

PREDICCIÓN DE EPISODIOS DE PRECIPITACIÓN QUE OCASIONAN ALUDES EN EL ÁREA MONTAÑOSA DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE MENDOZA, ARGENTINA

PRECIPITATION EVENTS PREDICTION THAT CAUSES DEBRIS FLOW AND LANDSLIDES OVER MOUNTAINOUS AREA ON NORWEST REGION OF MENDOZA PROVINCE, ARGENTINA

Jorge Rubén Santos¹, Federico Norte², Stella Moreiras³, Diego Araneo², Silvia Simonelli²

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Cuyo, Padre Contreras 1300, Parque General San Martín, Mendoza, Argentina.

² Programa Regional de Meteorología (PRM), IANIGLA-CCT. Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza, Argentina.

³ IANIGLA-CCT. Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza, Argentina.
E-mail: jrsantos@uncu.edu.ar

RESUMEN

La predicción de precipitación en terrenos de orografía compleja especialmente donde las características del suelo presentan una tendencia a producir aludes, es de vital importancia desde el punto de vista estratégico a fin de evitar posibles accidentes.

Como consecuencia de episodios de tormentas intensas en el entorno de la Ruta Internacional N° 7, que conecta la Argentina con el Océano Pacífico (Chile), suelen generarse grandes flujos de detritos o caídas de rocas que ocasionan la interrupción del tránsito internacional. Dependiendo de la magnitud de estos aludes, los cortes de esta ruta suelen ocurrir a veces por períodos prolongados, poniendo en peligro la seguridad de las personas que la transitan y generando trastornos de índole comercial.

El objetivo principal de este trabajo es analizar cuáles son los forzantes sinópticos más relevantes que ocasionan este tipo de eventos tratando, como objetivo secundario, de evaluar la mayor o menor habilidad de los modelos regionales (WRF y Eta/ PRM) para predecir eventos de precipitación en una zona topográficamente compleja y carente de mediciones sistemáticas. Se analizaron cuatro episodios: 27 de marzo de 2007, 13 de enero de 2013, 7 y 8 de febrero de 2013 y 25 de febrero de 2014.

Las situaciones sinópticas que contribuyen a la ocurrencia de estos aludes tienen el común denominador de presentar características bien definidas como la anomalía negativa de la componente zonal del viento entre los niveles de 850 y 400 hPa.

La validación de los pronósticos se llevó a cabo mediante el uso de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, de la Superintendencia de Irrigación de la provincia de Mendoza y con estimaciones de precipitación global a partir de datos infrarrojos y de microondas pasivas en alta resolución espacial (8 km) y temporal (30 minutos) método conocido como CMORPH (Joyce et al., 2004).

Los modelos numéricos de la atmósfera tales como WRF y Eta-PRM predicen, aunque sobreestimando, la precipitación en la zona de topografía compleja analizada y que el método CMORPH es un potencial elemento de validación en zonas con dichas características.

Palabras claves: Aludes, Precipitación, Topografía, Modelos, Predicción,

ABSTRACT

Precipitation prediction on complex terrain, especially where the soil is vulnerable for landslides occurrence, is an important tool to prevent accidents.

Severe storms along the 7 International Route that connects Argentina with Pacific Ocean (Chile) causes debris flow and landslides interrupting the international traffic.

Sometimes, if the episode is severe, the blocking is large generating commercial problems and danger for the people. The principal aim of this paper is to analyze the relevant synoptic conditions that favour the occurrence of landslides and a secondary objective is to evaluate the ability of regional models such as the Weather Research

and Forecasting (WRF) and Eta/MRP (Meteorological Regional Program) to predict precipitation events in a complex terrain area with a meteorological network of low density.

Four events that ocasioned landslides were analyzed, namely March 27th 2007, January 13th 2013, February 7th and 8th 2013 and February 25th 2014.

Negative anomaly of zonal wind between 850 hPa and 400 hPa level is one of the common synoptic characteristics for these episodes analyzed.

Forecast validation was carried out by using surface data from a meteorological network of National Weather Service of Argentina, Irrigation Bureau of Mendoza province and the precipitation estimation by the CMORPH method (Joyce et al., 2004).

It was observed that numerical models can predict these heavy precipitating events however with an overestimation. It worth noting that CMORPH is a good tool to estimate precipitation in mountainous terrain.

Keywords: Landslides, precipitation, topography, models, prediction.

INTRODUCCIÓN

La Cordillera de los Andes Frontal en la región noroccidental de la provincia de Mendoza ,tiene una topografía abrupta con picos de hasta 6200 msnm correspondiendo a la Cordillera del Tigre y al Cordón del Plata orientadas en sentido norte-sur, en tanto la Pre-cordillera presenta elevaciones que no superan los 3500 msnm (La Ruta internacional N° 7 que conecta la Argentina con Chile, atraviesa la cordillera en valles y en zonas potencialmente peligrosas debido a la formación de aludes ante precipitaciones intensas). Estas zonas poseen condiciones de clima desértico y con escasas precipitaciones que ocurren en la época estival; suelen ser muy localizadas atribuibles a celdas convectivas causantes de chaparrones a veces intensos pero de corta extensión espacio-temporal. En ciertas quebradas, adyacentes a la ruta N° 7, suelen generarse grandes flujos de detritos o caídas de rocas que ocasionan la interrupción del tránsito internacional, a veces por periodos prolongados dependiendo de la magnitud de los aludes, poniendo en peligro la seguridad de las personas que la transitan y generando trastornos de índole comercial (Moreiras, 2006) (Figura 1).

Los flujos de detritos más dañinos han ocurrido en la Quebrada Seca (Figura 2) que corresponde en realidad a dos cuencas hidrológicas que alcanzan 60 km² en extensión con rocas volcánicas muy friables del Grupo permotriásico Choiyoi. Los aportes de ambas cuencas han construido un abanico aluvial muy activo por donde se encauzan los flujos de detritos cuyas trayectorias son perpendiculares al trazado de la ruta internacional.

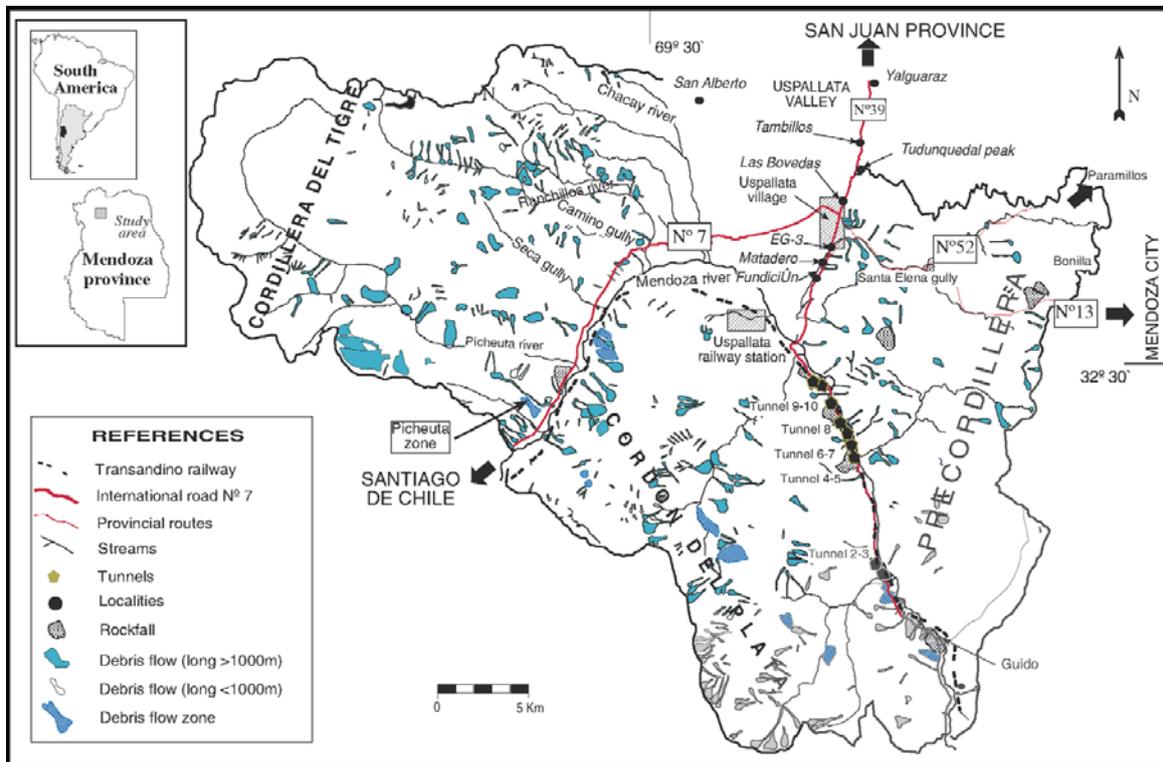


Figura 1. Área principal de estudio (obtenida de Moreiras, 2005).
Figure 1. Main field of Study (obtained from Moreiras, 2005).

Eventos históricos que han ocasionado daño a la ruta internacional N° 7 se reportan desde 1974 con episodios en 1976, 1980, 1983, 1999, 2000 y 2006 (Moreiras, 2006).

Además el evento de 2007 alcanzó un volumen de 33,500 m³, mientras se estima un volumen de 7000 m³ para el flujo de detritos ocurrido en febrero de 2013 resultando dañinos (Sepúlveda et al., 2014).

La causa de estos eventos son las tormentas convectivas generadas en las nacientes de estas cuencas donde no existen estaciones meteorológicas que permitan establecer un umbral de precipitación y por ende se carece de un sistema de predicción. El valor de 33.4 mm ha sido establecido como umbral para estos eventos considerando los datos de precipitación de la estación de Uspallata aunque la zona de generación de los flujos de detritos podría ubicarse a más de 10 km (Moreiras, 2005) perdiéndose la calidad del dato. Por ende este umbral incierto junto a una alta recurrencia de estos procesos, estimada entre 0.23 y 0.67 (Moreiras, 2006), son insuficientes para la predicción de la distribución temporal de los aludes futuros, por eso es fundamental contar con herramientas de predicción de estos eventos. Las grandes pérdidas económicas como consecuencia de 10 días de interrupción del tránsito internacional, la evacuación de casi 600 personas, así como la muerte de una de ellas debido a los eventos registrados durante el verano de 2013 ha sido analizado detalladamente en el trabajo de Sepúlveda et al., (2014).



Figura 2. Alud del 27 de marzo de 2007 en Quebrada Seca (Ruta Nacional N° 7 a Chile).
Figure 2. Landslide of March 27th 2007 in Quebrada Seca (National Route 7 to Chile).

Aun no fueron consideradas las condiciones sinópticas predominantes antes y durante el desarrollo de estos aludes, las precipitaciones extremas registradas y la posibilidad de ser pronosticadas.

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es analizar cuáles son los principales forzantes sinópticos que originan eventos de precipitación que ocasionan aludes, tratando, como objetivo secundario, de evaluar la mayor o menor habilidad de los modelos regionales (WRF y Eta/ PRM) para predecir eventos de precipitación en una zona topográficamente compleja y carente de mediciones sistemáticas. Para ello se consideraron cuatro episodios de aludes desencadenados por tormentas estivales locales ocurridas en la zona de análisis en las fechas siguientes: 27 de marzo de 2007; 13 de enero de 2013; 7 y 8 de febrero de 2013; 24 y 25 de febrero de 2014.

Este trabajo está diseñado de la siguiente manera: la sección 2 describe los datos y la metodología; la sección 3, los resultados del análisis sinóptico para cada uno de los episodios analizado; en la sección 4 se analizan los resultados correspondientes al análisis sinóptico obtenido de la composición de los cuatro casos estudiados; en la sección 5 se hace una evaluación del pronóstico de la precipitación según cada modelo utilizado y finalmente en la sección 6 se presenta la discusión y las conclusiones.

DATOS Y METODOLOGÍA

Datos

La situación sinóptica fue analizada usando los datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y los re-análisis del National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) (Kalnay et al., 1996). La región de estudio se caracteriza por su compleja orografía y presenta escasos registros pluviométricos. La validación de los pronósticos se llevó a cabo mediante el uso de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional Mendoza Aero (MZA), Mendoza Observatorio (OBS) y San Martín (SMA) y de la

Superintendencia General de Irrigación de la provincia de Mendoza (San Alberto (SAL), Polvaredas (PLV), Uspallata (UPS), Potrerillos (POT)) (Figura 2).

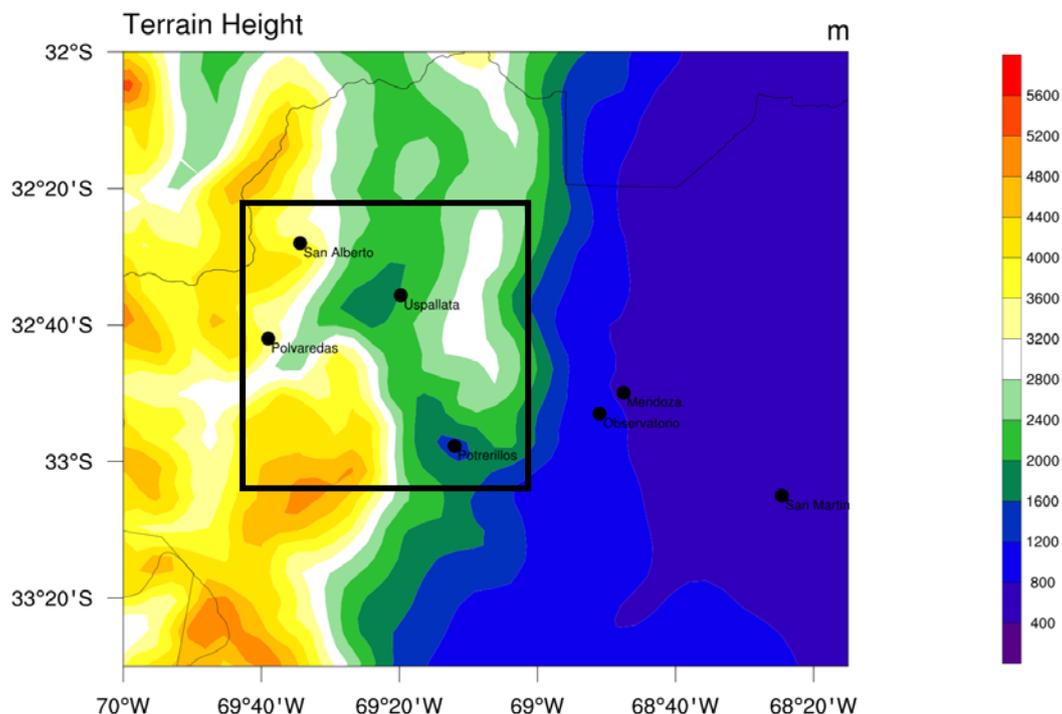


Figura 3. Topografía y ubicación de las estaciones meteorológicas.
Figure 3. Topography and location of weather stations.

Se utilizó el método que produce estimaciones de precipitación global a partir de datos infrarrojos y de microondas pasivas en alta resolución espacial y temporal conocido como CMORPH (Joyce et al., 2004). El método se inscribe dentro de las diversas técnicas surgidas en los últimos años que intentan lograr una descripción detallada de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación aun en aquellas regiones donde es muy escasa la densidad de estaciones (Ruiz et al., 2009). No obstante, cabe destacar que en estudios preliminares para la región de Sudamérica se indica que los datos CMORPH tienden a sobreestimar los acumulados de precipitación (Ruiz et al., 2009). Asimismo Salio et al. (2014) que realizan una exhaustiva evaluación de las estimaciones de la precipitación con satélites a una resolución de 0.25 grados sobre el sudeste de Sudamérica usando una red densa de pluviómetros, obtienen que regiones afectadas por sistemas convectivos muestran una tendencia a sobreestimar la precipitación principalmente para valores extremos que superan los 70 mm.

METODOLOGÍA

Para identificar denominadores comunes o patrones que identifiquen la causa de la ocurrencia de estas precipitaciones cordilleranas causantes de aludes, se realizó un análisis compuesto de condiciones a distintos niveles de la atmosfera integrando los cuatro casos seleccionados.

Debido a la escasez de estaciones meteorológicas en la zona de montaña y a la baja resolución de los re-análisis del NCEP, el uso de simulaciones numéricas es una solución alternativa para estudios de diagnóstico en regiones con estas características.

El modelo regional Eta/PRM y el modelo WRF se usaron para la evaluación del pronóstico y para experimentos de simulación.

El Eta/PRM es un modelo de predicción numérica caracterizado por ser totalmente compresible y no hidrostático. Este modelo es una versión del modelo regional Eta del *Centro de Previsao do Tempo e Estudos Climáticos* (Eta/CPTEC) de Brasil, y desde mediados de 2006 corre en forma operativa en el PRM del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Centro Científico Tecnológico (CCT) - Mendoza. Tiene una resolución horizontal de 15 km y 38 niveles verticales, abarcando el centro de Chile, el centro-oeste de Argentina e incluyendo la Cordillera de los Andes. Puede pronosticar hasta 120 hs a intervalos de 3 hs para varios

niveles de presión en la vertical.

Las características generales y la física de este modelo pueden ser consultadas en Messinger (1984), Black (1994) o (Seluchi y Chou 2001). Para el caso del modelo ETA/PRM, se integró utilizando un anidado en un sentido, partiendo de condiciones iniciales globales a 40 km de resolución horizontal, las cuales se interpolaron a un dominio con espaciamiento de grilla horizontal de 12 km con una extensión latitudinal de -40 a -29 grados y longitudinalmente de 286 a 304 grados. Se utilizaron 30 niveles verticales en coordenadas eta.

Si bien el modelo Eta/PRM produce en forma operativa un pronóstico a 120 hs, sólo se analizaron en conjunto con el modelo WRF, ventanas de integración de hasta 48 hs ya que la habilidad de los mismos comienza a degradarse desde este período en adelante.

El paquete de la física del modelo está constituido por los siguientes esquemas: representación en forma explícita de la precipitación (Zhao y Carr, 1997) y convección (Betts y Miller, 1993), como modificación de Janjic (1994). Los flujos de intercambios turbulentos en la atmósfera libre están basados en el esquema de Mellor y Yamada (1974), nivel 2.5. Se inicializó con las condiciones atmosféricas globales provistas por el CPTEC a 40 km, realizándose un anidado a 15 km e integrado durante 48 hs.

El modelo WRF, versión 3.2, está compuesto por el núcleo WRF-ARW, cuya característica principal es ser totalmente compresible, no hidrostático y con la posibilidad de realizar anidados interactivos de los dominios computacionales a distintas resoluciones espaciales. Los esquemas físicos utilizados fueron: Microfísica: WSM 3-class simple ice scheme; Radiación de onda larga RRTM y corta (Dudhia, 1989). Parametrización de Cúmulus: Kain y Fritsch (1993); Capa superficial atmosférica: Monín-Obukhov (1954); y Capa límite planetaria: Yon Sei University (Hong y Pan, 2006).

Las condiciones iniciales y de contorno para la inicialización del modelo WRF se obtuvieron de los datos globales en FNL (final analysis) del NCEP en formato GRIB1, y condiciones de contorno cada 6 horas con una resolución de 1° de latitud x 1° de longitud. Se realizó la integración del modelo durante 48 horas utilizando la estrategia de doble anidado en doble sentido, comenzando con condiciones iniciales globales del FNL a 100 km, la cuales fueron interpoladas a un espaciamiento de grilla de 36 km, constituyendo este el dominio padre (hijo) de 36 km (12 km) el cual se extiende latitudinalmente de -45 a -23 grados (-38 a -29 grados) y longitudinalmente de 277 a 304 grados (285 a 296 grados). Se utilizaron 40 niveles. Estos dominios poseen espaciamientos de grilla de 45 km y 15 km. Se utilizaron 40 niveles verticales con un espaciamiento más denso cerca de la superficie terrestre.

RESULTADOS

Breve descripción Sinóptica

El episodio del 27 de marzo de 2007

El evento meteorológico extremo del 27 de marzo de 2007 ocurrido en la provincia de Mendoza fue producido por la presencia de una vaguada conteniendo una Baja Segregada (BS) en la troposfera media y alta. El fenómeno presentó lluvias intensas, caída de granizo, inundaciones y un aluvión de barro y piedras extraordinario que se encausó en la Quebrada Seca (32°28' S y 69°36' W) al oeste del Valle de Uspallata, dañando la ruta internacional a Chile e interrumpiendo su tránsito por 24 hrs.

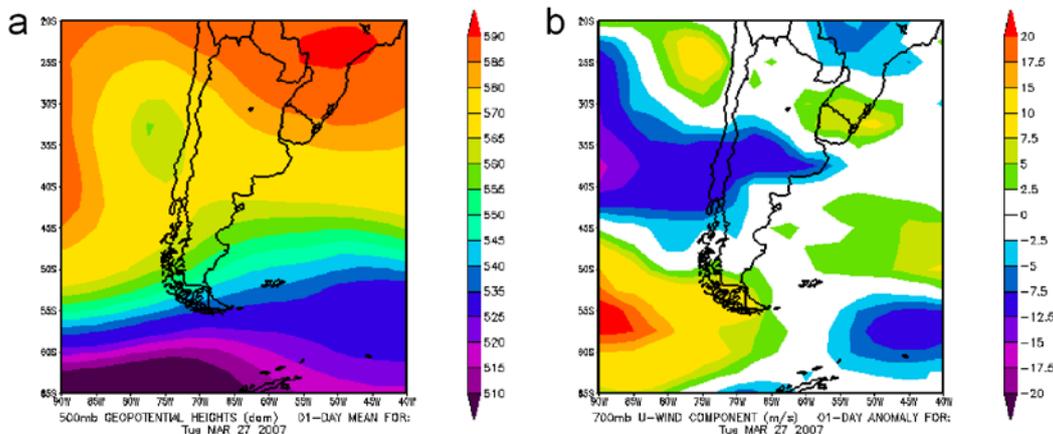


Figura 4. Carta de 500 hPa [líneas cada 10 m gpp] (a) y anomalía de la componente zonal del viento en 700 hPa [en $m s^{-1}$] (b), del 27 de marzo de 2007 a 12 UTC.

Figure 4. Field of 500 hPa geopotential heights [lines every 10 m gpp] (a) and anomalies of the zonal wind component at 700 hPa [in $m s^{-1}$] (b) from March 27th 2007 at 12 UTC.

Godoy et al. (2011), analizaron en forma exhaustiva este episodio poniendo énfasis en las cuatro etapas de la evolución de la BS y su relación con el impacto en la precipitación en las distintas áreas afectadas del país. Una corriente de aire templado y húmedo proveniente del noreste argentino y del sur de Paraguay alcanzaba la región de la provincia de Mendoza. A su vez una profunda vaguada con una BS o “gota fría” proveniente del Océano Pacífico (Figura 4a) actuó como gatillo para que el episodio tuviera características intensas o extremas que provocaron el aluvión en el sector montañoso.

Una anomalía de la componente zonal u del viento en distintos niveles (desde 700 hPa hasta 200 hPa) sobre el centro oeste argentino favoreció el desarrollo de la convección por ascenso orográfico en las laderas orientales de las montañas de la región de estudio (solo se muestra la correspondiente al nivel de 700 hPa, Figura 4b).

El episodio del 12 y 13 de enero de 2013

La situación sinóptica de este caso difiere notablemente del caso anterior. En superficie (Figura 5a) un anticiclón ingresa al continente desde el Océano Pacífico aproximadamente a 45 grados de latitud sur y una celda se desprende al día siguiente ubicándose en el Océano Atlántico determinando advección del sudeste y del este. En los niveles donde preferentemente se genera la nubosidad convectiva (850 hPa/700 hPa) se observa una advección moderada del noreste y del este sobre la región occidental de la provincia de Mendoza y en niveles superiores se aprecia el eje de una cuña o dorsal coincidiendo con la Cordillera de Los Andes. Débil anomalía negativa de la componente zonal del viento se observa a 700 hPa (Figura 5b).

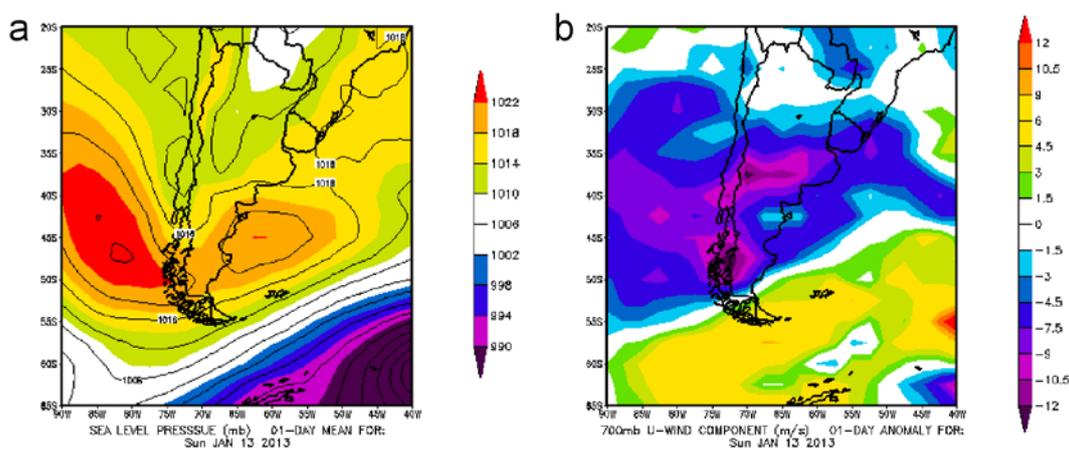


Figura 5. Carta de superficie [en hPa] (a) y anomalía de la componente zonal del viento a 700 hPa [en $m s^{-1}$] (b), del 13 de enero de 2013 a 12 UTC.

Figure 5. Sea level pressure [hPa] (a) and anomalies of the zonal wind component at 700 hPa [in $m s^{-1}$] (b) of January 13, 2013 at 12UTC.

El episodio del 7 y 8 de febrero de 2013

En general en superficie predomina en ambos días el anticiclón semipermanente del Océano Atlántico generando circulación moderada del norte y del noreste sobre el occidente del país. La situación más relevante para estos episodios lo constituye la circulación en 700 hPa donde el día 8 (Figura 6a) se observa una zona anticiclónica al norte de la Patagonia favoreciendo la circulación del este intensificándose al día siguiente. En los niveles más altos, si bien predomina una cuña, el eje de la misma está orientado de tal manera que permite el flujo del este y del sudeste sobre el área montañosa de la provincia favoreciendo el desarrollo de nubosidad convectiva a sotavento de las laderas (Figura 6b).

El episodio del 24 y 25 de febrero de 2014

En este evento las condiciones sinópticas de superficie presentan una evolución de tipo invernal con la presencia de un anticiclón migratorio que se instala en el centro de la Patagonia Esta zona de alta presión en capas bajas determina advección húmeda sobre la región de Cuyo con circulación bien definida del sur o sudeste acompañando el ingreso de una masa de aire muy frío para la época. (Figura 7a). En los niveles medios y altos se observa la aproximación de una baja segregada semejante a la observada en el episodio del 27 de marzo de 2007 (Figura 7b).

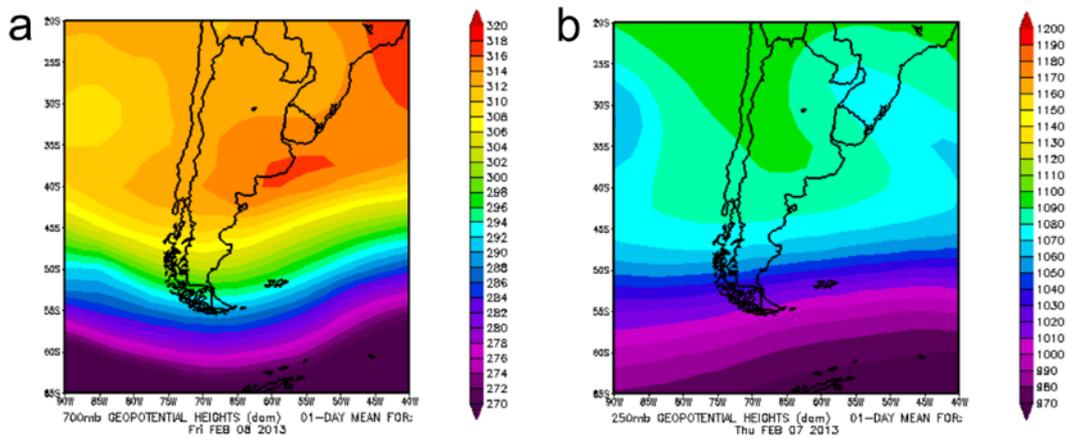


Figura 6. Cartas de 700 hPa (a) y de 250 hPa (b) [líneas cada 10 mgp], del 8 de febrero de 2013 a las 12 UTC.
Figure 6. Fields of 700 hPa (a) and 250 hPa (b) geopotential heights [lines every 10 mgp] of February 8, 2013 at 12 UTC.

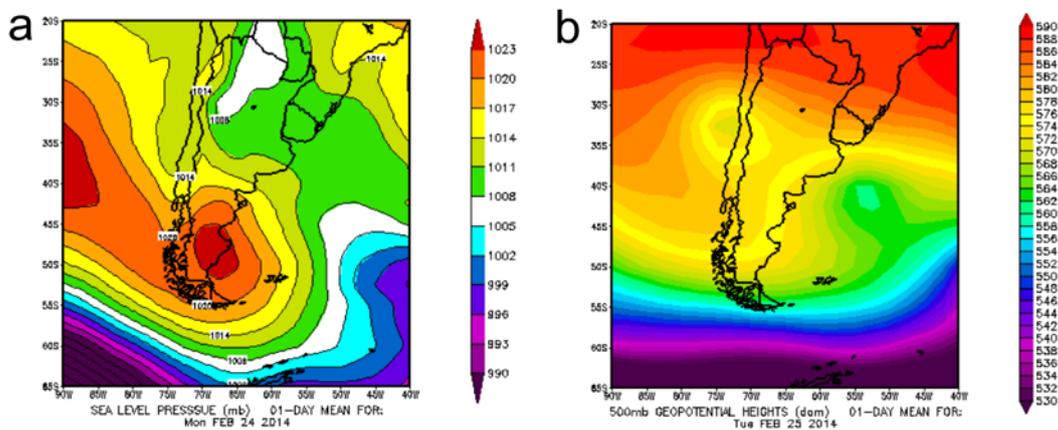


Figura 7. Cartas de superficie [en hPa] (a) y 500 hPa [líneas cada 10 mgp] (b), del 25 de febrero de 2014 a las 12 UTC.
Figure 7. Sea level pressure [hPa] (a) and 500 hPa geopotential heights [lines every 10 mgp] (b) of February 25, 2014 at 12 UTC.

ANÁLISIS SINÓPTICO COMPUESTO

A partir del análisis compuesto o integrado de diferentes variables para los cuatro casos analizados se observó que, si bien hay condiciones sinópticas diferentes asociadas a la ocurrencia de cada uno de los episodios analizados, existe un común denominador que permite identificar una de las causas de la formación de la nubosidad convectiva y las tormentas asociadas en esta zona montañosa de terreno complejo.

En particular analizando anomalías del vector viento para los distintos niveles se detecta un centro de anomalías sobre el área de ubicación media del anticiclón subtropical semipermanente del Océano Pacífico oriental. La región de estudio está dentro de esa zona de anomalías negativas predominando la circulación del este desde 850 hPa hasta 400 hPa. Desde ese nivel hacia arriba la circulación es del noreste. Los valores más elevados de las anomalías negativas sobre el área montañosa del noroeste de Mendoza se observan en los niveles de 700 hPa y 600 hPa disminuyendo de magnitud hacia niveles superiores (Figura 8a). Las anomalías del viento zonal u presentan una configuración semejante a las anteriores (vectores) siendo máximas entre 700 hPa y 400 hPa (Figura 8b).

Por otro lado la anomalía del viento meridional presenta valores negativos sobre la región de estudio en todos los niveles siendo máximas entre 500hPa y 400 hPa (no mostrado). Un área de anomalía positiva de agua precipitable se observa sobre Chile central, gran parte de la provincia de Mendoza y del norte de Neuquén (Figura 9a). Asimismo la anomalía de la tasa de precipitación en superficie indica un máximo sobre el área de estudio (Figura 9b).

En lo que respecta a la circulación y distribución de vapor de agua en los 700 hPa, se observa que la presencia de un anticiclón en el Océano Pacífico sur (Figura 10a) permite el ingreso de humedad desde el Océano Atlántico evidenciado en la Figura 10b.

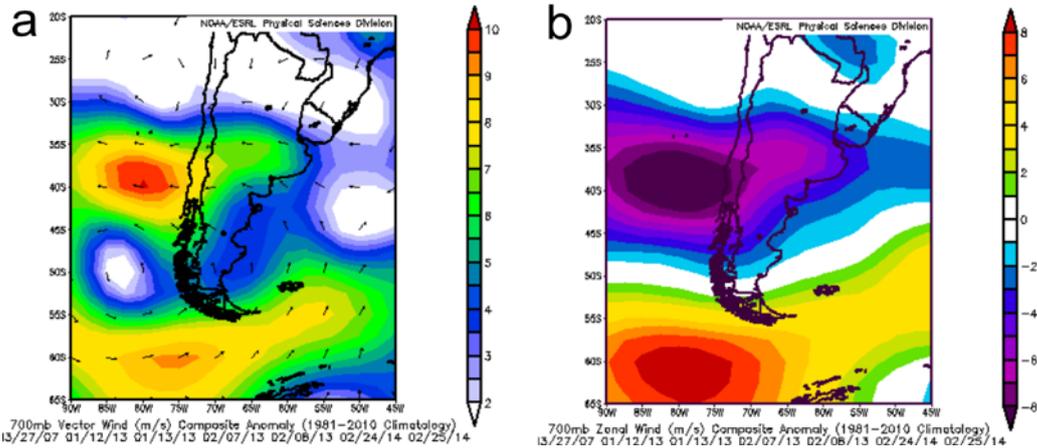


Figura 8. Anomalia compuesta del vector viento (a) y de la componente zonal del viento (b) [en $m s^{-1}$], en 700 hPa.
Figure 8. Composites of wind vector anomaly (a) and zonal wind component (b) [in $m s^{-1}$], at 700 hPa level.

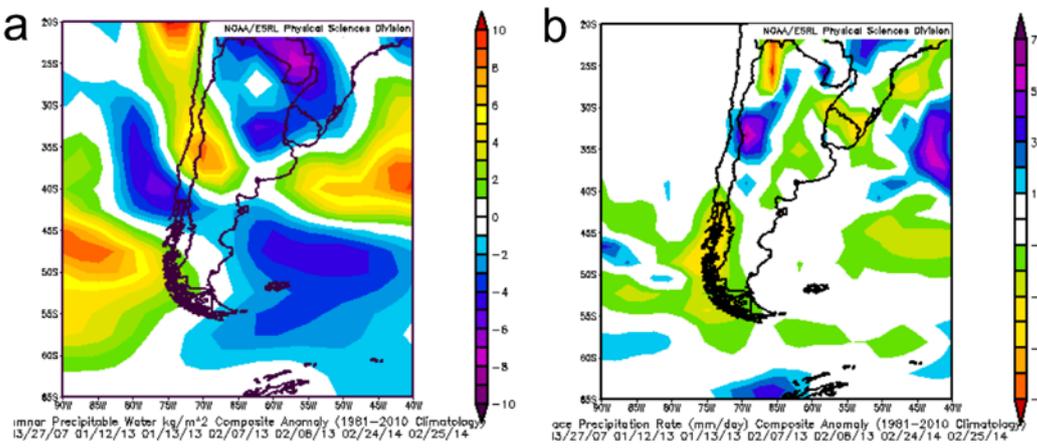


Figura 9. Anomalia compuesta del agua precipitable (a) y de la tasa de precipitación (b) [en mm], en superficie.
Figure 9. Composites of PW (a) and precipitation rate (b) anomalies [in mm] at sea level pressure.

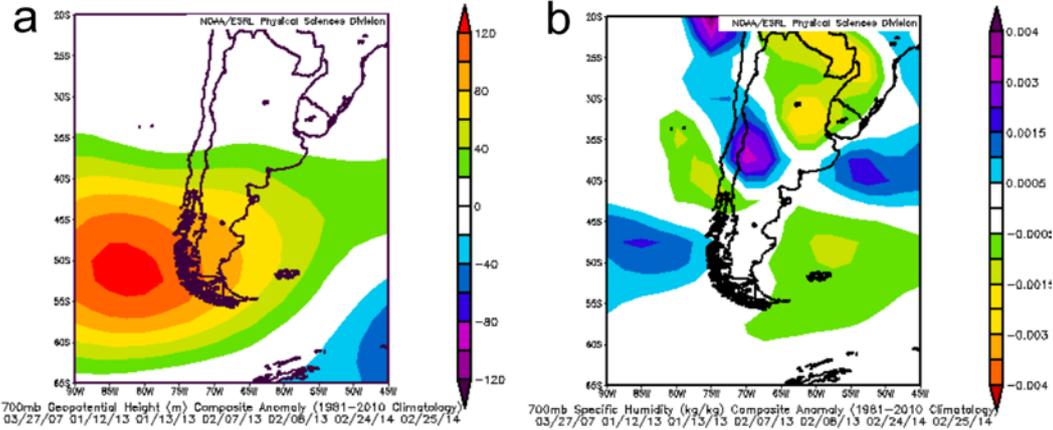


Figura 10. Anomalia compuesta de la altura geopotencial [en m] (a) y de la humedad específica [en $kg kg^{-1}$] (b), a 700 hPa.
Figure 10. Composite anomalies of geopotential height [in m] (a) and specific humidity [$kg kg^{-1}$] (b), at 700 hPa.

EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE PRECIPITACIÓN

Se evaluó el comportamiento de los modelos meteorológicos WRF y ETA en la predicción de la precipitación acumulada en 48 horas en la región de la Provincia de Mendoza caracterizada por una topografía compleja, como así también la estimación del método CMORPH de 8 km. Estas estimaciones fueron validadas con los datos provenientes de siete estaciones meteorológicas indicadas en la Figura 2.

En lo referente a la predicción para los cuatro eventos anteriormente mencionados se observa que la integración por 48 horas de los modelos meteorológicos inicializados 24 horas antes del comienzo del episodio, sobreestiman en la mayoría de las estaciones, la cantidad de precipitación acumulada en la superficie para los distintos esquemas convectivos utilizados (Betts-Miller (WRF-BM) y Kain-Fritsch (WRF-KF) con WRF y Betts-Miller (ETA-BM) con Eta-PRM), (ver Figura 11). Cabe destacar que la configuración WRF-KF es la que más sobreestima en la mayor cantidad de casos.

Respecto a la estimación del método CMORPH, puede observarse que en ciertos casos subestima (Fig. 11a), mientras que en otros sobreestima la cantidad de precipitación acumulada especialmente en áreas cordilleranas como las estaciones de San Alberto (SAL) y Polvaredas (PLV) (Fig.11b y 11c).

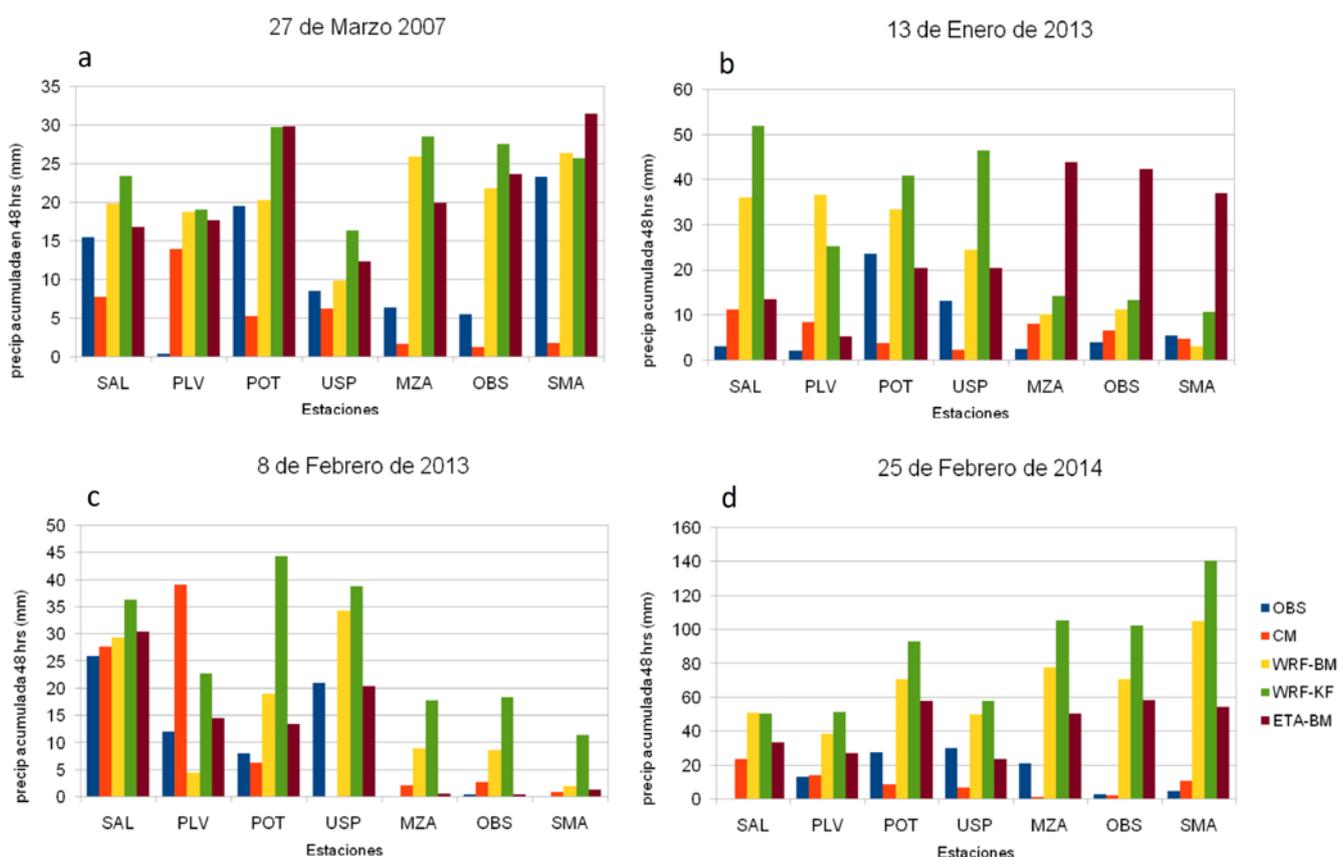


Figura 11. Precipitación Acumulada en 48 hrs observada (OBS), estimada por el método CMORPH (CM) y pronosticada por los modelos WRF y ETA-PRM con los esquemas de convección Betts-Miller (WRF-BM, ETA-BM) y Kain-Fritsch (WRF-KF) para los días: a) 27/3/07, b) 13/2/13, c) 8/2/13 y d) 25/2/14.

Figure 11. Cumulative rainfall observed at 48 hrs (OBS), estimated by the CMORPH method (CM) and predicted by the ETA-PRM and WRF models with convection schemes Betts-Miller (WRF-BM, ETA-BM) and Kain-Fritsch (WRF-KF) for days: a) 03/27/07, b) 02/13/13, c) and d) 02/08/13) 2/25/14.

CONCLUSIONES

Las tormentas convectivas en áreas cordilleranas son la principal causa de la ocurrencia de aludes que interrumpen el tránsito habitual en la ruta internacional N° 7 que une Chile con la Argentina a través de la provincia de Mendoza. El análisis de los cuatro episodios que produjeron aludes presentó algunas características sinópticas bien definidas tales como la anomalía negativa de la componente zonal del viento en las capas medias

favoreciendo la convección mediante el ascenso forzado en las laderas orientales de la cordillera de los Andes y un incremento en la cantidad de agua precipitable. En ciertos casos la presencia de una Baja segregada, acentuó la posibilidad de ocurrencia de precipitaciones en el área.

Asimismo el pronóstico de estos episodios constituye una herramienta esencial para la prevención de accidentes y mitigación de daños. Los Modelos Numéricos de la atmósfera tales como WRF y ETA-PRM predicen, aunque sobreestimando, la precipitación en la zona de topografía compleja analizada.

Una de las principales dificultades en la verificación de este tipo de fenómenos es la baja densidad de datos de precipitación observados. Esto motivó a considerar la precipitación estimada por el método CMORPH como elemento de validación, que a pesar de tener ciertas diferencias con las observaciones de las estaciones, permite estimar en forma aceptable la precipitación en zonas de difícil acceso.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a Héctor Segal y Rodrigo Villareal de la Superintendencia General de Irrigación de la provincia de Mendoza por el suministro de los datos de precipitación en áreas cordilleranas. Asimismo a Julio Cristaldo y Omar Silva del Programa Regional de Meteorología (PRM) CCT-CONICET Mendoza por la elaboración del archivo de información sinóptica y del modelo regional Eta-PRM.

Este trabajo fue parcialmente solventado por el PICT 2009-0063 de la Agencia Nacional de Ciencia y Tecnología y por el PIP- CONICET 11220090100439.

REFERENCIAS

- Betts, A.K. y Miller, M.J., (1993). The Betts-Miller scheme. En *The representation of cumulus convection in numerical models of the atmosphere*. Eds. K.A. Emanuel y D. J. Raymond American Meteorological Society, 24 (46): 107-121.
- Black, T.L., (1994). The new NMC meso scale Eta model: Description and forecast examples. *Weather and forecasting*, 9: 256-278.
- Dudhia, I., (1989). Numerical Study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46 (20): 3077-3107.
- Godoy, A.A., Campetella, C.M. y Possia, N.E., (2011). Un caso de Baja segregada en niveles altos en el sur de Sudamérica: Descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26 (3): 491-502.
- Hong, S.Y. y Pan, H.L., (1996). Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium range forecast model. *Monthly Weather Review*, 124: 2322-2339.
- Janjić, Zaviša I., (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, 122: 927-945.
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A. y Pingpin Xie, (2004). CMORPH: A Method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5: 487- 503.
- Kain, J.S. y Fritsch, J.M., (1993). Convective parameterization for meso-scale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*: 246 pp, American Meteorological Society.
- Kalnay, E. y otros, (1996). The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 437-472.
- Mellor, G.L. y Yamada, T., (1974). A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31: 1791-1806.
- Monin, A.S. y Obukhov, A.M., (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contributions of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences, USSR*, 151: 163-187.
- Messinger, F., (1984). A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 44: 195-202.
- Moreiras, S.M., (2005). Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza province, Argentina. *Landslides, International Consortium on Landslides*, 2 (1): 53-59. DOI 10.007/s10346-005-0046-4. Japón.
- Moreiras, S.M., (2006). Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina. *Special Issue Holocene Environmental Catastrophes in South America. Quaternary International*, 158: 110-121.
- Ruiz, J.J., (2009). Evaluación de diferentes metodologías para la calibración de las estimaciones de precipitación CMORPH sobre Sudamérica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24 (4): 473-488.
- Ruiz, J.J., Saulo, A.C. y Kalnay, E., (2009). Comparison of methods to generate probabilistic quantitative precipitation forecast over South America. *Weather and Forecasting* 24: 319-336.
- Salio, P., Hobouchian, M.P., Garcia Skabar, Y. y Vila, D., (2014). Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.017>.

Sepúlveda, S.A., Moreiras, S.M., Lara, M. y Alfaro, A., (2014). Debris flows in the Andean Ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides* (aceptado).

Seluchi, M.E. y Chou, S.C., (2001). Evaluation of two Eta Model versions for weather forecast over South America. *Geofísica Internacional*, 40 (3): 219-237.

Zhao, Q. y Carr, F.H., (1997). A prognostic cloud scheme for operational NWP Models. *Monthly Weather Review*, 125: 1931-1953.

Recibido: 06-11-2014

Aceptado: 03-07-2015