

ANÁLISIS DE UN DESARROLLO CICLÓNICO EN LA COSTA ORIENTAL DE AMÉRICA DEL SUR

Marcelo E. Seluchi, Nuri O. de Calbete, José R. Rozante
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)-INPE
Rod. Pte Dutra Km 39, Cachoeira Paulista, SP, (12630-000)
Seluchi@cptec.inpe.br

RESUMO

Este trabalho analisa um caso de ciclogênese no costa oriental da América do Sul, ocorrida nos dias 15 e 16 de maio de 2000. O intenso ciclone causou precipitações intensas, ventos fortes e provocou prejuízos na população do litoral do Rio da Prata. A situação sinótica caracterizou-se pelo deslocamento de um cavado nos altos níveis que atravessou a Cordilheira dos Andes e interagiu com um sistema frontal em superfície localizado entre o centro da Argentina e Rio Grande do Sul (Brasil).

A previsão do Eta/CPTEC foi avaliada comparando os campos do modelo com as análises do NCEP e com dados observados sobre algumas estações meteorológicas. O modelo mostrou um nível de acerto muito alto, pois previu a intensificação do ciclone com uma antecipação de 48 horas. Além disso foi utilizado para pesquisar os processos físicos envolvidos no desenvolvimento do sistema.

A equação das tendências conseguiu mostrar que a intensificação de ciclone deveu-se à variação da altura geopotencial do nível de 500 hPa, causada pelo deslocamento de uma intensa perturbação de onda curta.

1. INTRODUCCIÓN

Sin duda las ciclogénesis constituyen uno de los fenómenos más severos de escala sinóptica. Estos se manifiestan preferentemente a sotavento de cadenas montañosas (Chung 1977, Blackmon et. al. 1977, Sinclair 1995) o en las proximidades de regiones costeras (Taljaard 1967, Carleton 1979). Por esta razón la costa oriental del continente sudamericano resulta una zona preferencial para la formación de ciclones, puesto que se combinan la acción de la Cordillera de los Andes con la presencia de la corriente cálida de Brasil (Rivero y Bischoff 1971, Gan y Rao 1991, Seluchi 1995, Sinclair 1995).

Si bien los estudios tendientes a investigar los procesos físicos involucrados en las ciclogénesis del litoral sudamericano son aún relativamente escasos, se han llevado a cabo varios análisis de casos que ponen de manifiesto la importancia de la inestabilidad baroclínica como factor dominante (Necco 1982), influenciada por la presencia de la Cordillera de los Andes (Seluchi y Saulo, 1998) y por el contraste térmico costero (Saraiva y Silva Dias, 1997).

Un estudio climatológico realizado en base a 5 años de análisis del ECMWF (Seluchi 1995) destacó que el 70% de los casos tiene lugar durante el semestre frío (mayo a octubre), y que estos se originan en general a partir de bajas segregadas (gotas frías) que provienen del Océano Pacífico. Este mecanismo parece explicar alrededor del 85% de los casos del período analizado. Durante el verano (noviembre a abril) las ciclogénesis están más relacionadas con pasajes de perturbaciones de onda corta, que a veces se tornan explosivas debido al aporte de la liberación de calor latente por la precipitación (Seluchi y Saulo, 1998)

El objetivo del presente trabajo es analizar la situación sinóptica asociada a la ciclogénesis ocurrida sobre la costa este de América del Sur entre los días 15 y 16 de mayo de 2000. Los vientos fuertes y persistentes del sudeste provocaron el aumento del nivel del Río de la Plata (fenómeno conocido localmente como "sudestada") y el consiguiente anegamiento de los barrios más bajos de la ciudad de Buenos Aires. Este efecto, que se combinó con las precipitaciones intensas sobre Uruguay, centro y este de Argentina, y sur de Brasil, condujo a un saldo de 5 personas muertas y más de 60000 evacuados. El estudio propuesto pretende describir la situación sinóptica asociada, evaluar el grado de acierto del pronóstico producido por el modelo regional Eta-CPTEC e intentar inferir sobre los posibles procesos físicos causantes del desarrollo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio de la situación sinóptica fue llevado a cabo empleando los análisis del NCEP, que son también utilizados como condiciones iniciales del modelo Eta-CPTEC. El grado de acierto de los pronósticos fue evaluado comparando las salidas del modelo con los campos analizados (NCEP) y con las observaciones horarias obtenidas

sobre algunas estaciones de la red sinóptica. La bondad del pronóstico de precipitación fue evaluado a través de su distribución espacial y por medio del ETS y el BIAS score. El ETS básicamente compara las áreas con precipitación prevista y observada, mientras que el BIAS establece la relación entre la intensidad de la lluvia observada y pronosticada para varios umbrales de intensidad.

El modelo Eta-CPTEC es integrado diariamente con una resolución espacial de 40km en latitud y longitud y 38 niveles en la vertical. Los detalles sobre sus características pueden encontrarse en Black (1994). Las condiciones de frontera son obtenidas de los pronósticos del modelo global COLA-CPTEC a intervalos de 6 horas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Descripción sinóptica

Durante el 14 de mayo un frente semi-estacionario se ubica sobre el centro de Argentina, Uruguay y Rio Grande do Sul, conectado a una depresión sobre el Océano Atlántico. Dicho frente resulta evidente a través del gradiente de espesor 500/1000 hPa, la convergencia del viento del este en niveles bajos y el contraste de humedad. Al norte de esta zona baroclínica se distingue una vaguada invertida, mientras que sobre la Patagonia se halla un anticiclón relativamente cálido. Sobre el Océano Pacífico, inmediatamente al oeste de los Andes, se destaca una depresión cerrada que se manifiesta en todos los niveles troposféricos con su eje casi vertical, y que presenta una leve difluencia hacia el lado polar. En los niveles más altos (200 hPa) esta depresión presenta un centro caliente, debido probablemente al hundimiento de la tropopausa, mientras que sobre los 55-60°W se aprecia una cuña cálida asociada al anticiclón de latitudes medias.

Al cabo de 24 horas (15 de mayo) la depresión que se encontraba al oeste de los Andes se desplazó rápidamente a sotavento, inmediatamente al norte de la zona frontal semi-estacionaria. Esta baja advecta aire más cálido desde el norte que contribuye a aumentar la baroclinicidad en niveles bajos. La depresión de altura se halla prácticamente sobre la cordillera de los Andes, evidenciando una mayor inclinación dentro de la tropósfera. Debido a que la cuña asociada al anticiclón de latitudes medias permaneció prácticamente inmóvil se produjo además un acortamiento de la longitud de onda. Este efecto contribuye a aumentar la advección de vorticidad ciclónica sobre el sistema de superficie.

El 16 de mayo a las 00UTC es posible observar un ciclón frontal con su banda fría localizada cerca del trópico y su rama caliente sobre el sur de Brasil. Los campos de superficie y 850 hPa parecen indicar que la advección de aire frío y seco por detrás del ciclón superficial supera a la inyección de aire cálido y húmedo en la parte delantera. Los campos de altura muestran una depresión cerrada con centro frío en 500 hPa y caliente en 200 hPa.

El ciclón de superficie alcanza su máxima profundidad a las 12 UTC del día 16 de mayo, con una presión central de 993,8 hPa en la estación Salto (Uruguay), generando vientos de hasta 30 nudos sobre la costa atlántica y en las inmediaciones del Río de la Plata (según el análisis manual). Durante las próximas 24 horas el sistema comienza a decaer lentamente, a medida que se desplaza hacia el noreste en dirección de la costa de Rio Grande do Sul. Esta trayectoria no es la más comúnmente observada, ya que los ciclones en etapa de decaimiento tienden a moverse usualmente hacia el sudeste (Rivero y Ereño 1978, Necco, 1982). La posición adoptada por el sistema durante el día 17 de mayo generó vientos fuertes y persistentes del sector SE sobre el Río de la Plata, empujando las aguas río arriba y motivando el anegamiento de los barrios más bajos de la ciudad de Buenos Aires (10 millones de habitantes). En los días subsiguientes la depresión continuó su lento pero sostenido decaimiento a medida que se trasladaba con dirección ESE.

3.2 Evaluación del pronóstico del Eta/CPTEC.

El pronóstico de ciclogénesis sobre el litoral sudamericano resulta a veces difícil para los modelos numéricos, aún cuando estos posean una buena resolución horizontal y vertical. Este hecho se debe a la gran cantidad y variedad de procesos involucrados en los desarrollos, que incluyen efectos dinámicos de escala regional y meso-escala, influencias orográficas, efectos no-adiabáticos, etc.

La figura 1 compara el campo de presión a nivel del mar y el viento a nivel anemométrico reproducido por los análisis del NCEP para las 12 UTC del día 16 de mayo (momento de mayor intensidad) con los obtenidos a partir de la previsión de 48 horas del modelo Eta/CPTEC. En primer lugar es importante destacar que la Fig 1a (análisis) coincide muy

aproximadamente con los mapas realizados manualmente, debido probablemente a la buena cobertura de datos de superficie y altura durante esos días. La diferencia más destacada es el valor de la presión central que en los análisis manuales presentan una isolínea cerrada de 996 hPa, a causa del valor observado en Salto, Uruguay (993.8 hPa). El pronóstico elegido con fines de comparación fue el iniciado a las 12 UTC del día 14, pues este incluye todo el ciclo de vida del sistema, desde su génesis hasta su decaimiento. La hora 12 UTC fue escogida pues generalmente la calidad de los análisis (condiciones iniciales del modelo) es superior (frente a las 00UTC) debido a la mayor cantidad de observaciones.

A partir de la figura 1 puede observarse que el pronóstico de 48 horas generado por el Eta/CPTEC logró capturar con una muy buena precisión la intensidad, estructura y posición del ciclón de superficie. Las pequeñas diferencias encontradas indican que el Eta previó vientos algo más intensos del noroeste sobre Rio Grande do Sul, delineó un gradiente de presión comparativamente más intenso al sur del Río de la Plata, subestimó levemente la baroclinicidad sobre el norte de Argentina y sur de Paraguay, y ubicó al sistema unos 100-150 kms al sudoeste de la posición observada.

La figura 2 presenta el campo de precipitación observada a través de la red sinóptica entre las 12 UTC de los días 14 y 16 de mayo y la obtenida por el pronóstico del modelo Eta/CPTEC. Las áreas con precipitación poseen una buena concordancia (observar por ejemplo la isoyeta de 20mm) mostrando dos centros principales ubicados al norte y sur del Río de la Plata respectivamente. El pronóstico del Eta sobrestima en un 30% el monto de precipitación sobre la Provincia de Buenos Aires y desplaza unos grados hacia el sudeste el máximo localizado sobre Uruguay, pero con una intensidad muy similar a la observada. Los valores del ETS y BIAS score para la parte sur del dominio de integración (al sur del trópico) (Tabla I), muestran en ambos casos valores aceptables, teniendo en cuenta la magnitud y escala del sistema analizado

Intensidad (mm/d)	0.25	2.5	6.3	12.7	19
ETS (16/05)	0.67	0.73	0.72	0.55	0.44
BIAS (16/05)	0.90	0.91	0.90	0.73	0.63
ETS (17/05)	0.60	0.42	0.28	0.12	0.1
BIAS (17/05)	1.01	1.00	0.91	0.57	0.31

Tabla I: ETS y BIAS score correspondientes a los pronósticos de 48 horas generados por el Eta/CPTEC para los días y umbrales indicados

Las figuras 3 y 4 permiten apreciar la secuencia horaria del viento en superficie (medido a 10m) y la presión a nivel medio del mar observada sobre las estaciones Prado (Montevideo) y Ezeiza (Buenos Aires) y su comparación con los valores obtenidos por el Eta/CPTEC en los puntos de retículo más cercanos. Es posible verificar una vez más que el modelo fue capaz de prever el ciclo de vida del sistema con una muy buena exactitud, pues existe una correspondencia altamente satisfactoria entre los datos observados y previstos. Un análisis más estricto muestra que la presión pronosticada difiere ligeramente de la medida luego de las primeras 24 horas de integración, y que la velocidad del viento resultó algo subestimada durante ese período. En particular el alto grado de acierto logrado en el pronóstico de la dirección del viento hubiera permitido anticipar 48 horas antes la crecida del Río de la Plata (sudestada) y las inundaciones en la ciudad de Buenos Aires.

3.3 Diagnóstico de los procesos físicos

Si bien es deseable que el análisis de los mecanismos físicos asociados a este tipo de fenómeno sea encarado a partir de datos observados, la pobre resolución de los reanálisis del NCEP y la poca contabilidad de algunas variables, tales como el movimiento vertical, alientan el aprovechamiento de los pronósticos del Eta/CPTEC para tal fin. Por otra parte la buena resolución horizontal y vertical del modelo permite analizar más detalladamente algunos aspectos de la situación sinóptica. Dada la muy buena concordancia entre el fenómeno observado y el pronosticado por el modelo, éste puede ser utilizado como una herramienta apropiada para estudiar los procesos físicos que dieron origen a sistema bajo consideración. Este hecho se sustenta en la hipótesis de suponer que la bondad de las previsiones se debe a la correcta representación de los procesos responsables por el desarrollo del ciclón.

Una posibilidad relativamente sencilla de indagar los principales procesos físicos es emplear la ecuación de las tendencias escrita en la forma:

$$\frac{\partial h1}{\partial t} = \frac{\partial h5}{\partial t} - \frac{\partial H}{\partial t}$$

(a) (b) (c)

Donde h_1 (h_5) representa la altura geopotencial del nivel de 1000 (500) hPa y H el espesor 500/1000 hPa. Por lo tanto si se considera una capa de atmósfera limitada por los niveles de 1000 y 500 hPa, las variaciones del nivel inferior dependerán de las oscilaciones el nivel superior y de los cambios en el espesor de la capa. Escrita de esta manera la ecuación de las tendencias puede ser interpretada como una medida la intensificación (o debilitamiento) de los sistemas de superficie debido tanto a efectos dinámicos (término (b)) como a influencias térmicas (término (c)).

La figura 5 muestra los campos correspondientes a los términos (a), (b) y (c), (incluidos su signo) calculados entre las 12 UTC de los días 15 y 16 de mayo, es decir durante las 24 horas de mayor desarrollo del ciclón de superficie. En primer lugar es importante destacar que estos patrones se mantienen prácticamente sin variantes si se emplea un período mayor (48 hs) o menor (12 hs) para el cálculo de los incrementos temporales. Las tendencias de la altura geopotencial del nivel de 1000 hPa muestran un importante centro negativo sobre el Río de la Plata, que equivale a una tendencia trihoraria de presión media de -4.7 hPa/3h constante durante 24 horas. Otro hecho interesante es que la extensión y ubicación del centro isalobárico negativo coincide aproximadamente con el centro ciclónico, debido a que este no experimentó un gran desplazamiento durante su génesis. Esta distribución de isalobaras también se repite con pocas alteraciones si se utiliza un nivel troposférico más elevado, en lugar del nivel de 500 hPa. El centro positivo ubicado sobre el norte de Argentina responde al llenado de la depresión relativa al este de los Andes, y su remplazo por una moderada alta post-frontal.

Las figuras 5b y 5c permiten concluir que el desarrollo ciclónico se produjo fundamentalmente por la variación del nivel de 500 hPa, puesto que los valores de las isolinneas sobre el Río de la Plata coinciden prácticamente con los hallados en superficie. Por otra parte las variaciones del espesor 500/1000 hPa en esa región presentan un mínimo relativo con valores cercanos a cero. La distancia entre los máximos negativos y positivos en la tropósfera media (Fig 5b) permiten inferir el paso de una perturbación asociada a un número de onda 8-9, es decir una onda corta de tipo baroclínico. La variación del espesor (con signo negativo incluido) exhibe un máximo positivo (disminución del espesor) al noroeste del ciclón en superficie y un mínimo a barlovento de los Andes, que compensa el aumento de la altura del nivel del 500 hPa sobre esa región. Llama la atención, sin embargo, la ausencia de un centro negativo por delante del ciclón en superficie, que es usualmente producido por la advección cálida en la parte delantera del sistema. Efectivamente la figura 1 muestra que el viento se mantuvo relativamente paralelo a las líneas de espesor por delante de la depresión. En contraposición se puede detectar una apreciable advección de aire frío detrás de la depresión, presumiblemente responsable por la disminución del espesor sobre noreste y norte de Argentina. Las variaciones del espesor producto de la advección diferencial en la vanguardia y retaguardia del sistema es el mecanismo comúnmente señalado (Petterssen 1956) como responsable por el movimiento de los ciclones migratorios. En el presente caso la escasa advección de aire caliente sobre la costa sudamericana pudo haber contribuido al lento desplazamiento del centro ciclónico.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza un caso de ciclogénesis sobre la costa oriental de América del Sur, acaecida entre el 15 y el 16 de mayo de 2000. El intenso ciclón generó precipitaciones superiores a los 120 mm, vientos fuertes y persistentes sobre el Río de la Plata que provocaron su desborde, y trastornos a los pobladores ribereños en general.

La situación sinóptica asociada se caracterizó por el desplazamiento de una perturbación de onda corta en la tropósfera superior, que presentaba un núcleo frío en los niveles inferiores a 300 hPa y uno cálido por encima de este, asociado al descenso de la tropopausa. El día 14 de mayo (48 horas antes de alcanzar la mayor intensidad) esta perturbación era visible a barlovento (oeste) de los Andes como una débil depresión superficial superpuesta a un fuerte ciclón de altura con su eje casi en posición vertical. Durante el día siguiente la depresión de superficie se regeneró rápidamente a sotavento, provocando un aumento en la inclinación del sistema y, por lo tanto, de la advección de vorticidad ciclónica. El ciclón alcanzó su máxima intensidad durante el día 16 con una presión central cercana a los 993 hPa. A partir de ese momento la depresión comenzó a decaer lentamente a medida que se trasladaba hacia el noreste, en dirección a la costa de Río Grande do Sul.

El pronóstico del modelo regional Eta/CPTEC fue evaluado comparando sus salidas con los análisis del NCEP y con información observada sobre algunas estaciones meteorológicas. Este presentó un grado de acierto muy alto, ya que previó la formación del ciclón en el momento correcto y con una intensidad prácticamente idéntica a la observada. Los campos de precipitación acumulada durante las 48 horas de intensificación del sistema presentaron una muy buena concordancia con los obtenidos a través de la red sinóptica de información. La marcha del viento en dos estaciones costeras del Río de la Plata indicaron que si bien la intensidad del viento fue algo subestimada por el Eta/CPTEC, hubiera sido posible prever el desborde de las aguas debido a la persistencia del viento del sector sudeste.

Un análisis sencillo utilizando la ecuación de las tendencias permitió establecer que el desarrollo ciclónico en capas bajas se produjo como consecuencia de la variación de la altura geopotencial en el nivel de 500 hPa, debido al pasaje de una intensa perturbación de onda corta. En consecuencia cabe esperar que la advección horizontal de vorticidad haya sido presumiblemente el mecanismo primario para el desencadenamiento de la ciclogénesis. Este hecho se sustenta en la existencia de un intenso vórtice frío en altura sobre el Océano Pacífico que durante varios días que se desplazó lentamente, con su eje casi vertical, en dirección al continente sudamericano y sin sufrir grandes cambios en su estructura o intensidad. La desaparición de la depresión en superficie a barlovento de los Andes y su rápida reaparición a sotavento contribuyeron al aumento de la advección de vorticidad sobre una región con condiciones favorables de humedad y baroclinicidad.

Finalmente cabe destacarse que el presente caso no podría ser llamado estrictamente como “ciclogénesis”, ya que la epistemología de la palabra indica el “nacimiento” o “formación” de un ciclón. Si bien son relativamente raros los casos de ciclogénesis puras, tal vez sería más apropiado utilizar la palabra “intensificación” ciclónica para describir la situación del 16 de mayo de 2000.

agradecimientos: El primer autor desea agradecer al Conselho de Desenvolvimento Científico y Tecnológico (CNPq) por la concesión de una beca de Investigador Visitante, bajo la cual se realizó el presente trabajo.

5. REFERENCIAS

- Black T.L. , 1994: NMC Notes: The New NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples Weather and Forecast, Vol. 9, N°2, 256-278.
- Blackmon M.L., J.M. Wallace, N.C.Lau, S.L. Mullen, 1977: An observational study of the Northern Hemisphere winter time circulation. *J. A. S.*, **34**, 1040-1053.
- Carleton A. M., 1979: A synoptic climatology of satellite-observed extratropical cyclone activity for the Southern Hemisphere: winter. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A*, **27**, 265-279.
- Chung Y.S., 1977: On the orographic influence and lee cyclogenesis in the Andes, the Rockies Mountains and the East Asian Mountains. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A*, **26**
- Gan M.A., B.V. Rao, 1991: Surface Cyclogenesis over South America. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1293-1302.
- Necco G.V., 1982: Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante el FGGE: trayectorias y desarrollos. *Meteorologica*, **13**, 21-34.
- Petterssen, S. 1956: Weather Analysis and Forecasting Vol I, *Mc Graw Hill*, 428 pp.
- Rivero O. R., Bischoff S.A., 1971: Ciclogénesis, movimiento y distribución de depresiones en los océanos Atlántico y Pacífico Sur durante el período abril de 1967 a marzo de 1968. *Meteorologica*, **II**, 476-483.
- Rivero O.R., Ereño C., 1978: Ciclogénesis, movimiento y distribución de depresiones y densidad de pasaje de frentes en los Océanos Atlántico y Pacífico Sur durante el período abril 1967 a marzo de 1972. *Meteorologica*, **8-9**, 299-308.
- Saraiva J., P.L. Silva Dias, 1997: A case study of intense cyclogenesis off the southern coast of Brazil: impact of SST, stratiform and deep convection. *5th Int. Conf. S.H. Met. Oc. AMS, Pretoria*, 368-369.
- Seluchi M.E., 1995: Diagnóstico y pronóstico de situaciones sinópticas conducentes a ciclogénesis sobre el este de Sudamérica. *Geof. Int.*, **34-2**, 171-186.
- Seluchi M.E., Saulo A.C., 1998: Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. *Aust. Met. Mag.*, **47**, 309-320.
- Sinclair M.R., 1995: A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere, *Mon Wea Rev*, **123**, 1601-619.
- Taljaard, J.I., 1967: Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the I.G.Y. *J. Appl. Met.*, **6**, 973-987.

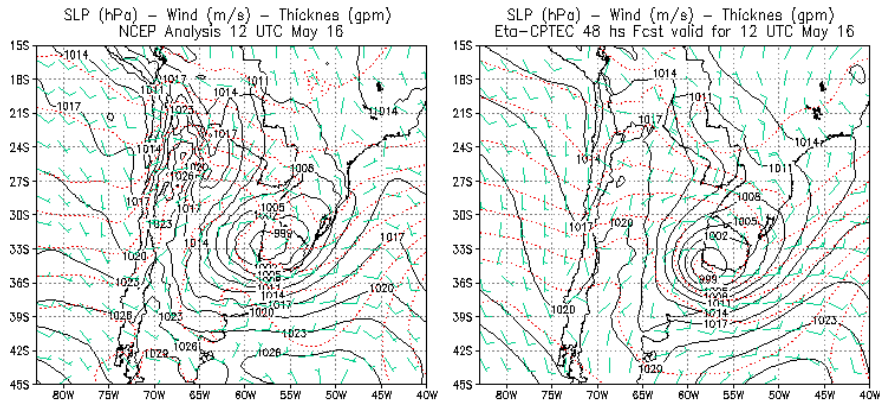


Figura 1: Situación sinóptica del 16 de mayo de 2000 (12 UTC) (momento de mayor intensidad), según los análisis del NCEP (izquierda) y el pronóstico de 48 horas generado por el Eta/CPTEC.

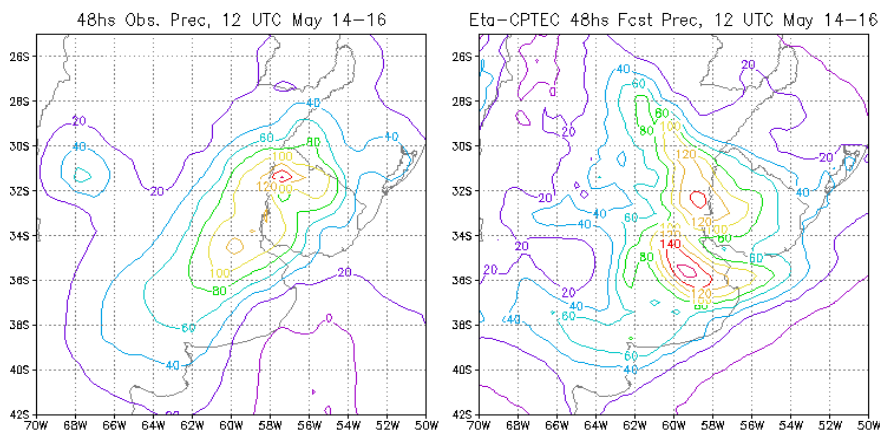


Figura 2: Precipitación observada a través de la red sinóptica (izquierda) y obtenida a través del pronóstico del modelo Eta/CPTEC (derecha) entre las 12 UTC de los días 14 y 16 de mayo

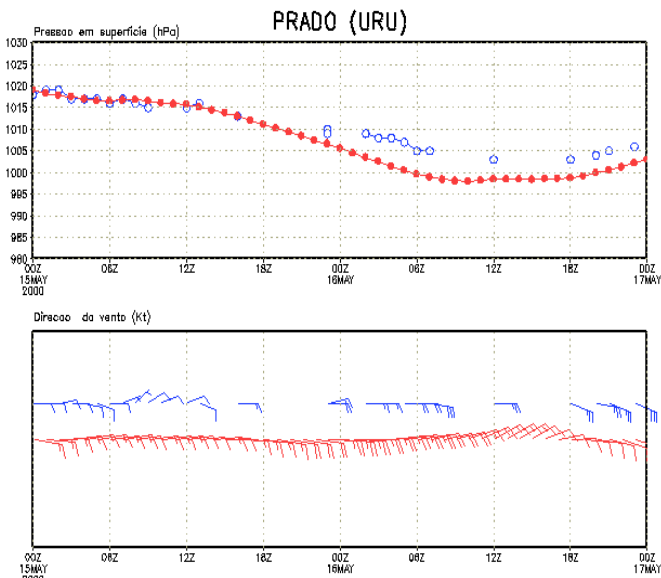


Figura 3: Secuencia horaria del viento en superficie (medido a 10m) y la presión a nivel medio del mar observada (Azul) y pronosticada Eta/CPTEC (rojo) sobre la estación Prado (Montevideo).

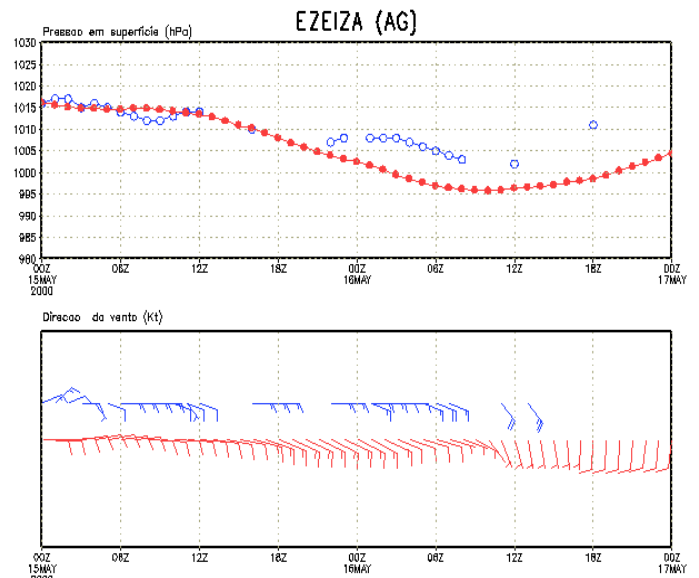


Figura 4: Idem figura 3 para la estación Ezeiza (Buenos Aires)

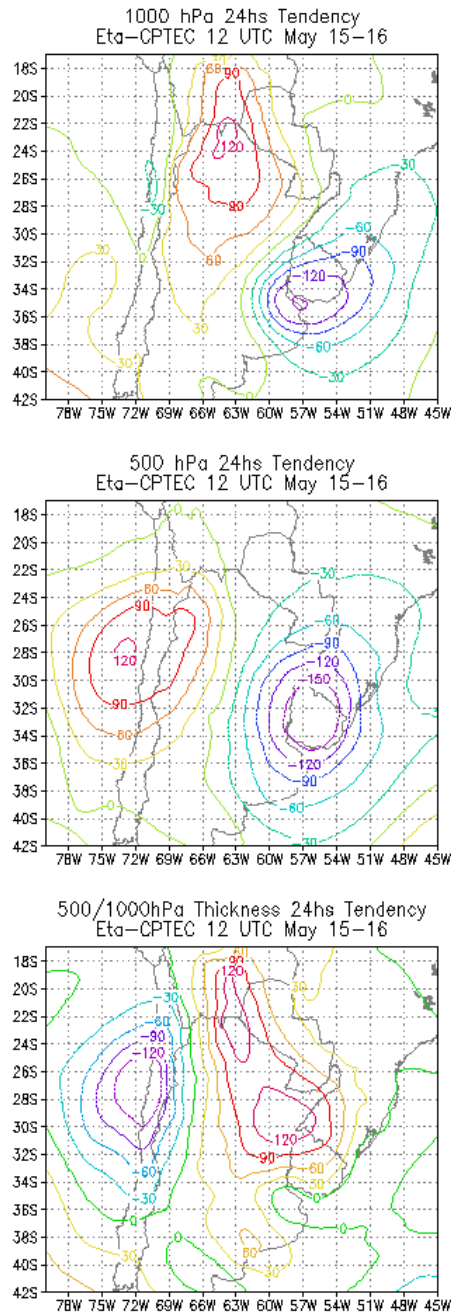


Figura 5: Variación de la altura geopotencial del nivel de 1000 hPa (arriba), del nivel de 500 hPa (cento) y del espesor 500/1000 hPa (abajo), entre las 12 UTC de los días 15 y 16 de mayo de 2000. Los valores fueron obtenidos a partir de las previsiones del modelo Eta/CPTEC iniciadas a las 12 UTC del 14 de mayo.