



Herramientas de detección, reporte y evaluación para salidas de modelos de pronóstico numérico desarrollado en Cuba

Detection, reporting and evaluation tools for outputs from numerical forecast models developed in Cuba

MSc. Maibys Sierra Lorenzo^{1✉}, Lic. Israel Borrajero Montejo¹, Miguel Hinojosa Fernández², Arletis Roque Carrasco³, Camilo Fernando Rodríguez Genó⁴, Liset Vázquez Proveyer⁵, Lic. Adrián Luis Ferrer Hernández¹

¹ Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba

² Centro de Instrumentos y Métodos de Observación, Instituto de Meteorología, Cuba

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

⁴ Universidad Nacional Autónoma de México, México

⁵ Facultad de Medio Ambiente, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba

Resumen

Los modelos de pronóstico numérico del tiempo son en la actualidad una de las herramientas más utilizadas por los pronosticadores. Sin embargo, la salida numérica, tal cual la brinda el modelo, no revela toda la información que puede emplearse en la elaboración de un pronóstico. Se hace necesario construir productos derivados de estas salidas que permitan, por ejemplo: la identificación de fenómenos meteorológicos, áreas de precipitación, entre otros; posibilitando la generación de reportes automático. El trabajo que se presenta describe la primera versión del módulo de detección, reporte y evaluación, que será acoplado con el sistema de pronóstico a muy corto plazo que se desarrolla en el Instituto de Meteorología de Cuba. Como resultado se cuenta con una herramienta de postprocesamiento que se compone de algoritmos para la detección de ciclones, frentes fríos y áreas de precipitación y nubosidad, en las salidas de los modelos. Los procesos detectados pueden ser monitoreados, y verificados con las imágenes de satélite. Entre los

✉ Autor para correspondencia: Maibys Sierra Lorenzo, Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología. E-mail: maibys.lorenzo@insmet.cu

Recibido: 12 de agosto de 2016

Aceptado: 21 de octubre de 2016

algoritmos utilizados se encuentran: el método de las crestas, la convolución y la lógica difusa.

Palabras clave: modelo numérico, modelo de pronóstico, pronóstico numérico del tiempo, detección de frentes fríos, detección de ciclones, evaluación espacial, MODE, Cuba

Abstract

Numerical Weather Models are among the most used tools by forecasters nowadays. However, the numerical output in the form that is delivered by the model, does not reveal all the information needed to prepare a weather forecast report. Hence, there is a need to derive products from these outputs that allow for instance: identification of meteorological phenomena, rainfall area, and others; all of which will enable the generation of automatic reports on its evolution and movement, and the validation with real data. The present paper aims to accomplish this goal. We describe the first version of the detection, report and evaluation module that will be coupled with the short-range forecast system being developed in the Institute of Meteorology of Cuba. As a result, a post-processing tool is developed composed by algorithms for detection of hurricanes, cold fronts, rainfall areas and cloudiness in model outputs; which can be monitored, and validated with satellite images. Ridge method, convolution and fuzzy logic are among the algorithms that we have used here.

Key words: numerical model, forecast model, numerical weather forecast, detection of cold fronts, detection of cyclones, spatial evaluation, MODE, Cuba

Introducción

La necesidad de conocer el estado futuro de la atmósfera para la planificación, desarrollo y supervivencia de las sociedades, crece cada vez más. Con el conocimiento acumulado y el avance tecnológico logrado en la Meteorología, hoy se alcanzan horizontes antes muy lejanos, al mismo tiempo que surgen nuevos retos a partir de requerimientos de pronósticos cada vez más especializados. En este marco, la experiencia de los meteorólogos, las observaciones meteorológicas y los modelos de pronóstico numérico del tiempo (MPNT), se combinan para responder a los propósitos antes mencionados.

Los MPNT son en la actualidad la mejor herramienta para la predicción atmosférica. Sin embargo, las soluciones numéricas de los mismos contienen errores por eso la caracterización de estos errores de modelación se hace necesaria.

Por otro lado, dado el volumen de solicitudes de diferentes pronósticos que se puede recibir en la actividad de pronóstico operativo, y la urgencia con la que en muchos casos se exige este pronóstico: es necesario un postprocesamiento de las salidas de los MPNT, que facilite su uso y aplicación. Entre los productos derivados de las salidas numéricas de los MPNT más solicitados se encuentra la detección, clasificación y monitoreo de fenómenos como: frentes fríos, ciclones y áreas de

precipitación y nubosidad que puedan ser de interés.

En este contexto, varios han sido los resultados alcanzados que tributan a la evaluación de los MPNT y a la identificación de diferentes fenómenos atmosféricos en estos. En el primer caso destaca, en particular para la verificación espacial, el “Method for Object-based Diagnostic Evaluation” (MODE) que permite la evaluación de variables discretas como la precipitación. Un ejemplo de su aplicación al Weather Research & Forecast (WRF) descrito en [WRF \(2014\)](#), se encuentra en [Davis et al. \(2009\)](#). Esta técnica fue incluida en el Model Evaluation Tool (MET Developers, 2011). Por su algoritmo basado en la detección de objetos, este método puede ser usado también en la detección de áreas de interés asociadas a las variables discretas. Relacionados con la detección de procesos atmosféricos se encuentran los trabajos de [Jenkner et al. \(2010\)](#) y [Vannière et al., \(2015\)](#), en los cuales se proponen diferentes enfoques para la detección de frentes fríos.

En Cuba, se cuenta con varios sistemas de modelación numérica del tiempo ejecutándose de forma operativa. Ejemplos de estos se encuentran en los trabajos de [Pérez & Mitrani, \(2013\)](#), [Pérez et al. \(2013\)](#), y [Sierra et al. \(2014\)](#). Para la evaluación de dichos sistemas se han alcanzado importantes resultados como lo muestran los trabajos de Roque et al. (2014), y Rodríguez et al. (2016). En estas investigaciones se partió de la propia propuesta del MODE adaptándolo a los datos con los que contaron los autores. Por otro lado, se ha trabajado en el desarrollo de un método para la detección de ciclones en las salidas numéricas. Ejemplo de su

aplicación se puede encontrar en [Martínez et al. \(2011\)](#).

El trabajo que se presenta tiene como objetivo la presentación del Módulo de Detección, Reporte y Evaluación (MDRE) desarrollado en el ámbito del proyecto “*Sistema de predicción a muy corto plazo basado en modelos de alta resolución y asimilación de datos*” (SisPI). Esta herramienta en su primera versión, genera reportes de frentes fríos, ciclones y áreas de precipitación y nubosidad detectados en la salida del “Sistema de predicción automático con cuatro actualizaciones diarias”, ver en [Sierra et al. \(2014\)](#), desarrollado también en el mismo proyecto. Además, el MDRE, a partir de los procesos detectados realiza una verificación espacial de los mismos auxiliándose de imágenes de satélite. Esto último permite conocer la habilidad del sistema de modelación en cuestión, para el pronóstico de este tipo de fenómenos. El módulo está compuesto por los siguientes submódulos: lectura de datos ASCII, NETCDF y TIFF, Csearch (detección de vórtices ciclónicos), Ftsearch (detección de frentes fríos), MODEMod_v1.0 (detección de áreas de nubosidad y precipitación), reporte y evaluación. El módulo tiene adicionalmente como virtudes, su reusabilidad y extensibilidad, además de la portabilidad.

El documento está organizado de la siguiente forma: la estructura del MDRE con los submódulos así como una descripción de los algoritmos matemáticos computacionales utilizados, se encuentra en la sección de *Descripción del MDRE*. La sección *Productos que proporciona el MDRE* presenta algunos de las posibilidades de postprocesamiento que brinda el módulo. Finalmente, se comentan

algunas consideraciones y los pasos a seguir en la sección *Consideraciones finales y trabajo futuro*.

Materiales y Métodos

La estructura y los algoritmos utilizados en el MDRE que se propone, son descritos brevemente en esta sección. También se describen: los lenguajes de programación y bibliotecas utilizados.

Estructura

El Módulo de Detección, Reporte y Evaluación versión 1.0, opera con las salidas numéricas de los modelos Advanced Regional Prediction System (ARPS) descrito en [Xue et al. \(2003\)](#), y con el WRF, además de las imágenes del satélite GOES-13. Para el manejo de estos datos, el MDRE cuenta con el submódulo encargado de la lectura, extracción de las variables meteorológicas necesarias y la preparación de las matrices de datos que serán introducidas en el resto de los submódulos.

El proceso de detección, permite la identificación de los siguientes procesos atmosféricos: frentes fríos, vórtices ciclónicos y áreas de nubosidad y precipitación; mediante los submódulos Ftsearch, Cysearch y MODEMod_v1.0 respectivamente. Como resultado de la detección se obtienen listas de objetos presentes en las salidas de los modelos y en las imágenes de satélite. Cada objeto es caracterizado por atributos geométricos como el centroide, la elongación, la orientación, área, perímetro entre otros. Estos atributos son utilizados para la generación de los reportes y la correspondiente evaluación de acuerdo con las imágenes de satélite.

Como salida de la ejecución del MDRE se obtienen gráficos de posición de los frentes fríos y de trayectorias de vórtices ciclónicos pronosticadas por los modelos. Además para cada plazo de pronóstico se generan mapas con las áreas de nubosidad y precipitación que puedan ser de interés. Las salidas de verificación espacial brindarán información acerca de la cantidad de objetos que se corresponden o no, entre el campo pronóstico (salida de los modelos) y el campo observación (imágenes de satélite). Con estos detalles se calcula Índice de éxito crítico (IEC), la Probabilidad de detección (PD) y otros estadígrafos con los que será posible medir la efectividad de los modelos en el pronóstico de los fenómenos atmosféricos antes mencionados. En la [figura 1](#), se muestra un esquema que resume la estructura del MDRE y el flujo de trabajo en su interior.

Herramientas de Programación

Para la implementación computacional del MDRE así como de su adecuada ejecución, se utilizaron las siguientes herramientas:

- **Lenguaje C++:** utilizado en la programación de los algoritmos de detección, reporte y evaluación
- **Lenguaje Python 2.7:** se emplearon los módulos Numpy, Scipy y Matplotlib. Utilizado fundamentalmente para la construcción de algunas salidas gráficas y como lenguaje de script para la automatización del módulo
- **Biblioteca NETCDF:** necesaria para la lectura de los datos NETCDF, formato de las salidas del WRF

- **Biblioteca LIBTIFF:** necesaria para la lectura de las imágenes de satélite cuyo formato es TIFF
- **GrADS:** se utilizó para la extracción de los datos del ARPS que se encuentran en binario de GrADS y la construcción de algunas salidas gráficas, ver [Doty \(2003\)](#).
- **Compilador de C++:** GNU C++ compiler g++

Además se utilizó el código fuente nutil.h y nutil.c de [Press et al. \(1992\)](#), para el manejo de arreglos y matrices.

Algoritmos

Los algoritmos matemático-computacionales así como, las consideraciones físico-meteorológicas tenidas en cuenta para la detección de los procesos mencionados, se discuten en esta sección. Las descripciones incluyen los parámetros de configuración obtenidos para la aplicación de los diferentes métodos de detección a las salidas numéricas e imágenes de satélites mencionadas anteriormente.

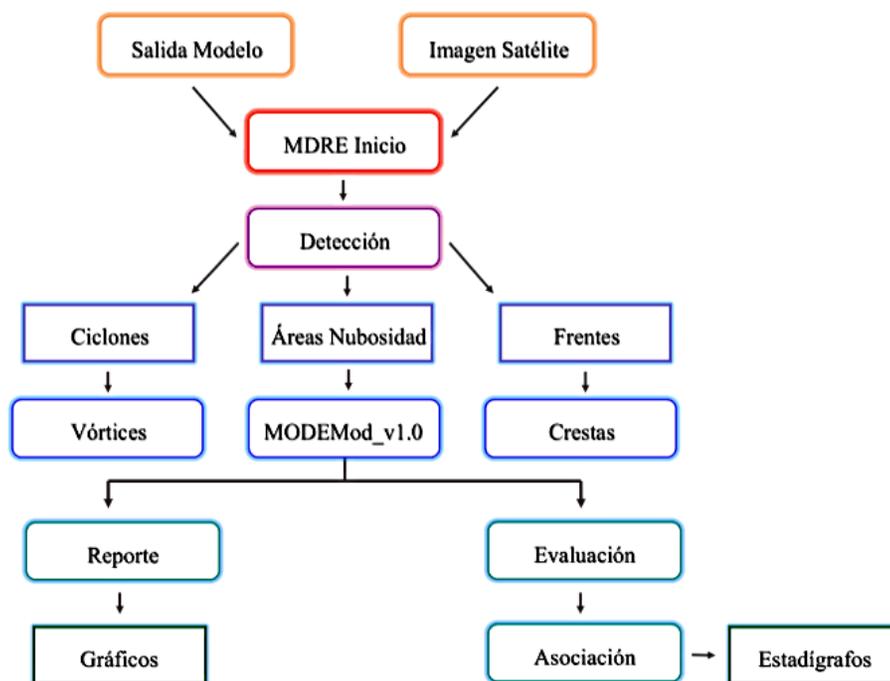


Figura 1. Esquema que describe la estructura del Módulo de Detección, Reporte y Evaluación

1. Cysearch

El submódulo Cysearch consiste en avisos basados en la detección automática de vórtices ciclónicos en las salidas numéricas del modelo WRF. Los vórtices detectados en plazos sucesivos de pronóstico se representan en un mapa de la región en forma de trayectoria.

El método de detección utiliza los campos de presión e intensidad de viento en la superficie. Inicialmente el campo de presión se recorre comparando los valores en cada punto del dominio con la media en los puntos que forman un círculo de 375 km a su alrededor. Si la diferencia es mayor de un umbral de 350 Pa se considera el punto un posible vórtice. Dentro del radio señalado, se examina el campo de intensidad del viento, en el que debe haber una diferencia de intensidades ($V_{max} - V_{min}$) mayor de 60 km/h para la clasificación definitiva. Lo anterior parte de la consideración de que en esa región debe haber valores de viento correspondientes a la zona de vientos máximos y simultáneamente valores de velocidad bajos dentro del ojo. En la exploración de los campos de cada plazo, alrededor de cada vórtice presente quedan agrupados varios puntos de rejilla que cumplen las condiciones anteriores. En un proceso posterior se selecciona un punto como el más representativo de la posición del vórtice para cada grupo, este puede ser el punto con menor presión o el más próximo al centro geométrico del grupo. De esta manera quedan señalados los vórtices detectados en cada plazo de pronóstico. Las trayectorias son construidas partiendo del inicio del pronóstico, buscando para cada vórtice de cada plazo cuál debe ser su correspondiente en el plazo siguiente, si es

que existe alguno con posibilidad de serlo. Se selecciona el más cercano espacialmente y se aplica un umbral de distancia máxima posible según el intervalo de tiempo entre los plazos de pronóstico.

Los umbrales de presión o diferencia de presión, así como las diferencias de valores de viento y el radio del círculo sobre el que se calcula la media de presión que se compara con el punto en el centro fueron ajustados de manera empírica a partir de casos de estudio (Iván, Wilma, Paloma, Ike, Gustav, Katrina) para lograr el mejor índice de acierto y evitar los falsos positivos. Los valores referidos corresponden al dominio de 27 km de resolución de las corridas operativas del modelo WRF. La experiencia indica que estos valores dependen del modelo utilizado y de la resolución del dominio. Este método ha sido aplicado con éxito en trabajos anteriores tales como [Martínez et al. \(2011\)](#).

2. Ftsearch

Dadas las características morfológicas generales de los frentes fríos, se requiere de un enfoque más específico al implementar el reconocimiento automático de los mismos en las salidas de los modelos numéricos. Aunque son varias las variables de salida que pudieran dar información significativa, la mayoría de los reportes en la bibliografía revisada se apoyan en los niveles inferiores y utilizan, principalmente una variable, casi siempre dependiente de la temperatura o del viento. Así, [Orlanski & Ross \(1984\)](#), determinan los perfiles de vorticidad y divergencia a lo largo de una sección transversal a un frente frío a partir de simulaciones numéricas y observaciones, obteniendo perfiles muy característicos con un máximo bien definido de vorticidad

sobre la posición del frente y un mínimo de divergencia que suele desfasarse en la dirección del movimiento. La divergencia (valores mínimos) es la variable utilizada por [Bieringer et al. \(2006\)](#), para la identificación de frentes, mientras que [Hewson \(1998\)](#), y [Jenkner et al. \(2010\)](#), proponen un mecanismo de segundas derivadas que se aplica sobre alguna función de la temperatura, Thermal Front Parameter (TFP), que debe dar valores de 0 sobre la línea del frente. [Thorpe & Clough \(1991\)](#), describen la vorticidad potencial como una variable con capacidad discriminadora y [Vannièrè et al. \(2015\)](#), hace un análisis detallado de esta variable, que depende tanto del viento, como de la temperatura. La ventaja más relevante de estos últimos métodos está en la capacidad de reconocer los frentes en condiciones de orografía compleja, como es el caso de Los Alpes en Europa. La región que comprende el sur de Estados Unidos, el Golfo de México, Cuba y el mar Caribe no presenta este tipo de complicaciones de terreno, y considerando la conveniencia de tener un método de detección que utilice la menor cantidad de datos de entrada posible, se propone la detección utilizando la vorticidad, calculada a partir de las componentes del viento en la superficie.

El método propuesto consiste en calcular la vorticidad en un dominio de salida del modelo, a partir de las componentes U y V del viento a 10 m. Para suprimir efectos de ruido de discretización, se hace un suavizamiento del campo obtenido con un filtro semi gaussiano de 5 x 5 puntos o celdas. Como fue señalado, el campo de vorticidad muestra máximos en dirección perpendicular a las líneas de los frentes, consecuentes con el giro brusco del viento

en esa zona. En el mapa de vorticidad se observan los frentes como crestas prolongadas. El principal inconveniente que surge es que no solo se tienen máximos de vorticidad en la región del frente, sino que otros procesos como ondas y bajas, así como zonas de interacción del viento con accidentes como costas o regiones montañosas, generan máximos con características semejantes, algunos incluso, también presentan forma de crestas.

Debido a la característica descrita de los frentes, en lugar de detectar las regiones de interés mediante algún método de comparación con umbrales y exploración, se implementó un algoritmo que detecta directamente objetos con características morfológicas de crestas, esto se hace convolucionando cada punto del dominio con un conjunto de 12 máscaras de 5 x 5 elementos que representan crestas muy agudas en 12 direcciones diferentes. Si el mayor de los valores de la convolución con alguna de las máscaras es superior a un umbral seleccionado empíricamente, se reconoce el punto como perteneciente a una cresta y se registra, además, en cuál dirección está orientado. Posteriormente, se explora la imagen por filas hasta encontrar algún punto señalado como perteneciente a una cresta, a partir de éste se exploran entonces los vecinos en las direcciones correspondientes con su ángulo de inclinación, construyéndose así las diferentes crestas como listas de puntos o nodos. De cada cresta detectada se determina un conjunto de parámetros que la caracterizan, como la longitud, el centroide, la inclinación respecto a la vertical y una medida del grado de curvatura. Aunque el método de detectar directamente crestas en el mapa de vorticidad elimina todas las

regiones de máximo con morfologías ajenas a los frentes, se reconocen con frecuencia formaciones con tipo de cresta que no son frentes. Para superar esto se emplea entonces una muestra de salidas del modelo que contienen frentes y se estudia la distribución de los parámetros determinados a cada cresta, para definir si los frentes presentan agrupamientos significativos con respecto a éstos parámetros, que permita descartar las crestas que no correspondan a los mismos.

El método de detección fue aplicado a las salidas del dominio 1 con 27 km de resolución definido en [Sierra et al. \(2014\)](#). Se escogieron 5 casos de frentes fríos entre diciembre de 2015 y marzo de 2016. Como el sistema corre 4 veces al día, y cada corrida genera 8 salidas (mapas trihorarios para pronósticos de 24 horas), el número de salidas examinadas fue de aproximadamente 160. De la lista de crestas identificadas y caracterizadas en cada salida se seleccionaron manualmente las que correspondían a frentes fríos, y para este subconjunto se estudiaron las dependencias entre los parámetros determinados en el proceso de detección. La relación entre el ángulo de inclinación y la medida de curvatura arrojó un agrupamiento significativo para los casos de frentes fríos y no frentes. A esta relación se ajustó una función de densidad de probabilidad a los puntos de frentes en el espacio inclinación-curvatura. Escogiendo un umbral apropiado (en este caso 0.003) para esta función, se puede determinar el carácter de frente frío o no, de una cresta en función de sus valores de inclinación y curvatura. La función ajustada consiste en una sumatoria de curvas gaussianas bidimensionales, ya que se trata de un espacio de 2 dimensiones.

3. MODEMod_v1.0

La herramienta MODEMod_v1.0 está basado en el MODE. Esta primera versión fue desarrollada para la aplicación a los pronósticos espaciales de nubosidad pero, también puede ser aplicada a otros campos coherentes con las estructuras espaciales (por ejemplo, la precipitación, la convección, entre otros). Dicha técnica identifica los objetos combinando la tradicional aplicación de umbrales de intensidad con un proceso de convolución con un filtro circular de 25 x 25 celdas, donde los campos son suavizados espacialmente. Los objetos identificados imitan lo que los humanos llamarían regiones de interés. Luego calcula propiedades llamadas atributos, que caracterizan a los objetos individuales:

- **Área:** es el número de cuadrículas que ocupa un objeto
- **Perímetro:** es el número de cuadrículas que conforman el borde de un objeto
- **Posición o centroide:** es el centro de masa del objeto. Se utiliza para tener una medida de la distancia entre los objetos. Es caracterizado por dos valores escalares (latitud-longitud, o las coordenadas de la rejilla x, y)
- **Orientación:** Caracteriza la dirección general u orientación del objeto
- **Razón de aspecto:** Razón entre la longitud del eje menor y el eje mayor del objeto
- **Complejidad:** Razón entre el área del objeto y el área de su envoltura convexa

Con la finalidad de fusionar objetos de un mismo campo y de asociar objetos de

dos campos diferentes se calculan atributos para pares de objetos. Estos son:

- **Distancia mínima entre los bordes:** Es la distancia entre los puntos más cercanos de ambos objetos. Da una medida de la cercanía de los bordes de los objetos
- **Diferencia de centroide:** Es la diferencia entre los centroides de los dos objetos. Proporciona una idea del desplazamiento que existe entre ambos objetos
- **Razón de las áreas:** es la razón entre el área del objeto más pequeño sobre el área del objeto más grande. Proporciona una medida de la semejanza de los objetos en cuanto a su tamaño
- **Razón de los perímetros:** Es la razón entre el perímetro del objeto más pequeño y el perímetro del objeto más grande. Proporciona una medida de la semejanza de los objetos en cuanto a su forma
- **Diferencia de ángulo:** Es la diferencia entre los ángulos de orientación de ambos objetos. Proporciona una medida de la diferencia de inclinación de los ejes de los objetos
- **Proporción de aspecto:** Es la proporción existente entre el valor de razón de aspecto más pequeño y el valor de razón de aspecto más grande. Proporciona una medida de la semejanza de los objetos en cuanto a su forma
- **Razón de complejidad:** Es la razón entre el valor de complejidad más pequeño y el valor de complejidad más grande. Proporciona una medida de la

semejanza de los objetos en cuanto a su forma

La fusión y la asociación se realizan utilizando la lógica difusa. Una vez establecida la correspondencia de objetos entre los campos, se calculan los estadígrafos IEC, PD, la proporción de falsas alarmas (PFA), el sesgo y se determina también un valor denominado mediana de interés máximo, la que agrupa en un único valor los estadígrafos totales de interés para cada una de las combinaciones de objetos en ambos campos.

La configuración del MODEMod_v1.0 utilizada es:

- **Umbral campo observación:** 33 (nivel digital) para las imágenes VIS de 4km y 17 para las imágenes VIS de 1km
- **Umbral campo pronóstico:** 0.3 para el WRF y 0.1 para el ARPS
- **Funciones de Interés:** 400 pts/res de distancia mínima entre los bordes y 600 pts/res de diferencia de centroide

Una descripción detallada de la implementación de este submódulo así como de la determinación de los parámetros de configuración antes mencionados puede ser encontrada en Roque *et al.* (2014), y Rodríguez *et al.* (2016).

Resultados y Discusión

Los productos que ofrece el MDRE se dividen de acuerdo con su propósito. Si lo que se desea es la identificación de los procesos y la generación de un reporte alertando su presencia, se obtienen salidas gráficas señalando la posición de los fenómenos meteorológicos detectados. Por otro lado, si el objetivo es evaluar o

verificar el pronóstico numérico en función de las observaciones satelitales, se calculan estadígrafos referidos a la cantidad de objetos que se corresponden o no, detectados en el pronóstico y la observación. Además en este caso, también se producen gráficos en los que se muestran los objetos encontrados en ambos campos y se colorean de un mismo color los que se corresponden.

En el caso de los ciclones y los frentes fríos, los reportes generan un fichero ASCII con las latitudes y longitudes de las posiciones en cada plazo de pronóstico que proporciona el modelo. En los gráficos se dibuja una trayectoria de los mismos de acuerdo estas ubicaciones. La evaluación de estos procesos se realiza contra la mejor trayectoria para el caso de los ciclones y contra el patrón nuboso detectado en las imágenes de satélite en el caso de los frentes fríos. En la [figura 2](#), se muestra la simulación de trayectoria correspondiente al huracán Wilma (19-25 de octubre de 2005), obtenida a partir de la implementación del submódulo Cysearch a las salidas del modelo WRF correspondientes a esa fecha.

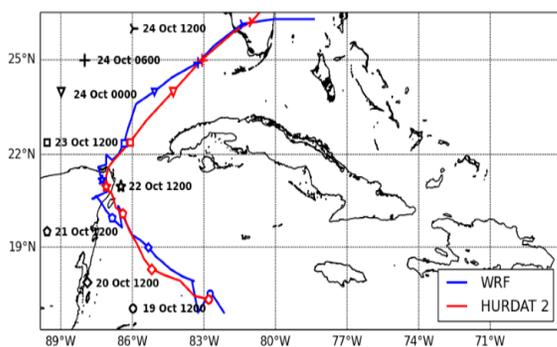


Figura 2. Comparación de las simulaciones de trayectoria del huracán Wilma obtenidas del Hurdatt2 y del Cysearch

Como verificación se emplearon los datos extraídos de la Base de Datos de

Huracanes del Atlántico (HURDAT2 por sus siglas en inglés). En la [figura 3](#) se muestran los resultados obtenidos a partir del submódulo Ftsearch para las salidas del modelo correspondiente al 21 de marzo de 2016 a las 18 UTC. Se identificaron inicialmente 9 crestas ([Figura 3a](#)). El proceso de filtrado implementado a partir de la función de densidad de probabilidad concluyó con el reconocimiento de 6 crestas que conforman el sistema frontal ([Figura 3b](#)). La [figura 3c](#), por su parte, muestra el flujo superficial del viento en el dominio de estudio. Al este de la costa norteamericana se visualizan variaciones en la dirección y fuerza (en metros/segundo) del viento correspondientes a un sistema frontal, que se extiende hasta el sur de la costa sur central del territorio cubano.

Las áreas de nubosidad que pueden ser relevantes, detectadas a partir del MODEMod_v1.0, se muestran luego de la aplicación de la máscara y la fusión. La evaluación de las mismas se realiza a partir de los estadígrafos IEC, PD y PFA, al mismo tiempo que se producen gráficos asociando las áreas que se corresponden mediante colores. Los objetos o áreas no asociados quedan de color blanco. Ejemplos de la verificación de áreas de nubosidad pronosticadas por el modelo ARPS, correspondientes a los días 25 y 26 de marzo de 2013, se muestran en la [figura 4](#). Durante estos días afectó al occidente cubano el frente frío número 15 de la temporada invernal 2012-2013. Se puede observar en cada caso que quedan sin asociar muchos objetos en el campo observación, pero de forma general el método consigue identificar acertadamente los objetos que se corresponden.

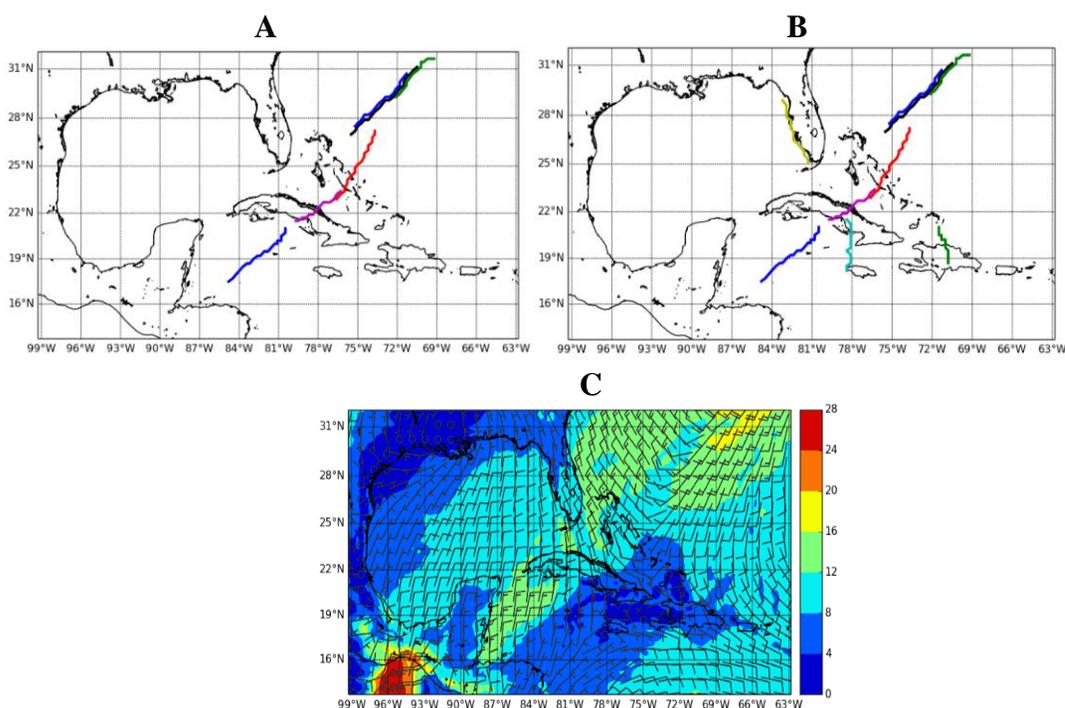


Figura 3. Representación de las crestas identificadas antes del proceso de filtrado (A), y el frente identificado (B), el día 21 de marzo de 2016 (18 UTC). La imagen (C) muestra el viento en superficie

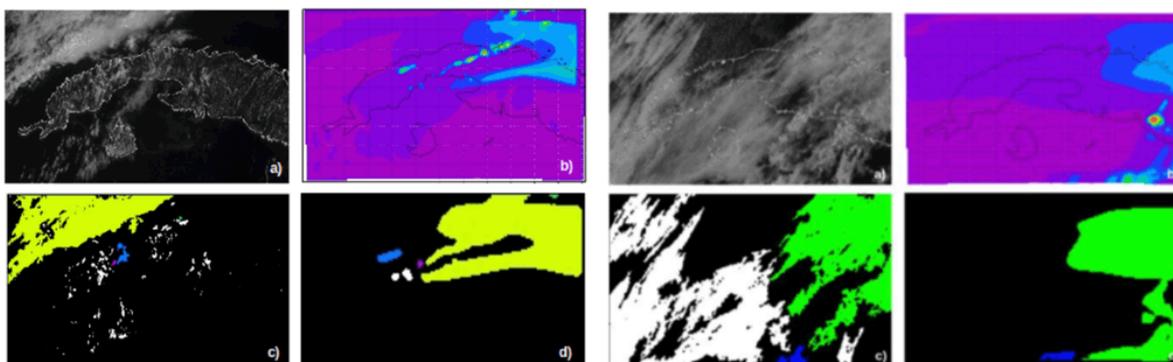


Figura 4. Producto del MDRE como resultado de su aplicación al APRS con la finalidad de evaluar el pronóstico numérico. La imagen izquierda se corresponde con el día 25 de marzo y la derecha con el 26 de marzo ambos del 2013. Los paneles superiores de cada imagen se refieren al campo observación a) y al campo pronóstico b) para cada día, mientras que en los paneles inferiores se muestran los objetos encontrados en cada campo, asociados por colores

Conclusiones y Recomendaciones

Si bien el MDRE se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, su primera versión resulta muy efectiva destacando entre sus ventajas el poco costo computacional y su versatilidad. Esta última está dada por la facilidad con la que puede ser adaptado a diferentes modelos de pronóstico numérico y campos de observación. Es importante resaltar también la doble funcionalidad: como herramienta para el monitoreo y la generación de reportes de diferentes fenómenos meteorológicos, que facilita la interpretación de la salida numérica; y como mecanismo de verificación orientado a objetos y a procesos físicos.

Con vistas a continuar enriqueciendo el módulo, se seguirá profundizando en los métodos que detectan los frentes fríos, ciclones y áreas de interés incluyendo parámetros que permitan una mejor discriminación. Además, extender la funcionalidad del MDRE a la detección de otros procesos como los frentes de brisa y las ondas.

Referencias

Bieringer, P. E.; Morgan, J.; Hurst, J.; Martin, B.; Winkler, S.; Xie, Y.; Mcginley, J. & Albers, S. 2006. "An Assessment of Automated Boundary and Front Detection to Support Convective Initiation Forecasts". In: *Georgia World Congress Center*, Massachusetts, U. S.: American Meteorological Society,

Available:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=3CF20D2921BDD60A9319590A039660BA?doi=10.1.1.207.6543&rep=rep1&type=pdf>>,

[Consulted: October 27, 2016].

Davis, C. A.; Brown, B. G.; Bullock, R. & Halley, G. J. 2009. "The Method for Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) Applied to Numerical Forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program". *Weather and Forecasting*, 24(5): 1252–1267, ISSN: 0882-8156, 1520-0434, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2009WAF2222241.1>.

Doty, B. E. 2003. *Grid Analysis and Display System (GrADS)*. version 1.5.1.12, [Linux - Mac OS X], USA: COLA, Available: <<http://www.m.monsoondata.org/grads/downloads.html>>, [Consulted: October 27, 2016].

Hewson, T. D. 1998. "Objective fronts". *Meteorological Applications*, 5(1): 37–65, ISSN: 1350-4827, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S135048279800553>.

Jenkner, J.; Sprenger, M.; Schwenk, I.; Schwierz, C.; Dierer, S. & Leuenberger, D. 2010. "Detection and climatology of fronts in a high-resolution model reanalysis over the Alps". *Meteorological Applications*, 17(1): 1–18, ISSN: 1469-8080, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/met.142>.

- Martínez, C. D.; Borrajero, M. I.; Bezanilla, M. A. & Centella, A. A. 2011. “La ocurrencia de ciclones tropicales en el Caribe y México y el calentamiento global. Aplicación de un modelo climático regional”. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio: II Época*, (12): 17–30, ISSN: 1729-3790.
- MET Developers 2011. *Model Evaluation Tools Version 3.0.1 (METv3 .0 .1): User's Guide 3.0.3*. Boulder, Colorado, USA: Developmental Testbed Center, 211 p., Available: <http://www.dtcenter.org/met/users/docs/users_guide/MET_Users_Guide_v3.0.3.pdf>, [Consulted: October 27, 2016].
- Orlanski, I. & Ross, B. B. 1984. “The Evolution of an Observed Cold Front. Part II: Mesoscale Dynamics”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(10): 1669–1703, ISSN: 0022-4928, 1520-0469, DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<1669:TEOAOC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<1669:TEOAOC>2.0.CO;2).
- Pérez, B. A.; Díaz, O. O. & Mitrani, I. 2013. “Sistema de Pronóstico Numérico Océano-Atmósfera para la República de Cuba”. In: *VII Congreso Cubano de Meteorología*, ISBN: 978-959-7167-43-3.
- Pérez, B. A. & Mitrani, A. I. 2013. “Pronóstico numérico del oleaje en mares interamericanos y costas de Cuba, mediante los modelos numéricos MM5, WW3 y SWAN”. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 14(1): 14–24, ISSN: 1729-3790.
- Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A. & Vetterling, W. T. 1992. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 994 p., ISBN: 978-0-521-43108-8, Available: <<https://www.amazon.com/Numerical-Recipes-Scientific-Computing-Second/dp/0521431085>>, [Consulted: October 27, 2016].
- Rodríguez, G. C. F.; Sierra, L. M. & Ferrer, H. A. L. 2016. “Modificación e implementación del método de evaluación espacial MODEMod para su uso operativo en Cuba”. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 17(1): 18–31, ISSN: 1729-3790.
- Roque, C. A.; Sierra, L. M. & Quintana, R. N. 2014. “Método de Evaluación Diagnóstico Orientado a Objetos Modificado (MODEMod) utilizando la información de los satélites meteorológicos”. *Ciencia de la Tierra y el Espacio*, 15(2): 139–150, ISSN: 1729-3790.
- Sierra, L. M.; Luis, F. A.; Valdés, H. R.; González, M. Y.; Cruz, R. R. C.; Borrajero, M. I.; Rodríguez, G. C. F.; Quintana, R. N. & Roque, C. A. 2014. *Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios*. (ser. Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos), Informe de

- Resultado, La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología de Cuba, p. 65, Available: <<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2888.1127>>, [Consulted: October 27, 2016].
- Thorpe, A. J. & Clough, S. A. 1991. "Mesoscale dynamics of cold fronts: Structures described by dropsoundings in FRONTS 87". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 117(501): 903–941, ISSN: 0035-9009, 1477-870X, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49711750103>.
- Vannièrè, B.; Czaja, A.; Dacre, H.; Woollings, T. & Parfitt, R. 2015. "A potential vorticity signature for the cold sector of winter extratropical cyclones: PV Signature for Extratropical Cyclone Cold Sector". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694): 432–442, ISSN: 0035-9009, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.2662>.
- Weather Research & Forecasting (WRF). 2014. *ARW Version 3 Modeling System User's Guide*. Boulder, Colorado: Mesoscale & Microscale Meteorology Division-National Center for Atmospheric Research, 413 p., Available: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.5/ARWUsersGuide_V3.pdf>, [Consulted: October 27, 2016].
- Xue, M.; Wang, D.; Gao, J.; Brewster, K. & Droegemeier, K. K. 2003. "The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation". *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82(1–4): 139–170, ISSN: 0177-7971, 1436-5065, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-001-0595-6>.