

Intercambios de masas de aire entre latitudes tropicales y extra tropicales de Sudamérica: Validación del modelo regional Eta

Marcelo E. Seluchi¹, Sin Chan Chou
*Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos CPTEC/INPE
São Paulo, Brasil*

Abstract

The regional Eta/CPTEC model has been producing operationally forecasts over South America since 1996. The objective of this work is to evaluate the model predictions during strong meridional mass exchange over South America based on different model domain and grid-size configurations.

Six cases of cold air intrusion and eight examples of warm air intrusion associated to convective activity over middle latitudes were chosen for the study.

The model was evaluated against the NCEP global analyses, based on statistical verification parameters. Global analyses were interpolated bilinearly to the 40-km Eta model output grid.

Larger forecast errors were found close to the southern boundary of the domain in both cold and warm air cases. These errors suggest the presence of strong forcing near the southern boundary generating errors which propagate toward the interior of the domain. The substitution of the boundary conditions to analyses reduced substantially the errors in the interior.

The unavailability of regional analyses limited the study. However the conclusion of large forecast errors being generated at the southern boundaries is apparent, and an increase in model domain is recommended for the 40-km version.

Extended Abstract

1. Introduction

The long north-south extend of the Andes Cordillera and its high altitudes cause a blocking effect to the westerlies and a channeling of the low level meridional flow on the eastern side (Gan and Rao, 1994; Garraud and Wallace, 1998). Consequently, baroclinic activity and associated strong air mass exchange between the tropics and extratropics can take place.

During summer the cold fronts move northward slowly, and tend to become stationary around 20S-25S resulting in the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) (Satyamurty et al., 1980; Nogués-Paegle and Mo, 1997). During winter these systems move faster and may sometimes reach low latitudes causing "friagens" (frost). On the other hand, the warm air intrusion which is channeled between the Andes and the South Atlantic Anticyclone, can reach middle latitudes and generate deep organized convective systems.

The regional Eta model has been producing operationally forecasts over South America since 1996. The objective of this work is to evaluate the model predictions during strong meridional mass exchange over South America based on different model domain and grid-size configurations.

2. Data

Six cases of cold air intrusion and eight examples of warm air intrusion were chosen for the study. The eight convective situations were among the strongest of the 1996/1997 warm season, two of them were associated with tornadoes over Argentina and another was linked to flooding over Minas Gerais, Brazil.

The model was evaluated against NCEP T62L28 global analyses, and based on statistical verification parameters. Global analyses were interpolated bilinearly to the 40-km Eta model output grid.

¹ Dirección permanente: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET), Buenos Aires, Argentina

3. The Eta model

It is a grid-point model with 38 layers in the vertical and comprehensive physics package. It uses the eta vertical coordinate (Mesinger, 1984) and has temperature, humidity, horizontal wind, surface pressure, turbulent kinetic energy and cloud liquid water as prognostic variables. Details of the model can be found in Mesinger et al., 1988; Black, 1994; and Chou, 1996.

The current version of the model takes NCEP analyses as initial condition and CPTEC GCM forecasts as the 6-hourly lateral boundary conditions. Forecasts are extended up to 60 hours. Three configurations of the model were used: 40-km, 80-km and large domain 80-km. The domains are shown in Figure 1. Table I lists the model versions used in the runs.

4. Results

4.1 Cold air intrusion

A composite from the NCEP analyses of the 6 cold air cases (Figure 2) shows that 48 hours before the minimum temperatures were reached at low latitudes, a cold front located at about 50W moved northward. The isotherms show a cold air pool along the coast. Figure 3 shows the composite for the 3 strongest cold events which resulted in frost over Southern Brazil. Figure 4 and 5 show the same composites as Figure 2 and 3, respectively, but for the 40-km Eta model forecasts. The contour patterns are captured by the model, but waves showed smaller amplitudes.

Forecast mean errors were calculated from the difference between the 60-hour forecast and the NCEP verifying analysis, and averaged over the number of cases. The 850-hPa geopotential height forecast mean errors are shown in Figure 6 for the 40-km and 80-km versions. Errors become larger toward the southern boundary, with the 80-km version showing smaller errors near 40S. Errors within the topography should be ignored.

Comparison between Figures 6a and 6b shows that the larger domain exhibits smaller errors near the southern boundary. This results from the boundary being placed farther away south in this version. The influence of the borders in producing errors is serious in the studied situations where polar air intrusion into the domain acts as strong forcing near the boundaries. To test the influence of the errors generated by the boundaries, a case on the 18 April 1996 was run with predicted and analyzed boundary conditions. Figure 7c and 7d show that the errors are considerably reduced when analyzed boundaries are employed.

The time evolution of the forecast errors for temperature at 850 (thin lines) and 500 hPa (thick lines) and root mean square errors (RMS) at 850 hPa (dash lines) and 500 hPa (dotted lines) for the 40-km and large 80-km versions of the model are shown in Figures 8a and 8b. Errors are also obtained for geopotential height (Figure 8c and 8d). Errors from forecasts based on persistence (thick dashed lines) are included to give the upper limit for the 850-hPa geopotential height and temperature errors. They are scaled by the right axis on the graph. The forecast bias (mean errors) are one order of magnitude smaller than the errors from a forecast based on persistence. The mean and RMS error are similar in magnitude and grow slowly in time. The larger domain Eta version show smaller errors despite the lower resolution.

Correlation coefficient between analyzed and forecasted 6-hour tendency of 850-hPa geopotential height is shown in Figure 9 for the three versions of the model. Correlation coefficients were calculated for each grid point and averaged over each model integration domain. A sharp decrease in correlation occurs between 6 and 12 hours of forecast in all versions.

4.2 Tropical air intrusion in middle latitudes

Composites of temperature, specific humidity and geopotential height from the analyses (Figure 10) show that the selected convective cases were related to passages of cold frontal systems and tongues of warm moist air located to the east of the continent. Same composites for the 40-km forecasts (Figure 11) show that the model is able to capture the essential patterns associated to the convective episodes, mainly the position of the Chaco Low, the subtropical anticyclone and the tongue of unstable air.

Figure 12 show RMS error of the 850-hPa temperature at 60-hour forecast. Similar to the cold air intrusions, errors increase toward the southern boundary. The version of the model with larger domain show smaller errors between 25S and 45S. Although the phenomenon studied has mesoscale dimensions, the large scale condition control the intensity and position of the organized convective events. Figure 13 is the equivalent to Figure 8, but for the warm air case. The errors in this situation are smaller, either in temperature or geopotential height.

The successful forecast of the mature convective phase occurred in advance of 36 hours in 3 cases, 24 hours in 4 cases, and 12 hours in 1 case. Figures 14 and 15 show the 6-hour total precipitation predicted by 40-km and large 80-km versions of the model and the satellite images closest to the forecast time. Most of the cases showed good correspondence between the precipitation regions and convective cloud images. A small tendency to move the convective systems faster can be noticed in the 80-km version. Precipitation rates are similar in both versions, with slightly larger amounts in the 40-km version. Although the availability of observed data is limited, the few observations had indicated values felt between the 80 km and the 40-km resolution forecasts.

5. Discussion and Conclusions

The regional CPTEC Eta model was configured in three versions, differing resolution and domain size, and evaluated in situations of strong meridional air mass exchange, six cases of northward polar air intrusion and eight cases of southward warm air intrusion.

Larger forecasts errors were found close to the southern boundary of the domain in both cold and warm air cases. These errors suggest the presence of strong forcing near the southern boundary generating errors which propagate toward the interior of the domain. The substitution of the boundary conditions to analyses reduced substantially the errors in the interior.

The unavailability of regional analyses limited the study. Forecast errors were compared to the NCEP analyses which contain global model information of characteristics different from the Eta model. Errors were calculated in the highest resolution grid, this procedure penalized the 40-km forecasts. However the conclusion of large forecast errors being generated at the southern boundaries is clear, and an increase in model domain is recommended for the 40-km version.

1.Introducción

El continente sudamericano constituye el rasgo topográfico más relevante del Hemisferio Sur. Su singular orografía incluye una de las cordilleras más altas del mundo, que ejerce una fuerte influencia sobre los sistemas meteorológicos en varias escalas espaciales y temporales (Lichtenstein, 1989). Sin duda la consecuencia más clara e inmediata de la presencia de los Andes es el bloqueo de los vientos del oeste y la canalización del flujo meridional en la baja tropósfera (Gan y Rao, 1994; Garraud y Wallace, 1998). Por esta razón la actividad baroclínica a uno y otro lado de los Andes presenta diferencias significativas: al oeste la presencia del anticiclón subtropical del Océano Pacífico, la escasez de humedad sobre la costa subtropical del Océano Pacífico y el efecto frontolítico generado por los Andes (Seluchi et. al., 1998) se combinan para determinar una de las regiones más áridas del planeta. Al este, por el contrario, los vientos cálidos y húmedos generados por el anticiclón subtropical del Atlántico, el efecto frontogenético a sotavento de los Andes (Seluchi et. al., 1998) y la canalización del flujo meridional permiten la propagación latitudinal de los sistemas migratorios de presión (Lichtenstein, 1989; Seluchi, 1993; Gan y Rao, 1994) y, por lo tanto, el intenso intercambio de masas de aire entre los trópicos y los extra trópicos.

Los sistemas frontales que logran arribar hasta latitudes subtropicales en verano suelen estar acompañados por precipitaciones, que con frecuencia alcanzan una gran intensidad debido al gran contenido de humedad y a las condiciones de inestabilidad imperantes. Estos sistemas se tornan usualmente lentos y tienden finalmente a estacionarse sobre los 20-25°S, confundándose con la Zona de convergencia del Atlántico Sur (SACZ) (Satyamurty et.al., 1980; Figueroa et.al., 1995; Nogués-Paegle y Mo, 1997; Garraud y Wallace, 1998). Durante el invierno los frentes fríos adquieren una mayor intensidad y velocidad, pudiendo arribar en ocasiones hasta latitudes ecuatoriales, tal como lo documentaron Myers (1964) y Parmenter (1976). Sin duda la consecuencia más perjudicial de este tipo de intercambio de masas

de aire es la generación de heladas que dañan especialmente a los cultivos tropicales.

La intrusión de masas de aire de origen tropical hacia latitudes medias suele estar asociada a la "baja del Chaco" (Schwerdtfeger, 1976; Lichtenstein, 1980) y al Anticiclón Subtropical del Océano Atlántico Sur. Entre ambos sistemas se establece un corredor de viento norte que transporta masas de aire de origen tropical hacia latitudes medias (Seluchi y Marengo, 1999). Según Rusticucci y Vargas (1995) ésta es la configuración, bajo ciertas condiciones de intensidad y persistencia, que conduce a la aparición de olas de calor sobre el Sur de Brasil, norte y centro de Argentina y Uruguay. Por otra parte Lichtenstein (1980) demostró que la intensidad de la baja del Chaco guarda una relación directa con la ocurrencia de fenómenos convectivos sobre el centro de Argentina.

En suma la Cordillera de los Andes contribuye a una mayor advección de aire cálido y húmedo de origen amazónico y a la incursión de los sistemas frontales hacia latitudes más bajas. Estos mecanismos constituyen los dos factores más importantes que determinan el régimen de precipitaciones sobre la llanura chaco-pampeana (Hoffmann, 1975), una de las regiones agrícolas y ganaderas más ricas del mundo. Dada la fuerte influencia orográfica sobre los intercambios latitudinales de masas de aire, el pronóstico de este tipo de episodios requiere de modelos con una resolución relativamente alta y, sobre todo, de una adecuada representación de la topografía y de los procesos ligados a ella.

El modelo regional Eta, desarrollado por la Universidad de Belgrado, está siendo utilizado por el Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos de Brasil (CPTEC) en forma rutinaria desde mediados de 1996. Su característica más destacada es el empleo de la coordenada vertical "eta", cuyas superficies aproximadamente horizontales lo avalan, en principio, para trabajar con topografías irregulares y de gran pendiente. Su buena resolución vertical y horizontal alientan su uso tanto para tareas operativas como para fines científicos.

En el presente trabajo se analiza una serie de episodios caracterizados por un fuerte intercambio meridional de masas de aire, con el objeto de evaluar la exactitud de los pronósticos emanados del modelo Eta/CPTEC. En particular se estudia la sensibilidad de los errores de previsión a cambios en la resolución horizontal y en el tamaño del dominio de integración.

2. Datos y metodología

Para la realización del presente trabajo se eligieron seis episodios de invasiones de aire polar sobre latitudes tropicales y ocho eventos convectivos sobre latitudes medias generados por masas de aire provenientes de latitudes tropicales.

Las incursiones de aire polar son las más conspicuas ocurridas durante el año 1996. En particular 3 de ellas condujeron a heladas generalizadas sobre los estados del sur y sudeste brasileño, mientras que las tres restantes ocasionaron sólo heladas dispersas. Los ocho eventos convectivos se encuentran entre los más intensos ocurridos durante la estación cálida de 1996/97. Algunos de ellos alcanzaron la categoría de severos ya que, por ejemplo, dos episodios produjeron tornados sobre el centro y norte de Argentina (el 7 de enero de 1997 en Brandsen, Provincia de Buenos Aires y el 19 de febrero de 1997 en Santiago de Estero; Altinger, comunicación personal). Otro evento ocurrido en los primeros días de 1997 condujo a fuertes inundaciones en el estado de Minas Gerais (Brasil). Todos los casos elegidos se destacaron por presentar convección organizada, ya sea en forma de líneas de inestabilidad, complejos convectivos de meso escala o conglomerados nubosos.

La descripción de la situación sinóptica se realizó a través de la confección de mapas compuestos a partir de los análisis del NCEP. Esta información posee una resolución horizontal aproximada de 1.8° en latitud y longitud, 9 niveles en la vertical (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 y 250 hPa) y una frecuencia temporal de 6 horas. Para la evaluación del modelo se utilizaron además datos de precipitación en algunas estaciones de superficie, provistos por la red de observaciones del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) y algunas estaciones automáticas.

La bondad de los pronósticos fue analizada a través de diversos parámetros de verificación, tales como errores medios, errores cuadráticos medios y coeficientes de correlación entre las tendencias temporales observadas y pronosticadas. Estos cálculos fueron realizados interpolando en forma bilineal los análisis del NCEP a la resolución (40 km) y dominio del Eta/CPTEC.

3. El modelo Eta

Una de las características más destacadas de este modelo hidrostático es el empleo de la coordenada vertical "eta", definida por Mesinger (1984) con el objeto de reducir los problemas de cálculo de la fuerza horizontal de presión, la advección y la difusión horizontal sobre pendientes topográficas muy abruptas. Por esta razón el Eta/CPTEC resulta especialmente apto para trabajar con topografías irregulares y en particular con orografía de gran pendiente como la Cordillera de los Andes.

El modelo utiliza un retículo del tipo E de Arakawa (Arakawa y Lamb, 1977), es decir que las variables de momento y de masa se evalúan sobre diferentes puntos. Posee una física completa con parametrizaciones para la precipitación de escala sinóptica en forma explícita (Zhao et al, 1991) y de escala convectiva según el método de Betts y Miller (1986) modificado por Janjic' (1994). Los intercambios turbulentos son representados mediante una actualización del esquema de Mellor y Yamada (1974) de orden 2.5, los flujos superficiales de calor y humedad son resueltos de acuerdo al esquema de Monin-Obukov, mientras que el esquema de la radiación es actualizado cada 2 horas de integración.

Las variables pronosticadas por el Eta/CPTEC son la temperatura, humedad específica, componentes horizontales del viento, presión de superficie, energía cinética turbulenta y el contenido de agua de nube. Para mayores detalles sobre este modelo puede consultarse por ejemplo a Mesinger et al. (1988), Black (1994) o Staudenmaier (1996).

El estado inicial es tomado de los análisis del NCEP, mientras que las condiciones de borde son provistas a intervalos de 6 horas por el modelo global que rutinariamente se emplea en el CPTEC (CPTEC/COLA GCM). El plazo de pronóstico es de 60 horas.

El modelo Eta/CPTEC es integrado diariamente con una resolución vertical de 38 niveles y horizontal de 40km, dentro del recinto representado en la figura 1(a). En el presente estudio esta versión operativa (que designaremos como ETA40) es comparada con otras dos que se diferencian en el tamaño del dominio de integración y/o en la resolución horizontal. La primera de ellas (ETA80) difiere en su resolución horizontal, fijada en 80km, mientras que la segunda (ETA80+) emplea también una resolución de 80 km pero es integrada dentro de un área mayor, que se muestra en la figura 1(b) (ver también la TABLA I). En todos los casos el número de niveles verticales es el mismo (38). En consecuencia la comparación de los resultados obtenidos por cada una de estas tres variantes brindará información sobre el impacto del espaciamiento horizontal y del tamaño del retículo en la calidad de los pronósticos. La resolución horizontal aparece a priori como un factor importante en el pronóstico de fenómenos convectivos, debido a su escala espacial y temporal y a la complejidad de los procesos físicos involucrados. Sin embargo el costo computacional, que difiere considerablemente entre estas versiones, debe ser tenido en cuenta cuando se trata de modelos operativos.

VERSIÓN	Resolución	Recinto
ETA40 (Operativa)	40 km.	45°S-5°N/83°W-33°W (fig. 1a)
ETA80	80 km.	45°S-5°N/83°W-33°W (fig. 1a)
ETA80+	80 km.	57°S-15°N/100°W-20°W (fig. 1b)

TABLA I: Versiones del Eta/CPTEC utilizadas para el pronóstico de las 14 situaciones elegidas.

4. Resultados

4.1 Invasiones de aire polar sobre latitudes tropicales.

4.1.1 Descripción de las situaciones seleccionadas.

La figura 2 muestra el mapa compuesto, realizado a partir de los análisis del NCEP, en donde se describe la evolución sinóptica correspondiente a los 6 casos de invasiones de aire polar. Puede observarse en ella que 48 horas antes de producirse el mínimo de temperatura sobre latitudes tropicales (figs. 2a y 2b) es posible distinguir un frente frío que avanza hacia el norte, delineado por la vaguada localizada aproximadamente sobre los 50°W. Este sistema frontal se interna en el continente tomando una dirección

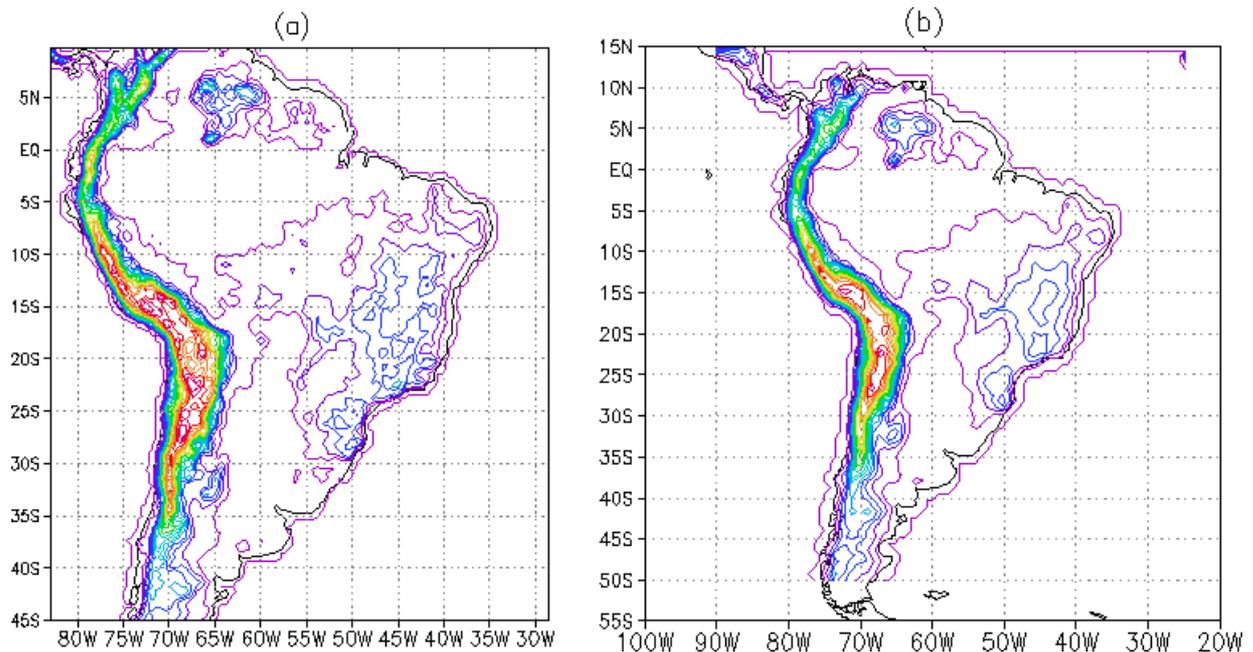


Figura 1: Dominio de integración utilizado por el modelo Eta en sus versiones (a) ETA40 y ETA80 y (b) ETA80+. Se incluye la topografía utilizada (intervalo= 250m)

más zonal, tal como lo sugieren las isotermas de superficie (líneas quebradas). En la tropósfera media se observa la vaguada que acompaña al sistema de superficie y una cuña ligada al anticiclón migratorio que comienza a ingresar en el continente sobre los 40°S. Este sistema vaguada-cuña determina corrientes conducentes del sudoeste sobre casi todo el continente, facilitando así el rápido traslado de los sistemas migratorios hacia el norte. Durante las próximas 24 horas (figs. 2c y 2d) el sistema frontal experimenta un apreciable avance, localizándose al norte de los 20°S sobre latitudes tropicales. Resulta también evidente el desplazamiento hacia el norte sufrido por el anticiclón frío, que mantiene una trayectoria continental ayudado por el efecto canalizador de los Andes (Gan y Rao 1994; Seluchi et.al. 1998) y por el balance negativo de radiación. Dicho anticiclón se localiza sobre la parte delantera de la cuña en 500 hPa lo que permite su desplazamiento hacia el norte y favorece su desarrollo (Petterssen, 1956; Bluestein, 1993). En este sentido es interesante notar la intensificación de las ondas en la tropósfera media respecto de la víspera. Cabe destacar que por tratarse de un compuesto de varios eventos (6) es de esperar que las características halladas sean más marcadas en los casos individuales.

El mínimo de temperatura sobre latitudes tropicales se produce en el momento en que el anticiclón migratorio alcanza su latitud más baja (figs. 2e y 2f). Puede notarse como este sistema es acompañado por un núcleo frío en el campo de isotermas, con temperaturas inferiores a los 10°C en zonas costeras y menores a 15°C al sur de los 20°S. Sin embargo la topografía escarpada de esta región determina temperaturas muy inferiores a estos valores en el fondo de los numerosos valles, que son justamente las áreas más propicias para la práctica de la agricultura.

La figura 3 es análoga a la anterior pero incluye solamente los tres casos más conspicuos, que condujeron a heladas generalizadas en varios estados del sur y sudeste de Brasil. Estas situaciones están vinculadas a sistemas frontales y anticiclones fríos considerablemente más fuertes que en el caso precedente, que son conducidos por un flujo del sur más intenso, en parte favorecido por las ciclogénesis que se verifican sobre el Océano Atlántico. Una diferencia fundamental reside también en la intensidad de las perturbaciones en la tropósfera media y alta. En estos casos la mayor advección de vorticidad anticiclónica produce un mayor desarrollo del sistema de alta presión en los niveles bajos, que es además conducido más rápidamente hacia el norte debido al aumento en la componente meridional del viento en la alta tropósfera. El frente frío asociado suele arribar en promedio hasta los 10°S (fig. 3e) y provocar temperaturas inferiores a los 10°C sobre prácticamente todos los estados brasileños productores de café.

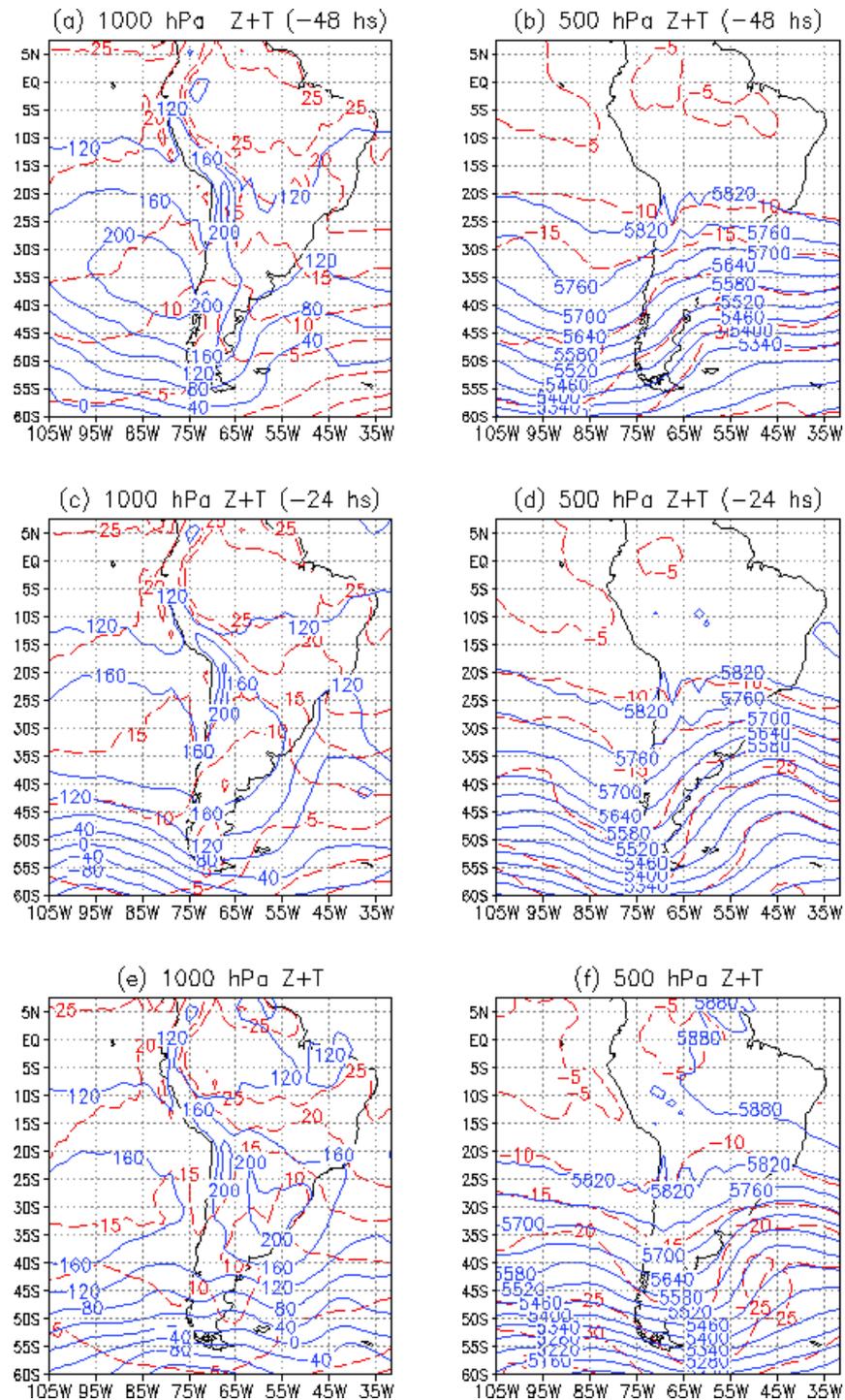


Figura 2: Compuesto de altura geopotencial (m_gp) (líneas continuas) y temperatura (°C) (líneas quebradas), obtenido a partir de los análisis del NCEP para los episodios fríos.

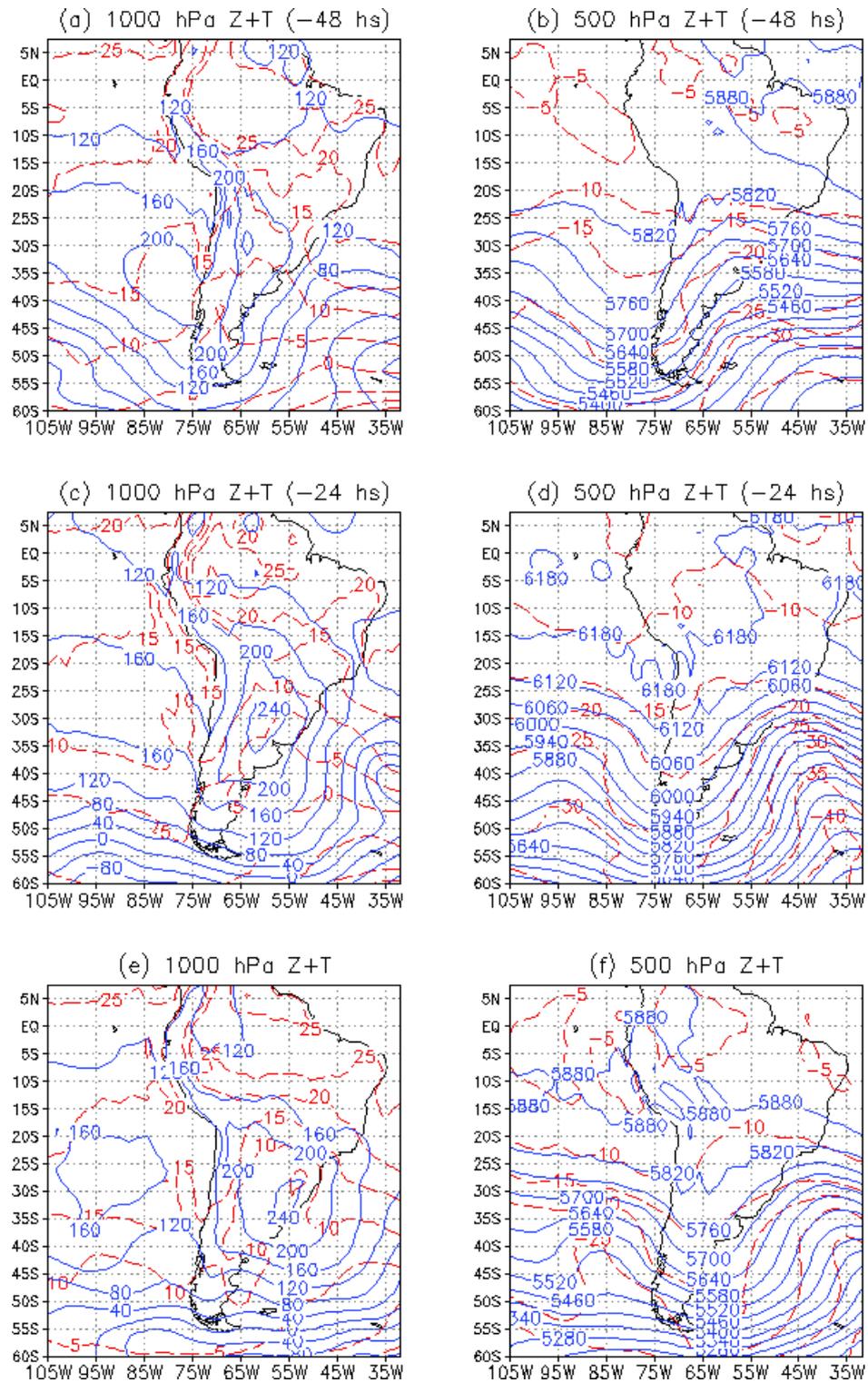


Figura 3: Idem figura anterior para los 3 casos más intensos.

4.1.2 Pronósticos realizados con el Eta/CPTEC

4.1.2.1 Mapas compuestos

Los casos seleccionados fueron pronosticados por cada una de las 3 variantes del modelo Eta/CPTEC (ETA40, ETA80 y ETA80+), inicializando los experimentos 60 hs antes de producirse las mínimas temperaturas sobre latitudes tropicales. En todos los casos las condiciones de contorno fueron provistas por el COLA/CPTEC_GCM.

La figura 4 presenta un compuesto de los casos elegidos, obtenido a partir de la versión operativa del Eta/CPTEC (ETA40). Si bien el dominio de integración utilizado es menor que el área graficada en la figura 2, es posible observar que el modelo logra reproducir con acierto las características fundamentales de la evolución sinóptica. En particular puede apreciarse el desplazamiento del sistema frontal frío y de un anticiclón migratorio que ingresa al continente desde el sur. Sin embargo la magnitud y la configuración de los campos de altura geopotencial y temperatura, tanto en la superficie como en la tropósfera media, indican que los sistemas involucrados son levemente subestimados. Por otra parte éstos no logran alcanzar latitudes tan bajas como en la figura 2 (comparar la isohípsa de 160 mgp en las figs 2 y 4), quizás debido a que las ondas en la tropósfera media presentan una intensidad y baroclinicidad menor.

La figura 5 indica que el Eta/CPTEC también es capaz de reproducir el patrón asociado a las invasiones de aire frío más intensas, que evidencian una marcada diferencia respecto del compuesto de todos los casos. Una comparación con la figura 3 revela que el modelo logra pronosticar la mayor intensidad de los frentes y anticiclones migratorios en superficie, así como el aumento de la baroclinicidad y de la componente meridional del viento en el nivel de 500 hPa. Por otra parte las ciclogénesis que tienen lugar sobre el Océano Atlántico son previstas con un error medio de unos 300 km en su posición y de menos de 20 mgp en su altura geopotencial. A pesar de ello puede advertirse también en estos casos que la intensidad del frente frío y del anticiclón migratorio se halla levemente subestimada.

Los compuestos efectuados a partir de los campos previstos con menor resolución horizontal (versiones ETA80 y ETA80+) (figuras no incluidas) son muy similares a los mostrados en las figuras 4 y 5. Sin embargo, la amplitud de las ondas y la intensidad de la componente meridional del viento en la tropósfera media resultan levemente más precisas en las previsiones realizadas con la versión ETA80+. Este hecho puede deberse al mayor tamaño del retículo de integración utilizado, que permite capturar mejor la posición y el desplazamiento de los sistemas sobre latitudes altas.

4.1.2.2 Cálculo de errores

Con el objeto de evaluar en forma más objetiva el acierto de los pronósticos provistos por el Eta/CPTEC, se calcularon diversos coeficientes de verificación.

La figura 6 presenta el error medio de los pronósticos en el nivel de 850 hPa, cuyo valor en cada punto de retículo está dado por:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$$

donde P_i representa el valor pronosticado, O_i el observado (análisis del NCEP) y N el número de pronósticos (seis). Este cálculo fue realizado interpolando bilinealmente los datos del NCEP al retículo y dominio del modelo en cada uno de los casos. Sin embargo, con fines de comparación dichos errores fueron graficados sobre el mismo dominio, (figura 1a), y con la misma resolución espacial (40km). El nivel de 850 hPa fue escogido por hallarse próximo a la superficie y estar poco afectado por la topografía, excepto en la región cordillerana.

La figura 6 muestra que los errores de temperatura son muy pequeños en todo el recinto de integración (líneas discontinuas) y levemente positivos sobre el este del continente, indicando que el Eta subestima ligera y sistemáticamente los descensos de temperatura en esa región. Estos desvíos aumentan hacia el sur, alcanzando su máximo sobre el borde inferior. Los valores obtenidos sobre la Cordillera de los Andes no deben tenerse en cuenta, pues en esa zona el nivel de 850 hPa se encuentra por debajo de la superficie terrestre. Los errores en la altura geopotencial son también bajos y tienden a crecer hacia el sur,

exhibiendo signos diferentes sobre ambos océanos. Los mayores errores negativos se encuentran sobre el Océano Atlántico Sur, como resultado de la pobre representación de la cuña anticiclónica (comparar las figuras 2 y 4). Ese hecho es coherente con la mayor temperatura prevista por el modelo sobre el este de Sudamérica.

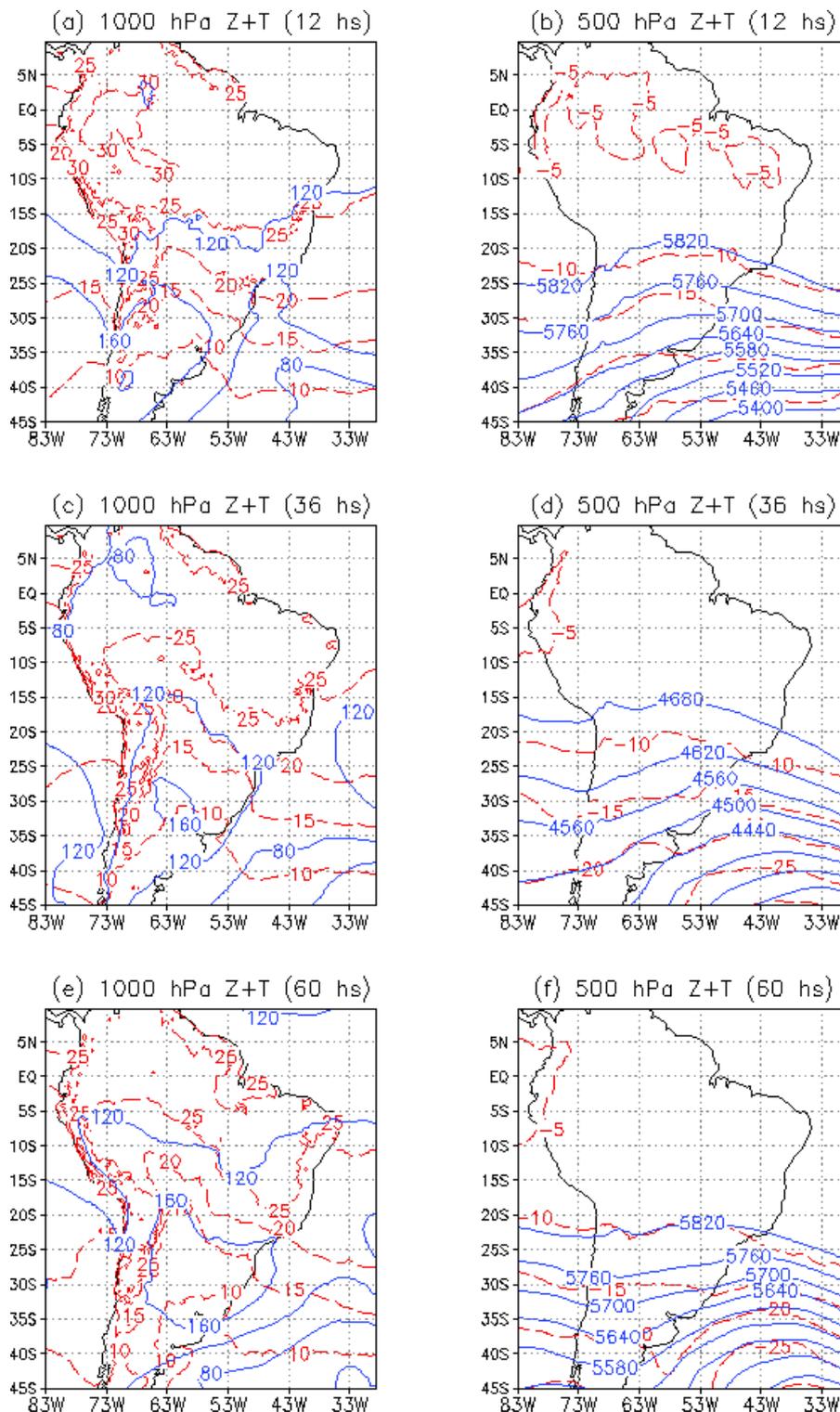


Figura 4: Compuesto de los casos fríos a partir de los pronósticos generados con el modelo ETA (ETA40). Las líneas continuas representan la altura geopotencial (m_gp) y las quebradas la temperatura (°C). Los números entre paréntesis indican el tiempo de integración transcurrido.

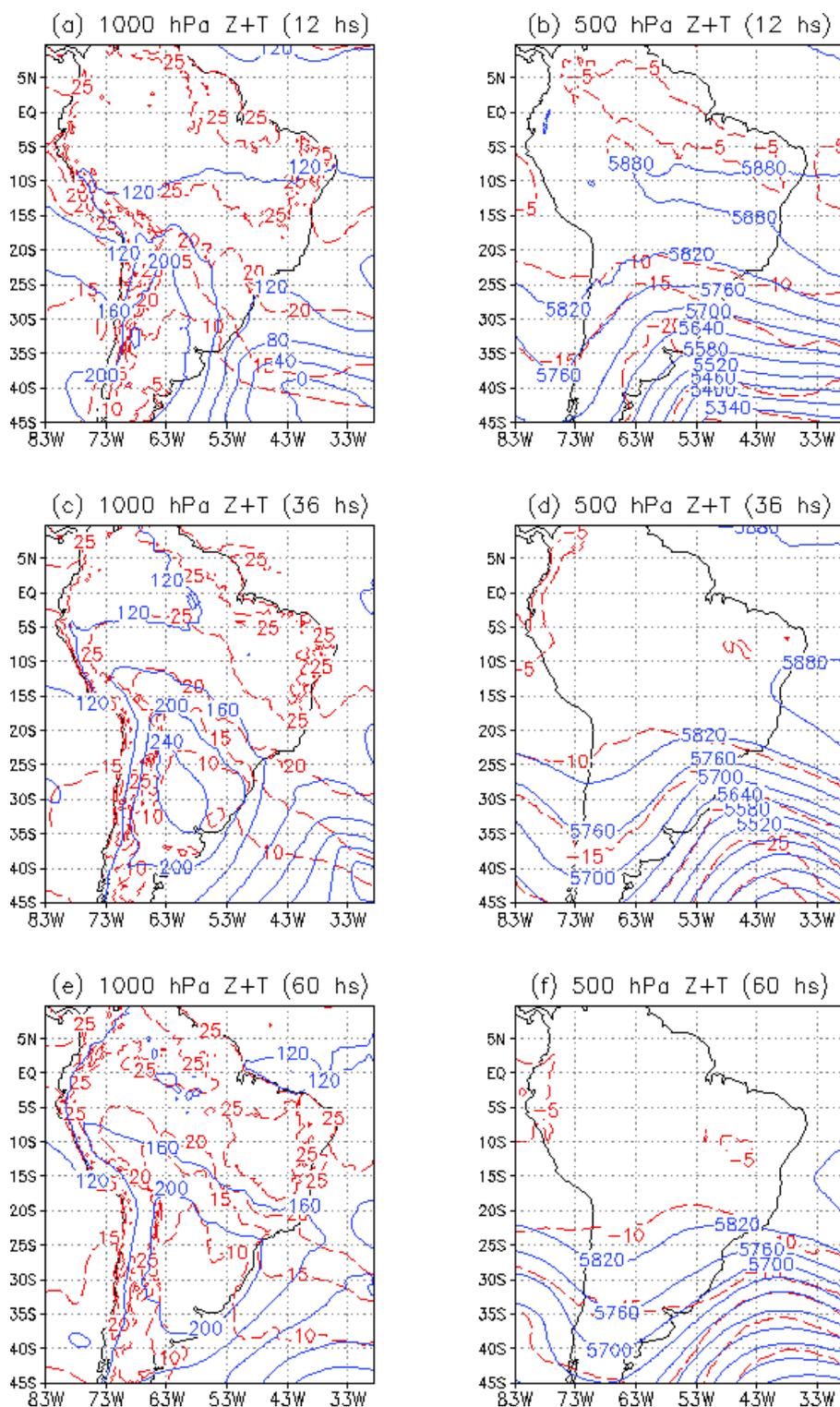


Figura 5: Compuesto de los 3 casos fríos más intensos a partir de los pronósticos generados con el modelo ETA (ETA40). Las líneas continuas representan la altura geopotencial (mgp) y las quebradas la temperatura (°C). Los números entre paréntesis indican el tiempo de integración transcurrido.

Los errores emanados de la versión ETA80 presentan una distribución muy similar a la mostrada en la figura 6a (figura no incluida) pero su magnitud es aproximadamente un 15% mayor, indicando que la pérdida de resolución horizontal contribuye a degradar los resultados. Sin embargo una comparación

entre las figuras 6a y 6b revela que en los pronósticos realizados con un dominio mayor (ETA80+) los errores de temperatura y altura geopotencial son comparativamente menores, especialmente en las cercanías del borde sur. Este resultado se debe presuntamente a la diferencia en los tamaños de las áreas de integración utilizadas, pues los pronósticos realizados con un recinto menor están probablemente más afectados por los errores introducidos a través de las fronteras.

La influencia de las condiciones de borde se torna, muy probablemente, más crítica en situaciones como las elegidas, donde los sistemas experimentan una rápida propagación meridional desde latitudes altas. Para obtener un mayor sustento respecto de esta afirmación se realizó un experimento adicional con un caso particular, ocurrido el 18 de abril de 1996. En él se utilizó como condiciones de borde a los análisis del NCEP en lugar de las previsiones del COLA/CPTEC. La figura 7, que compara los errores de altura geopotencial para ambos experimentos, pone en evidencia que la versión del Eta/CPTEC que es integrada sobre un área menor (ETA40) resulta más sensible a los errores introducidos a través de los contornos. En efecto, en este caso los desvíos disminuyen drásticamente en la cercanía de los bordes cuando se utilizan condiciones de frontera analizadas (comparar figuras 7a y 7c) mientras que en la experiencia realizada con recinto mayor (ETA80+) la mejora lograda fue comparativamente menos importante. En esta última versión la sensibilidad a las condiciones de borde es mayor en la región periférica, que para una estricta comparación fue excluida del gráfico. En síntesis, la mayor lejanía de los bordes permite que la parte interior del dominio sea menos afectada por los errores introducidos a través de las condiciones de contorno.

Teniendo en cuenta que el error medio puede compensar desvíos grandes de signo opuesto se calculó el error cuadrático medio, que castiga especialmente los malos pronósticos puesto que eleva las diferencias al cuadrado. Su valor está dado por:

$$\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Para que las previsiones sean consideradas de buena calidad los errores cuadráticos medios deben permanecer cercanos a los errores medios. Los campos resultantes (figuras 6c y 6d) presentan una distribución similar a la mostrada en las figuras 6a y 6b (errores medios) y una magnitud sólo levemente superior. Esto significa que entre las situaciones elegidas no existe ninguna que fuera particularmente mal pronosticada, lo que denota la confiabilidad del modelo. Nuevamente la versión que utiliza el mayor recinto de integración (ETA80+) posee errores cuadráticos medios comparativamente menores en las inmediaciones del borde sur.

Con el objeto de estudiar la evolución temporal de los distintos coeficientes de error, se graficó la marcha temporal de los errores medios y cuadráticos medios, promediados sobre el recinto de integración utilizado en cada caso. Estos promedios fueron calculados sólo al este de la Cordillera de los Andes (al este de 63°W) por ser ésta la región en la cual se desplazan los sistemas de interés y para evitar errores espureos generados por la presencia de orografía muy elevada.

Las figuras 8a y 8b muestran la evolución temporal del error medio de temperatura y altura geopotencial en los niveles de 850 hPa (línea delgada) y 500 hPa (línea gruesa) y sus respectivos errores cuadráticos medios (línea discontinua y punteada respectivamente) para las versiones ETA40 y ETA80+. Se incluye además el error por persistencia en el nivel de 850 hPa (línea gruesa discontinua con escala a la derecha) que es utilizado como referencia, pues toda previsión debe presentar un grado de acierto mayor a éste para ser considerada exitosa. La previsión por persistencia consiste en pronosticar para un tiempo posterior $t_0 + \Delta t$ las condiciones observadas en el instante inicial ($t = t_0$). En general los errores son pequeños, su crecimiento con el tiempo es bastante moderado y su magnitud es prácticamente un orden de magnitud menor a los derivados de previsiones por persistencia. El error cuadrático medio se mantiene cercano al error medio, mostrando un crecimiento con el tiempo ligeramente mayor. Una comparación entre las distintas versiones lleva a nuevamente a sugerir que la utilización de un mayor recinto de integración conduce a desaciertos menores, a pesar de emplear una peor resolución horizontal respecto de la versión operativa.

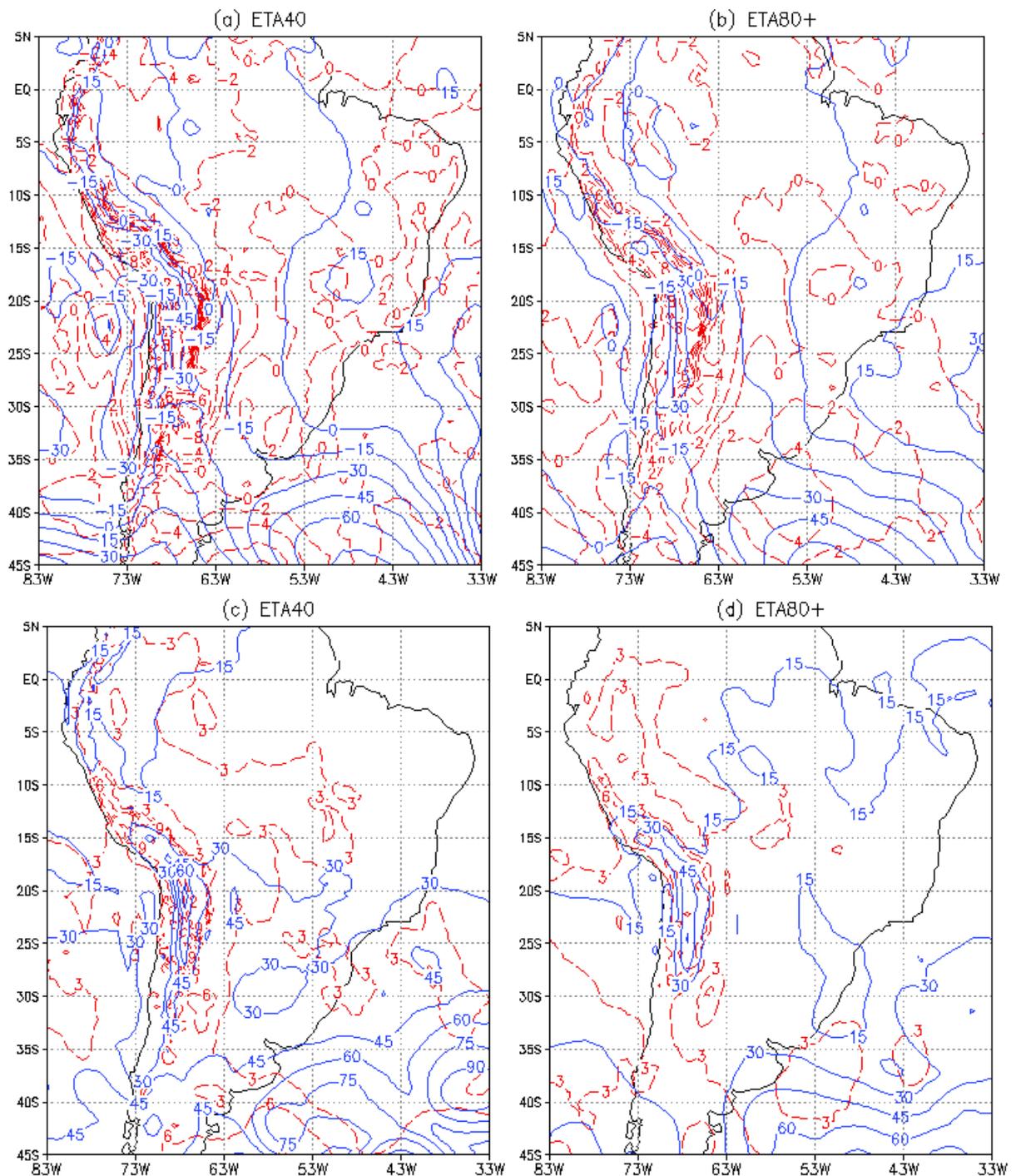


Figura 6: Error medio de altura geopotencial (m_{gp}) (líneas continuas) y temperatura (°C) (líneas quebradas) en el nivel de 850 hPa, correspondientes a los pronósticos de 60 horas realizados con la versión (a) ETA40 y (b) ETA80+, para el caso de invasiones de aire frío. (c) Error cuadrático medio para la versión ETA40. (d) Error cuadrático medio para la versión ETA80+ para el mismo instante y nivel.

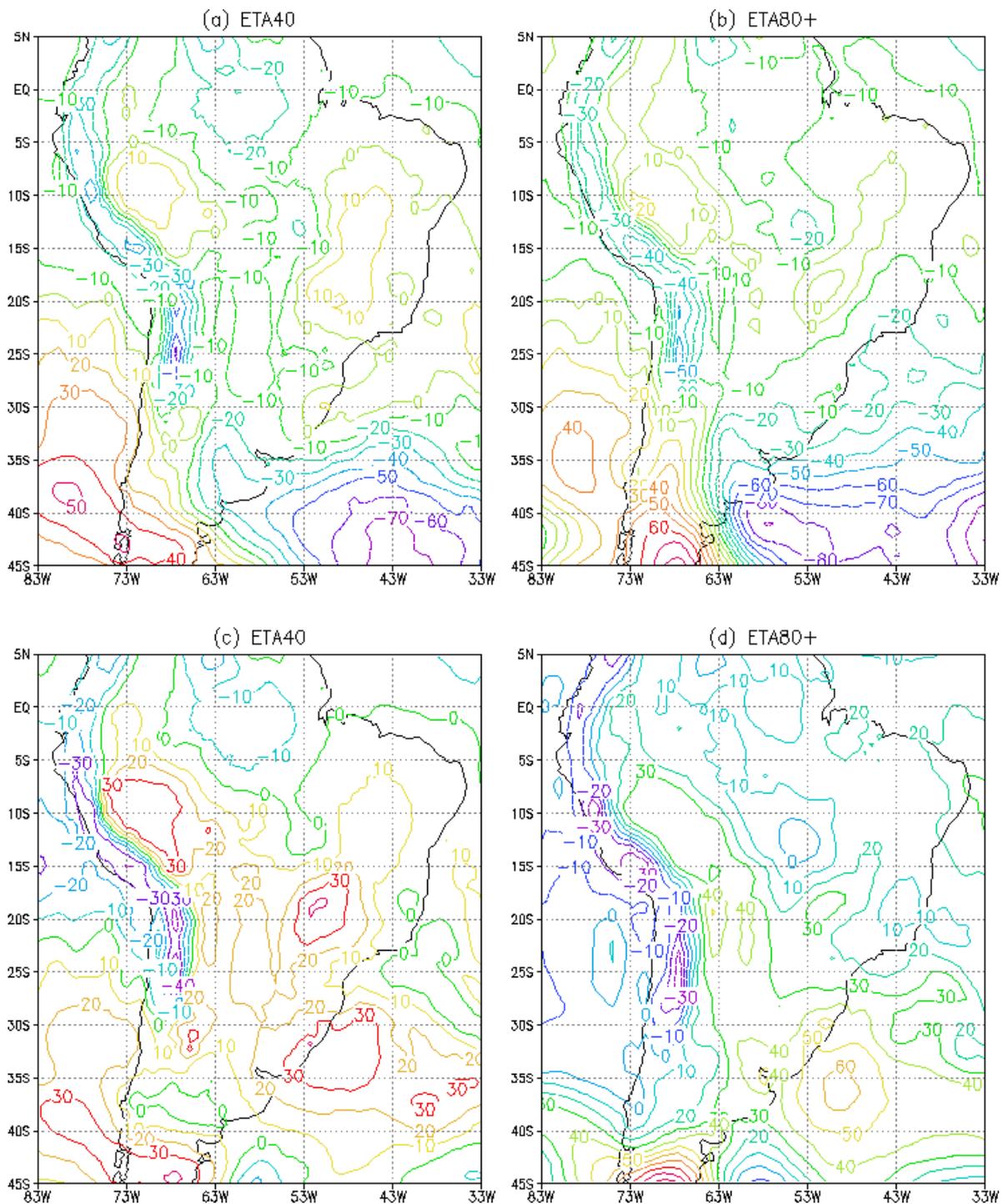


Figura 7: Errores de altura potencial (mgs) luego de 60 horas de integración para el episodio del 18 de abril de 1996. (a) con la versión ETA40, (b) con la versión ETA80+. Las condiciones de frontera son suministradas cada 6 horas por el COLA/CPTEC_GCM (c) ídem (a) pero con condiciones de contorno analizadas, (d) Ídem (b) con condiciones de contorno analizadas.

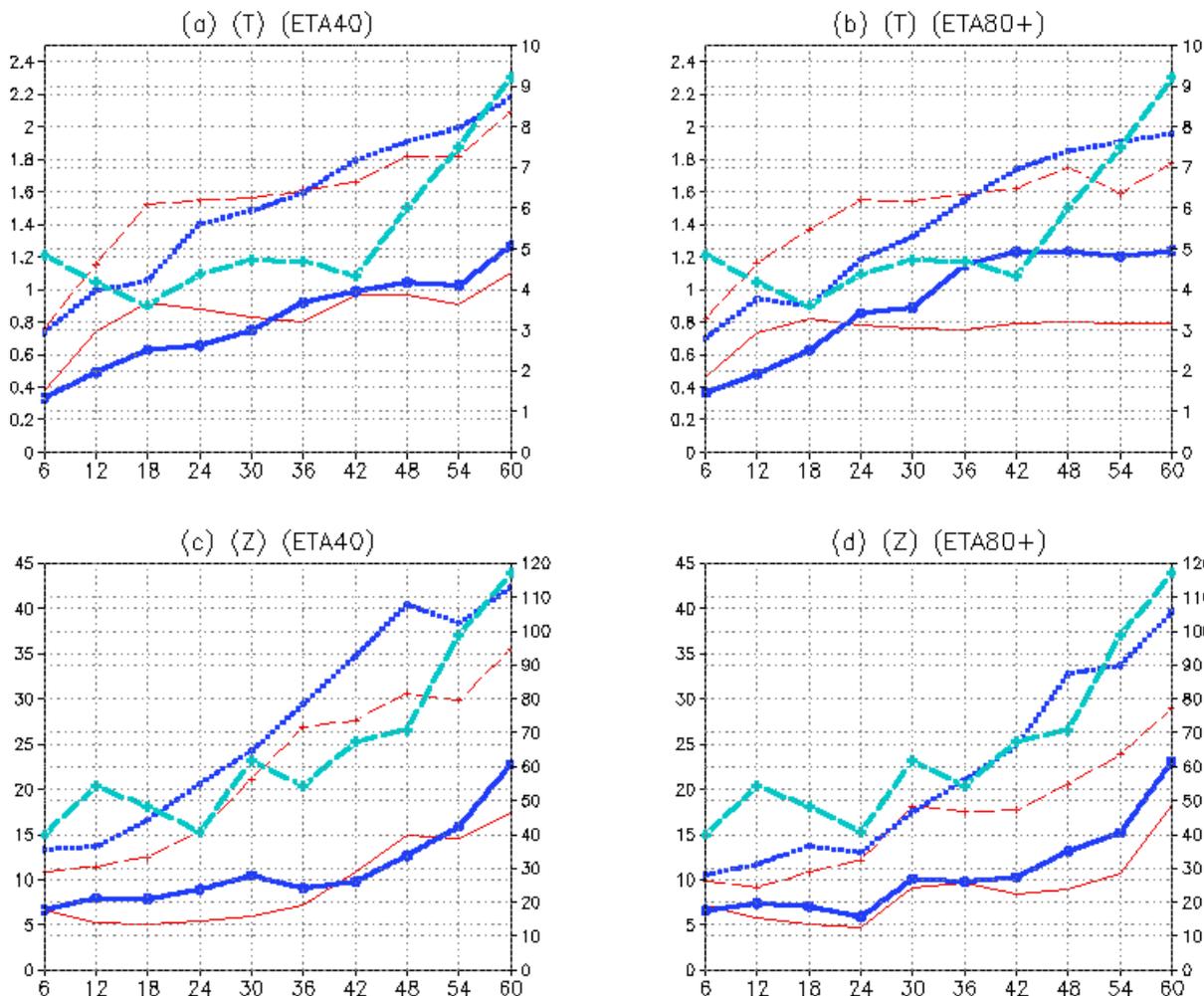


Figura 8: (a) Errores medios promediados sobre el recinto de integración de temperatura (°C) en 850 hPa (línea sólida delgada) y 500 hPa (línea gruesa) y errores cuadráticos medios areales de temperatura (°C) en 850 hPa (línea quebrada delgada) y 500 hPa (línea punteada) para el pronóstico de casos fríos con la versión ETA40. Se incluye el error por persistencia (línea gruesa quebrada con escala en la parte derecha) (b) Idem (a) para los pronósticos realizados con la versión ETA80+. (c) y (d) Idem (a) y (b) para la altura geopotencial (mgs).

La figura 9 exhibe la marcha del coeficiente de correlación entre las tendencias temporales (6 horas) de altura geopotencial analizadas y pronosticadas en el nivel de 850 hPa (ETA40 en línea delgada, ETA80 en línea gruesa y ETA80+ en línea de trazos), cuyo valor se obtiene como:

$$\frac{\sum(p-\bar{p})*(o-\bar{o})}{N*sp*so}$$

donde p (o) representan las tendencias temporales pronosticadas (analizadas), sp (so) sus desviaciones estándar y N el número de casos involucrados. Estos coeficientes de correlación fueron calculados para cada punto del retículo y luego promediados sobre el recinto de integración correspondiente a cada versión del modelo. Este exigente control determina el grado de relación que existe entre los incrementos temporales de las variables pronosticadas y observadas y, por lo tanto, su valor debe ser positivo para que

el pronóstico sea confiable. La figura 9 muestra que en todos los experimentos los cambios previstos por el modelo están en el mismo sentido que las variaciones analizadas, ya que si bien la correlación disminuye con el tiempo los coeficientes se mantienen positivos durante todo el lapso de pronóstico. Puede notarse además que la caída más abrupta se produce entre las 6 y 12hs primeras horas de la integración. Una nueva comparación entre las versiones del modelo confirma que los resultados son sensibles no sólo a la resolución horizontal sino también al tamaño del retículo empleado.

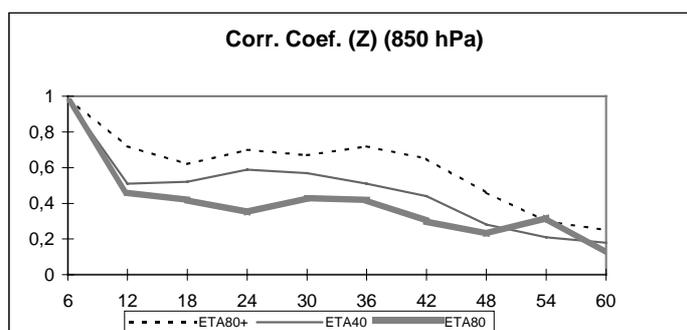


Figura 9: Marcha temporal del coeficiente de correlación entre las tendencias observadas y pronosticadas de altura geopotencial en el nivel de 850 hPa, según las versiones ETA40 (línea continua delgada), ETA80 (línea continua gruesa) y ETA80+ (línea de puntos).

4.2 Invasiones de aire tropical sobre latitudes medias.

4.2.1 Descripción de las situaciones seleccionadas.

La figura 10 muestra el compuesto de las ocho situaciones seleccionadas, en donde se ilustra la situación imperante antes y durante del inicio de la actividad convectiva profunda. A partir de ella puede concluirse que los episodios convectivos elegidos están ligados a patrones definidos de circulación sinóptica y en particular al desplazamiento de sistemas frontales fríos. En efecto, los mapas de altura geopotencial en los niveles de 1000 y 500 hPa (figs 10a, 10c, 10d y 10f), denotan el avance de una vaguada migratoria que separa dos masas de aire que contrastan por su temperatura, su advección térmica y su contenido de humedad. En niveles medios la presencia frontal se evidencia a partir del gradiente de temperatura y del máximo de viento localizado alrededor de los 40°S. Las imágenes satelitales incluidas en las figuras 15 y 16 (lado derecho) también confirman la presencia de sistemas frontales en casi todos los casos estudiados. La única excepción sería el caso acaecido el 18 de febrero de 1997 (última foto de la fig. 16) que parece estar vinculado a un sistema convectivo de meso-escala. Sin embargo, aún en esta situación se advierte una región baroclínica en las inmediaciones de la Provincia de Buenos Aires (Argentina).

Durante las horas previas al inicio de las tormentas (figuras 10a a 10c) la depresión del Chaco se encuentra bien desarrollada, generando junto con el borde oeste del anticiclón subtropical del Atlántico una franja con fuertes vientos del norte. Este transporte de masas de aire tropical hacia latitudes más altas se ve también reflejado en el progresivo desplazamiento hacia el sur de la lengua de aire húmedo localizada sobre el este del continente (comparar la humedad de las figuras 10b y 10e). La actividad convectiva tiene lugar, en consecuencia, dentro de la masa de aire que es inestabilizada por la inyección de aire caliente y húmedo desde el norte, y luego parcialmente elevada por la pendiente frontal. Este frente se mueve lentamente hacia el norte en las 12-24hs siguientes, interceptando la lengua de aire húmedo y permitiendo de esta manera el mantenimiento de la convección profunda y su desplazamiento hacia latitudes más bajas.

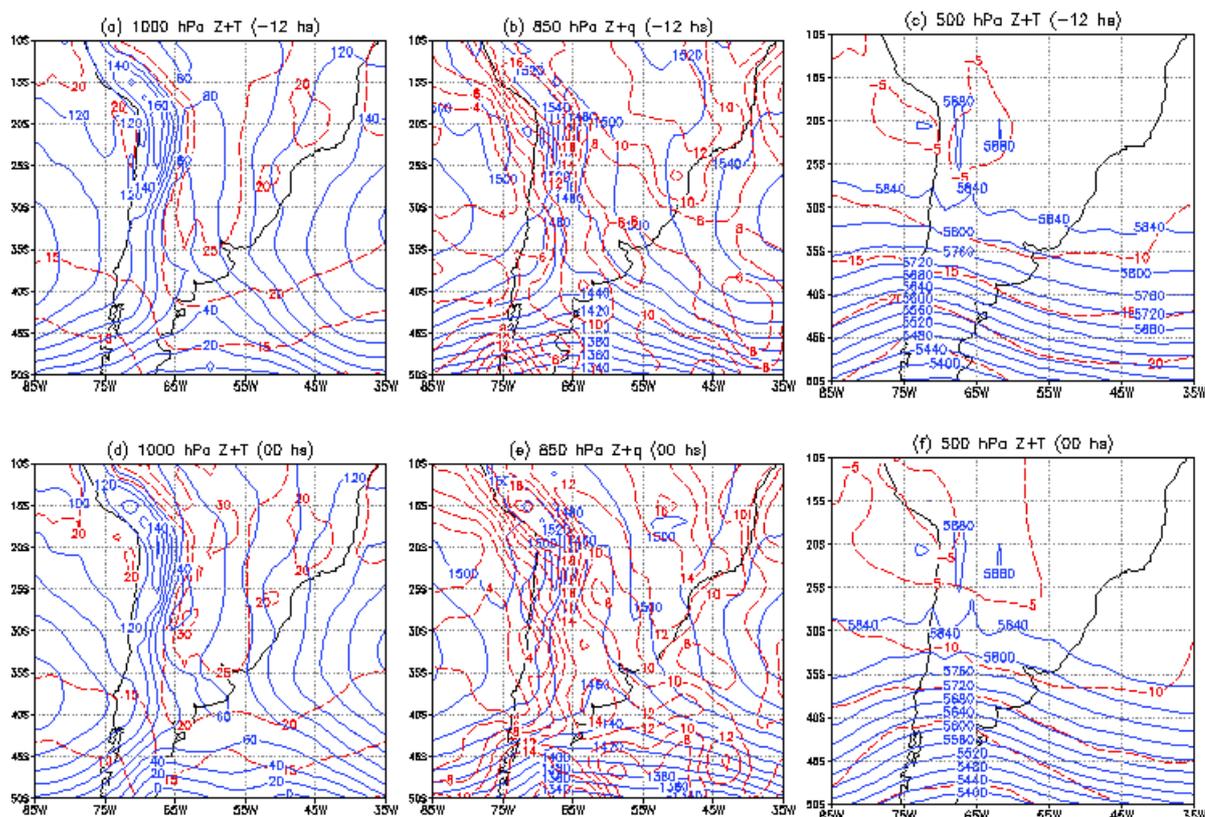


Figura 10: Compuesto de casos convectivos, obtenidos a partir de los análisis del NCEP. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, líneas quebradas en a, c, d y f), humedad específica (g/kg en b y e) y altura geopotencial (mgs , líneas continuas)

4.2.2 Pronósticos realizados con el Eta/CPTEC

4.2.2.1 Mapas compuestos

Los pronósticos realizados con el Eta/CPTEC fueron iniciados en todos los casos 48 horas antes del comienzo de la etapa madura de la convección organizada. El acortamiento del plazo de pronóstico respecto de las invasiones de aire frío obedece a que en general la previsión de fenómenos convectivos resulta más dificultosa, en virtud de su escala espacial y temporal, y de la mayor complejidad de los procesos físicos involucrados.

La figura 11a, realizada a partir de los pronósticos obtenidos con la versión ETA40, muestra que el modelo es capaz de reproducir las características esenciales de la situación meteorológica. En particular es posible identificar la zona con fuerte predominio de viento norte, ubicada entre la posición de la Baja del Chaco y el anticiclón subtropical, así como la zona frontal que dispara la convección. La ubicación e intensidad de estos sistemas guarda una alta concordancia con los campos analizados (comparar con la figura 10). La lengua de aire húmedo en el nivel de 850 hPa es igualmente bien pronosticada, tanto en su estructura espacial como en su evolución temporal. La vaguada que acompaña al sistema en la tropósfera media es posicionada correctamente, pero su baroclinicidad es levemente subestimada. En general las diferencias entre las distintas versiones del modelo empleadas son muy pequeñas, aún menores que en el caso de invasiones de aire polar (las figuras no se incluyen)

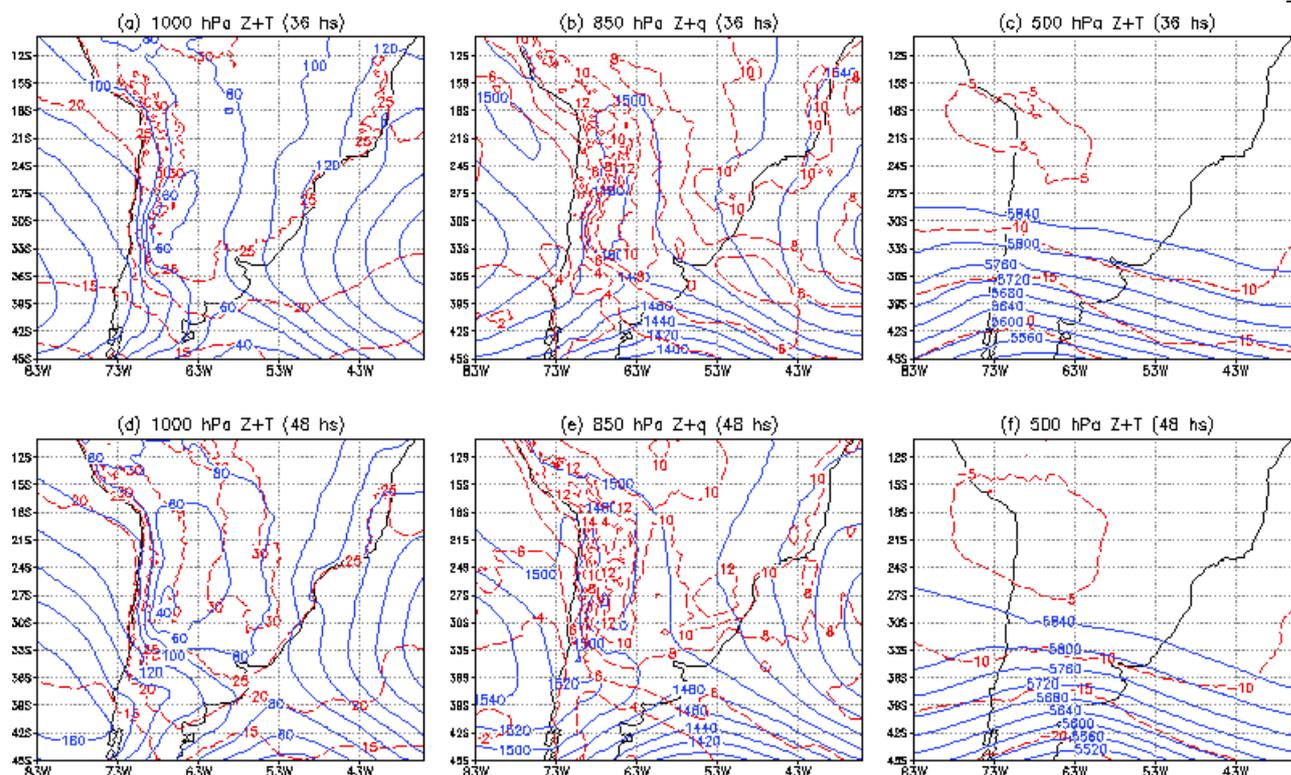


Figura 11: Compuesto de mapas pronosticados (ETA40 km) para los casos convectivos. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, líneas quebradas en a, c, d y f), humedad específica (g/kg en b y e) y altura geopotencial (mvp, líneas continuas). Los números entre paréntesis indican el tiempo de integración transcurrido.

4.2.2.2 Errores de los pronósticos generados por el Eta/CPTEC

La calidad del pronóstico generado por el modelo Eta/CPTEC para los casos de convección asociada a invasiones de aire tropical sobre latitudes medias, fue también evaluado a través del cálculo de los mismos coeficientes de error.

La figura 12 presenta el campo de errores cuadráticos medios en el nivel de 850 hPa, obtenido para las versiones ETA40 y ETA80+ al cabo de 60 horas de integración. Puede comprobarse que los errores de temperatura (líneas discontinuas) son pequeños, con una distribución bastante uniforme y una leve tendencia a aumentar hacia los bordes oeste y sur. Los errores de altura geopotencial son también relativamente bajos y tienden a aumentar hacia el borde inferior del recinto de integración. La presencia de diferencias positivas de altura geopotencial y negativas de temperatura sobre el continente, al sur de 25°S , parecen indicar que las irrupciones de aire frío vinculadas a los pasajes frontales son subestimadas. Una comparación entre las distintas variantes del modelo utilizadas lleva a comprobar que existen escasas diferencias entre ellas (figuras 12a y 12b). Sin embargo la versión del Eta/CPTEC que utiliza un mayor dominio presenta errores de altura geopotencial levemente menores sobre el continente entre los 25° y 45°S . Este hecho puede deberse a que las situaciones elegidas si bien corresponden a eventos convectivos de meso escala, están conducidas por configuraciones de escala sinóptica (pasajes frontales) cuyo pronóstico parece ser sensible a las condiciones de borde.

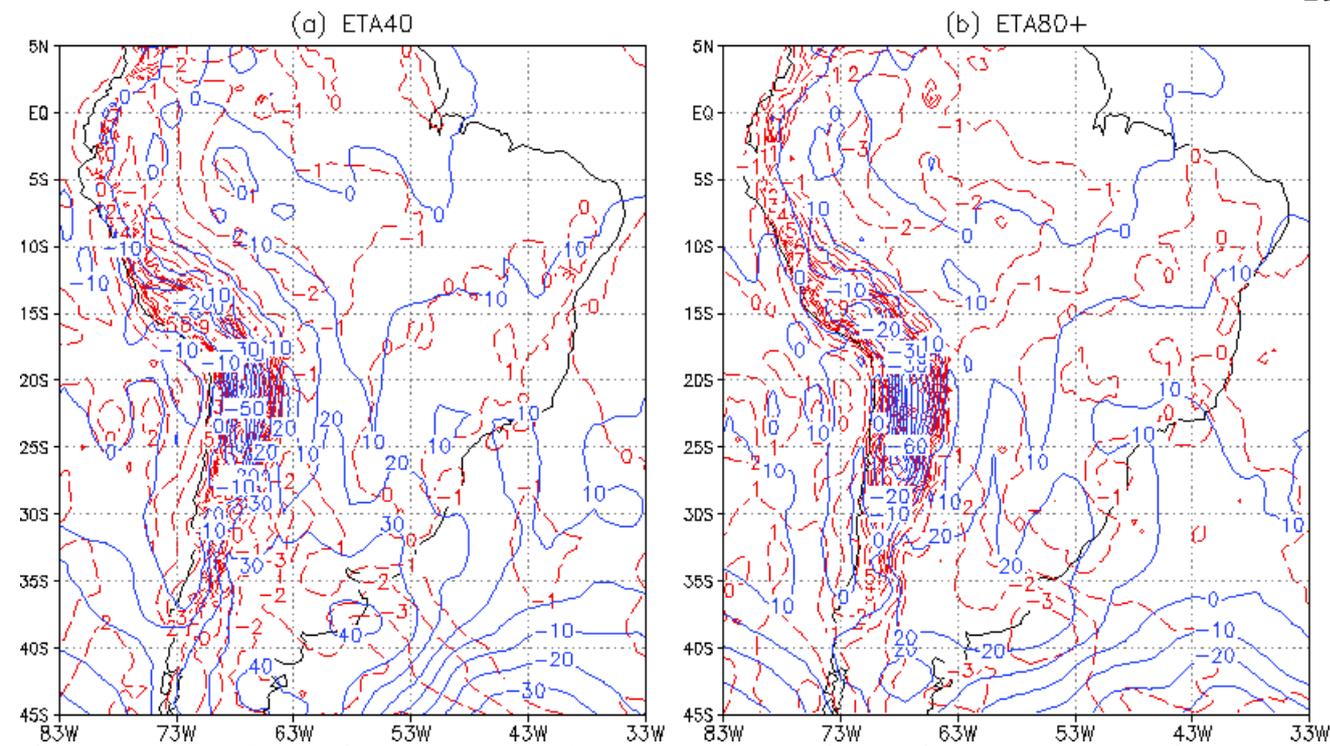


Figura 12: Idem figura 6a y 6b para las situaciones convectivas

La figura 13 exhibe la evolución temporal de los errores medios y cuadráticos medios de temperatura y altura geopotencial para las versiones ETA40 y ETA80+. Puede apreciarse un comportamiento similar al observado en la figura 8 con errores aún menores, muy inferiores al obtenido por persistencia, y un crecimiento gradual. La comparación entre las versiones revela que para los episodios convectivos analizados el modelo muestra alguna sensibilidad a los cambios de resolución horizontal y de tamaño del dominio. La marcha de los coeficientes de correlación entre las tendencias observadas y pronosticadas de temperatura en el nivel de 850 hPa (figura 14) presenta un comportamiento semejante al mostrado en la figura 9, exhibiendo en este caso valores ligeramente más altos y una disminución con el tiempo algo menos acentuada.

Los análisis anteriores han mostrado la eficacia del ETA/CPTEC para pronosticar la situación sinóptica conducente a los eventos convectivos seleccionados. Sin embargo, esto no significa que el modelo sea capaz de prever con acierto la precipitación asociada, que es una de las variables de mayor interés para la previsión del tiempo. Por esta razón se llevó a cabo un nuevo examen comparando el campo previsto por el Eta/CPTEC con la imagen satelital correspondiente. Si bien hubiese sido preferible la utilización de datos observados de precipitación para este propósito, lamentablemente su escasa disponibilidad tornaba cualquier comparación altamente insegura. Por otra parte dado que las imágenes de satélite se hallan disponibles a intervalos de 3 horas (a veces menos) su utilización como herramienta cualitativa se torna de utilidad. En consecuencia se analizó con que anticipación el modelo fue capaz de pronosticar el inicio de la convección organizada y en qué medida logró hacerlo. Con este fin se realizaron pronósticos adicionales para todos los casos elegidos, inicializando el modelo 36, 24 y 12 horas antes del comienzo de la etapa convectiva organizada. De esta manera se dispuso de previsiones con lapsos que oscilaron entre 48 y 12 horas para cada situación. En general el plazo con que el Eta/CPTEC fue capaz de pronosticar el inicio de la etapa convectiva madura fue bastante variable: en cinco situaciones logró prever acertadamente el inicio de las tormentas con 36 horas de antelación, mientras que en dos oportunidades lo hizo con 24 horas y en una solamente con 12 horas de anticipación.

Las figuras 15 y 16 muestran la precipitación acumulada en las últimas 6 horas de integración prevista por dos versiones del modelo, y la imagen satelital correspondiente a la hora más cercana (por cuestiones de espacio no se incluyen los campos emanados de la versión ETA80). El plazo de pronóstico en cada caso es el mayor con que el modelo logró reproducir el inicio de la actividad convectiva (36 horas

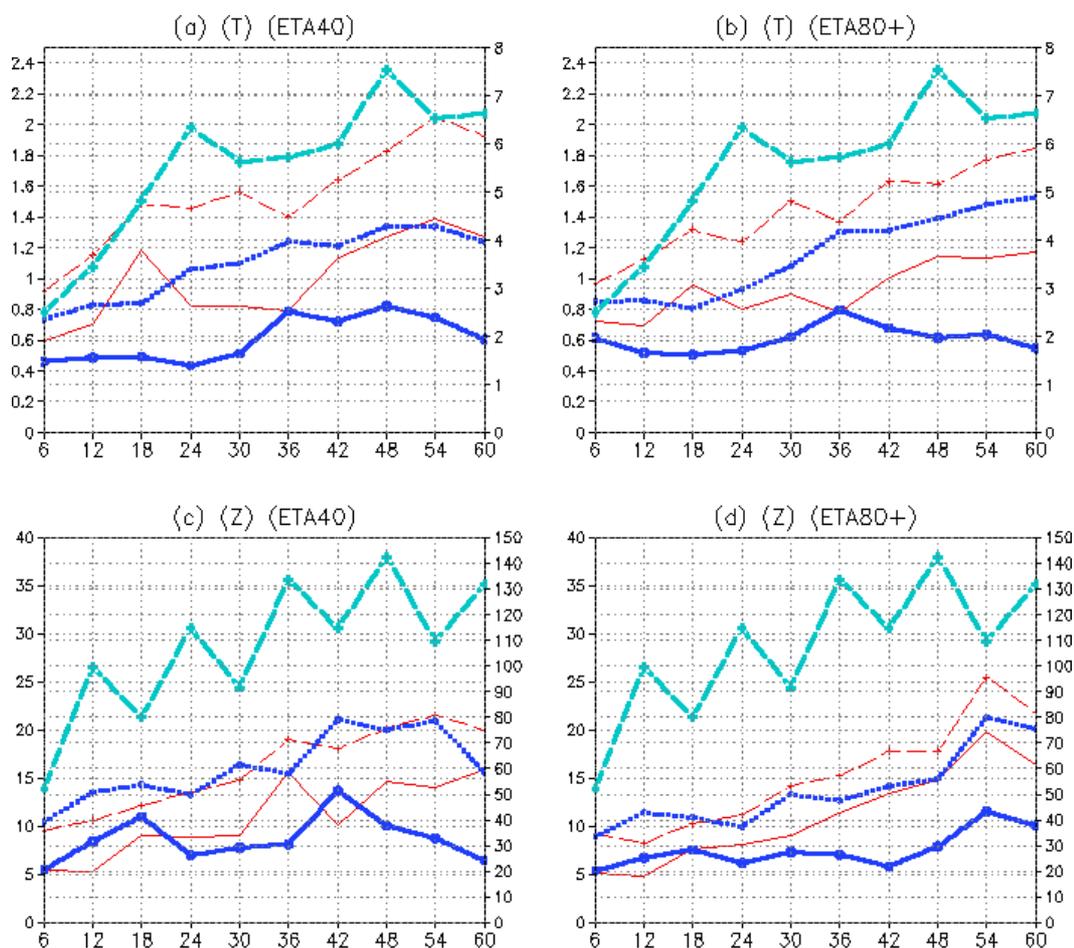


Figura 13: Idem figura 8 para los casos de convección organizada.

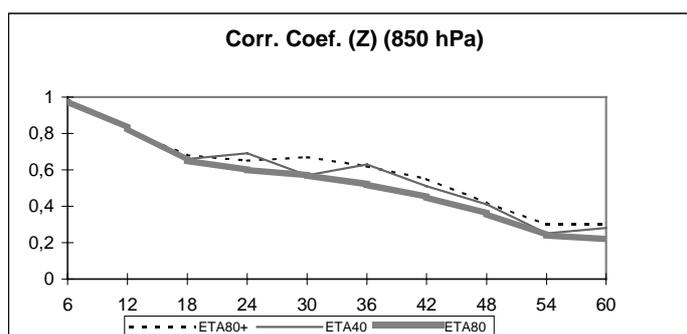


Figura 14: Idem figura 9 para los casos de convección organizada.

en la mayoría de los casos, ver texto de las figuras 15 y 16). Puede comprobarse en general una buena correspondencia entre las imágenes satelitales y las áreas con precipitación, existiendo una leve tendencia del modelo a adelantar los sistemas convectivos, especialmente en la versión ETA80+. Si bien una comparación entre ambas versiones resulta altamente subjetiva es posible establecer que existen sólo pequeñas diferencias entre ellas, que no establecen una clara supremacía de una sobre otra. En especial el caso ocurrido el 4 de febrero de 1997 (figuras 15c y 15d) presentó una actividad muy variable en tiempo y espacio, por lo que sólo fue prevista acertadamente con un plazo de 12 horas y utilizando una resolución de 40 km.

La intensidad de la precipitación prevista difiere relativamente poco entre ambas versiones del modelo, que muestra una tendencia a producir mayores montos cuando se utiliza una resolución horizontal de 40 km. Si bien la disponibilidad de datos observados de precipitación es limitada, en general los valores observados se ubican en forma intermedia entre los pronosticados por cada una de las versiones, aunque resultan levemente más próximos a los obtenidos a partir de una resolución de 40 km. En general la precipitación pronosticada por el ETA80 no difiere significativamente respecto de las otras versiones, pero su grado de verificación resultó comparativamente algo más bajo.

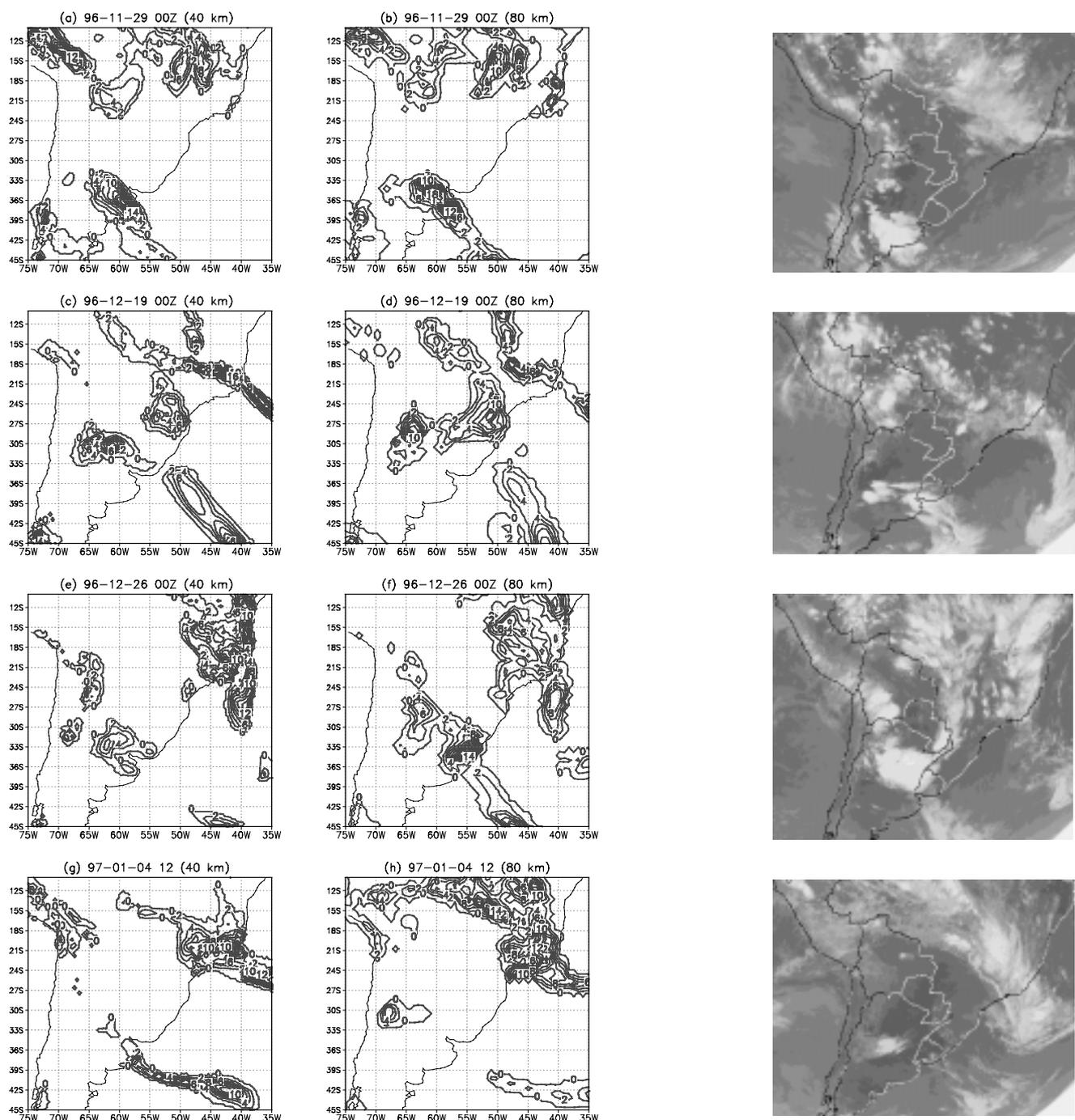


Figura 15 Campos de precipitación pronosticados por el modelo ETA en sus versiones ETA40 (izquierda) y ETA80+ (centro). En el extremo derecho se incluyen las imágenes satelitales GOES de los días y horas indicados (inicio de la convección madura). El período de integración fue de 36 horas, excepto en los casos (c) y (d) que fue de 12 horas.

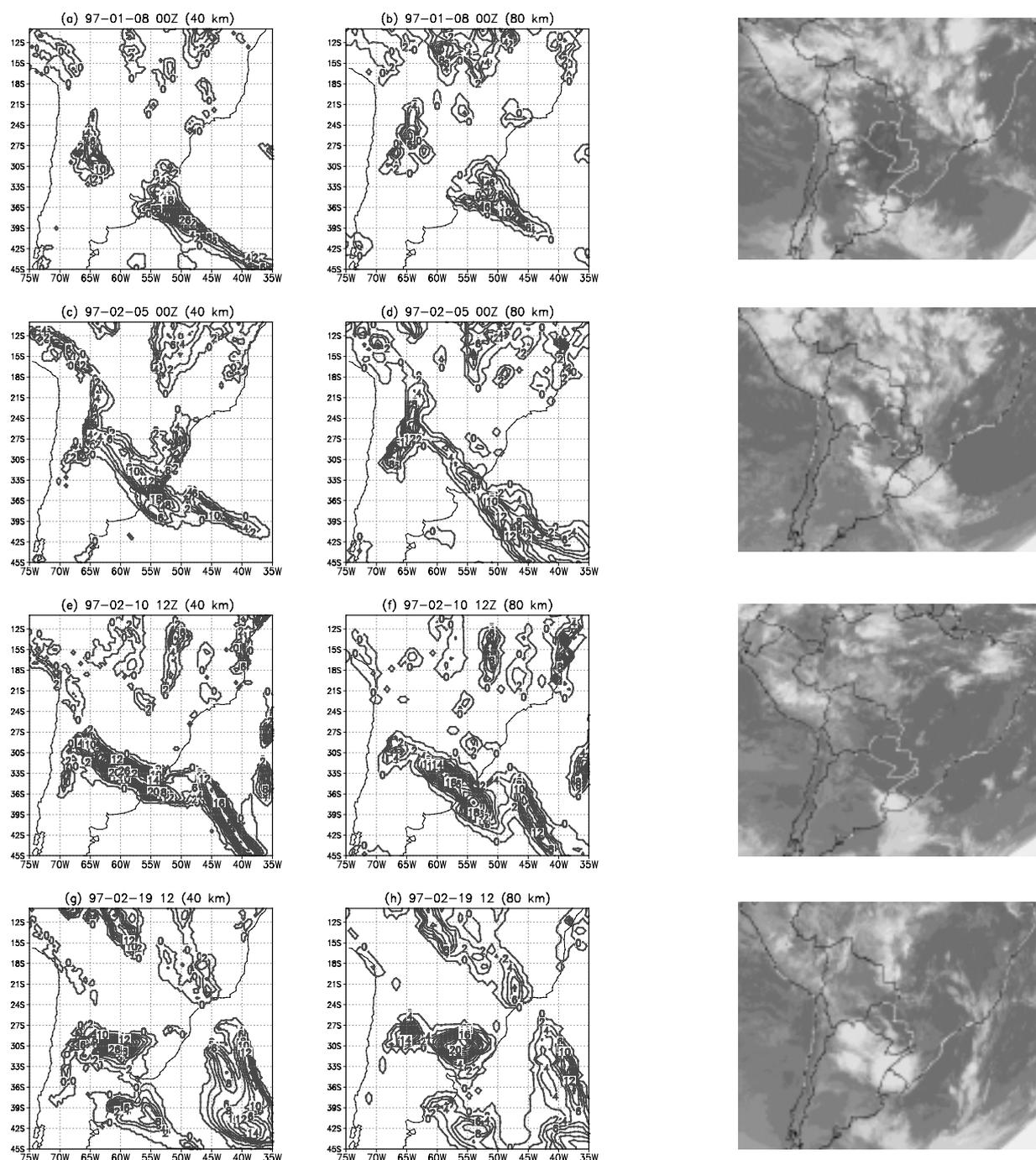


Figura 16: Idem figura 15. El periodo de integración fue de 36 horas, excepto en los casos (e), (f), (g) y (h) que fue de 24 horas.

5. Discusión y conclusiones

Con el objeto de investigar el grado de acierto que presenta el modelo regional Eta/CPTEC en el pronóstico de situaciones con fuertes intercambios meridionales de masas de aire se analizaron 14 situaciones particulares. Seis de ellas corresponden a intensas invasiones de aire polar sobre latitudes tropicales y 8 se vinculan a la aparición de convección organizada sobre latitudes extra tropicales. Las previsiones se realizaron empleando tres versiones distintas del modelo que difieren en su resolución horizontal y/o en el tamaño del recinto de integración.

Las incursiones de aire polar hacia latitudes tropicales estuvieron ligadas a pasajes de intensos

frentes fríos acompañados por anticiclones migratorios. Estos sistemas se desplazaron rápidamente siguiendo una trayectoria casi meridional debido fundamentalmente a la marcada componente meridional del viento en altura. El modelo Eta/CPTEC logra reproducir las características esenciales de estas situaciones con 60 hs de anticipación (plazo máximo de previsión). En general éste tiende a pronosticar sistemas levemente más débiles y localizados más hacia el sur, con lo cual los descensos previstos de temperatura sobre la mayor parte del litoral sudamericano son algo menores a los observados. El error cuadrático medio resulta muy similar al error medio por lo que el modelo no presenta variaciones importantes en su grado de acierto para los distintos casos analizados. La evolución temporal de los coeficientes de error muestra valores pequeños que presentan un crecimiento gradual con el tiempo. La diferencia entre los errores medios y cuadráticos medios sufre sólo un leve incremento con el tiempo. Los coeficientes de correlación entre las tendencias observadas y pronosticadas de temperatura son positivos durante todo el período de integración, con magnitudes que tienden a decrecer progresivamente con el tiempo. Este exigente control sugiere que el modelo se mantiene su confiabilidad durante las 60 hs que es integrado.

La comparación entre las tres versiones del modelo utilizadas (a través de los campos de error medio, de su evolución temporal y de la magnitud de los coeficientes de correlación) llevan a concluir que en las invasiones de aire polar elegidas los pronósticos efectuados utilizando un recinto de integración mayor resultan mas precisos, aún cuando la resolución horizontal empleada es menor. Por lo tanto en los casos analizados la resolución horizontal parece ser menos importante que el tamaño del recinto empleado, que resulta fundamental para detectar con precisión el movimiento de los sistemas provenientes de latitudes más altas. Este hecho es totalmente coherente con la aparición de los mayores errores de temperatura y altura geopotencial en las inmediaciones de la frontera sur del dominio de integración, que resultan comparativamente mayores para las versiones del modelo que emplean un recinto menor. En estos últimos casos el movimiento de los sistemas baroclínicos al sur de 45°S es informado a través de las condiciones de contorno suministradas cada 6 horas por el COLA/CPTEC_GCM. Este modelo posee una resolución considerablemente más baja y por lo tanto es esperable que no logre captar con gran detalle el desplazamiento de sistemas de estructura altamente baroclínica. Esta información, quizás excesivamente suavizada para la resolución del Eta/CPTEC, contribuiría a degradar el acierto de las previsiones con el decorrer del tiempo. Los pronósticos realizados con un mayor dominio de integración son en consecuencia menos influenciados por los errores introducidos a través los bordes, al menos durante las primeras 60 horas de previsión. Este hecho es especialmente evidente si los sistemas involucrados provienen de latitudes medias-altas, pues en esos casos la frontera sur cobra especial relevancia. Cabe señalar, por otra parte, que si bien el aumento en el tamaño del recinto resultó importante en los casos analizados, el incremento de la resolución horizontal también influyó positivamente en la calidad de las previsiones.

Las ocho situaciones convectivas en latitudes medias se caracterizaron por la intromisión de aire tropical desde el norte a través de las corrientes del norte asociadas a la baja del Chaco y al anticiclón del Atlántico. Dichas corrientes aumentaron la inestabilidad de la masa de aire emplazada al sur de 35°S que fue luego disparada por el pasaje de un frente frío.

El Eta/CPTEC pronostica con buen grado de acierto las ocho situaciones convectivas investigadas. Los campos de errores medios y cuadráticos medios presentan luego de 60 horas de integración valores pequeños, y una distribución que indica una tendencia por parte del modelo a subestimar muy levemente la intensidad de los frentes fríos involucrados. Los mayores errores se verifican también en las cercanías del borde sur del dominio de integración y resultan ligeramente menores para la versión que utiliza menor resolución horizontal y un dominio más amplio. Este hecho puede deberse a que los casos elegidos estuvieron ligados a pasajes de sistemas frontales fríos, cuyo desplazamiento es en gran parte regido por procesos de latitudes medias o altas.

La evolución temporal de los coeficientes de error muestra un crecimiento con el tiempo comparativamente más lento que en los casos de invasiones de aire polar, especialmente durante las primeras horas de integración. Este resultado es coherente con la marcha temporal de los coeficientes de correlación entre las tendencias observadas y pronosticadas, que presentan un decrecimiento temporal relativamente más lento.

La comparación realizada entre los campos pronosticados de precipitación y las imágenes satelitales correspondientes, permiten apreciar que el modelo fue capaz de prever acertadamente el inicio de la convección con 36 horas de anticipación en cinco oportunidades, mientras que lo hizo con una antelación de 24 horas en dos ocasiones y con sólo 12 horas en el caso restante. Contrariamente a lo que podría esperarse aún para los casos convectivos analizados, la versión del Eta/CPTEC que utiliza una mayor resolución no logra superar los resultados alcanzados con una resolución de 80 km y un recinto mayor. Este hecho puede deberse a varios factores:

1- Los casos escogidos estuvieron ligados a pasajes de sistemas frontales que interceptaron una masa de aire húmeda e inestable. El movimiento de estos sistemas parece estar afectado por las condiciones de borde generadas por el COLA/CPTEC_GCM, de más baja resolución. Estos resultados concuerdan con los hallados por Anthes et.al.(1989) quienes al estudiar el desempeño del modelo regional Penn State/NCAR destacan que luego de 36 horas de integración el modelo es más sensible a las condiciones de contorno que a las modificaciones en las parametrizaciones físicas.

2- El esquema de parametrización de la convección incluida en el Eta/CPTEC (Betts y Miller (1984) modificada por Jancic (1994)) que ajusta el sondeo local a un perfil medio (igual para todo el recinto) parece ser, quizás, algo simplificado para un modelo que posee una resolución horizontal de 40 km y 38 niveles verticales. Es de esperar que un esquema más completo, que tenga en cuenta con mayor detalle los procesos ligados a la convección, provea pronósticos más precisos y resulte más sensible a la buena resolución horizontal del modelo. En este sentido Kuo y Low-Nam (1990) hallaron una apreciable mejora en la simulación de 9 ciclones explosivos cuando utilizaron una parametrización explícita de la convección o un esquema de Arakawa y Schubert modificado, en reemplazo del esquema de Kuo modificado. Debido a la importancia de esta cuestión actualmente se está desarrollando un trabajo tendiente a evaluar y mejorar el desempeño del esquema de convección incluido en el Eta/CPTEC.

3- Por último Anthes et.al. (1989) destacan que el simple aumento de la resolución horizontal no conduce a cambios fundamentales en el acierto de los pronósticos. Los autores destacan que el número de niveles y el espaciamiento horizontal de la grilla deben ser aumentados progresiva y conjuntamente para introducir mejoras en el grado de acierto de las previsiones.

Un problema presente durante el transcurso de este estudio fue la disponibilidad de datos adecuados para realizar una comparación exhaustiva. El empleo de los análisis del NCEP, de resolución considerablemente menor a la del modelo, pudo quizás perjudicar en mayor medida la verificación de la versión ETA40 que provee un mayor grado de detalle. En la actualidad el CPTEC está abocado a la tarea de diseñar un esquema de asimilación de datos, con lo cual se espera que este inconveniente se solucione en el futuro. Esta asimilación debería contribuir, por otra parte, a disminuir el impacto que genera la inclusión de condiciones de borde provenientes de un modelo de resolución mucho más baja.

Cabe destacarse también que esta investigación fue orientada sólo a dos tipos particulares de situaciones sinópticas y que el número de casos analizados (14) no fue lo suficientemente grande como para brindar a los resultados un estricto rigor estadístico. Sin embargo éstos constituyen una guía para encaminar nuevos emprendimientos tendientes a validar y mejorar el modelo regional Eta/CPTEC. Las conclusiones halladas parecen indicar que una posibilidad para mejorar la calidad de las previsiones es aumentar el dominio de integración, aún cuando por cuestiones técnicas esto implique la necesidad de disminuir ligeramente la resolución horizontal. En particular el borde sur muestra mayor impacto, pues a través de él se informa sobre los sistemas que han de desplazarse más tarde sobre la región de interés para el pronóstico. Es de esperar que este efecto sea mayor en aquellas situaciones que impliquen movimiento de sistemas desde latitudes más altas. En consecuencia una tarea futura sería hallar, dentro de las posibilidades de cómputo, la relación óptima entre resolución horizontal, número de niveles verticales y tamaño del recinto de integración.

Finalmente se desea puntualizar que cualquier modificación que fuera introducida en el COLA/CPTEC_GCM con el objeto de mejorar su desempeño contribuirá muy posiblemente a aumentar el grado de acierto del Eta/CPTEC, teniendo en cuenta el importante rol desempeñado por las condiciones de contorno.

Agradecimientos: El primer autor desea agradecer las ideas y el apoyo del Dr. Carlos A. Nobre, así como la gran colaboración del personal de operación y soporte del CPTEC. El primer autor realizó este trabajo durante una estadía científica de 6 meses en el CPTEC, gracias a la concesión de una beca otorgada por el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Este trabajo fue parcialmente solventado a través de los proyectos IAI ISP-2/112 y CEE C11-CT94-0111.

5 Referencias

- Anthes R.A., Kuo Y.H., Hsie E.Y., Low-Nam S., Bettge T.W., 1989: Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models. *Quart.J.Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 763-806.
- Arakawa A., Lamb V.R., 1977: Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model *Methods Comput. Phys.* **17**, 173-265.
- Betts A.K., Miller M.J., 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column test using GATE wave, BOMEX, and arctic air-masses data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1306-1335.
- Black T.L., 1994: NMC Notes: The New NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Wea and Forecasting*, **9**, 256-278.
- Bluestein H.B., 1993: Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and theory of Weather Systems. Oxford University Press. 593 pp.
- Figueroa S.N., P. Satyamurty, P.L. Da Silva Dias, 1995: Simulation of the Summer Circulation over the South American Region with Eta Coordinate Model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 573-584.
- Gan M.A.; Rao V.B., 1994: The influence of the Andes Cordillera on Transient disturbances. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1141-1157.
- Garreaud, R., Wallace, J. M., 1998: Summertime incursions of mid-latitude air into subtropical and tropical South America. *Mon Wea Rev.*, **126**, 2713-2733
- Hoffmann J.A. 1975: Atlas climático de América del Sur. OMM-UNESCO, Printed in Cartographia, Budapest, Hungary
- Inzunza Bustos J.C., G. Berri, 1993: The effect of the Low-Level Jet on the poleward water vapour transport in the Central Region of South America, *At. Environ.*, **27A**, N°3, 335-341.
- Janjic', Z.I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Kuo Y.H., Low-Nam S., 1990: Prediction on nine explosive cyclogenesis over Western Atlantic Ocean with a regional model *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 3-25.
- Lichtenstein E.R., 1980: La depresión del Noroeste Argentino. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias de la Atmósfera, Universidad de Buenos Aires.
- Lichtenstein E.R., 1989: Some influences of the Andes Cordillera on the synoptic scale circulation. *Preprints III Int. Conf on S. h. Met. and Oc.*, 146-148
- Mellor G.L., Yamada T. (1974) "A hierarchy of turbulence closure model for planetary boundary layers" *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1722-1735.
- Mesinger F., 1984: A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Riv. Meteor. Aeronaut*, **44**, 195-202.
- Mesinger F., Z. I. Jancic', S. Nivcovi, D. Gavrilov, D.G. Deaven, 1988: The step mountain coordinate model: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for an Appalachian redevelopment. *MON. WEA. REV.*, **116**, 1493-1518.
- Myers V.A., 1964: A cold front invasion of southern Venezuela. *Mon. Wea. Rev.*, **92**, 513-521.
- Nogués-Paegle J., K. Mo, 1997: Alternating Wet and Dry Conditions over South America During Summer. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 279-291.
- Parmenter F.C., 1976: A Southern Hemisphere cold front passage at the equator, *Bull. amer. Met. Soc.*, **57**, 1435-1440.
- Petterssen, S., 1956: Weather Analysis and Forecasting. Mc Graw Hill., 428pp.
- Rusticucci M.; Vargas W.M., 1995: Synoptic situations related to spells of extreme temperatures over Argentina. *Meteorol. Appl.*, **2**, 291-300.

- Satyamurty P., Pinheiro Dos Santos R., Maringolo Lemes M.A., 1980: On the stationary trough generated by the Andes, *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 510-520.
- Schwerdtfeger, W.C., 1976: Introduction. *Climate of Central and South America* W. Schwerdtfeger and H.E. Landsberg, Eds. World Survey of Climatology, Vol. 12. Elsevier. 7-35.
- Seluchi M.E., H. Le Treut, Y.V. Serafini, 1998: The Impact of the Andes On Transient Atmospheric Systems: A Comparison between Observations and GCM Results. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 895-912.
- Seluchi M.E., 1993: Estudio del comportamiento de los sistemas sinópticos migratorios en la Argentina. Tesis doctoral. Departamento de Ciencias de la Atmósfera, Universidad de Buenos Aires, 243 pp. Disponible en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Pabellón, II Piso II, Ciudad Universitaria, (1428) Buenos Aires, Argentina.
- Seluchi M.E., J.A. Marengo, 1999: Tropical-Extratropical Exchange of air masses in South America: Climatic Aspects and Extreme Events. Submitted to *International Journal of Climatology*
- Staudenmaier Jr. M., 1996: A Description of the Meso Eta Model, *Western Region Technical Attachment*, N°96-06, NWSO Sacramento, 5pp. Available at <http://nimbo.wrh.noaa.gov/wrhq/96Tas/TA9606/ta96-06.html>.
- Zhao Q., F.H. Carr, G.B. Lesinus, 1991: Improvement of precipitation forecasts by including cloud water in NMC's Eta Model. Preprints, *Ninth Conf. On Numerical Weather Prediction*, Denver, CO, A.M.S., 50-53.