

ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA EN UN CICLÓN SUBTROPICAL MEDIANTE EL MODELO WRF: USO DE DIFERENTES PARAMETRIZACIONES

Lara Quitián Hernández ¹, S. Fernández González ², Juan Jesús González Aleman ³, Francisco Valero ¹ y María Luisa Martín ⁴

⁽¹⁾ Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica. Facultad de Física. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid. Spain. <mailto:lquitian@ucm.es>

⁽²⁾ Agencia Estatal de Meteorología. Leonardo Prieto Castro, 8. 28040 Madrid. Spain. <mailto:sfernandezg@aemet.es>

⁽³⁾ Instituto de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. Carlos III 14 s/n. 45071 Toledo. Spain. <mailto:juanjesus.gonzalez@uclm.es>

⁽⁴⁾ Dpto. Matemática Aplicada. E. de Ingeniería Informática. Universidad de Valladolid. Pza. de la Universidad, 1. 40005 Segovia. Spain. <mailto:mlmartin@eii.uva.es>

Resumen

Debido a la compleja dinámica y rápida intensificación de los ciclones subtropicales (STCs), estos sistemas siguen siendo un fenómeno de interés, además, de constituir un reto su predicción. Es por ello, que resulta conveniente conocer y analizar los esquemas de parametrización que mejor simulan este tipo de fenómenos. En este trabajo se realizan diversas simulaciones usando el modelo numérico WRF con el fin de llevar a cabo un análisis de la temperatura en el ciclón a distintos niveles atmosféricos a partir de diferentes combinaciones de parametrizaciones. Estos sistemas se caracterizan por poseer una estructura térmica híbrida, por lo que este estudio se lleva a cabo durante el desarrollo e intensificación del sistema. De esta forma, se pretende analizar la evolución de la estructura térmica del sistema desde que comienza siendo un ciclón extratropical hasta que adquiere características subtropicales. Así mismo, dicho análisis se desarrolla tanto desde un punto de vista determinista como probabilista. De este modo, se pretende obtener mayor información sobre estos fenómenos extremos con el fin de poder mejorar su simulación y, con ello, conseguir realizar predicciones más precisas en un futuro. Finalmente, se exponen, para los diferentes niveles atmosféricos, las combinaciones de parametrizaciones que mejor simulan la temperatura para este tipo de fenómenos.

Introducción

La formación, desarrollo, madurez y decadencia (conocida como ciclogénesis) de los diferentes tipos de ciclones se ha estudiado durante décadas, lo que da pie a poder distinguirlos según su estructura térmica y dinámica en la troposfera. Atendiendo a los extremos, se distinguen entre los ciclones de núcleo frío (como, por ejemplo, lo es la típica borrasca extratropical) los cuales crecen por inestabilidad baroclina que exige que existan gradientes de temperatura horizontal (es decir, baroclinicidad) y cizalladura vertical y los ciclones de núcleo cálido (como son, por ejemplo, los huracanes o tormentas tropicales) los cuales se desarrollan en entornos barotrópicos sin importantes gradientes de temperatura horizontal, con baja cizalladura vertical y dependen en mayor medida de los flujos de calor latente y sensible del océano (Evans and Guishard, 2009; Bentley et al., 2016).

Los STCs, sin embargo, son sistemas de baja presión con características tanto tropicales como extratropicales, presentando así una estructura híbrida con anomalías térmicas frías en la alta troposfera y cálidas en la baja troposfera (así como una estructura y energética mezclada). Suelen desarrollarse en ambientes con bajos gradientes de temperatura horizontal en niveles bajos junto con procesos diabáticos (referido al calor latente liberado por condensación: el sistema intercambia calor con el entorno).

Situación sinóptica

Aunque este ciclón ya ha sido analizado desde un punto de vista sinóptico y mesoescalar en estudios anteriores (Qutián-Hernández, L., et al., 2016), con el propósito de dar una visión sobre el ambiente en el que se desarrolló el fenómeno, se describe brevemente su evolución sinóptica (Figura 1). Como se puede apreciar en la Figura 1a,b, se representa la altura geopotencial (contornos) y temperatura (sombreado) a 500 hPa para los días 19 y 20 de octubre a las 06 UTC, respectivamente. Por otro lado, la Figura 1c,d representa la presión a nivel de superficie (sombreado) para los mismos días y horas.

Como se puede observar, la circulación atmosférica para el día 19 sobre el Atlántico Norte oriental (ENA) fue altamente meridional caracterizándose por una notable ondulación en el campo de geopotencial asociada con una onda de Rossby de amplitud significativa (Figura 1a). La permanencia de esta vaguada favoreció la formación de un ciclón extratropical débil al W de las islas Canarias (Figura 1c).

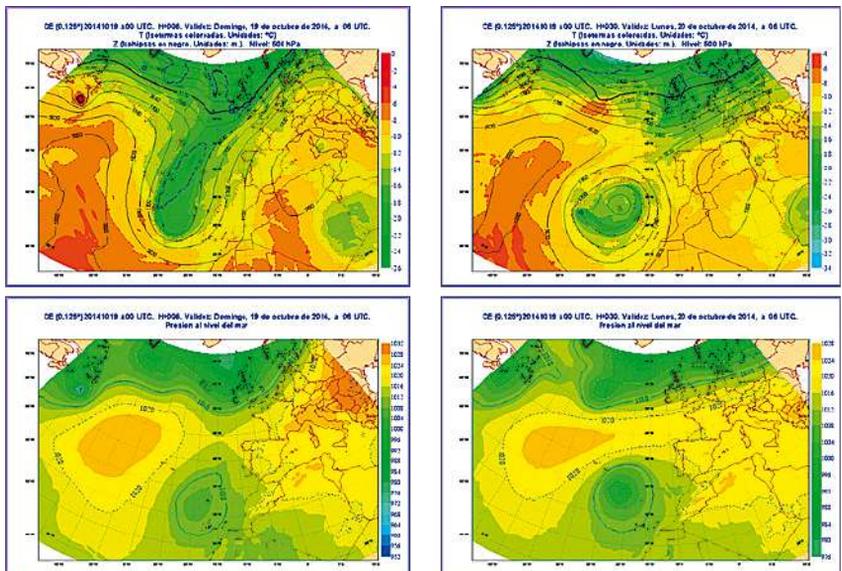


Figura 1: Altura geopotencial (m; contornos) y temperatura (°C; sombreado) a 500hPa para el día a) 19 de octubre a las 06 UTC y b) 20 de octubre a las 06 UTC. Presión a nivel del mar (hPa; sombreado) para el día c) 19 de octubre a las 06 UTC y d) 20 de octubre a las 06 UTC.

Posteriormente el día 20, el ciclón dejó de estar sostenido por procesos quasi-geostróficos (QG) y comenzó a estar gobernado por procesos diabáticos propios de los STC. La vaguada se separó de la circulación zonal y se convirtió en una baja aislada (Figura 1b) que se reflejó en superficie (Figura 1d). Tras el aislamiento se produce la oclusión y paralización del ciclón. Sin embargo, no se produce el típico proceso de los ciclones extratropicales sino que se observa una profundización de forma rápida (de 1008 a 996 aprox., 12 hPa en 24 h) tal vez debido al calor latente liberado.

Metodología

Atendiendo a la metodología utilizada para la realización de este estudio, cabe destacar que las simulaciones se han llevado a cabo en dos dominios anidados (Figura 2), con una resolución de 27 km de resolución horizontal el dominio de mayor tamaño (D1) y de 9 km el de menor tamaño (D2). Además, este último se ha ido moviendo con la trayectoria del ciclón con el fin de analizar su centro con mayor precisión. De esta forma, el ciclón siempre está bien cubierto por el dominio externo y analizado en profundidad en el dominio interno. Por otro lado, ambos dominios están definidos con 36 niveles verticales sigma.

El período de integración utilizado en la simulación del modelo comienza el 18 de octubre de 2014 a las 1200 UTC y comprende hasta el 23 de octubre de 2014 a las 0000 UTC. Este período abarca con suficiente margen las diferentes etapas de formación, desarrollo y disipación del STC.

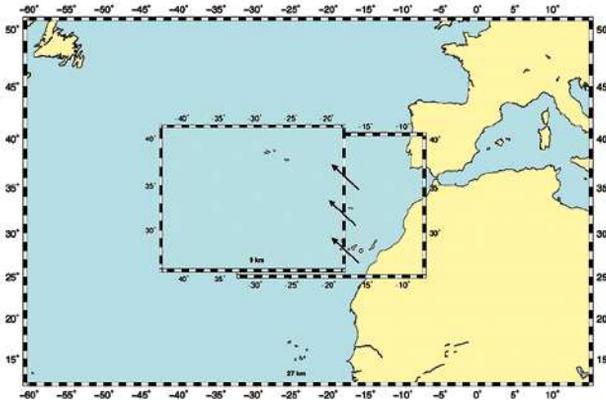


Figura 2: Dominios del modelo utilizados en este estudio. El dominio de menor tamaño y mayor resolución (9 km) muestra mediante flechas el movimiento aproximado que ha llevado a cabo en relación a la trayectoria del ciclón.

La Figura 3 muestra el diseño experimental utilizado en este trabajo, el cual consiste en un ensemble multifísico de diferentes esquemas de parametrización. De esta manera, se pretende mejorar la simulación del ciclón de estudio y obtener más información acerca de la mejor combinación de parametrizaciones a la hora de simular y predecir un fenómeno de estas características.

Así, se han definido 18 simulaciones (o experimentos) diferentes usando una combinación de 3 esquemas de parametrización de microfísica [WRF Single-Moment 5-class scheme (WSM5) (Hong et al., 2004), WRF Single-Moment 6-class scheme (WSM6) (Hong

and Lim, 2006) y Thompson (Thompson et al., 2008)], 2 esquemas de radiación de onda larga [Dudhia (Dudhia, 1989) y Rapid Radiation Transfer Model (RRTMG) (Iacono et al., 2008)] y dos de onda corta [Rapid Radiation Transfer Model (RRTM) (Mlawer et al., 1997) y RRTMG (Iacono et al., 2008)], y 3 esquemas de parametrización de cúmulos [KF (Kain,2004), Tiedtke (Tiedtke, 1989; Zhang et al., 2011) y antiguo KF (Kain and Fritsch, 1990)].

	Microphysics	Long-wave radiation	Short-wave radiation	Cumulus	Experiment
WSM5-Dudhia-KF	WSM5	RRTM	Dudhia	Kain-Fritsch	411
WSM5-Dudhia-Tiedtke	WSM5	RRTM	Dudhia	Tiedtke	416
WSM5-Dudhia-OldKF	WSM5	RRTM	Dudhia	Old Kain-Fritsch	419
WSM5-RRTMG-KF	WSM5	RRTMG	RRTMG	Kain-Fritsch	441
WSM5-RRTMG-Tiedtke	WSM5	RRTMG	RRTMG	Tiedtke	446
WSM5-RRTMG-OldKF	WSM5	RRTMG	RRTMG	Old Kain-Fritsch	449
WSM6-Dudhia-KF	WSM6	RRTM	Dudhia	Kain-Fritsch	611
WSM6-Dudhia-Tiedtke	WSM6	RRTM	Dudhia	Tiedtke	616
WSM6-Dudhia-OldKF	WSM6	RRTM	Dudhia	Old Kain-Fritsch	619
WSM6-RRTMG-KF	WSM6	RRTMG	RRTMG	Kain-Fritsch	641
WSM6-RRTMG-Tiedtke	WSM6	RRTMG	RRTMG	Tiedtke	646
WSM6-RRTMG-OldKF	WSM6	RRTMG	RRTMG	Old Kain-Fritsch	649
Thompson-Dudhia-KF	Thompson	RRTM	Dudhia	Kain-Fritsch	811
Thompson-Dudhia-Tiedtke	Thompson	RRTM	Dudhia	Tiedtke	816
Thompson-Dudhia-OldKF	Thompson	RRTM	Dudhia	Old Kain-Fritsch	819
Thompson-RRTMG-KF	Thompson	RRTMG	RRTMG	Kain-Fritsch	841
Thompson-RRTMG-Tiedtke	Thompson	RRTMG	RRTMG	Tiedtke	846
Thompson-RRTMG-OldKF	Thompson	RRTMG	RRTMG	Old Kain-Fritsch	849

¹Each experiment number is equivalent to WRF parameterization

Figura 3. Diseño experimental utilizado en este estudio.

Con el fin de validar las simulaciones, la base de datos de análisis obtenida del ECMWF se utiliza como datos observacionales. Esta base de datos está generada con una resolución espacial de 0,25° y 91 niveles atmosféricos.

La precisión del modelo a la hora de simular la temperatura del STC se analiza llevando a cabo un análisis de sensibilidad en el dominio interno de mayor resolución. Para ello, se ha definido una ventana de 500 km centrada en el ciclón y que se va moviendo con él, tanto para las simulaciones como para el análisis.

La habilidad del modelo WRF ha sido evaluada por medio de diferentes índices estadísticos, tales como el coeficiente de correlación (COR), el bias, el error relativo medio (MRE), el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE). Estos índices aportan diferente información acerca de la fiabilidad del modelo.

Con el fin de establecer una clasificación en términos de combinaciones físicas que muestren mejores y peores resultados estadísticos, se realiza un ranking de experimentos (en orden ascendente). En consecuencia, se utiliza un índice al que se denomina INDEX, teniendo en cuenta el promedio de la COR, bias y MRE, similar al definido por García-Ortega et al. (2017). Se ha calculado de tal forma que los resultados que estén más cerca de cero indiquen la mejor combinación de configuraciones. Además, este mismo INDEX se ha calculado a partir de un enfoque probabilístico. De esta forma, se ha obtenido información más completa acerca de las simulaciones.

Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad para la temperatura realizado mediante un enfoque probabilístico (Tabla 1), ya que fue mediante este enfoque con el que se obtuvieron mejores resultados (no se muestra). Esto verifica la necesidad del uso de ensembles a la hora de realizar simulaciones y predicciones de los diferentes fenómenos atmosféricos, ya que de esta forma es posible obtener una mayor información acerca de la incertidumbre del modelo (Toth et al., 1997; Toth, 2001).

300m Temperature Probabilistic Validation																	
900hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_5	ensemble_3	ensemble_7	ensemble_3	ensemble_8	ensemble_10	ensemble_4	ensemble_13	ensemble_11	ensemble_9	ensemble_14	ensemble_12	ensemble_15	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18	ensemble_2
INDEX	0.26	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.24	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
800hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_5	ensemble_7	ensemble_9	ensemble_10	ensemble_8	ensemble_11	ensemble_12	ensemble_3	ensemble_4	ensemble_13	ensemble_14	ensemble_15	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18	ensemble_2	
INDEX	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.27	
700hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_2	ensemble_3	ensemble_4	ensemble_5	ensemble_6	ensemble_7	ensemble_8	ensemble_9	ensemble_10	ensemble_11	ensemble_12	ensemble_13	ensemble_14	ensemble_15	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18
INDEX	2.21	2.28	2.30	2.34	2.33	2.56	2.73	2.87	3.00	3.12	3.22	3.32	3.40	3.46	3.58	3.65	3.69
600hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_4	ensemble_5	ensemble_3	ensemble_8	ensemble_2	ensemble_7	ensemble_6	ensemble_9	ensemble_10	ensemble_11	ensemble_12	ensemble_13	ensemble_14	ensemble_15	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18
INDEX	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.24	0.23	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33
900hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_3	ensemble_4	ensemble_5	ensemble_6	ensemble_7	ensemble_8	ensemble_9	ensemble_10	ensemble_11	ensemble_12	ensemble_13	ensemble_14	ensemble_15	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18	
INDEX	0.28	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	
925hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_11	ensemble_10	ensemble_3	ensemble_4	ensemble_9	ensemble_12	ensemble_5	ensemble_8	ensemble_7	ensemble_6	ensemble_2	ensemble_13	ensemble_14	ensemble_15	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18
INDEX	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23
850hPa Temperature																	
Ensemble	ensemble_4	ensemble_12	ensemble_7	ensemble_11	ensemble_13	ensemble_10	ensemble_5	ensemble_9	ensemble_2	ensemble_8	ensemble_14	ensemble_15	ensemble_3	ensemble_6	ensemble_16	ensemble_17	ensemble_18
INDEX	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28

Tabla 1. Validación probabilística para la temperatura a distintos niveles de presión.

Así, para los distintos niveles analizados que van desde los 950 hPa a los 500 hPa se muestra el valor del INDEX (en orden ascendente) y su correspondiente ensemble multifísico, el cual indica cuántos experimentos han sido necesarios para definir el óptimo ensemble.

Analizando los resultados, es destacable el valor del INDEX en 700 hPa. Su valor es notablemente superior al obtenido para el resto de niveles. Además, el número de experimentos necesarios para definir el óptimo ensemble es el menor de todos, con sólo 2 experimentos (446, 846). Se destaca la influencia del esquema de cúmulos de Tiedtke, lo que puede deberse a que en torno a ese nivel la influencia de los intensos procesos convectivos se hace más notable, llevando al modelo a experimentar una inestabilidad que puede generar mayores errores.

Se resalta a su vez el máximo número de experimentos obtenido para el nivel de 925 hPa, con 11 experimentos (616, 646, 446, 846, 416, 816, 841, 811, 441, 411, 611), lo que lleva a considerarlo como un nivel a tener en cuenta en el desarrollo e intensificación del ciclón.

Por motivos de espacio, se escogen para este trabajo los dos niveles previamente destacados en el análisis de sensibilidad (700 y 925 hPa). Así, además, se analizarán las diferencias observadas para la temperatura en niveles altos y bajos de la atmósfera centrada en el ciclón.

La evolución temporal de temperatura para estos dos niveles mencionados se representa en la Figura 4. En ella se representan las 18 simulaciones (en colores), observación (línea fina gris) y la media del conjunto o ensemble_mean (línea gruesa de color negro).

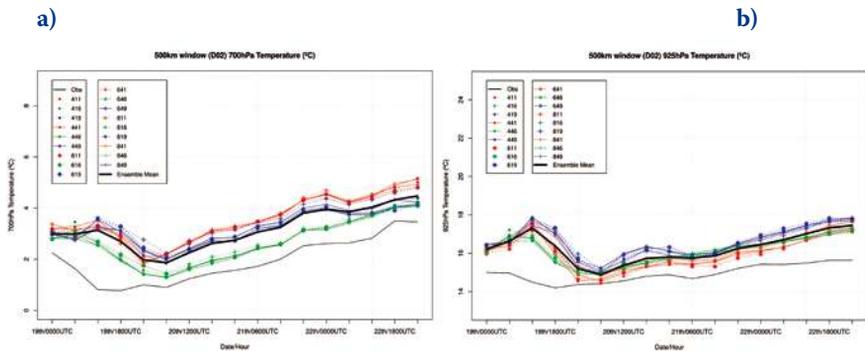


Figura 4. Evolución temporal de la temperatura para las 18 simulaciones (colores), observación (línea gris fina) y ensemble mean (línea negra gruesa) para a) 700 hPa y b) 925 hPa.

Atendiendo a los resultados, se destaca a 700 hPa (Figura 4a) la sobreestimación general de las simulaciones con respecto a la observación. Sin embargo, se ha de resaltar la importante contribución del esquema de cúmulos de Tiedtke (línea verde) siendo éste el que menos sobreestimación experimenta y, por tanto, el que mejor resultados ofrece. Estos resultados son consistentes con lo obtenido en el análisis de sensibilidad (Tabla 1) para el mismo nivel, en el que el óptimo ensemble está definido con la totalidad de sus experimentos incluyendo este esquema de cúmulos.

A 925 hPa la contribución del esquema de Tiedtke se hace más notable en los días previos a convertirse en STC puro (hasta el día 20 a las 00 UTC). Mientras que en los días en los que ya es considerado STC puro (resto de la evolución), la influencia del esquema de cúmulos de Kain-Fritsch (líneas de color rojo) adquiere una mayor relevancia a la hora de simular la temperatura.

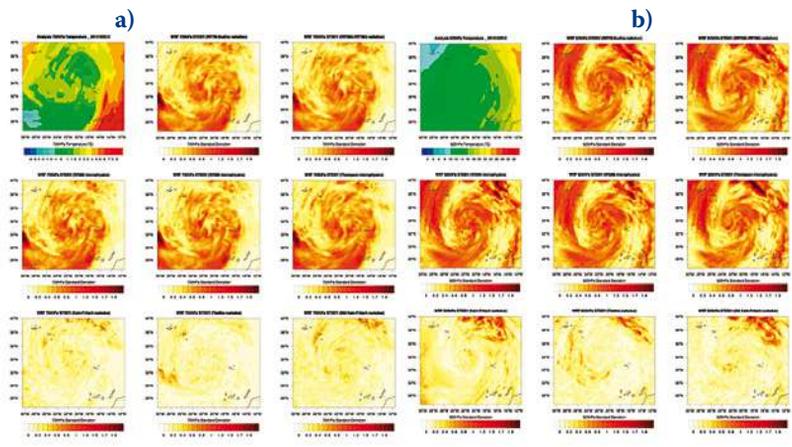


Figura 5. Media espacial de la temperatura y desviación estándar de cada esquema de parametrización para el 20 de octubre a las 12 UTC para los niveles de a) 700 hPa y b) 925 hPa.

Por otro lado, con el fin de analizar la incertidumbre y fiabilidad de las simulaciones del modelo, se calculan la media espacial de la temperatura y desviación estándar con respecto a esa media para cada esquema de parametrización. La Figura 5 muestra los resultados para el día 20 de octubre a las 12 UTC, día en que el ciclón ya ha adquirido completamente sus características subtropicales. Al igual que se observó en los resultados de la evolución temporal para los 700 hPa (Figura 4a), la diferencia de los distintos esquemas con respecto a la media se hace más acusada debido a esa sobreestimación que se experimenta. Sin embargo, cabe destacar los buenos resultados obtenidos con las parametrizaciones de cúmulos y, en especial, la importante influencia del esquema de cúmulos de Tiedtke, corroborando nuevamente la consistencia de los resultados obtenidos en la evolución temporal (Figura 4a) y el análisis de sensibilidad (Tabla 1).

Del mismo modo, se observa para 925 hPa (Figura 5b) una desviación con respecto a la media más notable para los esquemas de parametrización de radiación y microfísica. Se destaca una menor dispersión para el esquema de cúmulos de Kain-Fritsch en la zona central del ciclón, lo que es consistente con los buenos resultados obtenidos en el mismo momento y con el mismo esquema de cúmulos en la evolución temporal (Figura 4b). Quizás por ello para este nivel de 925 hPa, el óptimo ensemble obtenido en el análisis de sensibilidad (Tabla 1) incluía también los experimentos con la contribución del esquema de parametrización de Kain-Fritsch.

Conclusiones

Como conclusiones se ha de destacar que el ciclón de estudio fue un típico ciclón extratropical en su primer etapa, y que tras separarse de la circulación del oeste y convertirse en una baja aislada, experimentó una transición a ciclón subtropical.

Así mismo, tras verificar que mediante un análisis probabilista se obtienen mejores resultados, cabe destacar el valor tan alto del INDEX a 700 hPa así como el menor número de experimentos necesarios para definir el óptimo ensemble. Del mismo modo, se resalta el valor tan pequeño del INDEX para los 925 hPa y con él, el mayor número de experimentos necesarios para definir el óptimo ensemble.

Por otro lado, tras analizar la evolución temporal para la temperatura, se debe destacar la sobreestimación general de las simulaciones en el nivel de 700 hPa. Del mismo modo, se ha de recalcar la importante influencia del esquema de cúmulos de Tiedtke.

Finalmente, analizando los resultados de la desviación estándar, se observa menor dispersión para los experimentos con el esquema de cúmulos de Tiedtke a 700 hPa y una importante contribución del esquema de cúmulos Kain-Fritsch a 925 hPa una vez es considerado STC puro, siendo así consistentes todos los resultados obtenidos.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente respaldado por proyectos de investigación PCIN-2014-013-C07-04, PCIN2016-080 (UE ERA-NET Plus Proyecto NEWA), CGL2016-78702-C2-1-R y CGL2016-78702-C2-2-R, CGL2016-81828- REDT, y por el Instituto de Matemática Interdisciplinar (IMI) de la Universidad Complutense. Los autores también agradecen al Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF) por proporcionar

las bases de datos de análisis (ECMWF). El tercer autor ha sido financiado a través de la beca de doctorado BES-2014-067905 por parte del Ministerio Español de Economía y Competitividad, y cofinanciado por el Fondo Social Europeo. Para solicitar los datos, contáctese con L. Quitián-Hernández (lquitian@ucm.es).

Referencias

- Bentley, A.M., Keyser, D., and Bosart, L.F., 2016. A dynamically based climatology of sub-tropical cyclones that undergo tropical transition in the North Atlantic basin. *Mon. Weather Rev.* 144, 2049–2068. <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-15-0251.1>.
- Dudhia, J., 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.* 46, 3077–3107.
- Evans, J.L., and Guishard, M.P., 2009. Atlantic subtropical storms. Part I: diagnostic criteria and composite analysis. *Am. Meteorol. Soc.* 137, 2065–2080. <http://dx.doi.org/10.1175/2009MWR2468.1>.
- García-Ortega, E., Lorenzana, J., Merino, A., Fernández-González, S., López, L., Sánchez, and J.L., 2017. Performance of multi-physics ensembles in convective precipitation events over northeastern Spain. *Atmos. Res.* 190, 55–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.009>.
- Hong, S.-Y., and Lim, J.-O., 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.* 42 (2), 129–151.
- Hong, S.Y., Dudhia, J., and Chen, S.H., 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Weather Rev.* 132 (1), 103–120. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:aratim>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:aratim>2.0.co;2).
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A., and Collins, W.D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.* 113, D13103.
- Kain, J., 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteorol.* 43 (1), 170–181.
- Kain, J., and Fritsch, J.M., 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application on convective parameterization. *J. Atmos. Sci.* 47, 2784–2802.
- Mlawer, E.J., Taubman, A.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., and Clough, S.A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.* 102D, 16663–16682.
- Quitián-Hernández, L., Martín, M.L., González-Alemán, J.J., Santos-Muñoz, D., and Valero, F., 2016. Identification of a subtropical cyclone in the proximity of the Canary Islands and its analysis by numerical modeling. *Atmos. Res.* 178–179, 125–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.008>.
- Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M., and Hall, W., 2008. Explicit forecast of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization. *Mon. Weather Rev.* 136 (12), 5095–5115. <http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>.
- Tiedtke, M., 1989. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Weather Rev.* 117, 1779–1800.
- Toth, Z., 2001. Ensemble forecasting in WRF. *Bull. American Meteorol. Soc.* 82 (4), 695–697.
- Toth, Z., Kalnay, E., Tracton, S., Wobus, R., and Irwin, J., 1997. A synoptic evaluation of the NCEP ensemble. *Weather Forecast.* 12, 140–153.
- Zhang, C., Wang, Y., and Hamilton, K., 2011. Improved representation of boundary layer clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. *Mon. Weather Rev.* 139, 3489–3513.