
Pronóstico de granizadas mediante modelos numéricos regionales en la zona andina: El caso de la tormenta del 3 de noviembre de 2007 sobre Bogotá D.C.

DANIEL PABÓN* Y THORSTEN BEISIEGEL†

**Dep. de Geografía, Univ. Nac. de Colombia*

†Geoentrópica Ltda., Bogotá D.C.

Resumen

Actualmente, la mayoría de los esfuerzos realizados para pronosticar las granizadas se basa en las observaciones por los radares meteorológicos. En regiones para las cuales no se dispone de ese tipo de observaciones, generalmente se asumen las granizadas y sus impactos como fenómenos fortuitos. Por la misma razón, no se toman medidas anticipadas para la mitigación de los daños. El presente artículo demuestra, que mediante un modelo numérico de simulación, apto para el pronóstico del tiempo, las granizadas pueden ser pronosticadas con más de 24 horas de antelación. Como un caso ejemplar, se aplica el modelo WRF para simular la tormenta del 3 de noviembre de 2007, que tuvo lugar sobre la zona urbana de Bogotá D.C. Se realiza un breve estudio de sensibilidad, con el fin de destacar los principales aspectos que se deben tomar en cuenta para representar los principales características de interés de forma realista. Debido al grado de fidelidad logrado, se intenta calificar la influencia de las diferentes condiciones de pequeña y mesoescala en la generación de la tormenta.

1. Introducción

Actualmente los radares meteorológicos son las herramientas más usadas para determinar la probabilidad de una granizada. Esa predicción se puede realizar a partir de que exista la nube. El radar mide la reflectancia de la nube y con base en su crecimiento se puede deducir el crecimiento de la densidad de los hidrometeoros dentro de la nube. La implementación de esta tecnología requiere de una inversión considerable. Como ejemplo se puede presentar la instalación del primer radar meteorológico de Colombia en el Valle de Aburrá con un presupuesto destinado de 3 mil millones de pesos. El alcance de este radar cubre un radio máxi-

mo de 500km alrededor de su ubicación. La antelación con la que se puede indicar alguna probabilidad para la generación de una tormenta depende de la velocidad con la que se desarrolla la nube de tormenta. En el caso de la granizada del 03 de noviembre de 2007, el tiempo de antelación sería entre una y media hora. Desde finales de los años sesenta varios trabajos se han dedicado a la interpretación de las señales del radar para definir los patrones que coinciden con una posterior granizada, (Kennedy Patrick C. (2003), Marwitz John D. (1970)) una investigación que continúa hasta hoy en día (Knight Charles A. (2008)). Paralelamente a la interpretación de las observa-

ciones de los radares, se intentó la simulación de la generación de la granizada mediante modelos (Musil (1970)). Entre estos, un modelo unidimensional, diseñado exclusivamente para la predicción de las granizadas es el llamado HAILCAST (Poolman (1992)). Este modelo requiere como datos de entrada un perfil vertical de la atmósfera proveniente de un radiosondeo o de otro modelo de simulación atmosférica. Desde el año 2003 esta metodología está en uso por el servicio meteorológico de Canadá donde se lograron pronósticos de granizadas útiles con una antelación de 12 horas (Brimelow J. C. (2006), Brimelow J. C. (2009 a)). El mismo modelo ha sido aplicado en Argentina con fines de apoyar las actividades para evitar las granizadas mediante la siembra de nubes en Argentina (Brimelow J. C. (2009 b)). Otros avances se han realizado usando modelos numéricos tridimensionales para el pronóstico del tiempo (Kain J. S. (2006)). Así usando el modelo regional WRF (Skamarock W. C. (2008)) con una alta resolución espacial de 4 kilómetros, se han podido pronosticar tormentas con una antelación de hasta tres días. En Colombia se tiene experiencia en el uso de modelos regionales para el pronóstico del tiempo desde el año 2001. Durante esa época, se dedicaron varios esfuerzos y estudios al pronóstico de la precipitación y fenómenos extremos. Sin embargo la predicción de las granizadas representa un nuevo reto, debido a la complejidad de los procesos involucrados en la generación y disminución del granizo. La mayoría de las teorías sobre la generación de las partículas de granizo coinciden en los siguientes aspectos:

La producción de granizo asume la existencia de graupel en las nubes, también llamado hielo esponjoso. El granizo que precipita es una mezcla de hielo y agua líquida. Su crecimiento en la nube inicia con la coexistencia de unos núcleos de hielo y la de agua líquida superenfriada o vapor de agua. Al rozar el agua líquida o el vapor sobre la superficie del núcleo de hielo, se congela y libera calor latente. Así la superficie de núcleo en crecimiento llega a tener una temperatura entre 0.3 hasta $2,0^{\circ}C$ mayor a la del ambiente (Pruppacher

Hans R. (2000)). Característico para la generación del granizo es, que este aumento de la temperatura genera el descongelamiento parcial del hielo cerca a la superficie del granizo en crecimiento. El agua líquida que se genera, es por gran parte retenida en la superficie del núcleo. Por lo tanto el granizo se produce en una área de la nube con temperaturas entre $0^{\circ}C$ y $-40^{\circ}C$. A temperaturas debajo de $-40^{\circ}C$ se asume que toda agua en forma líquida cambia de fase. La temperatura específica con mayor probabilidad para el crecimiento del granizo depende del contenido de agua líquida del aire ascendente y de la velocidad giratoria del núcleo de hielo entre otras (Pruppacher Hans R. (2000)). La región con mayor probabilidad para el crecimiento del granizo tiene una temperatura alrededor de $-20^{\circ}C$ (C. (1993)). La generación de granizo a bajas temperaturas solamente es posible con un gran contenido de agua líquida en el ambiente. Así que la zona de crecimiento de granizo (ZCG) se relaciona con un cierto rango de temperatura y su extensión dentro de la nube es limitada. Si la fuerza de los vientos ascendentes en la nube se mantiene en equilibrio con la fuerza gravitacional del núcleo creciente de granizo, la partícula se mantiene mas tiempo en la ZCG y la probabilidad para su crecimiento y la posterior granizada aumenta C. (1993). De tal forma la producción de granizo depende de un equilibrio sensible entre el aumento del peso de los núcleos y el crecimiento simultáneo del movimiento vertical en la ZCG. El agua líquida en la superficie del núcleo es repartido por el aire durante su movimiento en la nube y su precipitación, lo que explica la textura liza de las piedras de granizo.

2. La granizada de 03.11.2007 sobre Bogotá

a. Descripción general

La granizada del 3 de noviembre de 2007 era un evento inesperado. El evento ocurrió entre las 13:30 y las 14:15 hora local colombiana (Rodríguez Erasmo A. (2008)). La información sobre la extensión de la granizada se debió recopilar de la prensa local. Con base en la lista de los barrios

más afectados (www.terra.com.co (2007)), el área con mayor intensidad de la granizada se sitúa entre 4°35'00" y 4°40'30" latitud y entre 74° 05'30" y 74° 05'00" longitud oeste. Según cálculos realizados por el IDEAM, se estima que durante una hora y media cayeron entre 50 y 70 mm de precipitación, según el sector de la ciudad www.eltiempo.com (2007). El mismo instituto afirma que se trató de la mayor granizada registrada en el centro de Colombia desde 1967 ecohuellas.wordpress.com (2007). Hay razón para cuestionar las mediciones de la cantidad precipitada, debido a, como lo explica Rodríguez et al. (Rodríguez Erasmo A. (2008)), los pluviómetros y pluviógrafos usualmente están diseñados para medir agua líquida y no granizo. Como resultado de la granizada, se reportaron 70 vehículos afectados, de estos 30 resultaron enterados por la masa de granizo. Los daños en las residencias se compusieron principalmente por daños en los techos y sótanos inundados. El evento llamado "Rock al Parque" ha sido suspendido por ese día. Otros impactos han sido cortes de electricidad en 25 barrios de la ciudad www.caracol.com.co (2007), trancones de vehículos www.eltiempo.com (2007). Aproximadamente 40 personas se vieron afectadas por hipotermia y otros por heridas en la cabeza ecohuellas.wordpress.com (2007). Varias viviendas tenían que ser evacuadas entre esos ancianos y hogares de niños. Según un reporte publicado el día 04 de noviembre de 2007, el costo de los daños se estimó en 16.000 millones de pesos.

b. Aspectos de la climatología regional

La ciudad de Bogotá D.C. está situada alrededor de una altitud de 2600 metros y la extensión de la zona urbana es de $4,305\text{km}^2$. La cordillera que limita a la ciudad en el oriente llega a alturas entre 3000 y 4000 metros. Al occidente una pendiente desciende al valle del Río Magdalena, y llega a una altitud entre 250 y 200 metros. En acuerdo a la latitud, las épocas lluviosas ocurren alrededor de los meses abril y octubre, cuando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) pasa sobre Bogotá. Los vientos Alisio tiene presencia durante casi to-

do el año y pasan por encima de la cordillera oriental a una altitud de aproximadamente 3000 metros. La variabilidad climática refuerza la precipitación en épocas de La Niña. Durante esa fase los vientos Alisio aumentan y la ZCIT generalmente se encuentra bien desarrollada.

En la escala diurna, las fuertes precipitaciones se presentan, cuando el aire asciende desde el valle del Magdalena por la pendiente de la cordillera al oeste de Bogotá. Cuando este viento llega a la Sabana de Bogotá se hace notar como viento en superficie del occidente. En este caso, se puede notar un cambio de dirección del viento de este a oeste, que ocurre mayormente en horas del medio día Montoya G. de J. (2000). El aire que llega del Río Magdalena lleva gran cantidad de humedad, que al subir por la cordillera llega cerca a la saturación. El día de la granizada, el aeropuerto Eldorado, al oeste del centro urbano, reportó una humedad relativa de 82 % media hora antes de que inició la granizada en el centro de la ciudad y 94 % una hora después. Cuando este aire húmedo llega a las montañas al borde oriental de la ciudad, se somete al ascenso forzado y se mezcla con los vientos Alisio. Bajo estas condiciones, se puede generar una fuerte turbulencia Montoya G. de J. (2004). Se sospecha que la zona urbana, como isla de calor, tiene un efecto a favor de la actividad convectiva. Sin embargo esa hipótesis no se ha podido comprobar y será analizada en el marco de este trabajo.

c. Situación sinóptica del día 03.11.2007

La influencia desde el océano pacífico, estaba predominada por la fase de la Niña. En el momento de la tormenta esta oscilación estuvo en su fase inicial y tuvo su máxima durante los meses de enero y febrero del año 2008. Según los índices ONI NOAA (2011a) y MEI NOAA (2011b) la fase de la Niña que tuvo inicio en el 2008 ha sido de intensidad moderada en comparación a otros años. Los principales efectos de este evento para la zona andina son la intensificación de los vientos alisios y como consecuencia la intensificación de la actividad convectiva en el área de la Zona de Convección

Intertropical (ZCIT). La ZCIT en el momento de la tormenta estaba situada sobre

d. Observaciones in situ y desarrollos de escala local

En seguida se presentan las condiciones durante las horas antes de la tormenta. Desde las 8 de la mañana hasta las 15:00 hora local, el viento en superficie predominó desde el oeste según los reportes horarios del aeropuerto Eldorado. A las 7 de la mañana se presentó neblina al oeste del centro urbano. hasta las 10 a.m. la humedad bajó a 64% y media hora antes de la subió nuevamente a 78%. El radiosondeo que se realiza entre las 6 y 8 de la mañana para las 12 UTC, muestra una atmósfera estable. Así el índice LIFT de 2.53 indica estabilidad y tormenta improbable. La energía potencial convectiva estaba en cero y el agua precipitable diagnosticada era de apenas 18.97mm. La temperatura de disparo a la hora del radiosondeo es de aproximadamente 19°C y el nivel de condensación está a una altura aproximada de 600 metros. Antes y durante la tormenta la nubosidad máxima reportada es de 4 octas, lo que indica que era un fenómeno bien localizado. A partir de las 13:00 se observan las primeras nubes de desarrollo vertical, tipo torrecúmulus. La temperatura máxima coincide con la presencia de la primera observación de nubes de tormenta. Las observaciones del aeropuerto Eldorado reportan 19°C para las 13:00 hora local. El artículo realizado sobre la granizada con base en las observaciones hidrometeorológicas realizadas en la ciudad universitaria Rodríguez Erasmo A. (2008) reporta temperaturas de hasta 23°C medidas al medio día. Con base en las observaciones se puede concluir que las condiciones in situ durante la mañana no dejan deducir la tormenta. A la vez dan lugar a la pregunta, que si la tormenta no se hubiera formado sin la advección de humedad desde el oeste.

3. Las configuraciones del prueba

Las simulaciones se realizaron con la versión 3.1 del modelo "Weather Research and Forecast", WRF desarrollado por el Centro Nacional de In-

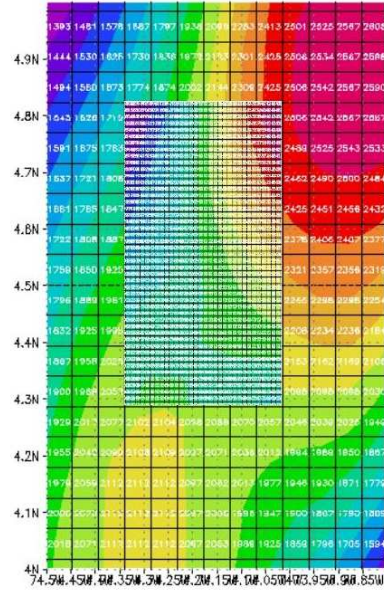


FIG. 1. dominios de 6km y 1.2km de resolución sobre Bogotá

vestigaciones atmosféricas, NCAR. Esa versión es capaz de cuantificar la parte congelada de la precipitación. Esa nueva funcionalidad ha sido la base de nuestra investigación. Para las condiciones atmosféricas iniciales y de frontera se sirvió del proyecto de reanálisis del NCAR/NCEP ?. Estos datos se ofrecen con una resolución horizontal de 2.5 grados, divididos en intervalos de 6 horas. Para el trabajo de investigación se emplearon 4 grillas con sus respectivos parámetros de 54, 18, 6 y 1.2 kilómetros. Cada una de las últimas tres grillas está insertada en la siguiente grilla mas grande y de menor resolución.

La grilla de 1.2 km de resolución se centró sobre el área urbana de Bogotá con una extensión de oeste a este de 246 kilómetros y 258 kilómetros de sur a norte. Para todas las grillas, la retroalimentación por la grilla insertada estaba habilitada. Durante las pruebas de sensibilidad a la resolución, se realizaron también simulaciones con solamente las tres grillas mas grandes. El modelo tiene 27 niveles hasta 50mb. Con el fin de usar los datos de uso de suelo proveniente del proyecto MODIS

NASA (2011), se empleó en todas las pruebas el esquema de superficie "NOAH" ?. Las grillas de 54 y 18 kilómetros de resolución, llevan un esquema de convección de cúmulus, mientras para las resoluciones mayores solamente se aplicaron esquemas de microfísica para la simulación de las nubes y de la precipitación. Para la cuarta grilla se probaron dos esquemas de microfísica diferentes, el esquema llamado WSM6 ? y el esquema de Thompson ?. Ambos esquemas representan los hidrometeoros de agua líquida, nieve, graupel, y hielo. Para los demás parámetros se asumió la configuración de una versión operacional de pronóstico del modelo, optimizada durante años para el pronóstico diario de las condiciones atmosféricas sobre el territorio colombiano. El código del modelo se amplió con códigos propios, el cual habilita el cálculo de algunos índices de tormenta como el CAPE, Showalter y el índice LIFT, entre otros.

4. Análisis de Sensibilidad

a. Procedimiento

El objetivo principal del presente trabajo es el de poner a prueba la habilidad de un modelo numérico regional de predecir una granizada severa. Una vez el modelo logró una descripción realista de las condiciones atmosféricas de la tormenta, el siguiente objetivo era encontrar los aspectos principales en la configuración y construcción del modelo que son fundamentales para lograr el resultado esperado. Especial atención se prestó a la representación fiel de los procesos locales. Entre estos está el efecto urbano, la convección orográfica y el ciclo diurno de la dinámica regional. Recientemente el modelo WRF ha sido usado para predecir fenómenos atmosféricos severos en regiones tropicales con resultados alentadores (Rajeevan M. (2010)). Se compararon siete configuraciones diferentes, con diferentes resoluciones horizontales, dos esquemas de microfísica, datos de uso de suelo de diferentes fuentes y una prueba asumiendo que no existiera la zona urbana de Bogotá. Como resultado de estas pruebas se logró la simulación de la granizada cuyo resultado

presentó la tormenta y la ubicación de la precipitación con buena precisión.

b. El resultado optimizado

El mejor resultado se logró con una resolución de 1.2 kilómetros. Con ese detalle, la inclusión de un esquema sofisticado de microfísica como el de Thompson era factible. En comparación a los demás esquemas de microfísica que ofrece la versión 3.1, el esquema de Thompson cuantifica la presencia de núcleos de congelación y resuelve el ajuste entre el calor latente y la cantidad de agua condensada o congelada de forma iterativa. Los datos de uso de suelo provienen del proyecto MODIS. La comparación con los radiosondeos realizados para las 12 UTC (7:00 hora local) el día de la tormenta y el siguiente día, sugieren que el modelo con esa configuración, simula los principales aspectos que llevaron a los cambios de estabilidad atmosférica, antes y durante la tormenta.

El resultado final muestra el granizo precipitado como la fracción congelada de la precipitación caída entre las 15:00 y 16:00 hora local (20:00 y 21:00 hora UTC). La ubicación del área cubierta por el granizo, corresponde a la zona central de Bogotá D.C. Como es de notar, el modelo presenta la granizada con aproximadamente 2 horas de retraso. Este retraso parece ser típico para el pronóstico de la precipitación producida por convección térmica, como lo ha mostrado la experiencia con este modelo durante el pronóstico operacional. La supresión de este desfase será tema de los siguientes estudios. El modelo reconstruye la nube de tormenta de forma localizada como se muestra en la gráfica 5. La distribución vertical del contenido de graupel deja reconocer la forma de una nube tipo cúmulonimbus. El modelo muestra la nube de tormenta en su mayor grado de desarrollo para las 16:00 hora local. Las figuras 6 y 7 comparan las series de tiempo observadas y simuladas en superficie para la ubicación de la estación de medición en el aeropuerto Eldorado. El aeropuerto se encuentra aproximadamente a 10 kilómetros de las zonas donde inició la graniza-

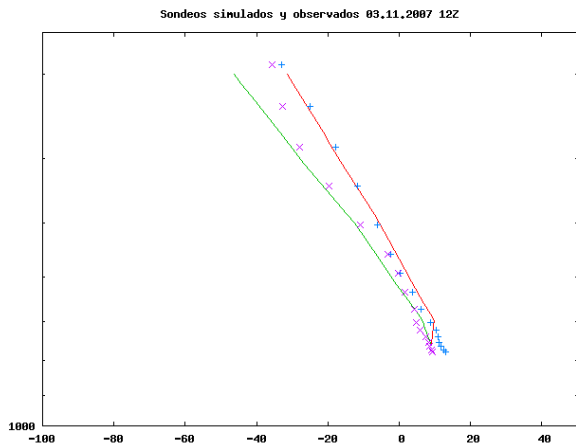


FIG. 2. Radiosondeo de la temperatura (\circ) y del punto de rocío (\circ) medido (puntos) y simulado (línea) para las 12 UTC del día 03 de noviembre de 2007

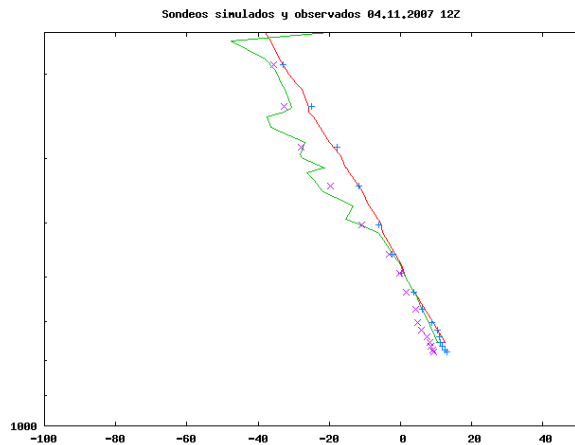


FIG. 3. Radiosondeo de la temperatura (\circ) y del punto de rocío (\circ) medido (puntos) y simulado (línea) para las 12 UTC del día 04 de noviembre de 2007

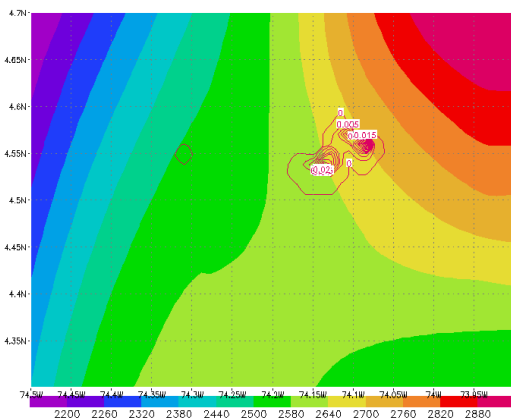


FIG. 4. Ubicación de la precipitación de granizo pronosticada sobre el centro de Bogotá para las 16:00 hora local

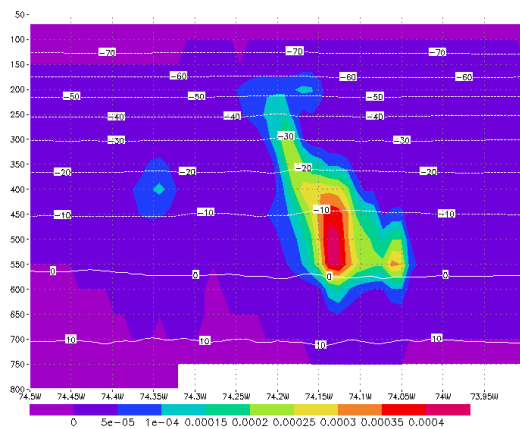


FIG. 5. Corte oeste-este (latitud=4.6) de la distribución de la razón de mezcla de graupel (kg/kg) en la nube de tormenta y estratificación de la temperatura (\circ C)

da. En ambas gráficas es notable el aumento de la humedad relativa a partir de las 16:00Z, más de dos horas antes del inicio de la tormenta. La observación y la simulación muestran la existencia de un flujo desde el noroccidente entre las 8:00 y las 14:00 hora local. En las series de tiempo simuladas se nota que el crecimiento de la humedad relativa está interrumpido por el aumento de temperatura a las 19:00UTC. El posterior curso de la curva

muestra el patrón de la observación con un retraso de aproximadamente dos horas. Para la hora 19:00UTC, la tormenta estaba en plena actividad mientras el modelo la presenta para las 21:00. Es de notar que coinciden los valores de la humedad relativa para el momento del inicio de la granizada observado y simulado.

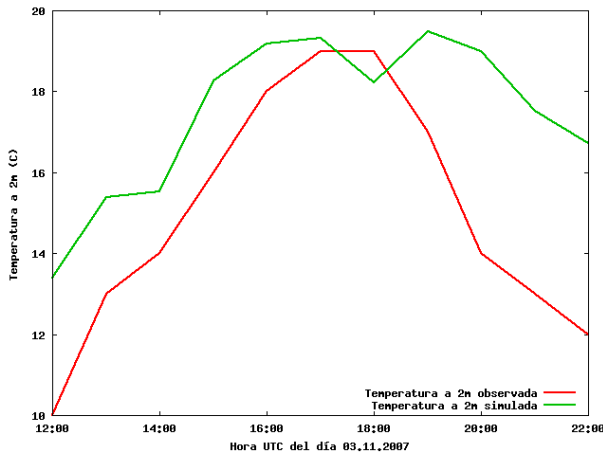


FIG. 6. Temperatura a 2m en el aeropuerto Eldorado, observada (rojo) y pronosticada (verde)

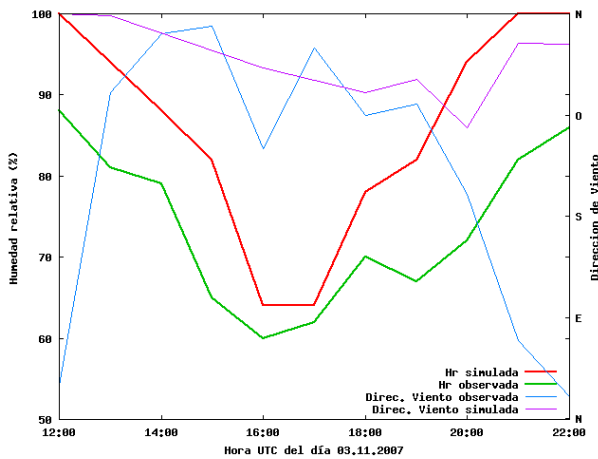


FIG. 7. Humedad relativa a 2m en el aeropuerto Eldorado, observada (rojo) y pronosticada (verde)

Resolución horizontal

Incluyendo una cuarta grilla con una resolución horizontal de 1.2 kilómetros en combinación con el esquema de microfísica WSM6, cambió el resultado solamente ligeramente. Con el uso de un esquema de microfísica más detallado, el aumento de la resolución llevó a una mejor representación de la granizada. Sin embargo es de notar que a una resolución de 6 kilómetros, la ubicación y la hora de la granizada coinciden con las del mejor resultado obtenido. El principal beneficio del aumento de la resolución, era el de poder aplicar el esquema de Thompson.

Microfísica

La producción del granizo conciste en procesos microfísicos. Por lo tanto las parametrizaciones de la microfísica deberían tener un impacto considerable sobre la predicción de la granizada (Rajeevan M. (2010)). Como la precipitación de granizo presupone la existencia de graupel en la nube, se prestó especial atención a representar la producción y la interacción de graupel en detalle. Para este fin, de la versión 3.1 del modelo WRF, dos esquemas han sido seleccionados para realizar las pruebas, el esquema WSM6 y el esquema Thompson. Como mencionado, ambos representan los hidrometeoros de agua líquida, nieve, graupel, y hielo. entre estos dos esquemas, el de Thompson es el mas detallado, debido a que realiza el ajuste de la condensación y congelación mediante iteración y cuantifica la presencia de nucleos de hielo. El esquema de Thompson mejoró el resultado solamente en combinación con una resolución debajo de 2 kilómetros. A la vez parece que este esquema no es apto para resoluciones menores.

c. Datos de Uso de Suelo

En varios estudios se destaca la importancia de los datos iniciales para el resultado generado por un modelo de simulación. Recientemente Kumar et al. (A. Kumar (2010)) investigaron los cambios generados por el uso de los datos de uso de suelo MODIS, entre otros como Tuleya (Tuleya (1994)) o Bolasina et al. (Bollasina M. (2010)). Durante las pruebas se compararon los datos de uso de suelo de dos fuentes diferentes, la del servicio geológico de los Estados Unidos, USGS (?) y del proyecto MODIS (Friedl M.A. (2002)). Los datos del USGS se publicaron por primera vez en el año 1993 y cuentan con 24 categorías de uso de suelo y han sido generados con el sensor AVHRR, también llamado "Imager", instalado en el satélite GOES. Los datos de MODIS han sido producido con el sensor del mismo nombre, ubicado en dos satelites polares, cuentan con 20 categorías y se publicaron

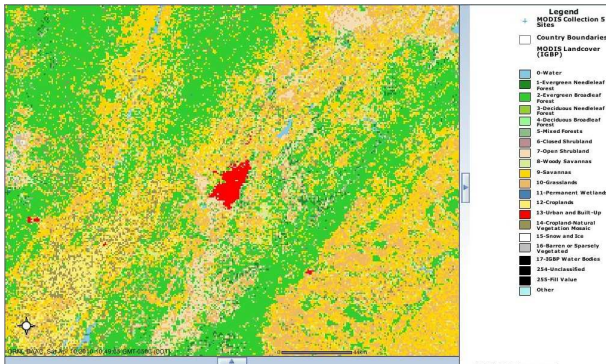


FIG. 8. Clasificación espacial del uso de suelo según el proyecto MODIS para la zona urbana de Bogotá (rojo) y sus alrededores, generado con ORNL DAAC WebGIS (ORNL-DAAC (2009))

en el año 2001. Un hecho notable de este trabajo es, que en ninguna prueba que empleó los datos del USGS, se obtuvieron resultados que presentaron alguna granizada sobre la zona urbana de Bogotá. Eso parece ser relacionado con la mayor fiabilidad de los datos MODIS. Una revisión parcial de los mapas de uso de suelo representado por la grilla de 6 kilómetros de resolución evidencia las fallas de los datos USGS. Al contrario, los datos MODIS ubican todas las mayores áreas urbanas de Colombia en su sitio real e incluso representan los picos de los nevados con la categoría de nieve como se puede observar en la figura 8.

d. El efecto urbano

With grid points of urban land use in the 6km domain and grid points in the 1.2km domain the Modis data describes the actual extension of the metropoli quite precisely. In order to test the urban effect on the hailstorm occurrence, those grid points were changed to grassland. No urban effect visible not in the humidity balance nor albedo. As a result, no notable change in the hailstorm were simulated. For both resolutions (6km and 1.2km) location and intensity of the hail precipitation kept the same within a tolerance of ... %. Only the results for the 1.2km domain are presented.

5. Conclusiones

Se aplicó el modelo WRF en su versión 3.1 al pronóstico de una granizada severa sobre una zona urbana en la zona andina de Colombia. El modelo anteriormente ha sido usado y ajustado para el pronóstico operacional sobre el territorio colombiano. Extendiendo el ajuste del modelo a este evento extremo, se estudio la habilidad del modelo de reconstruir procesos tan complejos como los que definen la ocurrencia y ubicación espacial y temporal de una granizada. Como resultado se llega a la conclusión, que un evento como la granizada del 03. de noviembre de 2007 es pronosticable mediante el uso de un modelo numérico con una antelación mayor a 24 horas. Se simuló la ubicación espacial de la región de mayor actividad de la granizada dentro del a'rea de las zonas mas afectadas de la metrópoli. Se pronostico la hora del evento con un error de dos horas. Mediante el estudio de sensibilidad se destacaron las condiciones fundamentales para lograr el resultado. La disponibilidad de datos de uso de suelo de alta fidelidad, ha sido una condición fundamental para el pronóstico de este evento. el uso de suelo alrededor de la zona urbana Parece tener una alta influencia sobre las condiciones atmosféricas sobre la ciudad. El remplazo de la zona urbana por una capa vegetal, no generó cambios notables en el resultado del pronóstico. Se supone que este hecho se relaciona con la importancia de la advección de humedad para la creación del evento. Tanto las observaciones como el modelo muestran la advección de humedad desde el oeste y el aumento de la humedad relativa durante pocas horas antes de la tormenta. Con base en las pruebas con diferentes resoluciones espaciales, se estima que con una distancia entre puntos de grilla de 6 kilómetros ya se pudo predecir el fenómeno. El trabajo evidencia la importancia de los datos de entrada para el pronóstico preciso de un evento tan localizado como fue la granizada del 03 de noviembre de 2007. Con base en este trabajo, nuestros siguientes estudios se enfocarán en la influencia de la inicial-

ización del pronóstico con datos de observación y el uso de datos topográficos validados para el territorio colombiano.

Referencias

- A. Kumar, e. a., 2010: Assessing impacts of integrating modis vegetation data in weather research forecasting (wrf)/noah coupled model, 14th symposium on integrated observing and assimilation systems for the atmosphere, oceans, and land surface (ioas-aols).
- Bollasina M., S.Ñ., 2010: Modeling of regional hydroclimate change over the indian subcontinent: Impact of the expanding thar desert. *por ser publicado en J. Climate*.
- Brimelow J. C., e. a., 2006: Spatial forecasts of maximum hail size using prognostic model soundings and hailcast. *Wea. Forecasting*, **21**, 206–219.
- Brimelow J. C., G. W. R., Julian C., 2009 a: Explicit forecasts of hail occurrence and expected hail size using the gemhailcast system with a rainfall filter. *Wea. Forecasting*, **24**, 935–945.
- Brimelow J. C., G. W. R., Terry W. Krauss, 2009 b: Application of a one-dimensional cloud and hail model to forecast maximum haistone diameter for mendoza, argentina. *Wea. Forecasting*, **24**, 935–945.
- C., Y. K., 1993: *Microphysical processes in clouds*, chap. 12, The formation and modification of hail. Oxford University Press.
- ecohuellas.wordpress.com, 2007: Granizada histórica en bogotá: Continúan estragos. <http://ecohuellas.wordpress.com/2007/11/05/granizada-historica-en-bogota-continuan-estragos>.
- Friedl M.A., e. a., 2002: Global land cover mapping from modis: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 287–302.
- Kain J. S., e. a., 2006: Examination of convection-allowing configurations of the wrf model for the prediction of severe convective weather: The spc/nssl spring program 2004. *Wea. Forecasting*, **21**, 167–181.
- Kennedy Patrick C., A. G. D., 2003: A case study of the origin of hail in a multicell thunderstorm using in situ aircraft and polarimetric radar data. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1679–1690.
- Knight Charles A., T. W. S., Paul T. Schlatter, 2008: An unusual hailstorm on 24 june 2006 in boulder, colorado. part i: Mesoscale settings and radar features. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2814–2832.
- Marwitz John D., E. X. B., 1970: The weak echo region and updrafts of a severe hailstorm. preprints of papers, fourteenth radar meteor. conf. Amer. Meteor. Soc., 43–47.
- Montoya G. de J., J. A. E., 2000: Análisis de las condiciones atmosféricas que favorecen el desarrollo de las tormentas eléctricas en la sabana de bogotá. *Meteorología Colombiana*, **1**, 1 – 12.
- Montoya G. de J., W. C., J. A. Eslava, 2004: Características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en bogotá. *Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, **28**, 327 – 335.
- Musil, D. J., 1970: Computer modeling of hailstone growth in feeder clouds. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 474–482.
- NASA, 2011: Modis website. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- NOAA, 2011a: Cold and warm episodes by season. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.
- NOAA, 2011b: Multivariate enso index (mei). <http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/>
- ORNL-DAAC, 2009: Webgis. <http://daac.ornl.gov/mapservers.shtml>.

- Poolman, E. R., 1992: Die voorspelling van haelkorelgroei in suid-afrika (the forecasting of hail growth in south africa).
- Pruppacher Hans R., J. D., 2000: *Microphysics of Clouds and Precipitation*, chap. 16, Growth of ice particles by accretion and ice particle melting. Kluwer Academic Publishers.
- Rajeevan M., e. a., 2010: Sensitivity of wrf cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over southeast india. *Ann. Geophys.*, **28**, 603–619.
- Rodríguez Erasmo A., L. A. C. B., 2008: Análisis hidrometeorológico granizada sobre el campus de la universidad nacional bogotá, xviii seminario nacional de hidráulica e hidrología de la sociedad colombiana de ingenieros.
- Skamarock W. C., e. a., 2008: A description of the advanced research wrf version 3. *NCAR Technical Note*, **NCAR/TN475+STR**.
- Tuleya, R. E., 1994: Tropical storm development and decay: Sensitivity to surface boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 291–304.
- www.caracol.com.co, 2007: El ideam no descarta nueva granizada en bogotá, aunque no puede predecirla. <http://www.caracol.com.co/nota.aspx?id=502321>.
- www.eltiempo.com, 2007: Cerca de 70 vehuclos resultaron afectados con granizada del sábado en bogotá. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3801405>.
- www.terra.com.co, 2007: Histórica granizada en bogotá. <http://www.terra.com.co/noticia.html>.