

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**PREDICCIÓN DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTREMA EN ZONAS
PRECORDILLERANAS CON EL MODELO WRF**

GONZALO YÁÑEZ M.¹
JORGE GIRONÁS L.²
MARTA CANEO F.³
RODRIGO DELGADO U.⁴

RESUMEN

La Quebrada de Ramón, en la precordillera de Santiago, es de particular interés socio-económico por situarse aguas arriba de zonas altamente urbanizadas que pueden ser afectadas por crecidas (*flash floods*). Con el objetivo de prevenir tales desastres, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) realiza periódicamente pronósticos meteorológicos con el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF). Dada la compleja topografía de la zona y la magnitud de los eventos extremos, tales pronósticos no son siempre certeros. Este trabajo propone un ensamble de esquemas microfísicos de WRF para mejorar tales pronósticos iniciales. Se testeó con WRF la resolución vertical, el uso de suelo, el esquema de superficie y la variabilidad del tiempo de antelación del pronóstico (lead time). El modelo WRF predijo óptimamente las 5 horas con más lluvia (tiempo de concentración de la Quebrada de Ramón), junto con las temperaturas durante el *peak* y la altura de la isoterma cero. Además de la topografía accidentada de la zona, se observó que el resultado depende del evento: bajas segregadas más intensas son subestimadas por WRF. Finalmente, se propone el esquema WSM-6Class para la parametrización microfísica. Mayor investigación debe realizarse, donde sugerimos un enfoque geoestadístico para obtener mejores resultados.

¹Alumno Magíster, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA), Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) – gjyanez@uc.cl

²Profesor Adjunto, DIHA, PUC. Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN), Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) y Centro UC de Cambio Global – jgironas@uc.cl

³Meteoróloga, Oficina de Modelos y Desarrollo, DMC – marta.caneo@dgac.gob.cl

⁴Analista informático en modelamiento meteorológico, Oficina de Modelos y Desarrollo, DMC – rdelgado@meteochile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los desastres hidrometeorológicos constituyen una gran amenaza y un problema considerable en Latinoamérica y el Caribe, en donde en los últimos 30 años, aproximadamente 90.000 personas han muerto y 150.000 resultaron damnificadas. Aún más, este tipo de desastre ha causado una pérdida económica cuantificada en más de 120 mil millones de dólares (EM-DAT, 2016). La ocurrencia de *flash floods*, aluviones o eventos de precipitación extrema es altamente variable en el tiempo, y su impacto negativo sobre la región aumenta cuando estos se concentran en periodos de tiempo relativamente cortos. La cordillera de los Andes es un ejemplo icónico de esta situación, dada la urbanización que se ha desarrollado en las zonas precordilleranas. Santiago de Chile (figura 1), ubicado en el piedemonte Andino, ha sufrido el impacto de eventos de precipitación extrema y su consiguiente aluvión (o *flash floods*). Los efectos pueden ser devastadores, al considerar una carencia de Seguridad Hídrica (Peña, 2016), reflejada en una planificación urbana mal organizada, además de la alteración de la vegetación natural de las laderas, en comunas como La Reina, Peñalolén y La Florida. Un claro ejemplo es lo que ocurrió en 1993 en la Quebrada de Macul, donde 26 personas perdieron la vida y más de 30.000 quedaron damnificadas. Las altas temperaturas durante eventos como aquel, incrementan la probabilidad de tener significantes flujos detríticos, dada la ocurrencia de precipitación en zonas donde usualmente nieva.



Figura 1. Santiago (33.45°S; 70.66°W) y la estación meteorológica en Apoquindo, Quebrada de Ramón (33.43°S; 70.46°W)

Poder realizar un pronóstico acertado a tiempo es una de las grandes ventajas que proveen los modelos numéricos de predicción del clima (NWP, por sus siglas en inglés). Implícitamente, el uso de un NWP también considera un proceso de downscaling mediante un enfoque estadístico o

dinámico. Actualmente la precisión exhibida por WRF, uno de los NWP más ampliamente usado, permite pronosticar los peligros hidrometeorológicos, lo que constituye una oportunidad invaluable para implementar acciones preventivas y esquemas de mitigación que puedan proteger a la población. Sin embargo, los modelos presentan ciertas falencias cuando se ocupan resoluciones muy finas en topografías complejas (como es el caso de la geografía chilena), o cuando se pronostican eventos frontales que obedecen a condiciones sinópticas más complejas y extremas, como es el caso de las bajas segregadas. En consecuencia, WRF presenta aún algunas carencias en el pronóstico de eventos extremos en las zonas precordilleranas, lo cual abre una oportunidad para mejorar su desempeño a través de la calibración de ciertos esquemas físicos internos del modelo.

El objetivo de este trabajo es mejorar los pronósticos iniciales que fueron hechos por la DMC sobre la región montañosa de la cuenca de Santiago: para ello se hará testeó sobre resolución vertical de la parametrización del modelo, esquemas sobre el uso de suelo y el esquema de superficie y finalmente la variabilidad del *lead time*, en un rango de 3 a 5 días. Luego se comparan tres distintos tipos de esquemas microfísicos, que están relacionados con los procesos internos de generación de lluvia dentro de las nubes. Se considera la predicción del desarrollo temporal de la tormenta, junto con su peak, y las N-horas con más lluvias, además de algunos estadísticos de desempeño, para escoger el mejor esquema microfísico para las condiciones particulares de ubicación y topografía de la precordillera santiaguina.

2. EVENTO DE PRECIPITACIÓN

Entre el 16 y el 18 de abril del 2016, el valle central de Chile fue afectado por un evento de precipitación extrema. Durante la tormenta, 108 mm de lluvia fueron registrados en sólo 24 horas en la estación meteorológica de Apoquindo, ubicada dentro de la Quebrada de Ramón, a 1625 metros de altura (figura 1). Este sistema frontal se desplazó desde el norte hacia el sur, con anomalías negativas en la presión atmosférica, y en el geopotencial a una altura de 500 hPa, con valores negativos de 50 metros de geopotencial sobre el valle central (figura 2a). Imágenes satelitales evidencian una importante contribución de humedad advectada desde latitudes más bajas para este evento, la cual incorporó más agua precipitable al sistema. Además, conjuntamente ocurrió la intensificación de los *jet stream* tropicales y subtropicales a 250 hPa. Las mayores intensidades de viento (anomalías positivas de 35 m/s en el vector del viento) ocurrieron en el núcleo del sistema, el que se localizó precisamente sobre el valle central, favoreciendo el desarrollo de nubosidad (figura 2b).

Todos estos factores intensificaron el sistema frontal, haciendo que su intensidad y su desarrollo temporal fueran similares a los que se producen por bajas segregadas. Además la altura de la isoterma cero se encontró sobre los 3000 metros, lo que originó una gran contribución de precipitación líquida en altas temperaturas, y consecuentemente, caudales significativos en las cuencas precordilleranas de Santiago y todo el valle central. En efecto, el 16 de Abril, el Río Mapocho se desbordó sobre la parte central de Santiago, causando daños económicos. Esta inundación ocurrió pues la construcción de una carretera en el lecho fluvial dejó un túnel abierto hacia el cauce, permitiendo la salida del flujo.

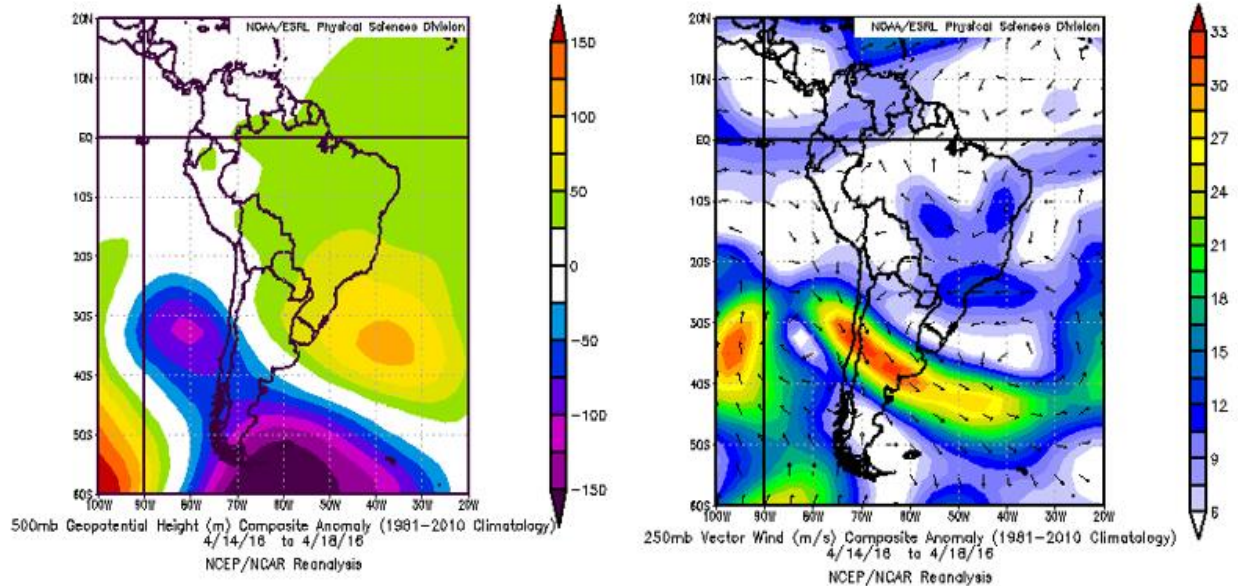


Figura 2. Anomalia durante del evento de precipitación para altura de geopotencial a 500 hPa (a, izquierda) y vector de viento a 250 hPa (b, derecha)

3. SIMULACIONES Y ESQUEMAS FÍSICOS

Las simulaciones fueron realizadas con ARW-WRFv3.5, un modelo NWP apto para un amplio rango de estudios en simulación, predicción y pronóstico del clima. WRF ocupa las ecuaciones de Euler con consideración compresible y no hidrostáticas, en conjunto a conservación escalar, sobre coordenadas verticales que siguen el terreno a densidad variable (coordenadas η). El sistema operativo de WRF y su código son actualizados y mantenidos por la NCAR (*National Center for Atmospheric Research*, <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>). Para esta simulación, tres dominios anidados de 54, 18 y 6 kilómetros de resolución horizontal fueron empleados bajo una proyección terrestre Lambert, con su punto central ubicado sobre Santiago. Una mayor resolución horizontal no fue posible debido a las limitaciones operativas de la DMC, sin embargo, esto hubiera aumentado considerablemente el tiempo de cómputo.

La resolución vertical del modelo provee mejores resultados en la simulación de temperatura y velocidad del viento cerca de la superficie, sin encarecer en demasía el tiempo de cómputo. Saide et al. (2011) recomendó 39 niveles verticales como un óptimo para las simulaciones en Santiago, sin embargo, se continuó empleando la discretización de 50 niveles verticales que ocupaba inicialmente la DMC, dado que las condiciones atmosféricas durante el evento de precipitación, en especial la temperatura del punto de rocío, y la velocidad y dirección del viento cercano a superficie, eran mejor capturadas (figura 3).

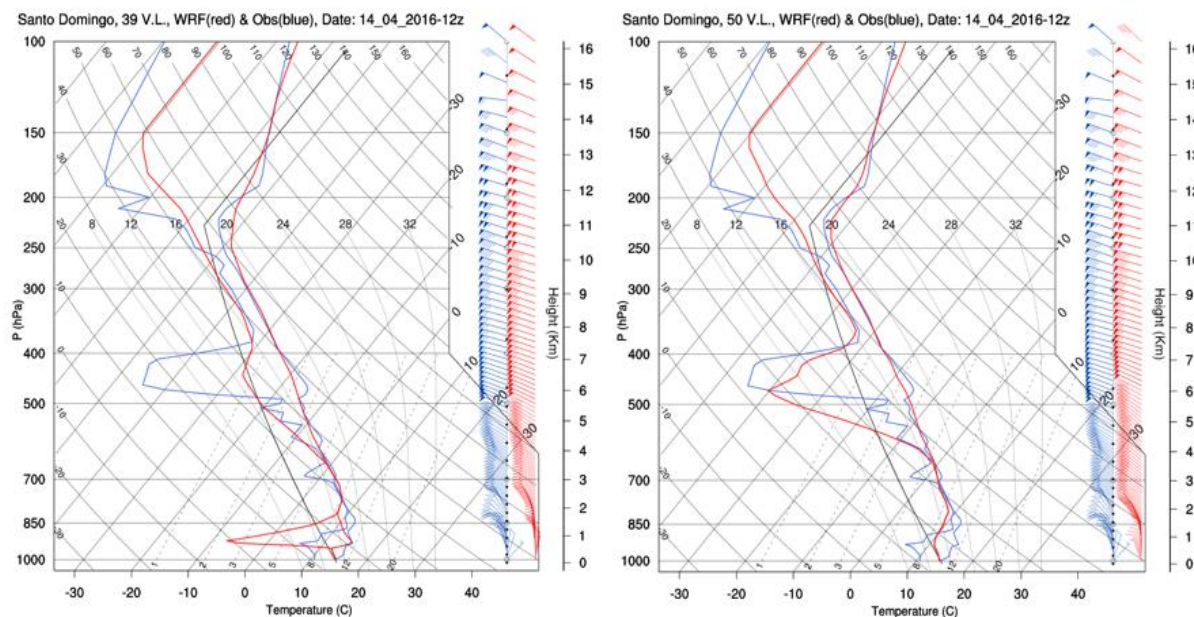


Figura 3. Diagrama *Skew-T* para Santo Domingo. Simulación hecha con 39 niveles verticales (izquierda) y con 50 (derecha).

La dificultad de simular eventos de precipitación en cercanía a zonas montañosas nos ha llevado a implementar un ensamble para mejorar el pronóstico. Tal enfoque ha sido comúnmente implementado en varios estudios para captar la incertidumbre de la predicción, o para mejorar la parametrización de algún esquema físico (Ruiz et al., 2010; Evans et al., 2012; Kim et al., 2013; Katragkou et al., 2015; Dimitrova et al., 2015; Ekström, 2016). Los esquemas físicos son procesos que WRF no puede resolver explícitamente durante la simulación debido a limitaciones computacionales, por lo que son parametrizados según distintos esquemas, tales como radiación, capa límite, superficie, microfísica, cúmulos, etc. Dado el amplio espectro de parametrizaciones para cada esquema, el cual se amplía continuamente mientras más investigación para mejorar el desempeño de WRF, para una locación geográfica y climatológica, es posible testear varias opciones físicas, incluyendo diferentes resoluciones temporales y espaciales. En este trabajo, se han realizado en total 17 simulaciones, considerando niveles verticales, uso de suelo, superficie, microfísica, y también el *lead time*.

Un breve ensamble sobre el uso del suelo y el esquema de superficie fue testeado, en donde se comparó en primer lugar datos de terreno de USGS y MODIS, optándose por los últimos dada su mejor representación de la zona urbana de Santiago. Para el esquema de superficie, se cambió desde la parametrización más simple que usa WRF (5 – Layer), por NoahMP, que presentó mejor desempeño al simular variables de superficie. Por otra parte, también se comparó la influencia de usar condiciones iniciales y de borde para el NWP, los cuales fueron GFS (*Global Forecast System*) y FNL (Reanálisis de datos, que incorpora observaciones reales para mejorar con un pequeño desfase de 6 horas las predicciones iniciales de GFS). No se encontró mejoras significativas en los datos simulados con FNL, incluso, la lluvia presentó mejor desempeño con GFS. Esto se muestra en concordancia con el criterio de la DMC, que ocupa GFS para hacer los pronósticos en tiempo real.

4. DESEMPEÑO DE WRF EN LA PREDICCIÓN DE LLUVIAS

La estación meteorológica de Apoquindo fue escogida para verificar el desempeño del modelo, del cual se extrajeron las variables meteorológicas (temperatura, velocidad y dirección del viento, altura de isoterma cero y precipitación) siempre desde el dominio anidado más interior. En primer lugar, se intentó salvar los problemas de discretización al mover el punto de simulación en un radio de 5 kms, procurando mantenerse siempre dentro de la Quebrada de Ramón, similar a la metodología empleada por Carvalho et al. (2012). Finalmente se optó por la mejor ubicación a 5 kms al norte de la real locación de la estación meteorológica, con una subestimación de 200 metros de altura, pero con un mejor desempeño en la descripción de la intensidad y desarrollo de la precipitación.

Simulaciones testeando la microfísica fueron realizadas ocupando las parametrizaciones de WSM-3Class (WSM3), Lin et al. (LIN) y WSM-6Class (WSM6). La primera parametrización fue la empleada por la DMC, y es un esquema simple de tres estados de agua (vapor de agua, agua/hielo y nieve/lluvia), tomando como separación el punto de congelamiento. Mayor mejora presenta WSM6, que toma cada estado por separado e incorpora también al granizo, siendo más propicio para simulaciones a alta resolución. También la parametrización de LIN describe óptimamente los procesos internos en las nubes, siendo apropiada para este tipo de simulaciones.

Adicionalmente, el *lead time* del pronóstico fue incluido considerando fechas de inicio al 12, 13 y 14 de Abril, es decir, una antelación de 3 – 5 días. La figura 4a muestra que ninguna de las parametrizaciones puede predecir con precisión el evento de precipitación, ya que hay un desfase entre los *peaks* de la precipitación simulada y observada (WRF pronostica el *peak* 48 horas antes de que ocurra). Esto se evidencia además en los altos valores de IoA para distintos desfases posibles (figura 4b), que tienen un claro *peak* en torno al desfase ya mencionado. El IoA (*Index of Agreement* modificado) se muestra en la ecuación (1), donde S_t es la serie simulada, y O_t es la observada, y \bar{O}_t el promedio de esta en el tiempo. El IoA tiene un rango de valores de [-1,1], pero solamente valores mayores a 0.6 se consideran óptimos.

$$IoA = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{t=1}^N |S_t - O_t|}{2 \sum_{t=1}^N |S_t - \bar{O}_t|} & \text{si } \sum_{t=1}^N |S_t - O_t| \leq 2 \sum_{t=1}^N |S_t - \bar{O}_t| \\ \frac{2 \sum_{t=1}^N |S_t - \bar{O}_t|}{\sum_{t=1}^N |S_t - O_t|} - 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

En la figura 5 se puede ver la serie de tiempo de precipitación acumulada y la serie de tiempo de temperatura con sus respectivos sesgos, el cual se calcula como una diferencia en cada dato horario entre la serie simulada y la observada ($S_t - O_t$). Se puede apreciar que hay una sobrestimación de la cantidad de precipitación para todo el ensamble, además del desfase temporal, lo cual se debe a la configuración sinóptica compleja del evento, mientras que la temperatura se predice con mayor precisión, sobre todo, en el momento *peak* del evento de precipitación. La isoterma cero (no se muestra aquí) presenta un comportamiento similar para todas las parametrizaciones, con subestimaciones de 500 m. disminuyen a menor *lead time*.

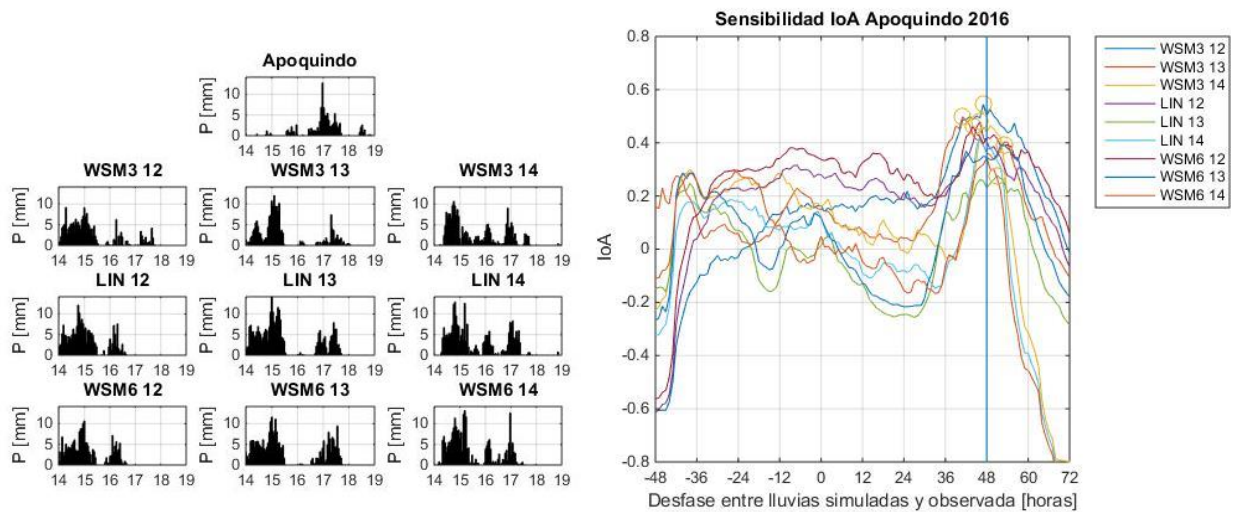


Figura 4. Lluvia observada, y bajo ella, ensamble de lluvia simuladas con WRF para los días 14 al 19 de Abril del 2016 (a, izquierda). IoA para distintos valores de desfase, valores positivos significan que el modelo predice la lluvia antes (b, derecha).

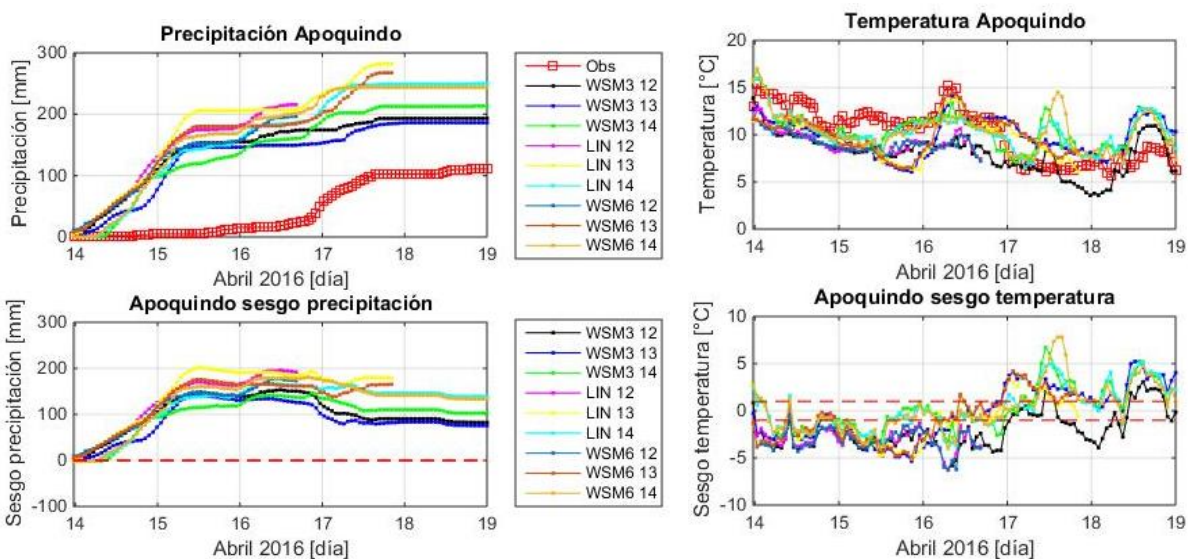


Figura 5. Series de tiempo para precipitación acumulada (izquierda) y temperatura (derecha) para Apoquindo con sus respectivos sesgos. En líneas rojas, valor óptimo del sesgo para la precipitación (izquierda), y la tolerancia de la DGAC para la temperatura (derecha)

El comportamiento general del ensamble puede verse con mayor claridad en la figura 6, donde se ocupa un umbral de 1 mm, y una “certeza” de lluvia cada vez que la probabilidad de ocurrencia lluvia era mayor a 0.5 (franjitas rojas). También se graficaron los percentiles 25, 50 y 75 del ensamble de temperaturas simuladas, en conjunto con los datos observados. Nuevamente es patente el desfase entre la simulación y la lluvia real, una subestimación en el rango de temperatura (4°C) que se corrige en el peak real de la tormenta. Hay un acierto espurio del modelo en este momento,

que corresponde a otro pulso de lluvia menor, probablemente el ocurrido luego del mediodía del 18 de abril. De todas formas no es aplicable a los pronósticos el uso de un ensamble para disminuir la incertidumbre, debido al alto costo computacional que esto tendría.

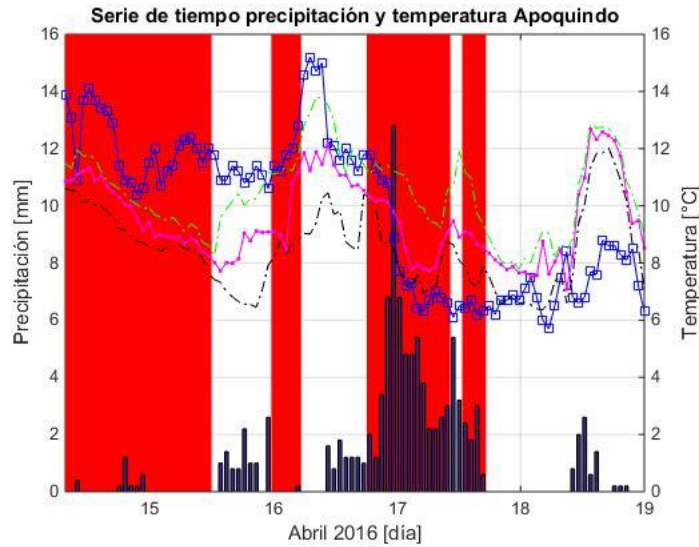


Figura 6. Serie de tiempo precipitación y lluvia ensamble, estación Apoquindo. Serie de temperatura observada (azul) y simulación en percentiles 25 (negro), 50 (magenta) y 75 (verde).

Aunque el modelo no predice óptimamente la dinámica de este evento, la precipitación acumulada durante N horas consecutivas (NRH, *N-Rainiest Hours*) es bien capturada para las primeras 10 horas, como lo muestra la figura 7. En esta se muestra además el MAE de la serie de temperatura correspondiente a cada una de las horas, que corresponde a un promedio del sesgo. Aunque no se puede establecer ninguna tendencia con el *lead time*, las parametrizaciones de LIN y WSM6 se comportan similarmente, y tienen un menor MAE en la temperatura, para las 5 horas, que corresponde al tiempo de concentración de la Quebrada de Ramón.

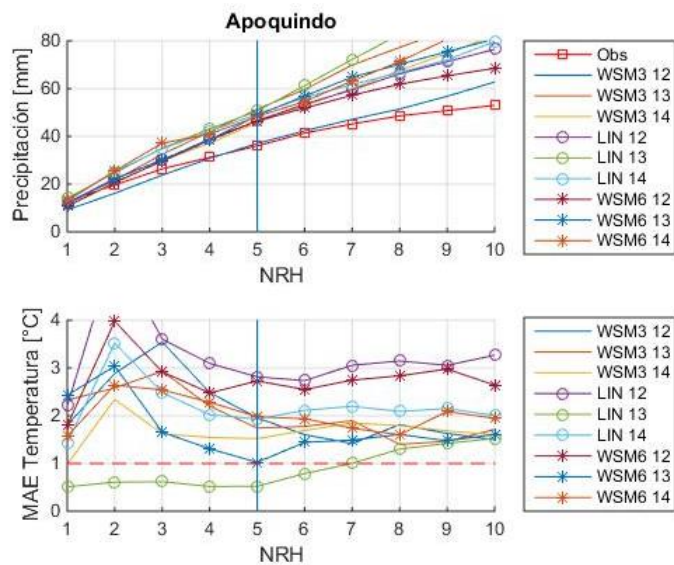


Figura 7. NRH para Apoquindo y MAE de temperatura.

Para la precipitación, los errores son menores al 15%, presentando las simulaciones de WSM6 el menor error porcentual en consideración a los tres *lead times* promediados, lo que lo sitúa, en conjunto con otros estadísticos, y para otras tormentas simuladas (no mostradas aquí), como la mejor opción para el esquema microfísico. Por tanto, simulaciones hidrológicas con estos inputs tendrían correctamente predichas las variables de interés en un sistema de alerta temprana.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la calibración del modelo WRF para pronosticar eventos de precipitación extremas en la región Andina, centrado en la precordillera central, caracterizada por su compleja topografía, la cual va en detrimento del usual buen desempeño del modelo. Para el evento de precipitación analizado, ocurrido en Abril del 2016, el modelo predice el desarrollo temporal con una anticipación de 48 horas, sin importar la parametrización del esquema físico empleado, pero predice con buena precisión las NRH y la temperatura, con énfasis en 5 horas, que corresponde al tiempo de concentración de la Quebrada de Ramón, en Santiago.

Adicionalmente, el ensamble microfísico mostró la mejora que proveyeron las parametrizaciones de LIN y WSM6, aunque no pudieron solucionar la sobrestimación de lluvia, inherente a las condiciones sinópticas complejas y a la topografía. Tampoco se pudo establecer alguna tendencia clara con respecto al *lead time*, pero el esquema WSM6 fue el que mostró mejor desempeño en promedio para las variables meteorológicas de interés. Investigación adicional es requerida para mejorar el pronóstico, el cual puede ser a través de un downscaling estadístico o un enfoque geostadístico que permita salvar las falencias propias del enfoque dinámico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por ND-PUC *Seed Fund*, como también las becas Arturo Cousiño Lyon y Magister Nacional CONICYT. Se agradece también a los proyectos de investigación FONDECYT 1161439, y CEDEUS/FONDAP 15110017 y 15110020, así como el apoyo de la Dirección de Postgrado UC. Y sobre todo, a la SOCHID.

REFERENCIAS

Carvalho, D., Rocha, A., Gomez-Gesteira, M., & Santos, C. (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling & Software*, 33, 23-34.

EM-DAT, 2016. The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), School of Public Health, Université Catholique de Louvain, Belgique.

Ekström, M, 2016. Metrics to identify meaningful downscaling skill in WRF simulations of intense rainfall events, *Environmental Modelling & Software* 79, 267-284.

Evans, J. P., M. Ekstrom, and F. Ji, 2012: Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia. *Climate Dyn.*, 39, 1241–1258.

Dimitrova, R., Silver, Z., Zsedrovits, T., Hocut, C. M., Leo, L. S., Di Sabatino, S., & Fernando, H. J., 2015. Assessment of Planetary Boundary-Layer Schemes in the Weather Research and Forecasting Mesoscale Model Using MATERHORN Field Data. *Boundary-Layer Meteorology*, 1-21.

Katragkou, E., García-Díez, M., Vautard, R., Sobolowski, S., Zanis, P., Alexandri, G., Cardoso, R. M., Colette, A., Fernandez, J., Gobiet, A., Goergen, K., Karacostas, T., Knist, S., Mayer, S., Soares, P. M. M., Pytharoulis, I., Tegoulis, I., Tsikerdekis, A., and Jacob, D., 2015. Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble, *Geosci. Model Dev.*, 8, 603-618, doi:10.5194/gmd-8-603-2015.

Kim, J.-H., D.-B. Shin, and C. Kummerow, 2013: Impacts of a priori databases using six WRF microphysics schemes on passive microwave rainfall retrievals. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30, 2367–2381, doi:10.1175/JTECH-D-12-00261.1.

Peña, H., 2016. Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), LC/L.4169, Santiago de Chile.

Saide, P.E., Carmichael, G.R., Spak, S.N., Gallardo, L., Osses, A.E, Mena-Carrasco, M.A., Pagowski, M., 2011. Forecasting urban PM10 and PM2.5 pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRF–Chem CO tracer model, *Atmospheric Environment*, 45(16), 2769-2780.

Ruiz, J. J., C. Saulo, and J. Nogués-Paegle, 2010: WRF Model sensitivity to choice of parameterization over South America: Validation against surface variables. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 3342–3355, doi:10.1175/2010MWR3358.1.