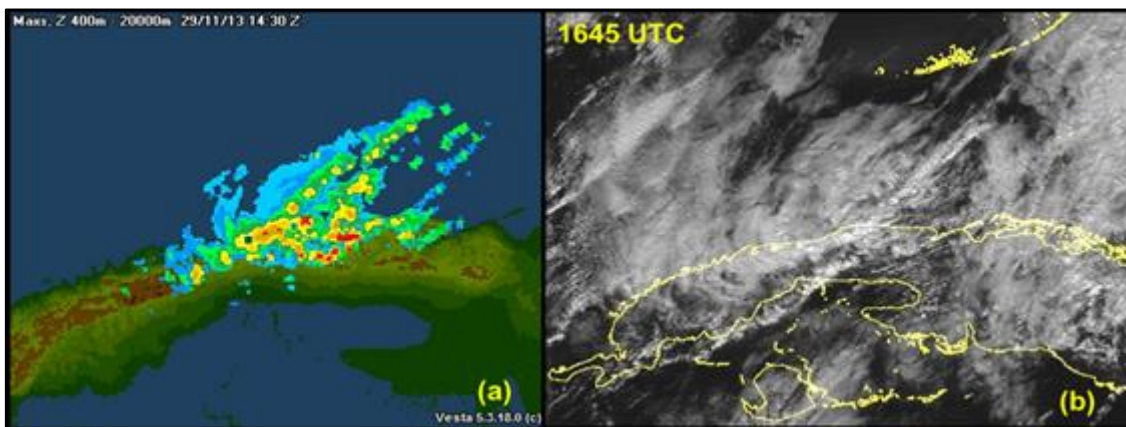
**Fig. 4:** Sondeo de Casablanca a las 2100 UTC (a) del 29 de noviembre y 0000 UTC (b) del 30 de noviembre.

En el sondeo de la noche se produce nuevamente la inversión frontal, con un ligero aumento de la temperatura en el nivel de 700 hPa (figura 3b), indicando la oscilación de la zona baroclínica entre el estrecho de La Florida y la costa norte occidental de Cuba, donde se ubica La Habana. El chorro de bajo nivel se superponía por encima del sistema frontal, haciendo que ascendiera el aire cálido y húmedo sobre el más seco y fresco, mientras el viento en los 500 hPa se incrementó girando al oeste a medida que la onda corta en este nivel se desplazaba sobre La Florida y el este del golfo de México, muy próxima o sobre el área de estudio. Este ambiente tan inestable provocó la rápida desestabilización de la atmósfera y favoreció la persistencia de la precipitación.

- **Análisis de las observaciones de radar e imágenes de satélite**

En la secuencias de observaciones de radar analizadas del día 29 (figura 5a) aparecen ecos de reflectividad fuerte sobre el área de estudio (48-53 dBZ), con algunos núcleos de máxima intensidad (55 dBZ) afectando principalmente los municipios costeros de la capital (Playa, Plaza de la Revolución, Centro Habana, Habana Vieja y Habana del Este). Los ecos mencionados se

fueron formando en el mar (estrecho de La Florida) y trasladándose hacia la zona del litoral habanero, desarrollados en una estructura cuasi estacionaria y generando en su desplazamiento Nordeste-Suroeste el llamado “Efecto de tren convectivo”, que afectó a determinadas zonas de la capital de forma casi continua con numerosas e intensas lluvias, como si fuera una tormenta cuasi estacionaria en un mismo lugar, siendo en realidad diferentes ecos convectivos, similar a lo encontrado por Quintero y Suarez (2016). En las secuencias de imágenes de satélite (figura 5b), se observa predominio de nubosidad en capas en todo el occidente de Cuba y los mares al norte, con el desarrollo de una línea de nubes bajas y algunas celdas empotradas de convección moderada, la cual se extendía directamente sobre La Habana, asociada con una zona de discontinuidad debido a la oscilación del frente casi-estacionario.

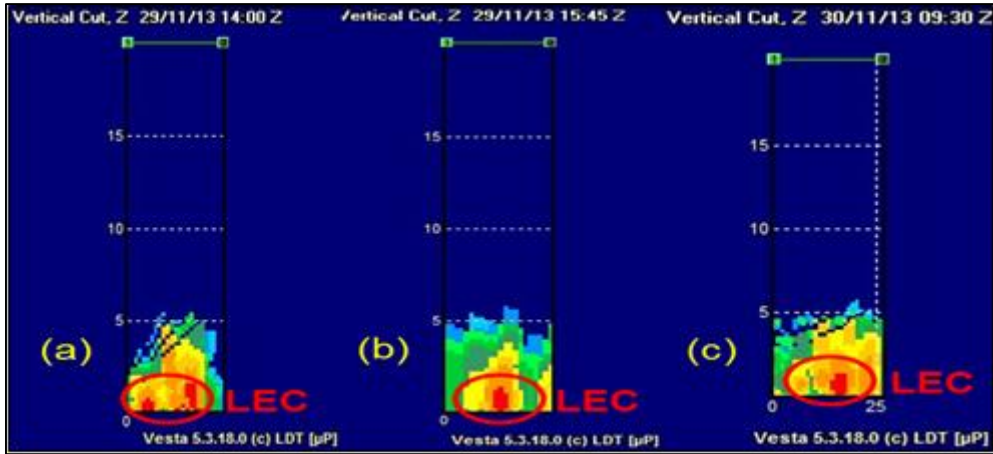


*Fig. 5: Imagen de satélite y observación de radar del 29 de noviembre de 2013.*

La constante regeneración de celdas de convección y la propagación de éstas desde el estrecho de la Florida hacia la costa norte occidental de Cuba, en la misma dirección que las celdas primarias, estuvo estrechamente relacionado a la persistencia del chorro de los bajos niveles casi estacionario que mantuvo la intrusión húmeda en los niveles inferiores de la tropósfera y a lo largo del sistema frontal, alimentando las estructuras convectivas organizadas que se desarrollaban en un entorno tan inestable.

Los sistemas convectivos que producen inundaciones súbitas, como es este caso de estudio, no necesariamente tienen que estar asociados a los que generan tiempo severo debido a que los sistemas convectivos que producen lluvias intensas, presentan un bajo centroide de ecos de máxima reflectividad (LEC), según plantea Caracena (1979). En una sección transversal o corte vertical de varias celdas vista con el radar de Casablanca (figura 6a, b y c), se aprecia que los topos del sistema convectivo de mesoescala solo alcanzaban los 5 km de altura, con un centroide de ecos de máxima reflectividad (LEC) en la capa baja de la nube entre 1 y 2 km de altura, cuando a éstos lo caracteriza su ubicación por encima del nivel de congelación (HEC); por tanto, los núcleos convectivos tenían gran cantidad de gotas de agua por debajo de la isoterma de 0 °C que se localizaba en el nivel 600 hPa (ver sondeos termodinámicos), predominando los procesos de colisión-coalescencia que favoreció la intensidad y eficiencia de la precipitación y dio lugar a la inundación súbita en La Habana.

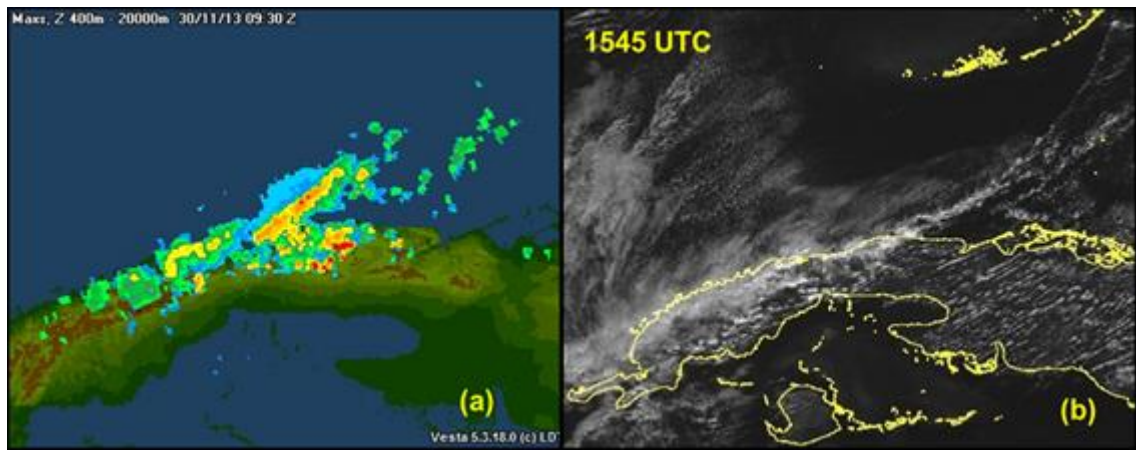




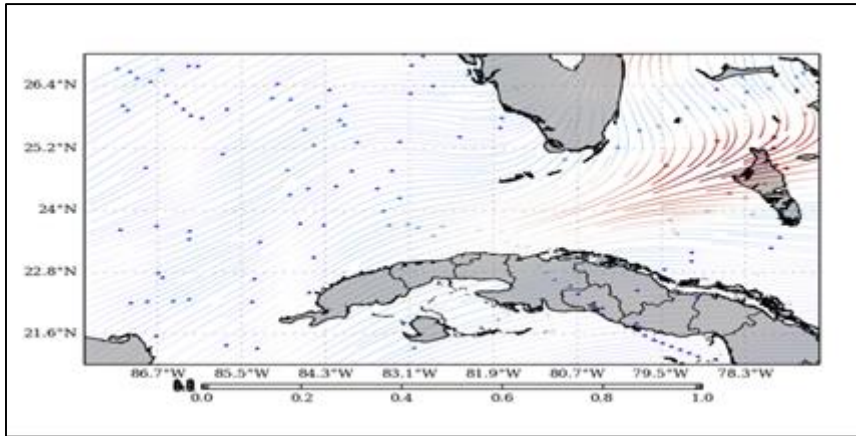
*Fig. 6: Cortes verticales a varias celdas convectivas.*

Las observaciones de radar del día 30, mostraron ecos de reflectividad fuerte (45-50 dBZ) con núcleos convectivos bien organizados que se desplazaban desde el Nordeste hacia el Suroeste (figura 7a), conectados unos con otros y formando una estructura convectiva lineal y casi estacionaria que se extendía desde el mar hasta la provincia La Habana, otra característica similar a la encontrada por Quintero y Suárez (2016). Este ordenamiento convectivo quedaba dentro de una zona de confluencia en los bajos niveles (figura 8) que se generó en el estrecho de La Florida debido a la interacción entre el flujo sinóptico del nordeste al este y el flujo de salida a mesoescala (terral) del norte nordeste durante la madrugada y la mañana en la porción sur de la península de La Florida.

En las imágenes de satélite se aprecia que el sistema frontal ya se había disipado, quedando la línea de convección moderada sobre el estrecho de La Florida (figura 7b), asociada a la zona de confluencia antes descrita, extendida casi zonal y tangente a la costa norte occidental con mayor incidencia de los municipios costeros de la provincia La Habana, dando continuidad a las persistentes precipitaciones que se había iniciado en la madrugada del 29 de noviembre. El evento lluvioso finalizó cerca de las 1600 UTC del día 30 cuando disminuye la humedad en la capa baja y desaparece el chorro de los bajos niveles.



*Fig. 7: Imagen de satélite y observación de radar del 30 de noviembre de 201*



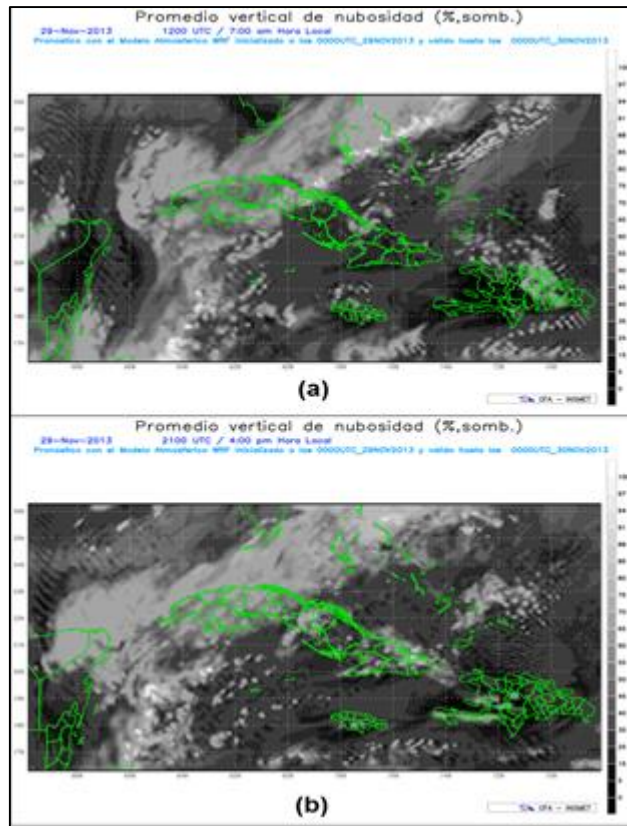
*Fig. 8: Flujo en los bajos niveles (1000 hPa) 12UTC 30 de noviembre de 2013.*

- **Efectividad del modelo de predicción numérica WRF**

En su conjunto, los modelos numéricos muestran o expresan la probable existencia de áreas de lluvias para una región o dominio extenso, donde los campos meteorológicos acoplan valores altos de humedad relativa en la tropósfera baja y media, índices de estabilidad elevados o críticos y valores adecuados de movimientos verticales. Sin embargo, aún no son capaces de resolver algunos problemas que pueden conllevar a la predicción desacertada de determinadas situaciones meteorológicas complejas. En la gran mayoría de los casos, los modelos no indican o estiman el desarrollo de eventos lluviosos extremos de pequeña escala “mesoescala“ y no son capaces de mostrar con exactitud la cantidad de lluvia caída en períodos muy cortos de tiempo producidas generalmente por nubes convectivas, o mostrar la existencia de eficientes precipitaciones por nubes de poco desarrollo vertical, las cuales pueden sobrepasar los 100 o 200 mm en 24 horas e incluso alcanzar acumulados con valores significativos, como ocurrió en la zona de Jaimanitas, municipio de Playa (costa Norte de la provincia La Habana) los días 29 y 30 de Noviembre de 2013, donde el total de lluvias fue superior a los 300 mm.

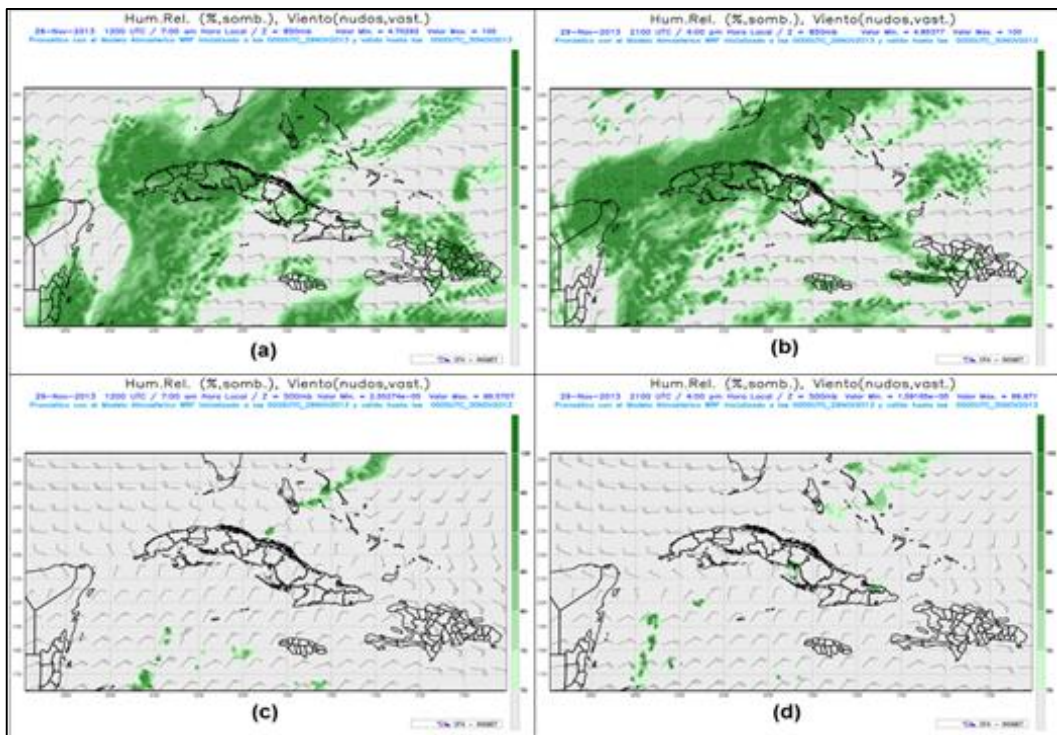
El modelo atmosférico WRF está disponible de forma operativa en el Centro de Pronósticos del Tiempo, constituyendo una de las principales herramientas de trabajo en la práctica operativa, el cual es alimentado por el modelo global GFS, por tanto la evaluación realizada es válida para la combinación de ambos modelos. Aunque su resolución ha ido mejorando con el paso del tiempo, no está exento de las desventajas antes mencionadas, por lo que continúa siendo insuficiente para simular el desarrollo y evolución de sistemas convectivos a mesoescala, pues a pesar de mostrar determinadas condiciones de inestabilidad mediante la salida de los sondeos antes explicados (chorro en los bajos niveles, alta humedad en la capa baja, cizalladura vertical necesaria en los primeros 6 km de altura, entre otros), y simular con un alto grado de confiabilidad los sistemas que a escala sinóptica influían sobre Cuba y mares adyacentes, no pudo ubicar o mostrar adecuadamente la zona de precipitación ni la intensidad alcanzada.

En las salidas del modelo válidas para las 1200 UTC y 2100 UTC del día 29 se puede observar que indicaba abundante nubosidad (figura 9) extendida sobre las regiones occidental y central de Cuba y los mares adyacentes, manifestando el desplazamiento al oeste de la banda frontal.



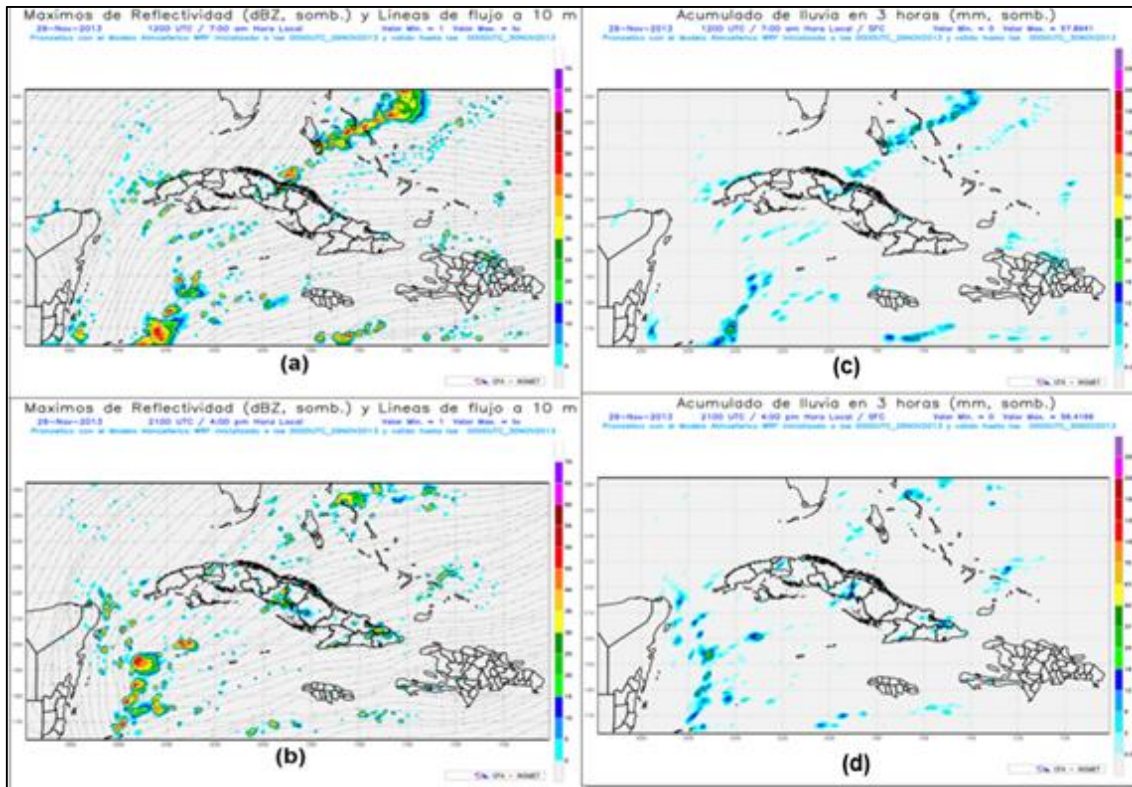
**Fig. 9:** Simulación de la nubosidad total a las 1200 UTC (a) y 2100 UTC (b).

La franja de humedad en el nivel de 850 hPa también fue bien reflejada por el modelo sobre el área de estudio y el estrecho de la Florida con valores superior al 90 % (figura 10a y b), a la que se le superpuso una diferencia significativa en los 500 hPa donde los valores eran inferior al 70 % (figura 10c y d).



**Fig. 10:** Simulación de la humedad en 850 hPa 1200 UTC (a) y 2100 UTC (b) y la humedad en 500 hPa 1200 UTC (c) y 2100 UTC (d).

Máximos de reflectividad de moderados a fuertes entre 35 y 45 dBZ se observan sobre Las Bahamas centrales y al norteste la provincia de Villa Clara, con algunas núcleos más dispersos hacia la costa norte de Artemisa y Pinar del Río, sin embargo sobre La Habana y el estrecho de la Florida no se reflejaba la existencia de máximos de reflectividad (figura 10a) y por tanto el modelo no predecía la cantidad de lluvia caída el 29 de Noviembre, solo mostraba alguna lluvia con valores entre 2 y 6 mm en 3 horas sobre las regiones de máxima reflectividad (figura 10b). Una predicción muy similar se observaba en la salida del modelo en el horario de la tarde (figura 3.16a y 3.17b).



**Fig. 11:** Simulación de máxima reflectividad y acumulado de lluvia UTC (a) y 2100 UTC (b).

Considerando los errores que pueden reflejar los modelos de pronósticos ante situaciones meteorológicas de rápida evolución en el tiempo y de esta magnitud, como fue en este caso de estudio analizado, los pronosticadores del estado del tiempo disponen de otras herramientas de trabajo ante situaciones de este tipo, como los datos de las observaciones de las estaciones de tierra, las observaciones de la nubosidad mediante los satélites meteorológicos y la información recibida por los radares meteorológicos.

La teledetección, facilita la vigilancia de eventos de tiempo severo e intensas lluvias y la rápida evolución de sistemas convectivos, su ciclo de vida y la intensidad de la precipitación en un momento y lugar determinado. De ahí la importancia de mantener el seguimiento de eventos hidrometeorológicos extremos y sus predicciones a muy corto plazo (now casting) a través del uso y explotación en la práctica operativa del radar y el satélite meteorológico, pero teniendo en cuenta que realizan observaciones en tiempo real y los pronósticos quedarían reducidos a plazos muy cortos, siendo esto una limitante o desventaja, pues no permite brindar una respuesta más oportuna a los tomadores de decisiones para mitigar las pérdidas y daños que puedan provocar determinadas situaciones de intensas lluvias a escala local. Por tal motivo, continuar profundizando en los estudios de estos fenómenos meteorológicos peligrosos sigue siendo una necesidad, con el fin de mejorar la efectividad de los pronósticos de abundantes precipitaciones a plazos de 24 a 72 horas, que permitan emitir Alertas Tempranas y Avisos Especiales más certeros y adecuados.

## CONCLUSIONES

El evento de lluvia intensa que afectó a la provincia La Habana los días 29 y 30 de noviembre de 2013, se caracterizó por la interacción de sistemas a escala sinóptica y condiciones muy favorables en la mesoescala que propiciaron la rápida desestabilización de la atmósfera.

1. Como principal rasgo sinóptico se constató la presencia de un frente casi-estacionario oscilando entre el estrecho de La Florida y la costa norte occidental de Cuba, e interactuando con una vaguada invertida en la tropósfera baja y una onda corta en la tropósfera media y alta, además de la presencia de un chorro de bajos niveles casi-estacionario. Otras características sinópticas involucradas con el proceso fueron: la presencia de una zona de confluencia en los bajos niveles orientada Nordeste-Suroeste en el estrecho de la Florida y la costa norte occidental de Cuba, una humedad relativa superior al 90 %, una capa seca en la tropósfera media con valores de humedad relativa inferiores al 30 %, y una inversión térmica de tipo frontal en el nivel de 750 hPa.
2. Los rasgos mesoescales asociados con la banda de nublados generadora de lluvias eficientes, estuvieron caracterizados por la formación de ecos centroide de máxima reflectividad (LEC) en la capa baja de las nubes y el establecimiento del “Efecto de tren convectivo” a lo largo de la línea de chubascos y lluvias que afectó a la provincia La Habana.
3. El modelo de predicción numérica WRF reflejó satisfactoriamente la ubicación de los sistemas sinópticos involucrados y simuló un entorno favorable mediante los sondeos termodinámicos generados, sin embargo, subestimó la disposición general a mesoescala de áreas de lluvia y la intensidad de la misma asociados con el evento hidrometeorológico estudiado.

## RECOMENDACIONES

Extender el estudio aquí presentado a otros casos de lluvias intensas en presencia de frentes casi-estacionarios sobre el estrecho de la Florida y en el entorno de La Habana y re-evaluar el modelo WRF en función de los criterios a mesoescala obtenidos en esta tesis.

Introducir los conocimientos adquiridos en la práctica diaria y operativa de los turnos de trabajo del Centro de Pronósticos del Tiempo y de los Centros Meteorológicos Provinciales.

## BIBLIOGRAFIA

- Alfonso, A. y A. Florido (1992): “Grandes precipitaciones en Cuba”. Informe de Resultado Científico aprobado por el Consejo Científico del Instituto de Meteorología en el mes de Octubre 1992. (inérito).
- Caracena, F. et al. (1979): “Mesoanalysis of the Big Thompson storm. Monthly Weather Review, pp 1-17, 107 pp.
- Fernández, A. J. y Y. Díaz (2005): “Catálogo de los Procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el período 1979-1993” Editorial Academia, 167 pp.
- González, P. C. (1984): “Algunas características de los sistemas frontales que produjeron precipitaciones por más de 100 mm en 24 horas”, en Primer Seminario Taller de Desastres Naturales, UNDRO.
- González, M. I. (2014): “Lluvia intensa en el período poco lluvioso desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo”, Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, La Habana, 75. pp.
- Lecha, L y A. Fernández (1982): “Relación entre la distribución de las precipitaciones en la región central de Cuba y el campo de viento a mesoescala y escala sinóptica”. Resumen de los trabajos de la V Jornada Científica del INSMET de la A.C.C. La Habana, 19pp.
- Maddox, R. A., C. F. Chappell, and L. R. Hoxit, 1979: Synoptic and mesoalpha scale aspects of flash flood events. Bull. Amer. Meteor. Soc., 60, 115–123.

- Mursulí, A. (2006): “Comportamiento de los días con lluvias intensas en la provincia de Ciego de Ávila en el período lluvioso y su relación con los Procesos Sinópticos Objetivos”. Tesis para optar por el grado académico de Master en Ciencias Meteorológicas, Ciudad de La Habana, 2006, 120 pp.
- Quintero P. D y D.M. Suárez (2016): “Estudio de la situación de precipitaciones intensas de los días 22 y 23 de octubre de 2015 en Canarias” Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Madrid.
- Orbe, G. (2009): “Sistema de reconocimiento de patrones de eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba”. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en ciencias meteorológicas. La Habana, 133 pp.
- Rubiera, J. y A, Caymares (1998): Eventos del tiempo severo inducidos por el ENSO en la temporada invernal cubana. 11 pp.
- Sempere, D. et al. (2000): “El episodio pluviométrico del 10 de Junio en Cataluña. Un primer estudio hidrometeorológico”, Ingeniería del Agua, Vol. 7, No.2 Junio, pp.105-115.