

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA CONVECTIVO OROGÉNICO Y SENSIBILIDAD A MODIFICACIONES EN EL PERFIL OROGRÁFICO.

Henrique Fuchs Bueno Repinaldo^{1,2}, Matilde Nicolini^{1,2,3}, Yanina García Skabar^{2,4,5}

hrepinaldo@cima.fcen.uba.ar

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET)

²Unidad Mixta Internacional-IFAECI

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEyN UBA

⁴Servicio Meteorológico Nacional

⁵CONICET

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de simulaciones en alta resolución con el modelo WRF de la iniciación de un sistema convectivo que se desarrolló sobre las Sierras de Córdoba y afectó la región con intensas ráfagas de viento, abundante lluvia y caída de granizo. En este caso en particular la tormenta se desarrolló en un entorno caracterizado por la presencia de bajas presiones cercanas a la Cordillera, del jet de capas bajas, y de convergencia de humedad sobre Córdoba. La iniciación del sistema fue favorecida principalmente por la presencia de brisas de montaña que en su fase diurna contribuyeron a transportar la humedad hasta la cumbre de las Sierras y producir la convergencia necesaria para que los ascensos alcancen el NCL. Los experimentos de sensibilidad mostraron que la iniciación orogénica es muy sensible a la cantidad de humedad que llega a la cumbre, la intensidad de las convergencias producidas por la brisa y al espesor entre el terreno y el NCL.

El análisis de sensibilidad realizado evidencia el rol de las características particulares de la “orografía real” de las Sierras de Córdoba en controlar el flujo en la mesoescala favorable a la iniciación del sistema convectivo estudiado.

ABSTRACT

In this paper we present a high resolution analysis of simulations of a convective system initiation which has developed over the Sierras de Córdoba and affected the region with strong wind gusts, heavy rain and hail fall, using the WRF model. In this particular case, the storm was developed in an environment characterized by the presence of low pressure near the Cordillera, the low level jet, and moisture convergence over Córdoba. The system initiation was mainly favored by the presence of mountain breezes, which in its diurnal phase helped to bring moisture up to the top of the Sierras, and to produce the necessary convergence for the updrafts to reach the LFC. The sensitivity experiments showed that the orogenic initiation is very sensitive to the amount of moisture reaching the top, to the intensity of the convergence produced by the breeze and to the thickness between the ground and the LFC.

The sensitivity analysis performed evidences the role of the particular characteristics of the Sierras de Córdoba “real orography” to control the mesoscale circulation favorable to the initiation of the convective system under study.

Palabras clave: WRF, iniciación orogénica, brisas.

1) INTRODUCCIÓN

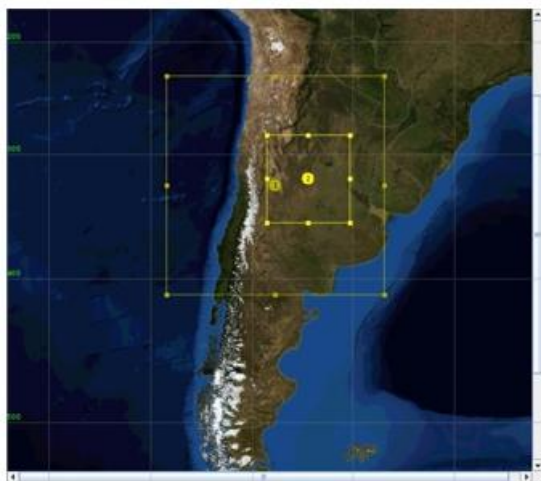
La mayoría de los sistemas convectivos más intensos que se desplazan sobre la Cuenca del Plata, tienden a dispararse a sotavento de la Cordillera de los Andes, principalmente al pie de la Cordillera o sobre las Sierras de Córdoba (Rasmussen y Houze, 2011). Particularmente la región de Córdoba es un lugar privilegiado, ya que se encuentra directamente en la trayectoria de la corriente en chorro en capas bajas (SALLJ), que provee el aporte de aire cálido y húmedo hacia el sur y en ocasiones a lo largo del borde de los Andes. Después de que las celdas convectivas se desarrollan sobre este terreno, tienden a producir las primeras tormentas con profundos núcleos convectivos. (Romatschke y Houze 2010).

Debido a que es necesaria una amplia comprensión de los procesos que favorecen la iniciación de las tormentas convectivas orogénicas, se simula en este trabajo en alta resolución un intenso sistema convectivo que se desarrolló sobre las Sierras de Córdoba y afectó la región con intensas ráfagas de viento, abundante lluvia y caída de granizo. Según reportes de los periódicos locales de la ciudad de Córdoba el granizo registrado tenía un diámetro aproximado entre 4 y 8 cm y produjo roturas de vidrios en casas y automóviles y graves daños a tejados, árboles y plantas.

El objetivo de este trabajo es poder identificar a partir de la simulación en alta resolución cuales son los factores en la mesoescala que contribuyeron a la iniciación convectiva sobre las Sierras de Córdoba, y la sensibilidad de estos factores a la modificación del perfil orográfico.

2) METODOLOGIA

En este trabajo se utilizó el modelo de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting*) (Skamarock y otros., 2008). Las simulaciones fueron inicializadas a las 0000UTC del día 29 de octubre de 2013 con una duración de 24 horas. Las condiciones iniciales y de bordes están dadas por los análisis del modelo global operativo Global Forecast System (GFS), con una resolución horizontal de los datos de 0.5° , disponibles cada 6 horas. Las corridas fueron realizadas utilizando 2 dominios anidados (Fig. 1) con resolución de 8 y 2 km, respectivamente. Se utilizaron 42 niveles en la vertical de los cuales 10 están por debajo de los 1000 m. En ambos dominios los procesos de convección fueron resueltos de forma explícita y con la finalidad de tener una microfísica más robusta que incluyera el granizo, se utilizó en este experimento el esquema de dos momentos y 7 clases de hidrometeoros (Milbrandt y Yau, 2005). Las demás parametrizaciones físicas utilizadas en los experimentos están descritas en la figura 1.



Parametrizaciones	
Microfísica	Milbrandt 2-mom
Capa Límite	Mellor-Yamada-Janjic
Suelo	NOAH
Onda larga	RRTM
Onda corta	Dudhia
Capa de superficie	ETA similarity
Cúmulus	Explicito

Figura 1 –Configuración del modelo: (Izquierda) Dominio del modelo con resolución de 8km (1) y 2km (2); (Derecha) Parametrizaciones físicas.

Las modificaciones a la orografía real (corrida de control) en los experimentos de sensibilidad del modelo se realizaron para alturas mayores a 500 m, utilizando un factor de reducción o de amplificación f según lo especificado en la Tabla 1 tal que la altura modificada es: $H_{\text{mod (m)}} = H * f + [500 - (500 * f)]$, donde H es la altura real.

Tabla 1 – Modificaciones en la orografía para los experimentos de sensibilidad.

Experimento	Área modificada	
E1	-	Corrida control – orografía real
E2		Reducción ($f=0.9$)
E3		Reducción ($f=0.7$)
E4	Sierras de Córdoba y San Luis	Reducción ($f=0.6$)
E5		Reducción ($f=0.5$)
E6		Amplificación ($f=1.2$)
E7	Cordillera	Reducción ($f=0.8$)

3) CASO DE ESTUDIO - 29 de octubre de 2013

Durante el día del evento la situación sinóptica estuvo dominada por las bajas presiones cercanas a la Cordillera de los Andes y por la presencia del jet de capas bajas con intensos flujos del sector N y NE que se extienden sobre Paraguay y el centro/norte de Argentina, acompañado por la convergencia de humedad especialmente en la provincia de Córdoba. En los niveles más altos, la presencia de un eje de cuña en niveles medios sobre Argentina y la posición de la corriente en chorro de niveles altos, situada al norte de las provincias de Córdoba y San Luis, no favorecieron a los ascensos de escala sinóptica (no mostrado).

Las primeras señales del sistema convectivo estudiado son observadas a las 1740 UTC, mediante la presencia de una línea en la nubosidad sobre los topes de las Sierras de Córdoba (Fig. 2). El sistema se desplazó hacia el noreste y alcanzó la fase madura alrededor de las 2140 UTC, con temperaturas de tope entre los -60 y -70°C . Al mismo tiempo más al sur, otro sistema convectivo de menor intensidad, iniciado sobre las Sierras de San Luis, avanzaba hacia el este. Después de la fase de máximo desarrollo, los sistemas convectivos entraron en la fase de disipación alrededor de las 0110 UTC del día 30 de Octubre. Según datos obtenidos con el software FORTRACC (Vila y otros, 2008) la tormenta una vez detectada tuvo una duración de 5 horas y alcanzó un área de 24000 Km^2 .

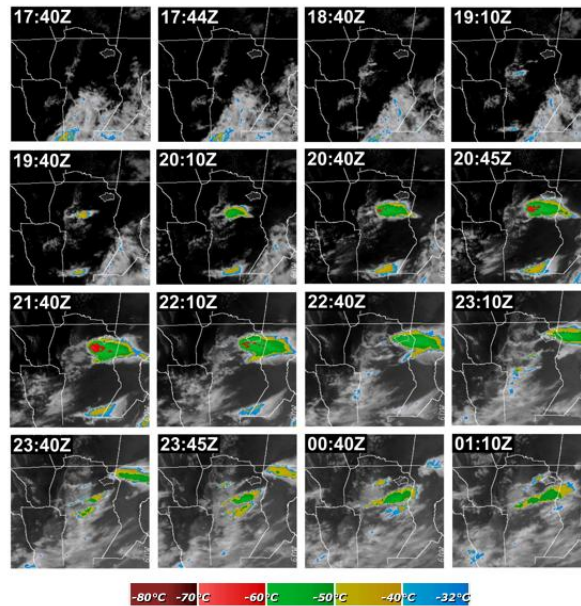


Figura 2 - Secuencia de Imágenes satelitales Goes-13 del evento observado en el día 29 de octubre de 2013. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

3.1 Simulación control

Como la escala sinóptica aparentemente no está favoreciendo la iniciación de la convección, mediante simulaciones con el modelo de mesoescala WRF se buscó identificar mecanismos en la mesoescala que favorecieran la convección.

Comparando las temperaturas de brillo en las figuras 2 y 3 es posible observar que el sistema convectivo simulado exhibe una estructura horizontal muy similar a la observada, del mismo modo que las temperaturas de brillo simuladas en la fase más intensa del sistema (fig. 3). El sistema simulado también sigue una trayectoria muy similar a la observada dirigida hacia el noreste.

Con respecto al ciclo de vida, una vez iniciado el sistema alcanza la temperatura de brillo de -32°C en la simulación y en las observaciones aproximadamente al mismo tiempo (figura 2 y 3), una vez que alcanza este umbral el sistema evoluciona más rápido, alcanzando la máxima intensidad ($T_{\text{brillo}}=-60^{\circ}\text{C}$) en los próximos 40 minutos en la simulación, y en el caso observado este intervalo dura aproximadamente 90 minutos.

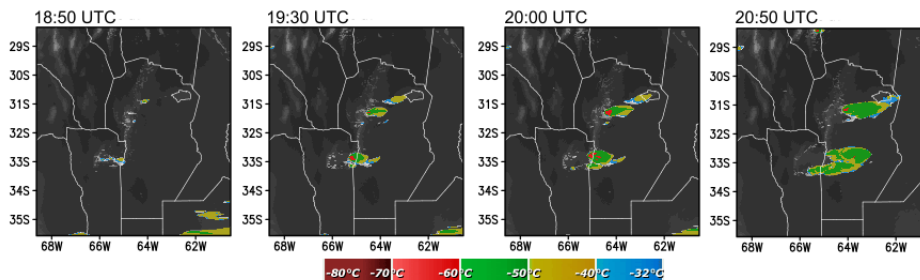


Figura 3- Campo de temperatura de brillo en el tope de la atmósfera simulado por el modelo.

Analizando las salidas del modelo (fig. 4) y teniendo en cuenta que la génesis tuvo lugar a las 1730UTC, durante las horas previas a la génesis del sistema convectivo (13 UTC) el flujo del NE al norte de las Sierras de Córdoba, advecta aire más inestable hacia el “gap” localizado entre la Cordillera y las Sierras. A las 1500 UTC es posible observar sobre las pendientes este y oeste de las Sierras los

vientos anabáticos, característicos de la fase diurna de las brisas de montaña en esta región (Repinaldo y otros, 2015), con el eje de convergencia alrededor de los 65°W. Como las Sierras son tridimensionales la existencia de una pendiente más suave al norte, orientada en el sentido meridional, también induce un sistema de brisas. Un análisis del Froude Number (no incluido) indica que el flujo proveniente del N no es bloqueado por las Sierras. Como consecuencia, el flujo del NE corriente arriba de las Sierras, al encontrar la pendiente es desviado a una posición más meridional, lo que favorece la entrada de aire más inestable desde latitudes más bajas, hacia la región de génesis del sistema convectivo. Esto puede ser observado claramente a las 17 UTC, donde se incrementan los valores del CAPE que alcanzan entre 1200 y 1500 J Kg⁻¹ en el área donde se dispara la convección.

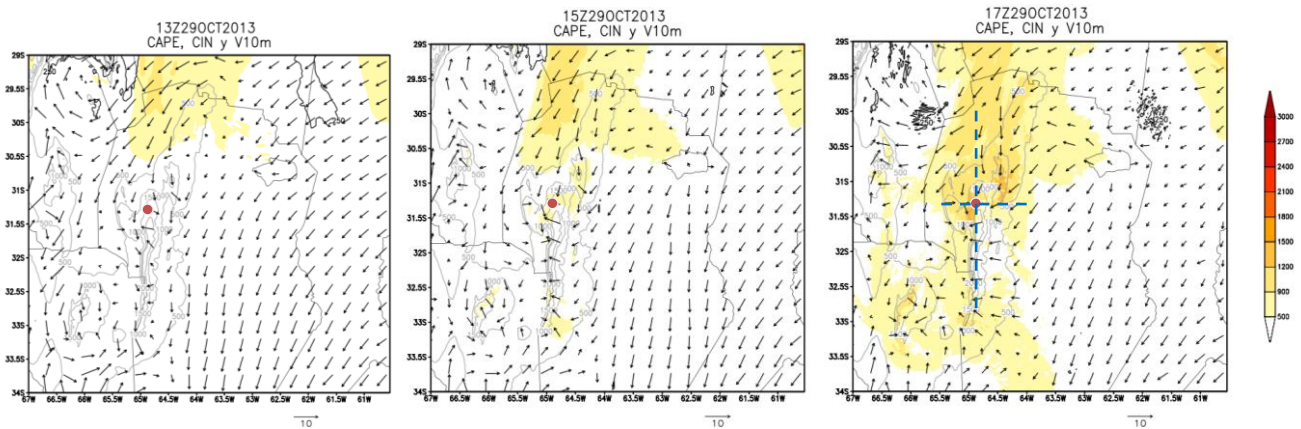
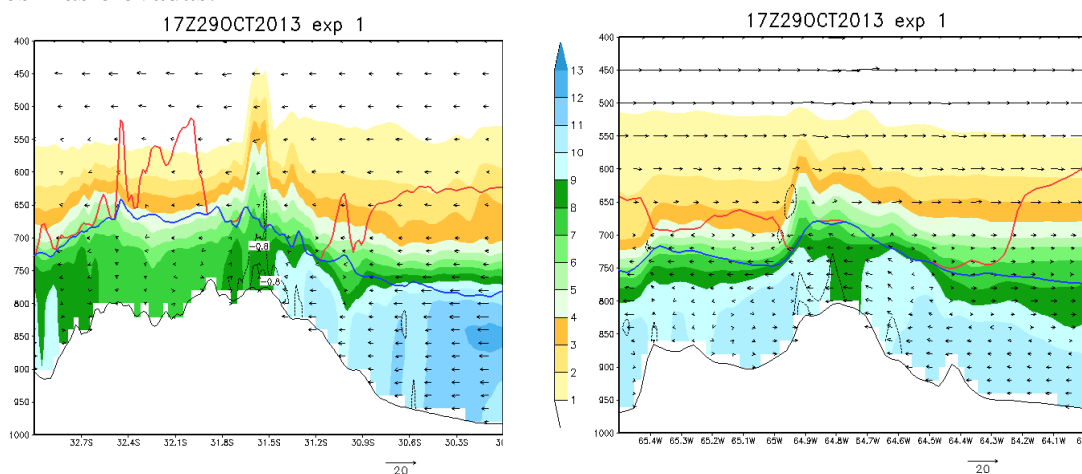


Figura 4 - Salidas del modelo (dominio con 2 km de resolución). Campos correspondientes al día 29 de Octubre de 2013. Topografía (m, contornos grises), CIN (J kg⁻¹, contornos negros), CAPE (J kg⁻¹, sombreado) y viento (m s⁻¹, vectores) a 10 m. El punto rojo es aproximadamente el punto de iniciación del sistema, y las líneas discontinuas en azul representan los cortes verticales en la fig. 5.

El corte vertical en 65°W (fig. 5), corrobora la presencia del flujo del N alcanzando el tope de las Sierras de Córdoba y facilitando la llegada de aire más húmedo. Al mismo tiempo, las líneas de convergencia asociadas al encuentro de los vientos anabáticos de ambas pendientes, posibilitan que el aire húmedo alcance el nivel de condensación por ascenso (NCA) y también el nivel de convección libre (NCL). La baja altura del NCA y del NCL es uno de los factores que favorece que la convección se inicie sobres las cumbres de las Sierras. Como podemos ver en ambos cortes a las 1700 UTC, en las regiones donde se inician los sistemas convectivos al norte de Córdoba, el NCL está por debajo de los 1000 m sobre el nivel del terreno. Esto ocurre porque el aire alcanza más rápidamente la saturación en las regiones más elevadas.



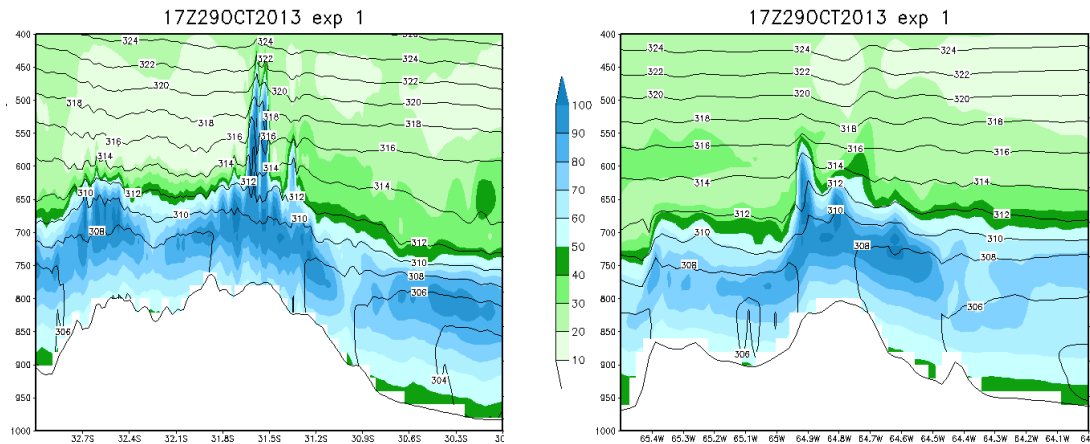


Figura 5—Simulación control con 2km de resolución a las 17 UTC del 29 de Octubre de 2013. (a) Corte meridional de la relación de mezcla (g kg^{-1} , sombreado), convergencia total (contornos cada 0,8 a partir de $0,8 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$) y vector componente meridional de viento. (b) Corte zonal: ídem (a) con vectores de la componente zonal. (c) Corte meridional de la humedad relativa (% , sombreado) y temperatura potencial (K, contornos). (d) Ídem (c) para el corte zonal. Las líneas en azul y rojo en las figuras (a) y (b) son respectivamente las alturas del NCA y del NCL en metros. Los cortes están indicados en la figura 6.

3.2 Sensibilidad a las modificaciones en la orografía

En el estudio de sensibilidad se modificó la orografía real para cada experimento de acuerdo a lo señalado en la tabla 1, con el objetivo de evaluar como se modifican los factores que favorecieron el desarrollo de la convección sobre las Sierras de Córdoba. La tabla 2 muestra que al reducir la altura de las Sierras hasta un factor de 0.6 el disparo de la convección ocurre, pero sólo cuando la reducción es mínima (E2) el sistema es comparable en intensidad a la corrida control, los otros no alcanzan el umbral de -60°C . Ya en la corrida E5 donde la reducción es más extrema, el sistema en ningún momento se dispara. Otro dato observado es que al reducir las Sierras el sistema alcanza el umbral de -32°C más temprano, adelantándose la iniciación con respecto a la corrida control. Además, a medida que se reduce la orografía el sistema convectivo presenta una trayectoria desplazada hacia el sur, pero siguiendo en la misma dirección que en la corrida control (Fig. 6).

Cuando se amplifica la altura de las Sierras (E6), a diferencia de las corridas anteriores, no hubo iniciación sobre la cumbre más alta centrada en 65°W , y si sobre un punto elevado ubicado más al norte, alrededor de $30.9^\circ\text{S}-64.5^\circ\text{W}$. Comparado con la corrida control, este sistema fue de menor intensidad, no alcanzando el umbral de -60°C .

En el experimento (E7) se experimentó reducir la Cordillera y mantener la orografía original de las Sierras de Córdoba y San Luis, y los resultados muestran que hay una concordancia en el punto de iniciación y en la trayectoria con la corrida control, pero el sistema alcanza el umbral de -32°C 70 minutos antes, indicando una iniciación más temprana o un rápido desarrollo. Además, en este experimento la convección alcanzó la máxima intensidad de todos los experimentos de sensibilidad.

Tabla 2 – Momento en que los sistemas alcanzan los umbrales temperatura de brillo de -32°C y -60°C . (*) Indica que no hubo sistema convectivo, (-) indica que el sistema no alcanzó este umbral.

Corrida	Área modificada	F	Temp. de brillo	
			-32°C	-60°C
E1	-	1	1850	1930
E2	Córdoba, SL	0.9	1800	1850
E3	Córdoba, SL	0.7	1740	-
E4	Córdoba, SL	0.6	1730	-
E5	Córdoba, SL	0.5	*	*
E6	Córdoba, SL	1.2	1850	-
E7	Cordillera	0.8	1740	1820

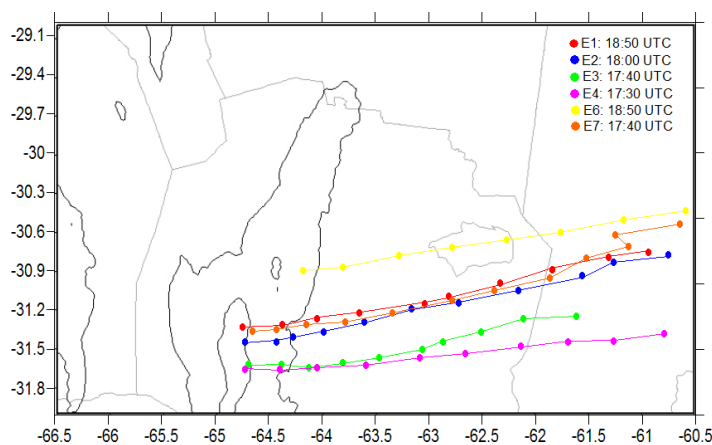


Figura 6- Trayectorias del sistema convectivo, obtenidas en los diferentes experimentos de sensibilidad. Las horas indicadas en la esquina superior derecha son las horas en que el sistema alcanzó el umbral de -32°C .

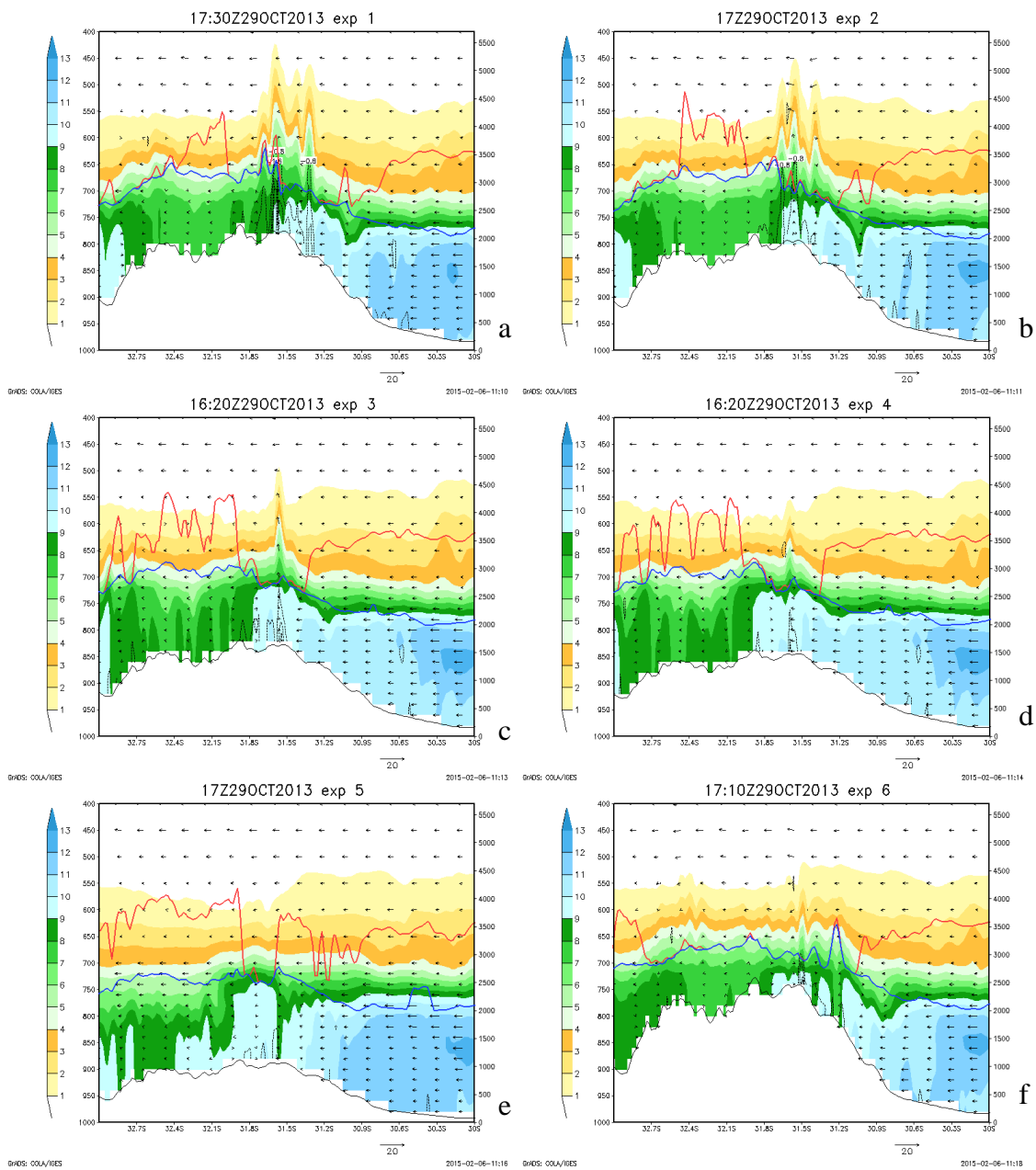
Los cortes meridionales en la figura 7 corresponden a los tiempos en que el umbral de reflectividad de 1 dbz fue alcanzado, esto permitió analizar los campos en un momento más cercano a la iniciación del sistema respecto al tiempo en que la temperatura de brillo alcanza -32°C . La figura muestra que en todos los casos en que hubo convección, la iniciación se da en un escenario caracterizado por una relación de mezcla del aire superior a 9 g Kg^{-1} en la cumbre de las Sierras, la presencia de convergencia en los niveles más próximos a superficie y una baja altura del NCL.

La reducción de la orografía en los experimentos E2, E3, E4 y E5 posibilitó que el aire más húmedo proveniente del norte ingrese a latitudes más altas y en horas más tempranas, y esto explicaría la iniciación más al sur y adelantada de los sistemas. En el experimento E5 (Figura 7e), a pesar de la humedad disponible, las convergencias más débiles no son capaces de inducir ascensos hasta la saturación y tampoco alcanzar los niveles de empuje positivo. Además la distancia entre la superficie y el NCL es aproximadamente 500m más profundo que en la corrida control.

En el experimento de amplificación E6 (figura 7f), la mayor elevación resulta en un mayor bloqueo del flujo del N, reduciendo el espesor de la capa húmeda por debajo del NCL, y esto es determinante para que el sistema convectivo resulte en un desarrollo vertical muy débil, no alcanzando el umbral de -32°C .

En apoyo a lo descrito anteriormente la figura 8 muestra la intensidad de los ascensos que alcanzan el NCL a partir del cual se inicia la conversión de energía potencial disponible en energía cinética convectiva. Estos ascensos representan el promedio en un área sobre la cumbre de las Sierras. A medida que reducimos la orografía los ascensos pierden intensidad (figura 8a) en parte por la

distancia superficie-NCL y por otra parte por el debilitamiento de las convergencias. Por otro lado, al aumentar la orografía no se observa una sensibilidad significativa a la intensidad de los ascensos para el factor utilizado (figura 8b), si bien el déficit de humedad se opone en este caso a la convección profunda.



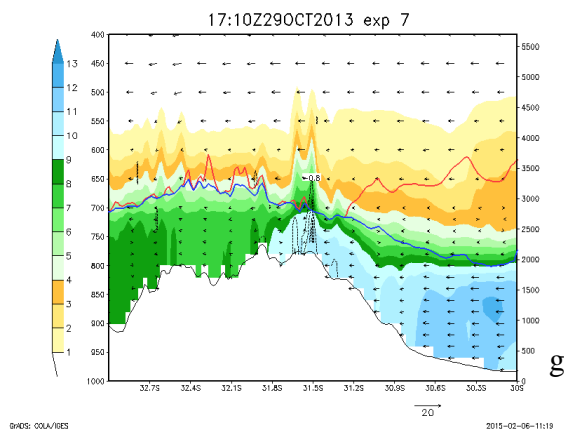


Figura 7 -Salidas del modelo (dominio con 2 km de resolución). Cortes meridionales en aprox. 65°W correspondientes al momento más próximo de la iniciación de cada experimento. Están graficados la relación de mezcla (g kg^{-1} , sombreado), convergencia total ($\times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, contornos a cada 0,8 a partir de $0,8 \times 10^{-4}$) y el vector componente meridional. Las líneas en azul y rojo en las figuras son respectivamente las alturas del NCA y del NCL en metros.

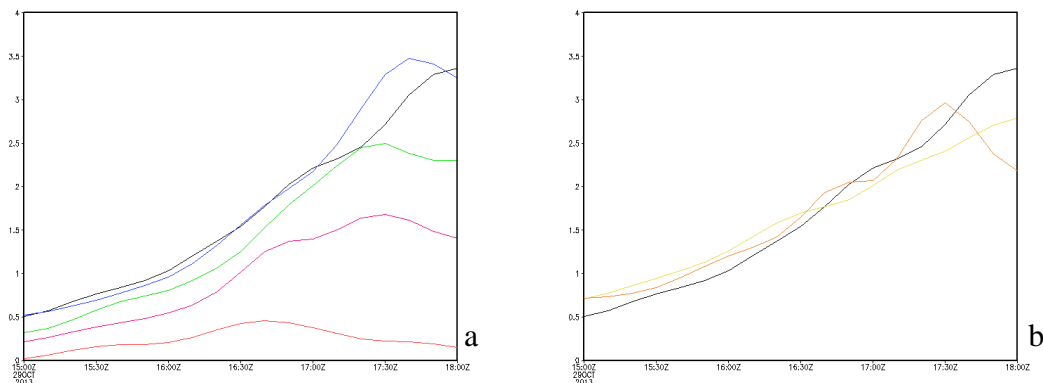


Figura 8—Serie temporal de los ascensos (m s^{-1}) que alcanzan el NCL el área 31.2 - 31.8°S y 64.8-64.9°W. (a) E1 (negro), E2 (azul), E3 (verde), E4(rosa), E5(rojo); (b) E1(negro), E6(amarillo), E7(naranja).

4. CONCLUSIONES

El entorno sinóptico del día 29 de octubre de 2013 en que se desarrolló un intenso sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba está caracterizado en la escala sinóptica por la presencia de bajas presiones cercanas a la Cordillera, la presencia del jet de capas bajas, y la convergencia de humedad sobre Córdoba. En la mesoescala los principales factores que contribuyeron para la iniciación del sistema convectivo fueron:

- La presencia de un flujo de N/NE en capas bajas que favorecido por la brisa diurna, advecta la humedad hasta las cumbres más altas de las Sierras de Córdoba;
- La convergencia sobre la cumbre asociada a la fase diurna de las brisas;
- El bajo espesor de la capa entre la superficie de la cumbre y el NCA y NCL;

Los experimentos de sensibilidad mostraron que la reducción de la altura de las Sierras de Córdoba y San Luis, facilita que la humedad alcance los puntos más altos de las Sierras, en contrapartida las convergencias y los ascensos son cada vez más débiles. Además al reducir la orografía, el espesor entre la superficie del terreno y el NCA y el NCL es cada vez más grande. Cuando elevamos las Sierras el espesor terreno-NCA/NCL se reduce bastante y los ascensos alcanzan dichos niveles, pero la humedad en parte es bloqueada por las Sierras lo que no permitió el desarrollo de un sistema con la misma intensidad del observado en el día 29. El experimento de reducción de la Cordillera de los Andes no modificó la iniciación de la convección, pero si la intensidad y organización del sistema.

El análisis de sensibilidad realizado evidencia el rol de las características particulares de la “orografía real” de las Sierras de Córdoba en controlar el flujo en la mesoescala favorable a la iniciación del sistema convectivo estudiado.

Se encuentra en ejecución el análisis de la estructura interna del sistema convectivo y la evolución de la estructura celular, dinámica y microfísica, en particular la interacción entre la microfísica y la dinámica a fin de investigar la evolución de los campos de las distintas especies con especial énfasis en la especie granizo, atributo severo de este sistema convectivo.

AGRADECIMIENTOS:

Se agradece a los subsidios de la Universidad de Buenos Aires UBACyT 2011-2014W742 y UBACyT 20020130100820BA, y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas PIP 2010-2012 11220090100850.

REFERENCIAS

Milbrandt, J. A. y Yau, M. K., 2005: A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part II: A Proposed Three-Moment Closure and Scheme Description. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3065-3081.doi: 10.1175/JAS3535.1

Rasmussen, K. L. y Houze, Jr. R. A., 2011:Orogenic convection in South America as seen by the TRMM satellite. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2399-2420.doi: 10.1175/MWR-D-10-05006.1.

Repinaldo, H. F. B., Nicolini, M., García Skabar, Y., 2015: Characterizing the Diurnal Cycle of Low-Level Circulation and Convergence Using CFSR Data in Southeastern South America.*J. Appl. Meteor. Climatol.*En prensa.doi: 10.1175/JAMC-D-14-0114.1.

Romatschke, U. y Houze Jr. R. A., 2010: Extreme summer convection in South America. *J. Climate*, 23, 3761–3791.doi: 10.1175/2010JCLI3465.1.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W. y Powers, J. G., 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note 475.Disponible en: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.

Vila, D.; Machado, L. A. T., Laurent, H. y Velasco, I., 2008: Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. *Weather and Forecasting*, v. 23, p. 233-245.doi: 10.1175/2007WAF2006121.1.