

Análisis de un Sistema Convectivo de Mesoescala que afectó el Paraguay el 3 de febrero del 2001

Carlos Roberto Salinas¹

*Dirección de Meteorología e Hidrología, Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC),
Asunción, Paraguay*

WALTER FERNÁNDEZ, JORGE A. GUTIÉRREZ Y ELADIO ZÁRATE

*Laboratorio de Investigaciones Atmosféricas y Planetarias,
Escuela de Física y Centro de Investigaciones Geofísicas,
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica*

(Recibido 21 de agosto de 2001, aceptado 30 de octubre de 2001)

ABSTRACT

Synoptic and mesoscale aspects related to the formation of a mesoscale convective system (MCS), which affected Paraguay on 3 February 2001, are analyzed. The MCS has its origin between 18:00 and 21:00 GMT on the 2nd of February on the southeastern part of Bolivia, affecting afterwards the northern part of Argentina and the central and southern regions of Paraguay. The MCS produced intense rains over the Paraguayan territory, specially in the central part of the Región Oriental, where 69 mm fell in two hours at Villarrica. The rainfall type over the Paraguayan territory was mostly of convective origin.

The severe convective processes had their origin at the time of maximum solar heating in the area, where low pressures at lower layers and an anti-cyclone at the top of the troposphere were predominating. The principal factors on the synoptic scale and the mesoscale, which generated the MCS, were: (1) The presence of a Low Level Jet from which the MCS originated, which was generating a cyclonic horizontal shear over the area; (2) the formation of strong convergence associated with diurnal heating and a low pressure system at the surface in the area where the MCS generated; (3) the presence of humid air advected by the Low Level Jet, showed by dew point temperatures greater than 22 °C in the area of development of the MCS; and (4) the predominance, at the birth of the system, of a pre-existing very divergent anti-cyclonic system at the upper troposphere, which was intensified by the own evolution of the MCS.

1. Introducción

La posición geográfica del Paraguay, ubicado aproximadamente entre las latitudes 19,5° S – 27° S, y los meridianos 54° O – 62,3° O, hace que esté expuesto a diferentes tipos de sistemas atmosféricos, cuyos orígenes pueden situarse al Norte o hacia zonas australes del territorio paraguayo. Entre los sistemas que con mayor frecuencia afectan al Paraguay están los sistemas convectivos de mesoescala (MCSs, por sus siglas en inglés).

Los MCSs son generalmente sistemas más grandes que las tormentas individuales (e.g., Cotton y Anthes, 1989; Houze, 1993). Estos sistemas producen en gran proporción las precipitaciones sobre la tierra, de esta forma adquieren gran relevancia desde el punto de vista climatológico. De hecho, en algunas partes del océano tropical y subtropical, y las planicies de los Estados Unidos, los MCSs son dominantes en la contribución de la precipitación. Estos

sistemas frecuentemente contienen una gran región de precipitación cumuliforme, otra de precipitación estratiforme y una circulación mesoescalar, con influencia de la escala sinóptica.

Los MCSs ocurren en una gran variedad de formas, sin embargo ellos poseen algunas características en común que permiten realizar una definición: *es un sistema que ocurre en conexión con un conjunto de tormentas y produce precipitaciones en un área contigua de aproximadamente 100 km o más en la escala horizontal en por lo menos una dirección* (Houze, 1993). Esta definición indica de hecho que algunos MCSs puedan ser largos y angostos. Estos sistemas típicamente tienen un periodo de vida entre 6 y 12 horas. Las tormentas producidas por los MCSs frecuentemente originan lluvias intensas, vientos fuertes muy perjudiciales y en algunos casos violentos tornados y granizos.

Los MCSs que se desarrollan sobre la parte central

Corresponding author address: Carlos Roberto Salinas, Dirección de Meteorología e Hidrología, Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), Asunción, Paraguay. E-mail: salinascr@hotmail.com

de América del Sur en su mayoría afectan gran parte del año al territorio paraguayo (Velasco y Fritsch, 1987; Machado et al., 1997). Sin embargo, es en el período que va de noviembre a mayo en el cual se desarrollan los más intensos y que generan consecuencias muy notorias en el comportamiento de algunas variables de interés, por ejemplo la precipitación. Es de resaltar que la agricultura, la ganadería y la generación de electricidad son tres pilares de la economía del Paraguay, y todos se ven fuertemente afectados por la escasez o abundancia de las lluvias.

Enero y febrero son meses en los que se producen algunos de los máximos secundarios de lluvia en la mayoría de las estaciones que se encuentran en la Región Oriental del Paraguay (Báez y Fernández, 1994), coincidente con una parte del periodo en el que se desarrollan con alta frecuencia MCSs en esta parte del territorio Sudamericano (Velasco y Fritsch, 1987).

Este trabajo tiene por objetivo realizar análisis sinópticos y de mesoescala para determinar las causas de la formación de un sistema convectivo de mesoescala que afectó el territorio paraguayo el 3 de febrero del 2001.

No existen antecedentes sobre trabajos realizados específicamente sobre casos de MCSs sobre el territorio paraguayo. No obstante, otros trabajos realizados en los trópicos sobre sistemas convectivos, particularmente en América del Sur constituyen una base de referencia importante (e.g., Betts et al., 1976; Fernández, 1980, 1982, 1998; Garstang et al., 1994; Greco et al., 1994; Houze, 1977; Leary y Houze, 1979; Miller y Betts, 1977; Velasco y Fritsch, 1987; Machado et al., 1997).

2. Datos

a. Observaciones de superficie

Para este trabajo se tomaron en cuenta los datos sinópticos generados cada seis horas por la red de estaciones meteorológicas que cubre el sector centro y Sur de América del Sur. Estos datos se encontraban en el formato del mensaje FM 12-IX SYNOP. Los mensajes fueron decodificados y utilizados para el análisis a escala sinóptica, mientras que para el análisis a mesoescala, éstos se complementaron con los datos generados por la red de estaciones meteorológicas de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH), dependiente de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) del Paraguay. Esta institución también facilitó los pluviogramas para el análisis de la lluvia en algunas estaciones.

b. Datos de altura

Estos fueron obtenidos mediante Internet del reanálisis NCEP/NCAR; se generaron mapas de geopotencial en los niveles de 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y 250 hPa cada 6 horas. Para la ubicación de los chorros de

bajo y alto nivel se generaron campos de isotacas promediados diariamente en los niveles de 850 hPa y 250 hPa. En todos los casos los mapas fueron desplegados con el programa de graficación GRADS.

c. Radiosondeos

Lastimosamente la cantidad de estaciones que generan datos mediante sondeos atmosféricos en la zona de ocurrencia del evento meteorológico está lejos de lo ideal, esto limitó bastante el análisis de la atmósfera en la vertical. Aún así, se consideraron las pocas estaciones existentes y que se encuentran en territorio argentino y brasileño, estas son; Salta (24,85° S 65,48° O), Resistencia (27,45° S 59,05° O) y Foz de Iguazú (25,52° S 54,58° O). Estas estaciones realizan sondeos diarios a las 12:00 UTC (09:00 horas en el verano y 08:00 horas en el invierno, hora de Paraguay). A estos datos se tuvo acceso mediante Internet y fueron graficados con un software administrado por el departamento de ciencias atmosféricas de la Universidad de Wyoming, EE.UU.

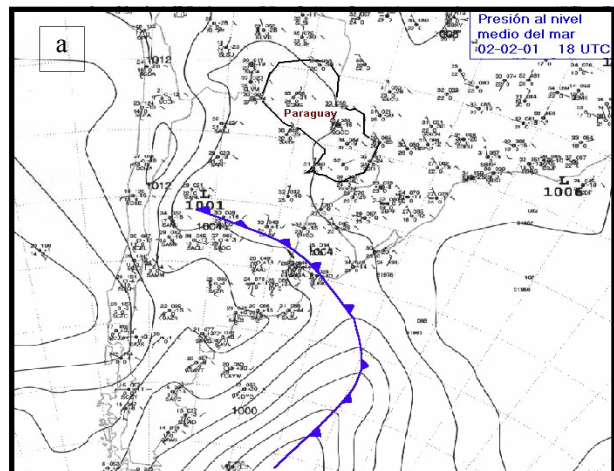
d. Imágenes de satélite

Se utilizaron imágenes obtenidas por el satélite geostacionario GOES-8. Para este trabajo se tuvo acceso a imágenes de este satélite cada tres horas en las bandas del visible (0,65 μm), infrarrojo (10,7 μm) y vapor de agua (6,75 μm), estas fueron provistas por Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Universidad Estatal de Colorado.

3. Situación sinóptica

a. Cartas de superficie

El día 2 de febrero a las 18:00 UTC (Figura 1a), un sistema de baja presión se situaba sobre la parte central de América del Sur, centrada en 30° S 66° O



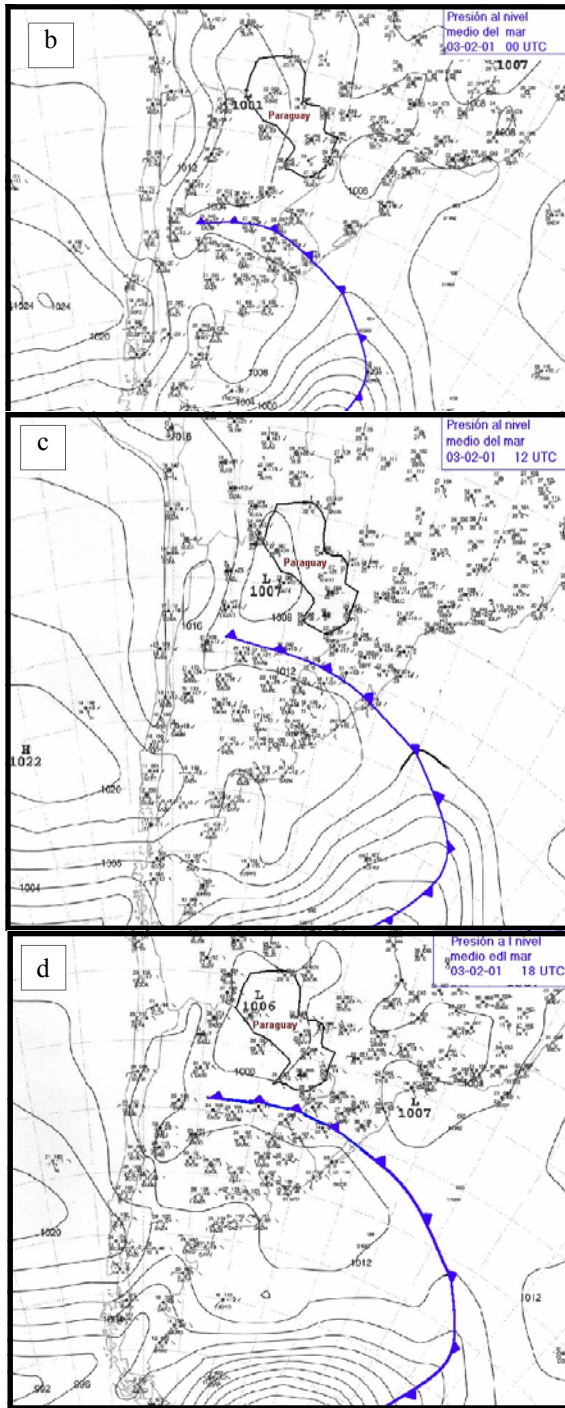


Figura 1. Mapa de superficie correspondiente al 2 de febrero del 2001 a las 18:00 UTC, y del 3 de febrero del 2001 a las 00:00 UTC, 1200 UTC y de las 18:00 UTC.

aproximadamente, tenía un valor mínimo de presión de 1001 hPa y generaba vientos predominantes del sector Norte sobre el Sureste de Bolivia, Paraguay, Norte argentino, Uruguay y el Sur del Brasil. Temperaturas de hasta 36 °C y temperaturas del punto de rocío que oscilaban

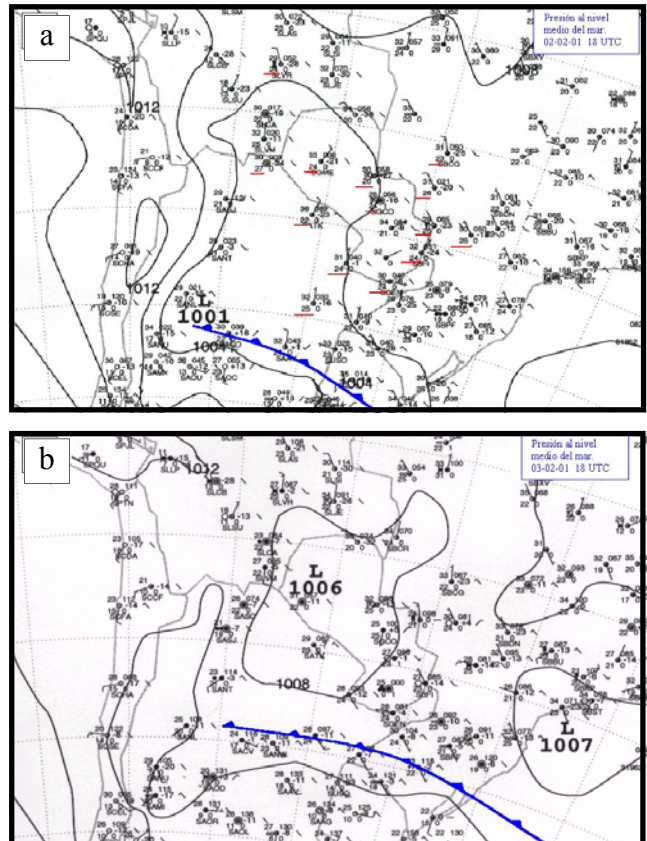


Figura 2. Mapas de superficie de las 18:00 UTC ampliadas sobre el sector de interés, correspondiente al 2 y 3 de febrero del 2001.

entre 22 y 27 °C, indicaban la presencia de una masa de aire cálida y húmeda en la zona mencionada, lo que se puede ver mejor en la Figura 2a. Más al Sur se encontraba un frente frío que se extendía desde una baja presión en el océano Atlántico e ingresaba sobre el Río de la Plata, debilitándose paulatinamente sobre el continente, pero su influencia llegaba hasta la provincia de Mendoza en las laderas de la cordillera de los Andes.

En las siguientes cartas de superficies (Figuras 1b, 1c y 1d) se puede ver el avance progresivo del frente frío hacia el Este-Noreste. Este sistema al interactuar con las condiciones preexistentes generó un aumento de la convergencia sobre el Norte argentino y el Sur de Paraguay. Al día siguiente, a las 18:00 UTC (Figura 2b), el frente frío se encontraba sobre el litoral argentino y el núcleo del sistema de bajas presiones se desplazó en dirección Norte hasta el Chaco paraguayo, aumentando su valor central de 1001 a 1006 hPa y generando vientos, de componente Norte sobre el Norte de la Región Occidental y vientos débiles del sector Sureste en el centro y Sur de la Región Oriental del territorio paraguayo.

b. Troposfera baja

A las 18:00 UTC del 02 de febrero, se observa en

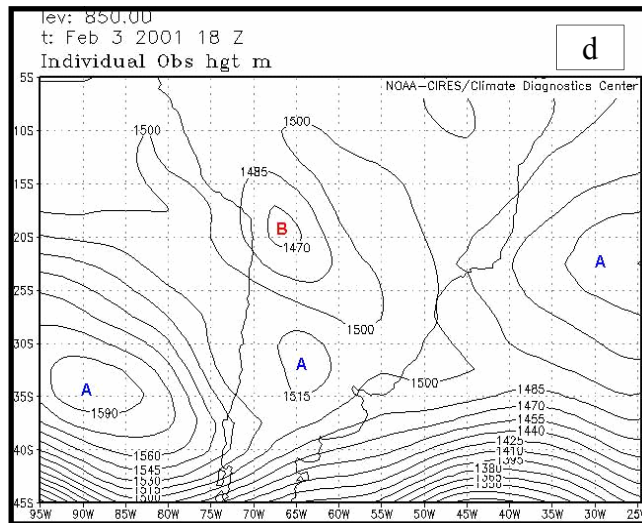
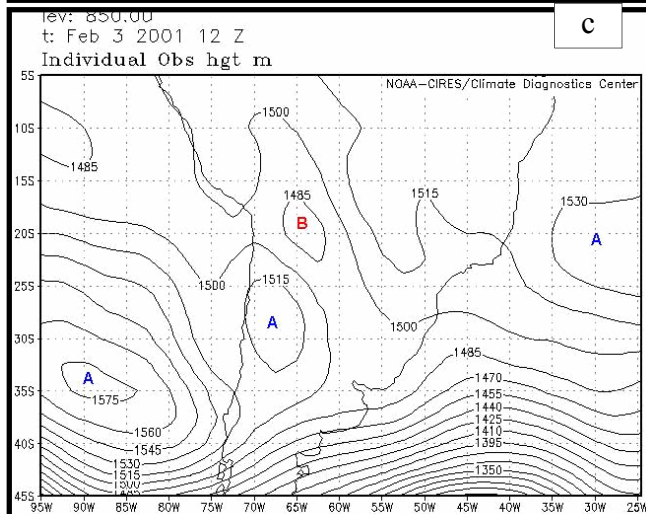
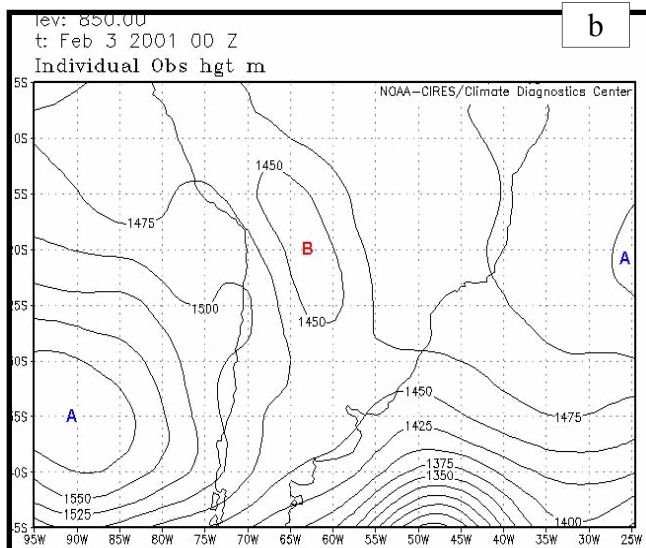
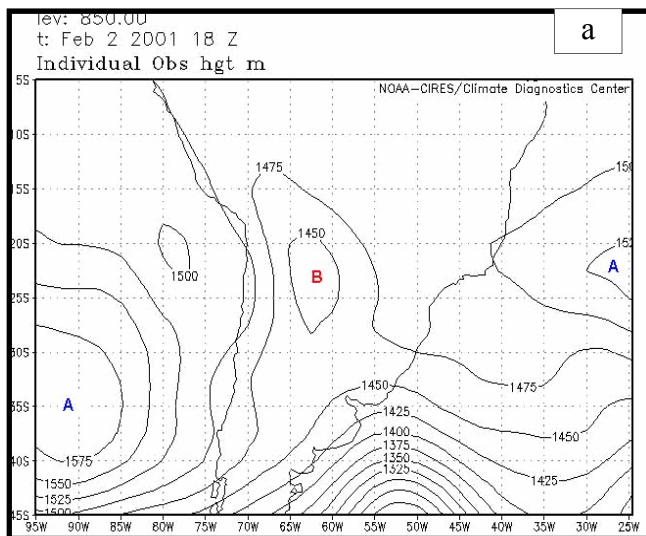
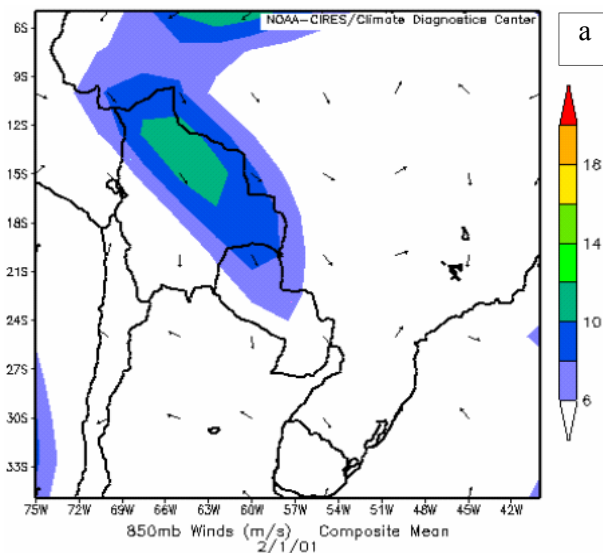


Figura 3. Mapas de altura en el nivel de 850 hPa, de las 18:00 UTC correspondiente al 2 de febrero del 2001, y de las 00:00 UTC, 12:00 UTC y las 18:00 UTC del 3 de febrero del 2001.

850 hPa un núcleo de baja presión extendiéndose sobre el Sur de Bolivia, Norte de Argentina y el Noroeste de Paraguay (Figura 3a). En latitudes más elevadas se nota una vaguada asociada al frente frío en superficie, con eje extendiéndose casi meridionalmente desde, 45° S 52° O en el océano Atlántico, hasta las costas del Río de la Plata. A las 12:00 UTC del 3 de febrero (Figura 3c), se observa un sistema de alta presión que incursionó sobre el continente desde el Suroeste cerca de 30° S e impulsó el frente frío hacia el Este-Noreste como se observa en la siguiente carta (Figura 3d).

El patrón del campo de isohipsas observado en 850 hPa se repite en el nivel de 700 hPa (no mostrado aquí) con leves diferencias, ya que la vaguada sobre el océano



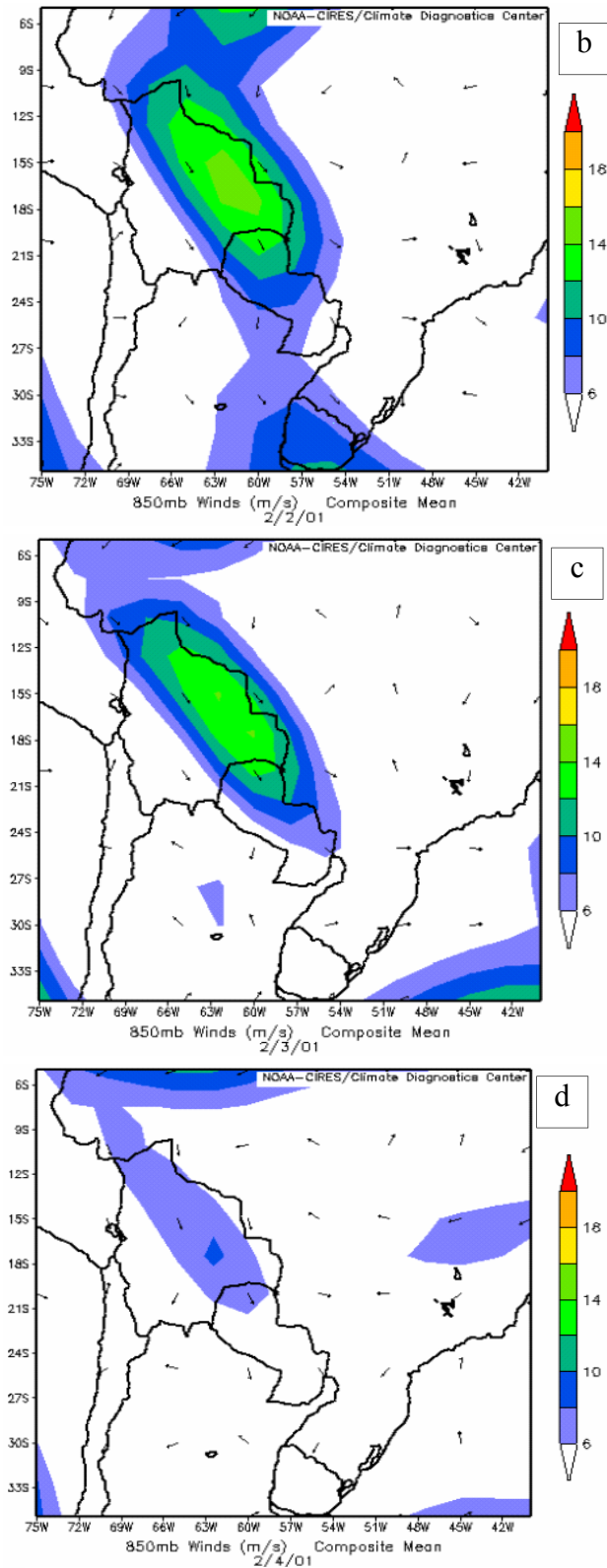
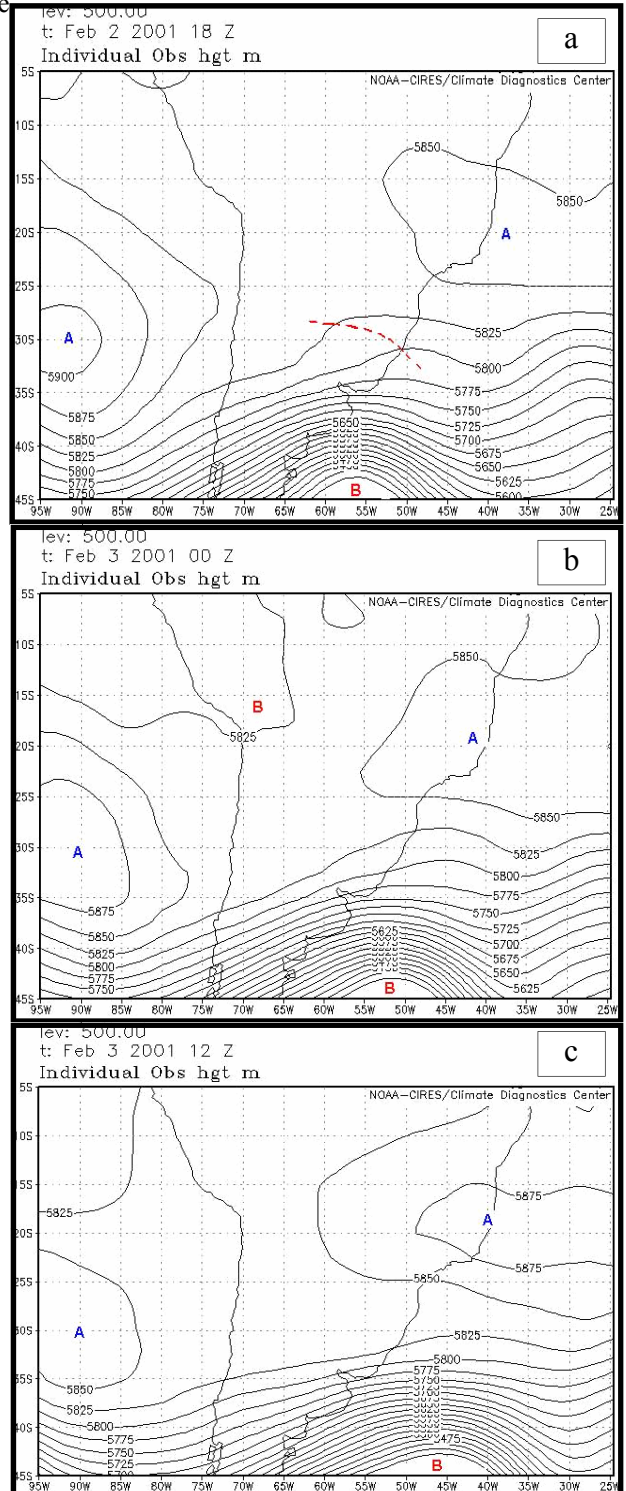


Figura 4. Mapas de altura en el nivel de 850 hPa, viento promediado de los días 1, 2, 3 y 4 de febrero del 2001.

Atlántico se encuentra ligeramente retrasada respecto a su

posición en 850 hPa y el sistema de alta presión es menos intenso que en 850 hPa.

En el nivel de 850 hPa también se evidencia una corriente en chorro ubicada al Noreste de la depresión observada en la carta de superficie de las 18:00 UTC del 2 de febrero, tal como puede notarse en la secuencia de mapas d e



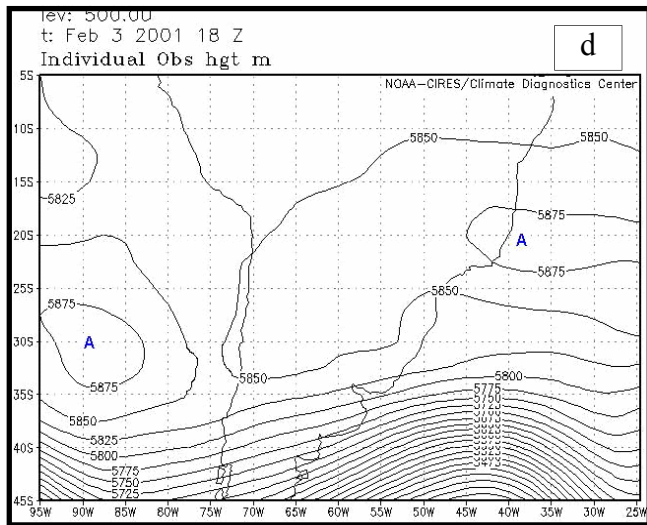


Figura 5. Mapas de altura en el nivel de 500 hPa, de las 18: 00 UTC correspondiente al 2 de febrero de 2001, y de las 00:00 UTC, 1200 UTC y las 18:00 UTC del 3 de febrero de 2001.

isotacas promediado diariamente (Figura 4). El chorro tenía una ligera curvatura ciclónica y se extendía bordeando la cordillera de los Andes, desde el Noreste de Bolivia hasta el Chaco paraguayo, soplando en dirección Sureste y con velocidades que excedían los 15 m/s, colaborando de esta forma con la fuerte advección de humedad en capas bajas sobre el Norte de Argentina, el extremo Sur de Brasil y el territorio paraguayo. El 3 de febrero (Figura 4c) el Chorro de Bajo Nivel se mantuvo aún en la misma zona y con la misma intensidad, sin embargo durante el día 4 de febrero (Figura 4d) se debilitó notablemente, llegando su intensidad en promedio a solo 6 m/s.

c. Troposfera media y alta

En el nivel de 500 hPa el campo de geopotencial de las 18:00 UTC (Figura 5a), muestra una vaguada bien organizada y ubicada sobre el océano Atlántico, este sistema estaba asociado

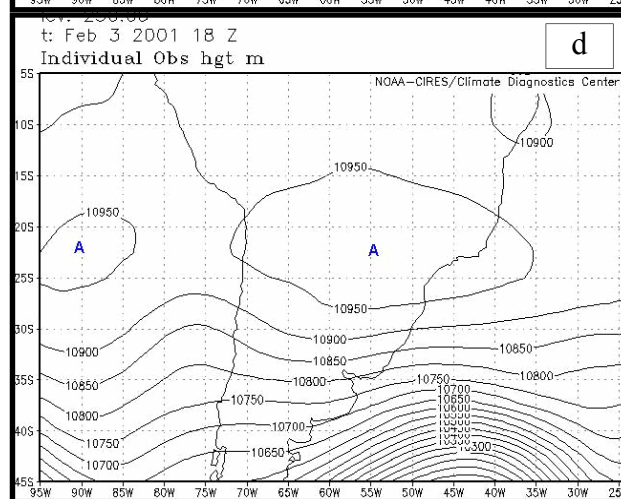
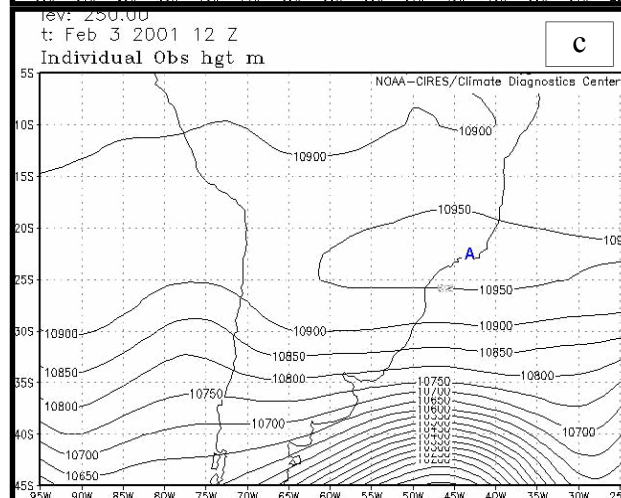
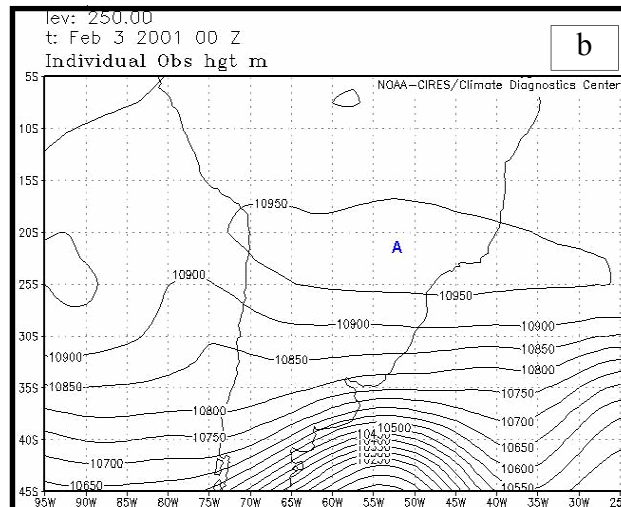
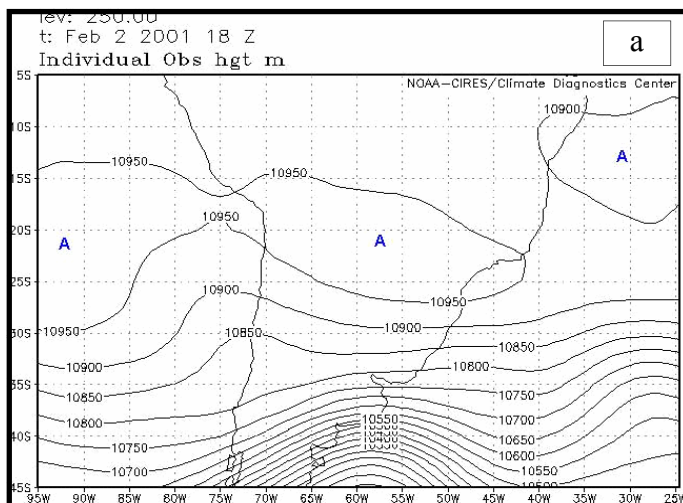


Figura 6. Mapas de altura en el nivel de 250 hPa, de las 18: 00 UTC correspondiente al 2 de febrero de 2001, y de las 00:00 UTC, 1200 UTC y las 18:00 UTC del 3 de febrero de 2001.

con el frente en superficie. Un poco más al Norte de esta vaguada se observa una débil perturbación que se

desplazaba hacia el Este afectando el Sur de Paraguay y el Sureste de Brasil, marcada en la figura en líneas de punto.

En ambos océanos se observan dos sistemas de alta presión, uno de ellos centrado en 20° S 40° O en el Atlántico y el otro centrado en 30° S 90° O en el Pacífico. Ambos extendían una dorsal sobre el continente y dejaban un área de escaso gradiente sobre la zona central de Sudamérica. Sin embargo para el día siguiente, entre las 12:00 y 18:00 UTC (Figuras 5c y 5d), el sistema de alta presión del Atlántico se intensificó extendiendo una dorsal

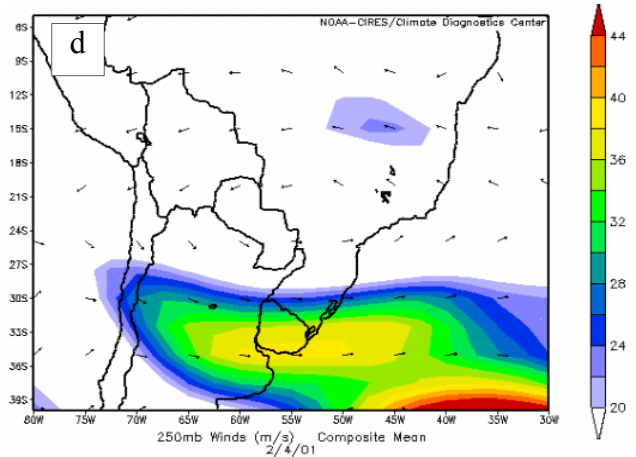
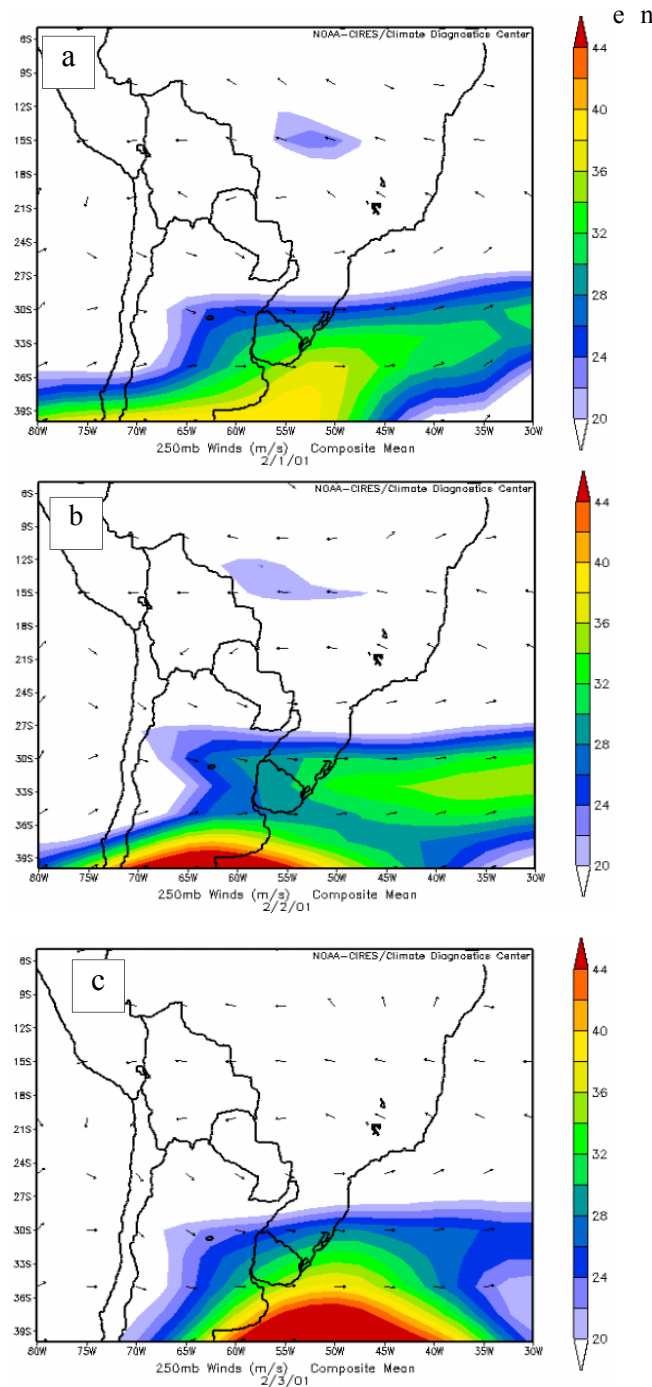


Figura 7. Mapas de altura en el nivel de 250 hPa, viento promediado de los días 1, 2, 3 y 4 de febrero del 2001.

forma más pronunciada sobre el territorio brasileño, e incluso llegando su influencia sobre Paraguay y el Norte de Argentina.

En 250 hPa. (Figura 6) se observa el predominio de circulación anticiclónica sobre la zona central de América del Sur (área de estudio) en todo el periodo analizado, desde las 18:00 UTC del 2 de febrero hasta las 18:00 UTC del 3 de febrero. Se puede inferir de esta situación, que la atmósfera en su capa superior se encontraba muy divergente. Más al Oeste en el océano Pacífico, se puede ver una vaguada en la carta de las 18:00 UTC del 2 de febrero (Figura 6a). Este sistema se mantuvo estacionario mientras duró el evento, como puede verse en las siguientes cartas. El hecho que esta vaguada no haya incursionado sobre el continente más la divergencia generada por el sistema convectivo en este nivel, ayudaron a que se intensificara y se estableciera un sistema anticiclónico cerrado y achatado centrado sobre el continente, el cual extendía una dorsal de Este a Oeste aproximadamente sobre la latitud 20 S (Figura 6d).

En la secuencia de la Figura 7, que muestra isotacas promediadas diariamente, se observa que en los días 2 y 3 de febrero (Figuras 7a y 7b) una componente de la corriente en Chorro Subtropical se extiende a través de Argentina, Uruguay, Sur del Brasil hasta el Atlántico, con velocidades máximas de hasta 34 m/s. El chorro modificó su forma y se intensificó al día siguiente (Figuras 7c y 7d) pero se mantuvo al Sur de Paraguay y Brasil. En esta secuencia también se puede evidenciar el predominio de circulación anticiclónica sobre Paraguay, Bolivia y el Sur de Brasil.

4. Evolución del sistema analizado con imágenes de satélite

En la Figura 8 se observa la secuencia de las imágenes de satélites en infrarrojo tomadas por el satélite

GOES-8, las cuales fueron captadas cada tres horas y muestran la evolución del sistema convectivo de mesoescala. La región incluida dentro de cada imagen se extiende aproximadamente desde 19° S hasta 30° S, y desde 70° O hasta 50° O, abarcando la parte central de Sudamérica e incluyendo el Sur de Bolivia,

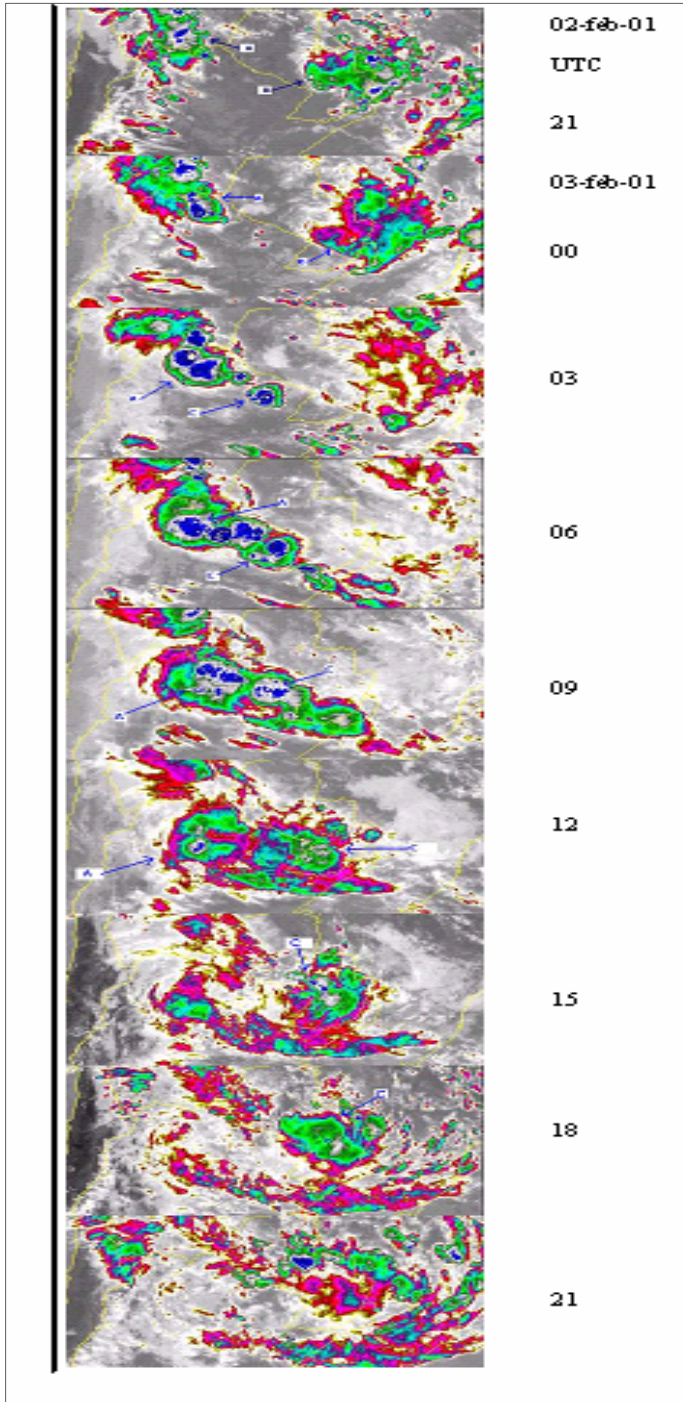


Figura 8. Secuencia de fotografías en el infrarrojo tomadas por el GOES-8 cada tres horas, mostrando el movimiento y la evolución del sistema convectivo de mesoescala. La parte superior de la fotografías es aproximadamente 19 S.

Norte de Argentina, Paraguay y el Sureste de Brasil.

En la imagen correspondiente a las 21:00 UTC del 02 de febrero, se pueden ver dos sistemas convectivos que están indicados con las letras A y B, un poco más al Sur también se observa convección aislada a lo largo del lado Este de la cordillera de los Andes. El sistema B se

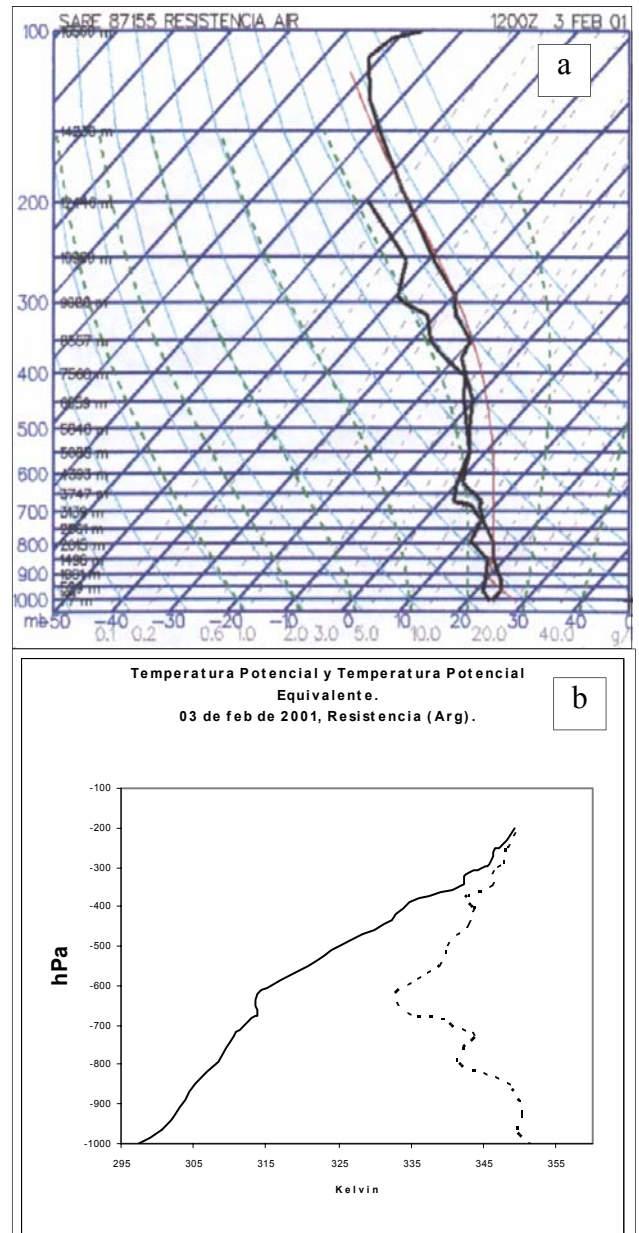


Figura 9. (a) Sondeo tomado en Resistencia, Argentina (27,45 S 59,05 W) a las 12:00 UTC el 3 de febrero del 2001. No se midieron datos de viento ese día. (b) Perfil vertical de la temperatura potencial y la temperatura potencial equivalente.

encontraba centrado sobre el Norte de la Región Oriental del Paraguay, pero también extendía su influencia sobre Paraná (Brasil), mientras que el sistema A recién se había formado sobre el Suroeste de Bolivia, en la ladera de la

cordillera de los Andes. Se estima que el sistema A se

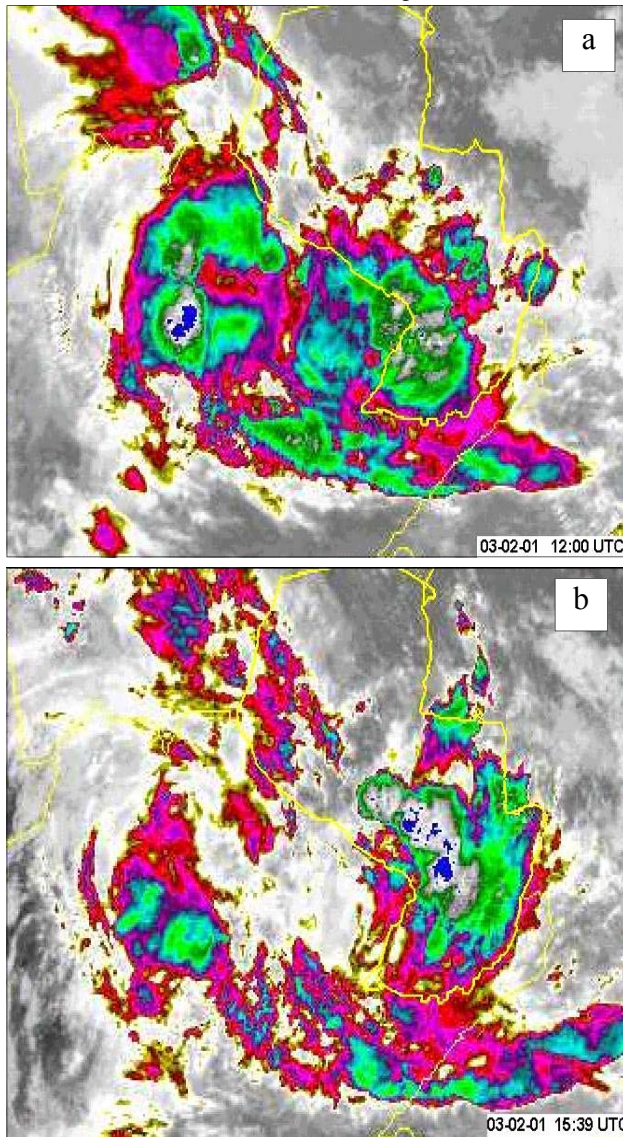


Figura 10. Imágenes de satélite en infrarrojo, correspondientes a las 11:45 y a las 15:39 UTC del 3 de febrero de 2001.

generó entre las 18:00 y las 21:00 UTC, lapso en el que se produce el máximo calentamiento en esa zona en esta época del año (la imagen de las 18:00 UTC quedó excluida en esta secuencia). Las cartas analizadas en las Figuras 4 y 2, correspondientes a los niveles de 850 hPa y superficie, muestran la posición del Chorro de Bajo Nivel al Noreste de la zona donde se formó este sistema y valores del punto de rocío en superficie en el orden de 22 a 27 °C. Es conocido que éstas son condiciones favorables para la formación de complejos convectivos de mesoescala sobre Sudamérica (Velasco y Fritsch, 1987).

Las características de la atmósfera libre en el 3 de febrero, a las 12 UTC, pueden verse en el sondeo (Figura

9a) realizado en la localidad de Resistencia, Argentina (27,45° S 59,05° O), siendo esta estación la más cercana al origen y a la zona de desplazamiento del sistema convectivo. En este sondeo se puede observar la profundidad a la que llega la capa húmeda, alcanzando 400 hPa. En la Figura 9b se observa el perfil vertical de la temperatura potencial equivalente, donde se evidencia la existencia de inestabilidad convectiva desde la superficie hasta 600 hPa aproximadamente.

Entre las 00:00 y las 03:00 UTC del día 3 de febrero, las imágenes muestran la disipación del sistema B, sin embargo el sistema A se expande, formando varias células, las cuales se desplazan hacia el Sureste. En la imagen de las 03:00 UTC se observa un núcleo convectivo con la etiqueta C, el cual se formó presumiblemente como consecuencia del aflujo generado por el sistema A y que interactuó con el aire cálido y húmedo preexistente en la zona. Este núcleo convectivo C afectó la estación Las Lomitas (24,75° S 60,5° O) en el territorio argentino, donde produjo 82 milímetros de lluvia entre las 03:00 y las 12:00 UTC. En la imagen de las 06:00 UTC y con base a los falsos colores de las imágenes, se observa el momento de máxima intensidad del sistema convectivo y se puede identificar varios núcleos convectivos dentro de un gran manto nuboso, el cual se extiende de Noroeste a Sureste sobre territorio argentino y bordeando la frontera con Paraguay. Esta forma que adquiere el sistema convectivo, con un largo de aproximadamente 1200 km y un ancho de 550 km, lo descarta como un Complejo Convectivo de Mesoescala (MCC, por sus siglas en Inglés) ya que su excentricidad es de solo 0,46 y no cumple con el requisito de excentricidad propuesto por Maddox (1980).

Entre las 09:00 y las 12:00 UTC se aprecia la separación en dos del sistema convectivo. Los núcleos A y C van disminuyendo en intensidad, pero al mismo tiempo que el núcleo A se disipa, el C se mueve al Este e ingresa sobre el territorio paraguayo, lo que se puede apreciar mejor en la Figura 10 correspondiente a la imágenes ampliadas de las 12:00 y las 15:39 UTC. Este cambio en la dirección del movimiento del sistema convectivo podría estar ligado a la presencia del frente frío sobre el Norte argentino, cuya posición se observa en la Figura 2b.

En el periodo comprendido entre las 12:00 y las 21:00 UTC, la resolución de las imágenes de la Figura 8 no es suficiente para visualizar la evolución del sistema cuando afecta al territorio paraguayo, por lo que éstos son complementados con las imágenes de alta resolución en la ventana del visible, las cuales se muestran en la Figura 11.

Entre las 13:00 y las 16:10 UTC (Figuras 11a, b, c, y d), se observa la progresiva intensificación del sistema convectivo que ingresó sobre el Paraguay, el cual se extendió desde el bajo Chaco en la Región Occidental y la zona centro y Sur de la Región Oriental. El sistema adquirió una forma de arco y se desplazó lentamente hacia el Noreste, probablemente como consecuencia del viento con

componente Suroeste, el cual estaba asociado a la circulación de un sistema de baja presión centrado en el Chaco paraguayo, como puede verse en la Figura 2b. Una imagen mejorada en infrarrojo y con escala de colores del sistema se puede ver en la Figura 10b, el cual nos permite identificar núcleos convectivos con temperaturas en sus topes entre -50 y -70 °C. En este periodo se registraron las precipitaciones más importantes en la localidad de Villarrica en el centro, y San Pedro en el Norte de

Región Oriental respectivamente, localidades que están marcadas con una cruz en la Figura 11d.

A partir de las 17:45 UTC (Figuras 8 y 11) el sistema entró en su etapa de disipación, ya que las nubes con topes más fríos empezaron a fragmentarse. Aún así se observan algunos núcleos convectivos dispersas sobre el extremo Norte de Paraguay y parte del Brasil que inicialmente no formaban parte del sistema analizado.

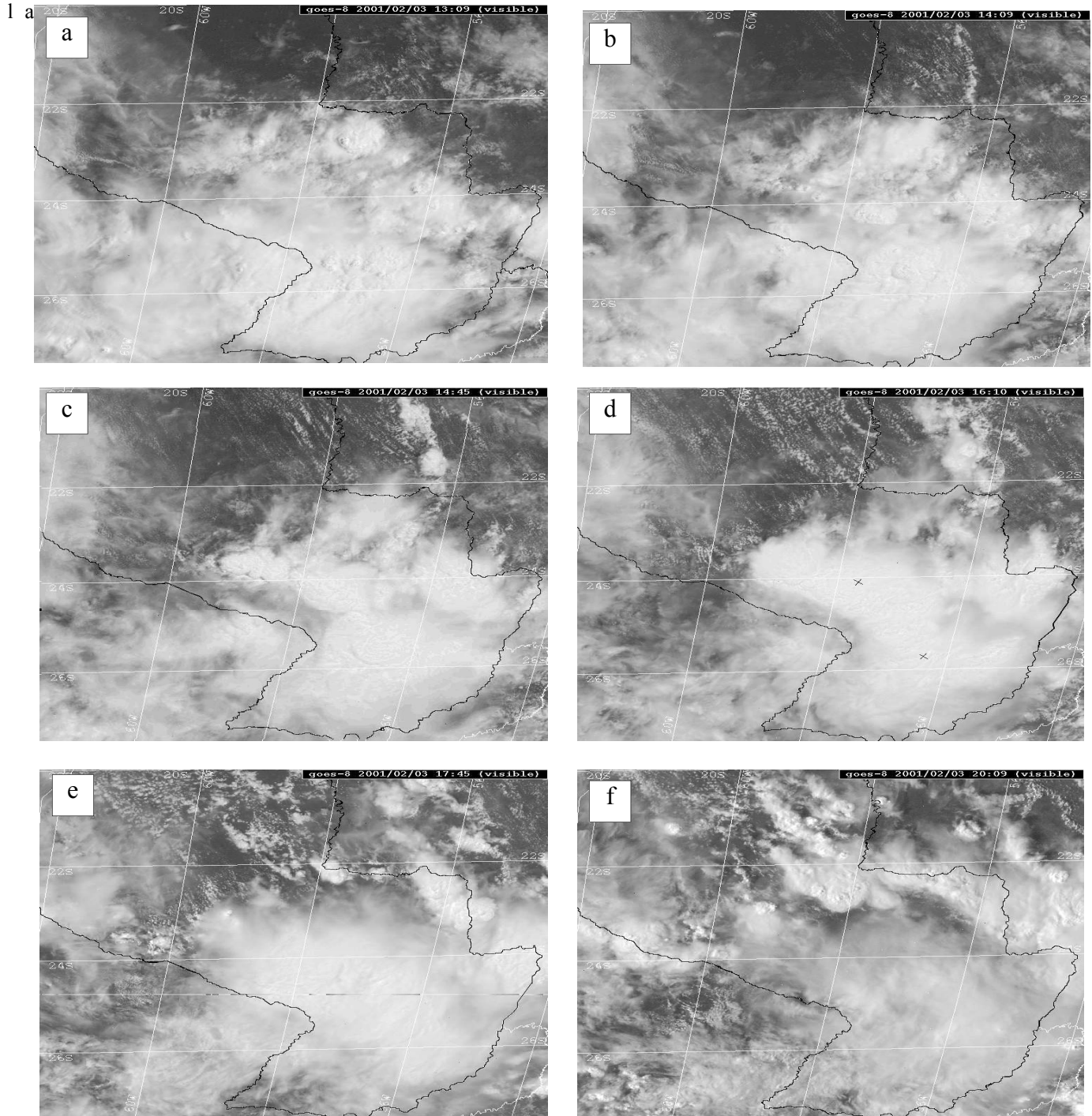


Figura 11. Imágenes de satélite de alta resolución en visible de las 13:09, 14:09, 14:45, 16:10, 17:45 y 20:09 UTC respectivamente, del 03 de febrero del 2001.

La animación de la secuencia de imágenes de la Figura 8 y las cartas del nivel de 250 hPa de la Figura 6 deja en evidencia una clara circulación anticiclónica en niveles superiores sobre el sistema convectivo de mesoescala. Esta característica coincide con los hallazgos de Maddox (1979) de que los sistemas convectivos generan circulación anticiclónica en los niveles altos de la troposfera, lo cual fue corroborado posteriormente analizando un mayor número de casos por Maddox et al. (1981). Se puede concluir de esta situación en particular, que debido al desarrollo del sistema convectivo en la periferia de un anticiclón subtropical preexistente, la circulación anticiclónica en capas superiores fue intensificada.

5. Efectos en algunas variables meteorológicas como consecuencia del paso del sistema

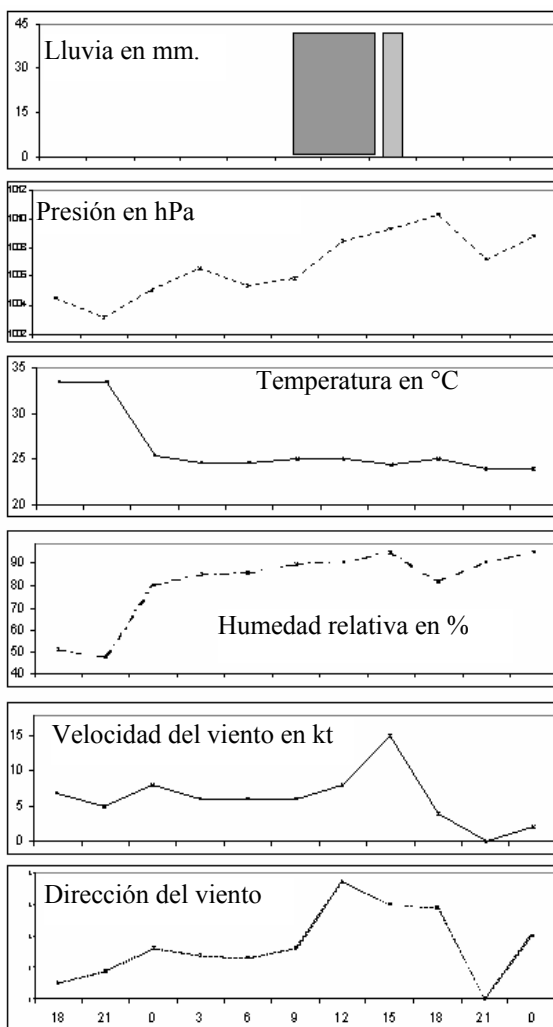


Figura 12. Cambios registrados en superficie en Asunción (25,1 S 57,4 W), Paraguay, desde las 18:00 UTC del 02/02/01 hasta las 00:00 UTC del 03/02/01. Los datos incluyen, lluvia, presión, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del viento.

convectivo de mesoescala

La Figura 12 muestra el cambio observado en varios parámetros meteorológicos en superficie en la localidad de Asunción (25,16° S 57,38° O), Paraguay, durante la ocurrencia del evento. El gráfico fue construido con datos cada tres horas, debido a que no se dispuso de datos tomados con mayor frecuencia. El sistema convectivo afectó a esta ciudad entre las 10:00 y las 12:00 UTC del 3 de febrero del 2001, según lo muestra la secuencia de las imágenes de satélite. Asunción está ubicado aproximadamente a 600 kilómetros al Sureste de donde se originó el sistema convectivo, esto implica que el sistema se movió con una velocidad promedio de 12,4 m/s.

La Figura 12 muestra la lluvia acumulada y asociada a la llegada del sistema, también se ven picos máximos en la variación de la humedad relativa, la velocidad del viento y la presión atmosférica. La dirección del viento tuvo una variación importante, rotando progresivamente desde el Norte hacia el Sur a medida del arribo del sistema. La temperatura decreció significativamente entre las 21 y las 00 horas pero luego no sufrió un cambio apreciable como se puede ver en la figura, esto tal vez ocurrió debido a la hora en que el sistema afectó esta localidad y a la cobertura nubosa que permaneció sobre la estación después del paso del sistema. La presión atmosférica muestra un comportamiento anómalo respecto a su variación diaria, ya que en el transcurso de la tarde normalmente tiene un descenso debido al máximo calentamiento que genera una disminución local de la presión, sin embargo con la incursión del sistema la presión se mantuvo claramente en alza.

Después del paso del sistema convectivo, la temperatura y la humedad se mantuvieron prácticamente constantes, mientras que la presión tuvo un leve descenso, el viento disminuyó su velocidad y volvió a girar hacia el Norte.

6. Cortes verticales

Teniendo en cuenta que el sistema analizado afectó una zona donde no se realizan sondeos en Sudamérica, para analizar el comportamiento de la atmósfera en la vertical se recurrió a varias estaciones aledañas. De todas ellas, la más cercana y con datos para esos días, es Resistencia, Argentina. Los índices de inestabilidad calculados con base en el radiosondeo realizado el día 2 de febrero en esta estación, constataron la alta inestabilidad que presentaba la atmósfera en esta zona el día previo de la formación del sistema. Los índices K y Showalter que sirven para estimar la inestabilidad atmosférica presentaron valores de 35,7 y 2,17 respectivamente, valores que indican altas probabilidades de tormentas. A continuación se describe el comportamiento de algunas variables en esta estación de radiosondeo.

a. Viento

La Figura 13 muestra el comportamiento del viento con la altura para el día previo, durante y después de la formación del sistema convectivo de mesoescala. Teniendo en cuenta que el día 3 no se midió el viento en esta estación, éstos fueron obtenidos del reanálisis. El día 2 de febrero, antes de la formación del sistema se observa en capas bajas, entre superficie y 700 hPa, que el viento sopla en el rango que va de Noreste a Noroeste, mientras que a partir de 500 hPa aumenta su intensidad y gira paulatinamente hacia el Oeste hasta 200 hPa. En la parte superior de la troposfera gira de nuevo al Noroeste.

Los días 3 y 4 de febrero se puede observar un marcado cambio en la dirección del viento en capas bajas respecto al día 2 de febrero; entre la superficie y 700 hPa el viento sopla del Sureste, lo que produjo un ligero enfriamiento en esta capa respecto al día previo a la ocurrencia del fenómeno, ya que esta estación quedó al Sur de un sistema de baja presión que se centró sobre el Chaco paraguayo en esos días. Más arriba, en capas medias la intensidad del viento es débil hasta los 500 hPa, mientras que aumenta a partir de 300

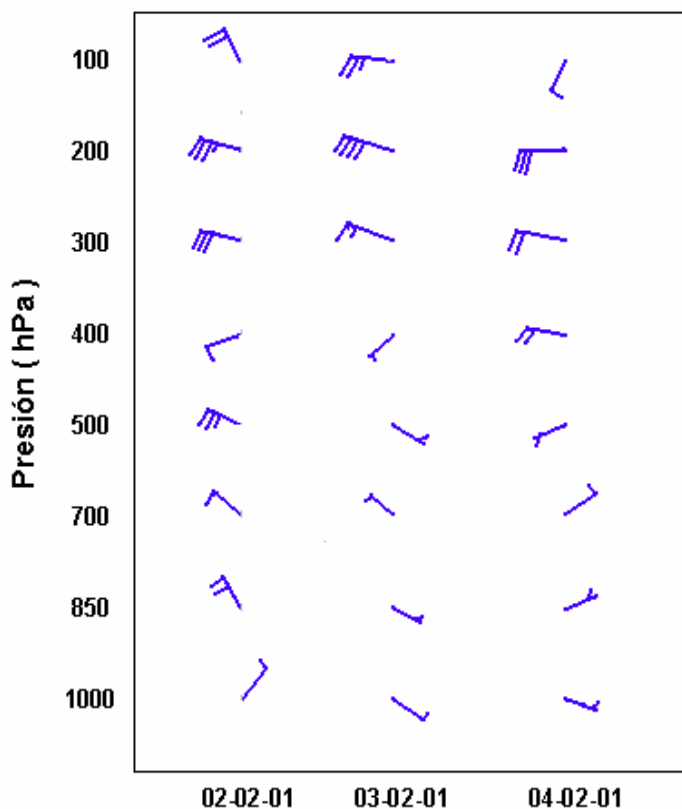


Figura 13. Secuencia diaria del perfil del viento entre el 2 de febrero y el 4 de febrero del 2001 en Resistencia, Argentina. La velocidad está en nudos y cada barra completa corresponde a 10 nudos. La dirección es de donde sopla el viento.

hPa llegando hasta un valor máximo de 40 nudos (21 m/s) en 250 hPa.

b. Humedad relativa

La Figura 14 muestra la distribución vertical de la humedad con la altura. El día 2, previo a la ocurrencia del evento, la atmósfera presentaba características húmedas hasta el nivel de 700 hPa, por encima de este nivel la humedad disminuía paulatinamente hasta un núcleo de 40 por ciento alrededor de los 400 hPa.

El día 3 de febrero la columna de aire se humedeció hasta la troposfera alta con valores mayores a 93 por ciento, lo que es coherente ya que a las 12:00 UTC del día 3 de febrero el sistema convectivo tuvo el mayor acercamiento a la estación de sondeo. El día posterior a la formación del sistema la columna de aire se mantenía húmeda aún hasta las capas superiores de la troposfera debido a la formación de otro sistema meteorológico que se generó ese día, el cual no es analizado en este trabajo.

c. Temperatura potencial equivalente

En la Figura 15 se puede observar el perfil de la temperatura potencial equivalente con la altura para los días 2 y 3 de febrero del 2001. Se puede observar en la Figura 15 que el día 2, la atmósfera presentaba inestabilidad potencial ($\partial\theta_e/\partial z < 0$) en tres capas intermedias desde la troposfera baja hasta la media, la primera entre la superficie y 960 hPa, la otra entre 880 y

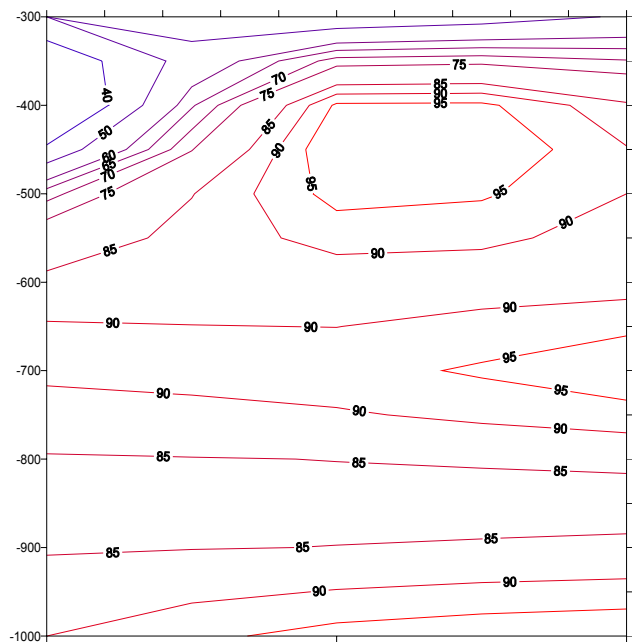


Figura 14. Análisis de la humedad relativa para sondeos realizados en Resistencia, Argentina, entre el 2 y 4 de febrero del 2001.

850 hPa y la última entre 740 y 530 hPa. El día 3 cuando ocurrió el evento, se observa inestabilidad potencial desde superficie hasta 800 hPa y entre 720 y 620 hPa, a partir de 620 hPa la atmósfera se encontraba potencialmente estable ($\partial\theta e/\partial z > 0$).

7. Distribución de Lluvias

En la Figura 16a se puede ver la distribución espacial de la lluvia sobre el territorio paraguayo. En el mapa de isoyetas correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 4 de febrero, se observa un núcleo de máxima

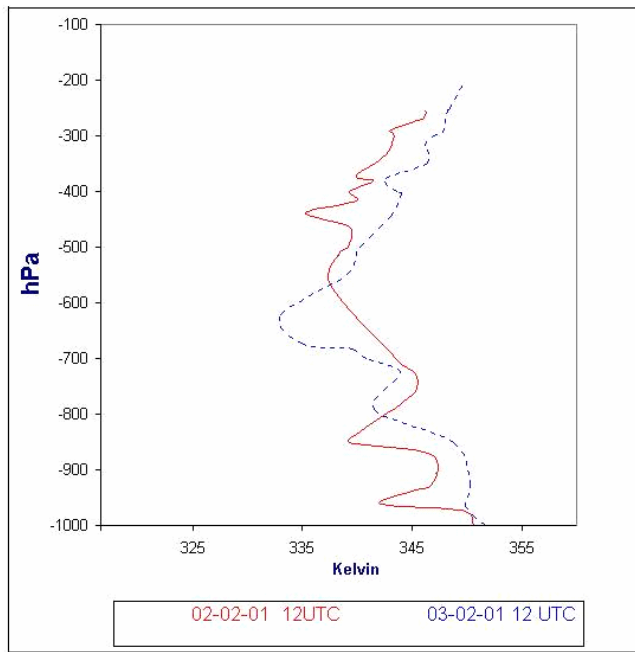


Figura 15. Perfil de la temperatura potencial equivalente para sondeos realizados en Resistencia, Argentina, el 2 de febrero y el 3 de febrero del 2001.

lluvia sobre la zona central de la Región Oriental. Este máximo refleja claramente la zona más afectada por el sistema convectivo a partir de las 12:00 UTC del 3 de febrero. El máximo secundario que se observa sobre el extremo Noreste de la Región Oriental evidencia la dirección que tomó el sistema convectivo. La cantidad de precipitación producida por este evento meteorológico en esta zona del territorio paraguayo prácticamente llega al 50 por ciento del promedio mensual correspondiente al mes de febrero.

En la Figura 16b se observa la distribución temporal de la precipitación en dos estaciones de la Región Oriental del Paraguay, San Pedro y Villarrica. La pendiente de la curva que describe la lluvia en Villarrica entre las 10:00 y las 12:00 hora local, evidencia la intensidad de la lluvia en esta estación, ya que en este corto periodo se acumularon más de 70 milímetros. Esto es coherente con lo

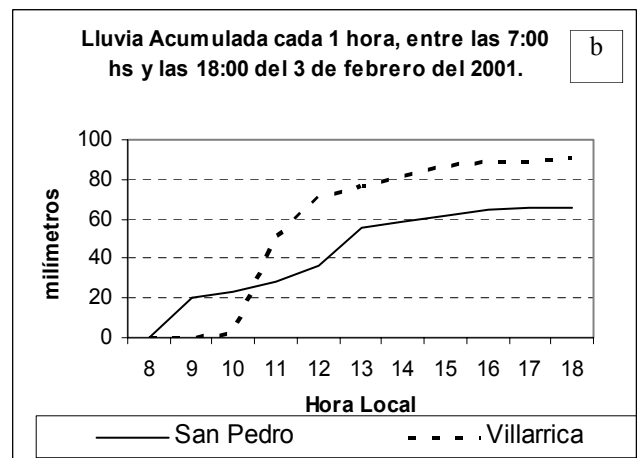
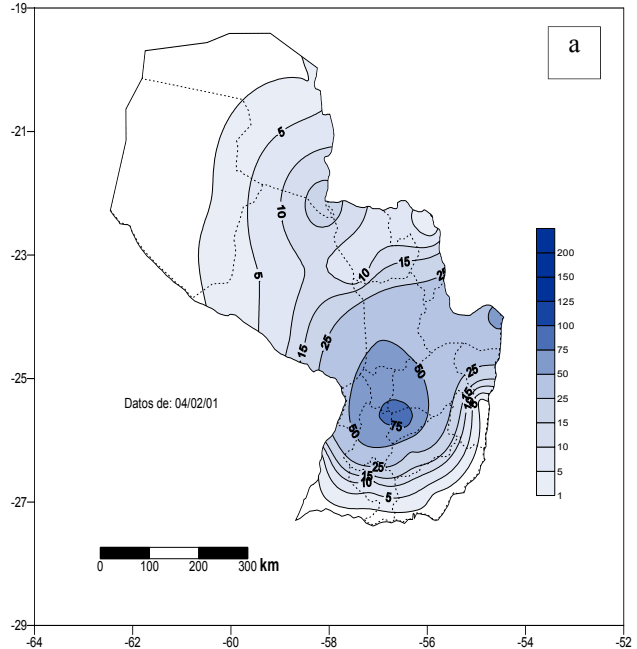


Figura 16. (a) Distribución espacial de la lluvia (mm) sobre Paraguay, acumulada entre las 12:00 UTC del 3 de febrero y las 12:00 UTC del 4 de febrero de 2001. **(b)** Lluvia acumulada en milímetros cada hora, desde las 7:00 hora local del 3 de febrero hasta las 18:00 hora local, en las localidades de San Pedro y Villarrica.

observado en las imágenes de satélite que muestran en este periodo al sistema en su máxima actividad. Se puede ver que esta región de máxima lluvia coincide con un núcleo convectivo en la imagen de satélite de las 15:39 UTC (Figura 10b).

Aunque no aparece en este análisis, se obtuvieron datos de lluvias tomados en estaciones de Argentina ubicados al Noroeste de la zona más afectada del Paraguay, como por ejemplo la localidad de Las Lomitas, donde se produjeron 82 mm de lluvia en el transcurso de la madrugada del 3 de febrero.

8. Conclusiones

Los procesos convectivos severos tuvieron su origen en horario de máximo calentamiento para la zona, donde predominaban bajas presiones en capas bajas y un anticiclón en el tope de la troposfera. Los principales factores a escala sinóptica y de mesoescala que desencadenaron el MCS analizado fueron:

- 1- La presencia de un Chorro de Bajo Nivel al Noreste de donde se inició el sistema convectivo de mesoescala, el cual generaba una cortante horizontal ciclónica sobre la zona.
- 2- La formación de fuerte convergencia asociada al calentamiento diurno y a un sistema de bajas presiones en superficie en la zona donde se generó el MCS.
- 3- La presencia de aire húmedo advectado por el Chorro de Bajo Nivel, el cual estaba evidenciado por isodrosotermas mayores a 22 °C en el área de desarrollo del MCS.
- 4- El predominio de un sistema anticiclónico preexistente muy divergente en niveles altos de la troposfera en el momento de la iniciación del sistema, el cual fue intensificado por la propia evolución del MCS.

La trayectoria que tomó el MCS está acorde a lo que encontraron Velasco y Fristch en 1987 para el mes de febrero. El cambio de dirección que adquirió el MCS hacia el Este y luego al Noreste fue debido presumiblemente a la presencia del frente frío al Sur del MCS.

El tipo de precipitación que se produjo sobre el territorio paraguayo fue mayoritariamente de origen convectivo y con una distribución espacial y temporal acorde a la características de esta clase de evento.

La excentricidad del MCS encontrada en su etapa de madurez fue de 0,46, lo cual, según la definición de Maddox (1980), no cumple con el requisito de excentricidad para ser considerado un Complejo Convectivo de Mesoescala (MCC, por sus siglas en Inglés).

Agradecimientos

Carlos Roberto Salinas expresa su agradecimiento a la Organización Meteorológica Mundial por financiar parcialmente sus estudios en la Universidad de Costa Rica y a la Dirección de Meteorología e Hidrología, dependiente de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) del Paraguay, por la oportunidad que le brindó para culminar con éxito sus estudios.

Los autores están agradecidos con la Dra. Bernadette Connell, del Cooperative Institute for Research in the Atmosphere at Colorado State University, por proporcionar imágenes satelitales de alta resolución en formato digital y con la Dra. Vilma Castro, Universidad de Costa Rica por su asistencia en la manipulación y despliegue de las imágenes satelitales.

A los señores Michel Davison, del International Desk del U.S. National Weather Service, y Alejandro Pastén y Raúl Rodas, de la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC del Paraguay, se les agradece el haber facilitado el acceso a los datos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

El sistema RAMSDIS de la Universidad de Costa Rica fue amablemente proporcionado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a través del Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIRA) at Colorado State University y el Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS) at the University of Wisconsin-Madison.

RESUMEN

Se analizan los aspectos sinópticos y de mesoescala relacionados con la formación de un sistema convectivo de mesoescala (MCS, por sus siglas en Inglés) que afectó el territorio paraguayo el 3 de febrero del 2001. Este MCS tuvo su génesis entre las 18:00 y las 21:00 UTC del 2 de febrero sobre el Sureste de Bolivia, afectando luego el Norte de Argentina y la región centro-sur del Paraguay. El MCS generó lluvias intensas sobre el territorio paraguayo, especialmente en el centro de la Región Oriental, donde se registraron 69 milímetros en dos horas en la localidad de Villarrica. El tipo de precipitación que se produjo sobre el territorio paraguayo fue mayoritariamente de origen convectivo.

Los procesos convectivos severos tuvieron su origen en horario de máximo calentamiento para la zona, donde predominaban bajas presiones en capas bajas y un anticiclón en el tope de la troposfera. Los principales factores a escala sinóptica y de mesoescala que desencadenaron el MCS analizado fueron: (1) La presencia de un Chorro de Bajo Nivel al Noreste de donde se inició el sistema convectivo de mesoescala, el cual generaba una cortante horizontal ciclónica sobre la zona; (2) la formación de fuerte convergencia asociada al calentamiento diurno y a un sistema de bajas presiones en superficie en la zona donde se generó el MCS; (3) la presencia de aire húmedo advectado por el Chorro de Bajo Nivel, el cual estaba evidenciado por isodrosotermas mayores a 22 °C en el área de desarrollo del MCS; y (4) el predominio de un sistema anticiclónico preexistente muy divergente en niveles altos de la troposfera en el momento de la iniciación del sistema, el cual fue intensificado por la propia evolución del MCS.

Referencias

- Báez, J. y W. Fernández, 1994. Variabilidad espacial y temporal de la precipitación lluviosa en Paraguay. *Revista Geofísica*, No. 41, 177-204.
- Báez, J. y W. Fernández, 1995. Anomalías observadas en la atmósfera libre sobre Paraguay durante los eventos ENOS de 1986-1987 y 1991-1992. *Revista Geofísica*, No. 43, 31-52.
- Betts, A.K., R.W. Grover y M.W. Moncrieff, 1976. Structure and motion of tropical squall lines over Venezuela. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 395-404.

- Cotton, W.R., y R.A. Anthes, 1989. Storm and Cloud Dynamics. Academic Press, Inc, 880 pp.
- Fernández, W., 1980. Environmental conditions and structure of some types of convective mesosystems observed over Venezuela. Arch. Met. Geoph. Biokl., A29, 249-267.
- Fernández, W., 1982. A review of downdrafts at the rear of tropical squall lines. Bull. Amer. Meteor. Soc., 63, 1285-1293.
- Fernández, W., 1998. VIMHEX 1972 Revisited: The life cycles of two tropical convective mesosystems over land. Meteorol. Atmos. Phys. 69, 67-80.
- Garstang, M., H.L. Massie, Jr., J. Halverson, S. Greco, y J. Scala, 1994. Amazon coastal squall lines. Part I: Structure and kinematics. Mon. Wea. Rev., 122, 608-622.
- Greco, S., J. Scala, J. Halverson, H.L. Massie, Jr., W.-K. Tao, y M. Garstang, 1994. Amazon coastal squall lines. Part II: Structure and Kinematics. Mon. Wea. Rev., 122, 623-635.
- Houze, R.A., Jr., 1977. Structure and dynamics of a tropical squall-line system. Mon. Wea. Rev., 105, 1540-1567.
- Houze, R.A., 1993. Clouds Dynamics. Academic Pres, Inc, 574 pp.
- Leary, C.A., R.A. Houze, Jr., 1979. The structure and evolution of a tropical cloud cluster. J. Atmos. Sci., 36, 437-457.
- Machado, L.A., W.B. Rossow, R.L. Guedes, y A.W. Walker, 1997. Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. Mon. Wea. Rev., 126, 1630-1654.
- Maddox, R.A., 1979. An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data. Mon. Wea. Rev., 108, 1108 – 1121.
- Maddox, R.A., 1980. Mesoscale Convective Complexes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, 1374 – 1378.
- Maddox, R.A., D.J. Perkey and J.M. Fritsch, 1981. Evolution of upper tropospheric features during the development of a mesoscale convective complex. J. Atmos. Sci., 38, 1664 – 1674.
- Miller, M.J., A.K. Betts, 1977. Travelling convective storms over Venezuela. Mon. Wea. Rev., 105, 833-844.
- Velasco, I. y J. M. Fritsch, 1987. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. J. Geophys. Res., 92, 9591 – 9613.