

para su desarrollo. Entre ellos se encuentran el Programa de Investigación de Meteorología Tropical de la CCA y el Decenio internacional de las NU para la Reducción de los Desastres Naturales. También doy las gracias personalmente a Sir James Lighthill, del CIUC, por su incansable apoyo y entusiasmo.

Referencias

ABERSON, Sim D., James L. FRANKLIN, 1999: Impact on Hurricane Track and Intensity Forecasts of GPS Dropwindsonde Observations from the First-Season Flights of the NOAA Gulfstream-IV Jet Aircraft. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80, 421-428.

HOLLAND, G. J., T. MCGEER y H. YOUNGREN, 1992: Autonomous Aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 73, 1987-1998.

HOLLAND, G. J., P. J. WEBSTER, J. CURRY, G. TYRRELL, D. J. GAUNTLETT, G. BRETT, J. BECKER, R. HOAG y B. VAGLIENTI, 2000: The Aerosonde robotic aircraft: A new

paradigm for environmental observations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 889-902.

KEPERT, J. D., C. W. FAIRALL y J.-W. BAO, 1999: Modelling the interaction between the atmospheric boundary layer and evaporating sea spray droplets. En *Air-Sea Exchange-Physics, Chemistry and Dynamics*, Ed. Gary Geernaert, pp. 363-410. Kluwer, 578 pp.

KEPERT, Jeff, Yuqing WANG, 2001: The Dynamics of Boundary Layer Jets within the Tropical Cyclone Core. Part II: Nonlinear Enhancement. *J. Atmos. Sci.*, 17, 2485-2501.

TYRRELL, G. y G. J. HOLLAND, 2002: Small, long endurance drone aircraft for monitoring the hurricane core. *Coping with Hurricanes. American Geophysical Union* (en imprenta).

WANG, Yuqing, 2001: An Explicit Simulation of Tropical Cyclones with a Triply Nested Movable Mesh Primitive Equation Model: TCM3. Part I: Model Description and Control Experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 1370-1394.

WANG, Y., J. D. KEPERT y G. J. HOLLAND, 2001: The effect of sea spray evaporation on tropical cyclone boundary-layer structure and intensity. *Mon. Wea. Rev.*, 58, 2485-2501.

Predicción por conjuntos de ciclones tropicales

267

Por Johnny C. L. CHAN*

Introducción

Desde principios de la década de los noventa, la técnica de la predicción por conjuntos (EF) se ha utilizado para realizar predicciones meteorológicas en muchos centros meteorológicos mundiales como una alternativa a las predicciones tradicionales a partir de una solución única de un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT). La idea que apoya la EF es bastante sencilla. La teoría del caos, propuesta originariamente por Lorenz (1963), sugiere que las soluciones numéricas a partir de condiciones iniciales ligeramente diferentes podrían diverger con el tiempo: el llamado "efecto mari-

Los ciclones tropicales representan uno de los sistemas meteorológicos más destructivos, constituyendo cada año una amenaza para muchas zonas del mundo. Toda mejora en la precisión de las predicciones de su trayectoria ofrecerá más tiempo de ventaja para emitir avisos, que ayudarán a reducir las muertes y las pérdidas de bienes materiales. La preparación contra los desastres y su mitigación son dos temas muy importantes del desarrollo sostenible que se tratarán en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, que se celebrará en Johannesburgo, en Sudáfrica, en agosto / septiembre de este año.

posa". Como los errores son inherentes a las observaciones meteorológicas (y oceanográficas) que se utilizan como condiciones iniciales para los modelos de PNT, una predicción meteorológica basada en unas condiciones iniciales podría ser errónea, incluso aunque el modelo fuera perfecto. Por otra parte, si se pudieran perturbar las condiciones iniciales de forma que los valores perturbados representen la distribución del error en las observaciones, el "conjunto" de soluciones a partir de estas condiciones iniciales perturbadas (designada cada una como un miembro del conjunto) debería envolver a la solución verdadera y al verdadero estado futuro

* Laboratorio de Investigación Atmosférica, Departamento de Física y Ciencia de Materiales, Universidad de la Ciudad de Hong Kong, Hong Kong, China.

de la atmósfera en un modelo perfecto. Se muestra una ilustración esquemática de este concepto en la Figura 1, que destaca también la importancia del método por el que se generan las perturbaciones. Si las perturbaciones no pueden representar la distribución del error probable de un parámetro particular de predicción, las predicciones resultantes pueden pertenecer a sólo uno de los grupos, mientras que el verdadero estado de la atmósfera se produce realmente en el otro.

Si la muestra de la distribución del error es adecuada, entonces las predicciones del conjunto deberían envolver a la solución correcta de forma que la predicción final se obtenga aplicando algún método de selección o de promedio de estas soluciones, que debería ofrecer una predicción mejor que una simple ejecución del modelo. La esencia de una técnica de EF es, por lo tanto, desarrollar un(os) método(s) para realizar perturbaciones que puedan representar las distribuciones del error, y diseñar métodos para obtener la predicción final, además de los criterios de evaluación.

La mayor parte del trabajo de investigación en la EF se ha centrado en las predicciones a medio plazo de sistemas meteorológicos de latitudes medias a escala sinóptica en modelos globales de PNT, porque se conocen bien las restricciones dinámicas relacionadas con estos sistemas (p. ej., la inestabilidad baroclina). Además, las mejoras de la física del modelo y de las técnicas numéricas han aumentado la predictibilidad de estos sistemas a aproximadamente una semana, incluso con una ejecución del modelo. El éxito de la EF para aumentar tal predictibilidad (p. ej., Kalnay y otros, 1998) ha originado numerosos estudios para mejorar la capacidad predictiva para sistemas con escalas temporales y espaciales menores: la llamada predicción por conjuntos de corto plazo (SREF). (Véase en Cheung (2001) un examen de estos estudios).

Un sistema meteorológico muy importante de escala sinóptica —o incluso subsinóptica— es el ciclón tropical (CT). El elemento más importante en la predicción de un CT es su movimiento. Por lo tanto, la investigación en la aplicación de la técnica de la EF a las predicciones de CT, que no empezó hasta mediados de la década de los noventa, se ha realizado sobre todo sobre el movimiento de los CT (aunque se ha llevado a cabo algún trabajo reciente sobre predicciones de intensidad

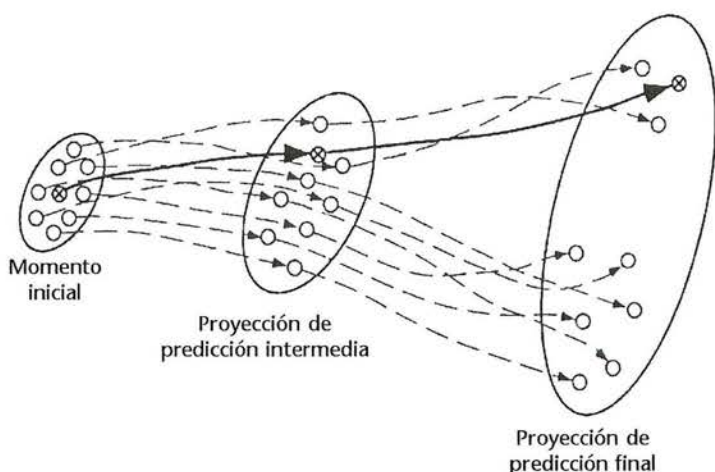


Figura 1 — Divergencia de las predicciones de un conjunto con condiciones iniciales ligeramente distintas (cada una representada por un pequeño círculo en el momento inicial). La elipse representa la envoltura de todos los estados en un momento dado. Cada flecha a trazos representa la predicción a partir de cada estado inicial. La flecha continua indica la solución sin ningún tipo de perturbación de las condiciones iniciales (círculos con cruces). (Adaptado de Wilks, 1995)

utilizando el enfoque de la EF: véanse las secciones siguientes). En los problemas de SREF, tales como las predicciones de CT, la predictibilidad es, en general, menor, debido a las menores escalas espaciales y temporales. Además, el sistema meteorológico en cuestión puede interactuar con sistemas de mayor escala de forma que el diseño de los métodos de perturbación se convierte en una tarea estimulante, ya que las perturbaciones apropiadas para una escala pueden no capturar necesariamente toda la distribución de error asociada a un parámetro particular. Estas consideraciones también son aplicables al problema de la predicción de CT utilizando la técnica de la EF.

En este artículo se describe el progreso en la predicción por conjuntos de ciclones tropicales durante la última década, analizando los resultados de todos los grupos importantes que trabajan en este problema. Se verá que se han probado muchas técnicas, cada una con sus logros y sus dificultades. También se ofrecerá una discusión sobre la forma de aplicar la técnica de EF en la predicción operativa de CT.

Utilización de campos perturbados de otro modelo

Aberson y otros (1995) fueron los primeros en analizar la utilidad de la técnica de la EF en la predicción del movimiento de CT. Tomaron como condiciones iniciales para un modelo barotrópico operativo de huracanes atlánticos los miembros del conjunto generado a partir del enfoque de “producción de modos de crecimiento” (BGM), del modelo global de PNT de los Centros Nacionales de Predicción Medioambiental de los EE.UU. (véase una descripción más detallada de

esta técnica en Toth y Kalnay, 1993; 1994; y en Cheung, 2001). Animados por los razonables resultados de este estudio, Abernethy y otros (1998 (a)) probaron el esquema con huracanes en 1996 y 1997, pero aplicaron los modos producidos al modelo anidado del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL) de EE.UU. Las predicciones de los miembros del conjunto se promediaron para obtener la media del conjunto. Mientras que los errores medios de predicción de la trayectoria a partir de la media del conjunto eran, en general, menores que los del control, solo la predicción a 72 horas ofreció un resultado estadísticamente significativo, y únicamente al nivel de confianza del 90 por ciento. Dado que el modelo del GFDL también ofrecía predicción de la intensidad, Abernethy y otros (1998 (b)) examinaron también la utilidad de su técnica en la predicción de la intensidad pero los resultados no fueron lo suficientemente satisfactorios.

Una conclusión importante de estos estudios es que puede que los campos perturbados generados por un modelo (en este caso, el modelo global) pueden no ser adecuados como condiciones iniciales de otro modelo. Esto se debe a que los procesos físicos en los dos modelos pueden ser distintos, de forma que el crecimiento del error puede, con mucha probabilidad, no ser idéntico en los dos modelos. Como resultado de ello, los campos perturbados de un modelo pueden no representar la distribución de error esperada en el otro modelo.

Utilización de funciones empíricas ortogonales

Teniendo en cuenta que el flujo a gran escala es el principal responsable de la "conducción" del CT, Zhang y Krishnamurti (1997, 1999) aplicaron una técnica basada en la utilización de funciones empíricas ortogonales (EOF) para estimar el esquema del crecimiento del error característico específicamente en zonas tropicales. Primero se calcularon los campos de diferencia del viento o de la temperatura entre una predicción de control y una perturbada aleatoriamente para formar una serie temporal que se sometió después a un análisis EOF complejo. Aquellos autovectores con coeficientes EOF que aumentaban rápidamente con el tiempo se consideraron los modos de crecimiento rápidos, y se utilizaron después como perturbaciones para el flujo inicial a gran escala. La posición inicial del CT en el modelo también estaba perturbada para simular la incertidumbre en la determinación del centro del CT en un entorno operativo. Se encontró que la predicción media de conjunto de la trayectoria resultante era mejor que la de control. La estructura promedio del CT a partir de los miembros del conjunto también parecía razonable.

Aplicación de perturbaciones al flujo medio y/o a la circulación asociada al vórtice

Estudios barotrópicos

Cheung y Chan (1999 (a) y (b)), a partir de ahora CCa y CCb, respectivamente) utilizaron un modelo barotrópico para probar la utilidad de tres métodos muy utilizados en sistemas meteorológicos de latitudes medias (predicción de Monte Carlo (MCF), predicción de promedio retrasado (LAF) y la ya citada BGM) para la EF de trayectorias de CT. Otra cuestión importante tratada en estos dos estudios fue la contribución relativa de la perturbación del flujo medio frente a la de la circulación asociada al vórtice en la mejora de las predicciones de la trayectoria. Llevaron a cabo experimentos sobre un total de sesenta y seis casos a partir del conjunto de datos del Experimento sobre Movimiento de Ciclones Tropicales TCM-90 (Rodgers y otros, 1993). Hasta la fecha, sus estudios representan la investigación más extensa sobre el problema de la aplicación de la técnica de la EF en predicciones de CT.

Se adoptó la técnica de filtrado propuesta por Kurihara y otros (1993) para separar el flujo asociado al vórtice del flujo medio. En CCa, se eliminó la componente del vórtice y se perturbó después el flujo medio, utilizando uno de los tres métodos. Las condiciones iniciales consistieron entonces en un vórtice "sintético" generado a partir de condiciones preasignadas (basadas en la información de la mejor trayectoria sobre la intensidad del CT) superpuestas al flujo ambiental perturbado. La técnica de la MCF ofrece una predicción media de conjunto parecida a la de la predicción de control (sin perturbar). En otras palabras, la técnica de la MCF no puede mejorar la predicción. Este resultado es parecido a la experiencia en predicciones en latitudes medias (Toth y Kalnay, 1993), aunque Leslie y Speer (1998) tuvieron algo de éxito al aplicar esta técnica en la predicción de un caso de ciclogénesis explosiva. Haría falta más trabajo para establecer una conclusión más definitiva.

Se lograron mejoras en las predicciones de la trayectoria basadas en la media del conjunto en aproximadamente el cuarenta por ciento de los casos cuando se utilizaron las otras dos técnicas y se verificaron con la mejor trayectoria. Basándose en las clasificaciones de tipo sinóptico de Carr y otros (1997), CCa identificaron situaciones en las que se producían tales mejoras. Entre ellas se incluían: una transición de una región sinóptica a otras; recurvatura; CT múltiples; y una ruptura o un cambio rápido de la intensidad de la dorsal subtropical. Todas estas condiciones sinópticas estaban relacionadas con cambios temporales en el flujo a gran escala. Por lo tanto, si la circulación media se perturba "correctamente", el conjunto podría envol-

ver a la trayectoria real del CT y, por ello, la predicción por conjuntos podría implicar mejoras. Un corolario a esta conclusión es que, dependiendo de la situación, la perturbación del flujo medio puede no ser la solución óptima. Esto vuelve a destacar la dificultad de los problemas de la SREF cuando están implicadas escalas múltiples.

Para perturbar la circulación asociada al vórtice, CCB probaron dos estrategias. La primera era aplicar las tres técnicas mencionadas arriba a la circulación del vórtice, es decir, se imponían las perturbaciones al análisis original sólo dentro del área del vórtice identificada a partir del algoritmo de filtrado de Kurihara y otros (1993). La técnica de MCF, de nuevo, no ofrece una mejora apreciable. Los otros dos métodos (la LAFV y la BGMV, indicando con "V" las perturbaciones del vórtice) ofrecían mejoras en algunas situaciones pero, en algunos casos, el vórtice pronosticado se deformaba tanto que no era posible la integración.

La segunda estrategia se basaba en la idea de que un CT en un modelo barotrópico tiene un movimiento inherente hacia el noroeste (en el hemisferio norte) debido al efecto beta (Chan y Williams, 1987). Las incertidumbres en la especificación del vórtice podrían originar variaciones en la fuerza de los "giros beta" (Fiorino y Elsberry, 1989) y, por lo tanto, en el movimiento del CT. Por ello, se perturbaban los parámetros que se utilizaban para generar el vórtice, y el vórtice resultante se sumaba a la circulación ambiental. Heming y otros (1995) mostraron que una superposición de un vector director, que representaba el movimiento del CT en las 6 últimas horas sobre dicho vórtice sintético, podría originar una mejora importante en las predicciones de la trayectoria del CT. Se incluyó, así, un experimento adicional para simular este efecto perturbando las componentes de este vector.

La mejora óptima se obtuvo en el experimento que perturbó los parámetros que generan los giros beta y el vector director. El rendimiento de esta técnica fue mejor que la LAFV para predicciones de más de dos días y comparable al de la técnica de la BMGV. Sin embargo, hasta la mejora más importante fue menos significativa que la obtenida perturbando el flujo medio. En otras palabras, el flujo medio juega el papel principal en el movimiento de un CT, como era de esperar.

Muy recientemente, el grupo del autor ha llevado a cabo algunos experimentos en los que se perturbaron por separado la circulación del vórtice y la media, y después se las combinó para formar las condiciones iniciales. Los resultados preliminares sugieren que, en muchos casos, tal combinación ofrecía mejores predicciones que si se perturbaba sólo un campo.

Estudios con un modelo baroclino completo

Con el éxito de la aplicación de las distintas técnicas de perturbación en la predicción del movimiento de CT en un modelo barotrópico, Cheung (1999) amplió los estudios de CCA y de CCB a un modelo baroclino completo: la Versión 4 del Modelo de Mesoescala (MM4) de la Universidad del Estado de Pennsylvania y del Centro Nacional de Investigación Atmosférica. Las perturbaciones se generaron utilizando la formulación BGM y se aplicaron solo a las componentes de la temperatura y del viento a gran escala. En un caso de estudio, se encontró que la predicción media de conjunto tenía un rendimiento mejor que la del modelo barotrópico a 72 horas. Cheung (2000) obtuvo resultados parecidos cuando se repitió el experimento utilizando la última versión del modelo de mesoescala, MM5.

Es importante observar que estos experimentos solo se han realizado para un número muy limitado de casos. Hace falta mucho más trabajo para establecer la utilidad de dichas técnicas en un modelo baroclino completo. Esto no solo significa más casos de estudio, sino también investigaciones que impliquen las operaciones del modelo, que podrían incluir la influencia de las condiciones de contorno, el balance entre las variables dinámicas y termodinámicas, y si deberían ampliarse las perturbaciones a los esquemas de parametrización, etc.

Enfoques alternativos a la predicción por conjuntos

Como las predicciones por conjuntos implican, de forma inevitable, un gran número de integraciones, y cada una de las cuales consume una cantidad importante de recursos informáticos, hacer predicciones utilizando la técnica de la EF requiere una capacidad de computación importante. Puesto que muchos de los modelos de PNT globales o regionales pueden ya realizar predicciones muy buenas, incluso con una ejecución única, se han propuesto alternativas a este enfoque formal de la EF. Se han sugerido al menos dos enfoques relacionados con la predicción de CT, cada uno de los cuales se describe a continuación.

Predicción de consenso

Goerss (1999, 2000) propuso promediar las predicciones de posición a partir de tres modelos operativos de predicción de CT para obtener una predicción "de consenso". La idea básica es que los análisis a partir de distintos modelos representan errores en los procedimientos de asimilación y pueden así simular los de las condiciones iniciales. Los resultados tanto del océano Atlántico como del noroeste del océano Pacífico indicaron que esta predicción de consenso puede reducir el error de predicción en más del veinte por

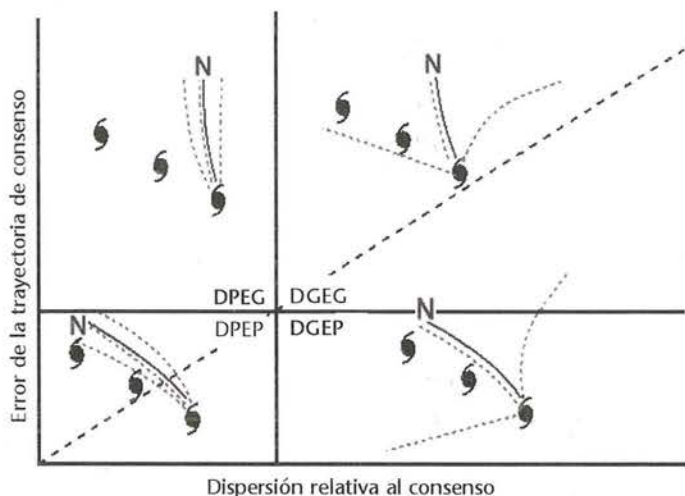


Figura 2 — Tres trayectorias (líneas de puntos), trayectoria de consenso (línea continua etiquetada con la N), posiciones inicial y de verificación (símbolos de tifón negros) para ilustrar las cuatro categorías distintas en la relación entre el error de la predicción de consenso y la dispersión relacionada con el consenso: DP — dispersión pequeña; DG — dispersión grande; EP — error (de consenso) pequeño; y EG — error (de consenso) grande. (Adaptado de Elsberry y Carr, 2000)

ciento de media, comparado con el mejor modelo de predicción individual. No obstante, hay que advertir que, por definición, una predicción promedio no puede ser nunca la peor predicción. Por lo tanto, se debe esperar una reducción en el error de predicción, como sugirió Thompson (1977). Las cuestiones importantes que hay que tratar aquí son las condiciones bajo las cuales la predicción de consenso será mejor que las predicciones a partir de modelos individuales, y cuándo debería descartarse la predicción de consenso.

Para seguir estudiando la utilidad de este enfoque, Elsberry y Carr (2000) examinaron las predicciones de consenso obtenidas a partir de cinco modelos de predicción de CT en el noroeste del Pacífico. Encontraron que una diseminación pequeña de las predicciones de los modelos individuales no implicaba necesariamente un error de la predicción de consenso pequeño, ya que las predicciones de los modelos podían ser todas erróneas. De hecho, la representación del error de la trayectoria de consenso frente a la dispersión (máxima distancia entre las predicciones del modelo individual) puede dividirse en cuatro categorías (véase la Figura 2). Cuando las predicciones individuales están muy agrupadas (dispersión pequeña, DP), la trayectoria real observada puede estar cerca de la de consenso (error pequeño, EP) o quedar alejada (error grande, EG). De forma similar, una dispersión grande (DG) también puede tener las dos situaciones, es decir que la trayectoria real quede cerca de la de consenso (error pequeño EP) o alejada de ella (error grande EG). Evidentemente, si un predictor conoce a cuál de las cuatro categorías pertenece una predicción, le ayudará a decidir si elige o des-

carta la predicción de consenso. Carr y Elsberry (1999) demostraron que esto se podía hacer de forma operativa si se establecía una base de conocimiento de las condiciones bajo las cuales era más probable que ciertos modelos produjeran predicciones erróneas. Además, Elsberry y Carr (2000) demostraron que, en situaciones de DP, esta base de conocimiento se podía usar para eliminar las predicciones "erróneas" de algunos modelos. Entonces, la predicción de consenso era el promedio de los miembros restantes, que podrían, por tanto, ser más precisos.

Aunque estos estudios han demostrado el potencial del enfoque de consenso al reemplazar la técnica de la EF formal, hay que evaluar más profundamente su aplicación en entornos operativos. Carr y otros

(2000) informaron acerca de algunas pruebas en tiempo real para demostrar que dichas aplicaciones eran factibles. Obviamente, se necesita una evaluación más profunda.

La predicción de "superconjunto"

Krishnamurti y otros (1999) propusieron que, aplicando un procedimiento sencillo de regresión múltiple que realice una regresión de las distintas predicciones del modelo frente a las observaciones, se puede obtener una predicción estadística (un "superconjunto") para ofrecer una predicción mejor que cualquiera de las predicciones del modelo. La idea es que todos los modelos tienen deficiencias, de forma que sus predicciones sólo pueden correlacionarse con las observaciones reales hasta un cierto punto. En otras palabras, todas las predicciones del modelo actúan como una predicción de la observación. Por lo tanto, combinando predicciones múltiples de modelo, se puede explicar un porcentaje mayor de la varianza de las observaciones.

Como en la mayoría de los procedimientos estadísticos, separaron las predicciones de cada modelo en dos grupos, uno como conjunto de prueba y el otro como conjunto independiente. También probaron la utilidad de este concepto mediante un procedimiento de validación cruzada. Los resultados de ambas pruebas indicaron que el superconjunto podía ofrecer un error promedio de predicción de la trayectoria del CT a 72 horas de ~ 210 km en el Atlántico (frente a un error de la predicción de consenso de ~ 300 km) y un error de la intensidad de 20 kt (frente a un promedio de conjunto de cinco modelos de ~ 25 kt).

Por supuesto, para realizar una buena predicción de superconjunto todos los modelos individuales tienen que permanecer sin cambios durante un período grande de tiempo. Además, Krishnamurti y otros (1999) sugirieron que son necesarios seis o siete modelos para reducir los errores del modelo múltiple. No es fácil satisfacer ambas condiciones, ya que la mayoría de los centros operativos modificarían sus modelos si se prueban nuevas técnicas o si se detectan problemas importantes. De esta forma, puede que el uso operativo de la técnica de superconjunto sea difícil.

Discusión

En los dos enfoques presentados en esta sección se asume de forma implícita que las distintas condiciones iniciales y los procesos físicos de distintos modelos pueden abarcar una gran parte de los posibles errores de observación. Sin embargo, ni se ha validado ni se ha establecido de forma teórica tal asunción. Por lo tanto, si se habla de forma estricta, no podemos denominar a estas técnicas predicción de conjunto. No obstante, desde un punto de vista operativo, podría probarse que son útiles, en especial para centros meteorológicos que no pueden permitirse la enorme cantidad de recursos de computación necesarios para crear un gran conjunto de miembros de conjunto.

Observaciones finales

Este artículo examina las técnicas de predicción por conjuntos que se han probado para la predicción del movimiento y la intensidad de ciclones tropicales. Los métodos de perturbación de los campos iniciales incluyen la utilización de las perturbaciones a partir de un análisis de modelo global, el uso de un enfoque mediante funciones empíricas ortogonales para identificar modos de crecimiento más rápidos y la aplicación de métodos de perturbación habituales al flujo medio en torno al ciclón tropical o a la circulación del ciclón. Cada uno de estos métodos parece tener alguna utilidad. En general, los que se centran en perturbar los campos medios del modelo parecen ofrecer mayores mejoras en las predicciones de la trayectoria. Sin embargo, no se ha logrado mucha mejora en las predicciones de la intensidad.

Las necesidades de inmensos recursos de computación en la predicción por conjuntos y la precisión mejorada de los modelos de predicción numérica del tiempo globales y regionales han originado el desarrollo de alternativas al enfoque clásico de la predicción por conjuntos. Entre ellos se incluye simplemente promediar las predicciones de modelos individuales o desarrollar una ecuación de predicción estadística utilizando predicciones de modelos individuales como predictores y observaciones como predictandos. Aunque ambos enfoques parecen demostrar su superioridad

sobre las predicciones de modelos individuales, su utilidad operativa puede resultar difícil ya que los modelos tienden a sufrir modificaciones continuas.

La aplicación de la técnica de predicción por conjuntos que se desarrolló originariamente para modelos globales representa otro intento de mejorar la precisión de las predicciones de ciclones tropicales. Aunque está todavía en sus inicios, el progreso en esta área de investigación ha demostrado, ciertamente, su potencial como una alternativa viable a la tradicional solución única de los modelos de PNT, no sólo en las predicciones de la trayectoria, sino también en las de la intensidad y quizás, en las de la estructura (incluida la precipitación). Obviamente, hace falta mucha más investigación. Se espera que este examen pueda servir como antecedente para ayudar a los investigadores de esta especialidad a que se embarquen en tales empresas.

Agradecimientos

El autor quisiera dar las gracias al Dr. Kevin Cheung por sus muchas y útiles discusiones cuando era un estudiante de doctorado en la Universidad de la Ciudad de Hong Kong y trabajaba en el problema de la predicción por conjuntos del movimiento de ciclones tropicales. La investigación del autor sobre este tema se ha visto apoyada por el Consejo de Becas de Investigación del Gobierno de la Región Administrativa Especial de Hong Kong de China.

Referencias

- ABERSON, S. D., S. J. LORD, M. DEMARIA y M. S. TRACTON, 1995: Short-range ensemble forecasting of hurricane tracks. *Publicaciones previas de la 21.ª Conf. de Hur. y de Meteor. Trop.*, Miami, Amer. Meteor. Soc., 494-496.
- ABERSON, S., M. A. BENDER y R. E. TULEYA, 1998a: Ensemble forecasting of tropical cyclone tracks. *Publicaciones previas de la 12.ª Conferencia sobre Predicción Numérica del Tiempo*, Phoenix, Amer. Meteor. Soc., 290-292.
- ABERSON, S., M. A. BENDER y R. E. TULEYA, 1998b: Ensemble forecasting of tropical cyclone intensity. *Publicaciones previas del Simposio sobre Cambio en la Intensidad de Ciclones Tropicales*, Phoenix, Amer. Meteor. Soc., 150-153.
- CARR, L. E. III, R. L. ELSBERRY y M. A. BOOTHE, 1997: Condensed and updated version of the systematic approach meteorological knowledge base - Western North Pacific. *NPS Rept. NPS-MR-98-002*, Naval Postgrad. Sch., Monterrey, California, 169 pp.
- CARR, L. E. III y R. L. ELSBERRY, 1999: Systematic and integrated approach to tropical cyclone track forecasting. Part III: Traits knowledge base for JTWC track forecast models in the western North Pacific. *NPS Rept. NPS-MR-99-002*, Naval Postgrad. Sch., Monterrey, California, 227 pp.
- CARR, L. E. III, G. M. DUNNAVAN, R. L. ELSBERRY, M. A. BOOTHE y P. A. HARR, 2000: Developing a systematic approach to tropical cyclone track forecasting expert system-2: Results of a real-time prototype test. *Publicaciones previas de la 24.ª Conf. de Huracanes y de Meteor. Trop.*, Amer. Meteor. Soc., Fort Lauderdale, Florida, EE.UU. 504-505.

- CHAN, J. C. L. y R. T. WILLIAMS, 1987: Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part I: Zero mean flow. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1257-1265.
- CHEUNG, K. K. W., 1999: Ensemble forecasting of tropical cyclone motion. *Tesis doctoral*, Departamento de Física y Ciencia de Materiales, Universidad de la Ciudad de Hong Kong, 200 pp.
- CHEUNG, K. K. W., 2000: Regionally bred modes and ensemble forecasting of tropical cyclone motion. *Publicaciones previas de la 24.ª Conf. de Huracanes y de Meteor. Trop.*, Amer. Meteor. Soc., Ft. Lauderdale, Florida, EE.UU., 504-505.
- CHEUNG, K. K. W., 2001: A review of ensemble forecasting techniques with a focus on tropical cyclones forecasting. *Meteor. Appl.*, 8, 315-332.
- CHEUNG, K. K. W. y J. C. L. CHAN, 1999a: Ensemble forecasting of tropical cyclone motion using a barotropic model. Part I: perturbations of the environment. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 1229-1243.
- CHEUNG, K. K. W. y J. C. L. CHAN, 1999b: Ensemble forecasting of tropical cyclone motion using a barotropic model. Part II: perturbations of the vortex. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2617-2640.
- ELSBERRY, R. L. y L. E. CARR, III, 2000: Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts - errors versus spread. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 4131-4138.
- FIORINO, M. y R. L. ELSBERRY, 1989: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, 46, 975-990.
- GOERSS, J. S., 1999: Tropical cyclone forecasting using an ensemble of dynamical models - 1998 Atlantic hurricane season. *Publicaciones previas de la 23.ª Conf. de Huracanes y de Meteor. Trop.*, Dallas, Amer. Meteor. Soc., 826-829.
- GOERSS, J. S., 2000: Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1187-1193.
- HEMING, J. T., J. C. L. CHAN y A. M. RADFORD, 1995: A new scheme for the initialisation of tropical cyclones in the UK Meteorological Office Global Model. *Meteor. Appl.*, 2, 171-184.
- KALNAY, E., S. J. LORD y R. D. MCPHERSON, 1998: Maturity of operational numerical weather prediction: medium range. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2753-2769.
- KRISHNAMURTI, T. N., C. M. KISHTAWAL, T. E. LAROW, D. R. BACHIOCHI, Z. ZHANG, E. WILLIFORD, S. GADGIL y S. SURENDRAN, 1999: Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 285, 1548-1550.
- KURIHARA, Y., M. A. BENDER y R. J. ROSS, 1993: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2030-2045.
- LESLIE, L. M. y M. S. SPEER, 1998: Short-range ensemble forecasting of explosive Australian east coast cyclogenesis. *Wea. Forecasting*, 13, 822-832.
- LORENZ, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141.
- RODGERS, E., S. J. LORD, D. G. DEAVEN y G. J. DIMEGO, 1993: Data assimilation and forecasting for the tropical cyclone motion experiment at the National Meteorological Center. *Publicaciones previas de la 20.ª Conf. de Huracanes y de Meteor. Trop.*, Amer. Meteor. Soc., San Antonio, Texas, EE.UU., 329-330.
- THOMPSON, P. D., 1977: How to improve accuracy by combining independent forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 228-229.
- TOTH, Z. y E. KALNAY, 1993: Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 2317-2330.
- TOTH, Z. y E. KALNAY, 1994: Ensemble forecasting at NMC: The use of breeding method for generating perturbations. *Publicaciones previas de la 10.ª Conferencia sobre Predicción Numérica del Tiempo*, Portland, Amer. Meteor. Soc., 202-205.
- WILKS, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. An Introduction*. Academic Press, 464 pp.
- ZHANG, Z. y T. N. KRISHNAMURTI, 1997: Ensemble forecasting of hurricane tracks. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2785-2795.
- ZHANG, Z. y T. N. KRISHNAMURTI, 1999: A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 447-469.

