

## **Análisis de sensibilidad del pronóstico de nubosidad del modelo WRF en la mitad occidental Cuba**

### **Sensitivity study of the cloudiness forecast of the WRF model in the western half of Cuba**

**Lic. Alejandro Baró Pérez**<sup>✉</sup>, **Lic. Israel Borrajero Montejo**

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

#### **Resumen**

En el presente trabajo se realiza un estudio de sensibilidad del pronóstico de nubosidad del modelo WRF-ARW-UPP en la mitad occidental de Cuba. Las corridas se realizaron con dos períodos de *spin-up* del modelo diferentes: 6 horas y 12 horas. Se utilizaron cuatro configuraciones determinadas a partir de las combinaciones de dos esquemas de microfísica (WSM6 y Thompson) con dos esquemas de parametrización de cúmulos (Grell-Freitas y Kain-Fritsch). Las salidas del modelo WRF se compararon con las imágenes del canal IR-4 (10,7  $\mu\text{m}$ ) del satélite GOES-13. Se utilizaron dos métodos de verificación: la comparación punto a punto y la verificación espacial MODEMod\_1.0; con ambos métodos de verificación se obtuvieron tendencias similares en los valores de las medidas calculadas. Los resultados fueron similares para los dos períodos de *spin-up* utilizados; por ello, se recomienda utilizar el más corto (6 h), lo cual significa un ahorro de tiempo y de cálculo en cada corrida.

**Palabras clave:** modelo WRF, verificación, nubosidad, esquema de microfísica, esquema de parametrización de cúmulos, Cuba

#### **Abstract**

In the present work a sensitivity study of the cloudiness forecast of WRF-ARW-UPP model in the western half of Cuba is conducted. The runs were performed with two periods of spin-up of different models: 6 and 12 hours. Four configurations were used to determine as a result of the combination of two microphysics schemes (WSM6 and Thompson) with two cumulus parameterization schemes (Grell-Freitas and Kain-Fritsch). WRF model outputs were compared with images from channel IR-4 (10,7  $\mu\text{m}$ ) of the satellite GOES-13. Two verification methods were used: point to point comparison and the spatial verification MODEMod\_1.0. Similar trends in values of calculated measures were obtained with both verification methods. Results were similar for the two spin-up periods used, so it is advisable to use the shortest (6 hours) which means a saving of time and calculation in each run.

**Key words:** WRF model, verification, clouds, microphysics scheme, cumulus parameterization scheme, Cuba

---

✉ Autor para correspondencia: *Alejandro Baró Pérez*, Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: [alejandro.baro@insmet.cu](mailto:alejandro.baro@insmet.cu)

Recibido: 4 de febrero de 2016

Aceptado: 26 de abril de 2016

## Introducción

La mayoría de los pronósticos de nubosidad se basan en las salidas de los modelos de pronóstico numérico (modelos NWP) (WWRP, 2012-1), y se utilizan en numerosas investigaciones y servicios meteorológicos. Las nubes son la fuente fundamental de la intermitencia de la radiación solar que recibe la superficie terrestre; por ello, los pronósticos de radiación solar, muy útiles para las instalaciones que aprovechen esta energía, están estrechamente vinculados con la calidad de los pronósticos de nubes.

La nubosidad es una de las variables meteorológicas que presenta mayores dificultades en el pronóstico de los modelos numéricos debido a lo complicado que resulta simular de forma adecuada los procesos que ocurren durante la formación, el desarrollo y la disipación de las nubes. Las variaciones espacial y temporal que experimentan los campos nubosos dificultan el pronóstico de los modelos numéricos, para los cuales constituye un reto representar adecuadamente a las nubes en el tiempo y el lugar correctos.

Las observaciones de satélites con resoluciones espacial y temporal altas suministran una excelente información para la verificación del pronóstico de nubes, sobre todo cuando las observaciones convencionales son escasas o no existen ([Zingerle & Nurmi, 2008](#)). Las mediciones de radiancia del satélite utilizadas en las técnicas de verificación se realizan en las partes del espectro infrarrojo donde la atmósfera es transparente a la radiación, conocidas como ventanas atmosféricas. Estas bandas de longitudes de ondas son particularmente sensibles a la presencia de nubes. Se asume que toda la radiación que llega al instrumento del satélite es originada por partículas sólidas o líquidas en la atmósfera o desde la superficie terrestre ([Zingerle, 2005](#)).

Muchos estudios de verificación de modelos numéricos se han enfocado en el pronóstico de nubes. [Morcrette \(1991\)](#), evaluó la nubosidad generada por el modelo ECMWF sobre varias regiones del planeta bajo distintas condiciones meteorológicas, y comparó las temperaturas de brillo simuladas por el modelo con las medidas por el Meteosat. [Zingerle & Nurmi \(2008\)](#), presentaron un mecanismo operativo con miras a verificar a corto y muy corto plazos el pronóstico de nubes del High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) utilizando los instrumentos del Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) instalados en cuatro satélites de órbita polar de la NOAA. [Otkin & Greenwald \(2008\)](#), examinaron la habilidad de distintas combinaciones de parametrizaciones de capa fronteriza y la microfísica de las nubes del WRF para simular de forma realista la gran variedad tipos de nubes asociadas con un ciclón extratropical. Sobre estos temas también se incluyen los trabajos de [Söhne et al. \(2008\)](#), [Nielsen \(2009\)](#), [Otkin et al. \(2009\)](#), [Shah et al. \(2010\)](#).

Otros estudios en los cuales se ha analizado el pronóstico de nubosidad de los modelos NWP, esta vez de forma indirecta, son los que se enfocan en pronosticar la radiación solar mediante los modelos NWP. En este sentido, [Lara et al. \(2012a, 2012b\)](#), [Rincón \(2013\)](#), [Mathiesen et al. \(2014\)](#) coinciden en que los problemas de los modelos NWP para la predicción de la evolución y el desarrollo de las nubes constituyen uno de los factores fundamentales en los errores de los pronósticos de radiación solar.

Con vistas a verificar el pronóstico de nubosidad en los modelos NWP con imágenes de satélite, debe lograrse que las magnitudes que representan a las nubes en los campos pronóstico y observación sean comparables ([Zingerle, 2005](#)).

Es necesario aplicar un criterio para determinar la existencia o no de nubes en ambos campos. Además, resulta ideal que el método de verificación empleado permita conocer la forma en que el pronóstico estuvo bien o mal, y que los errores pequeños de desplazamiento en tiempo y espacio del pronóstico no tengan un peso significativo y perjudiquen el resultado de la evaluación.

En la actualidad, uno de los modelos más utilizados universalmente es el WRF, cuyo pronóstico de nubosidad se ha verificado en varias regiones del mundo; sin embargo, en Cuba no se han realizado estos trabajos, que pudieran ser muy útiles en la esfera investigativa y en los servicios operativos. La situación descrita constituye la causa fundamental que ha motivado la realización este trabajo, que tiene como objetivo principal analizar la sensibilidad del pronóstico de nubosidad del modelo WRF en Cuba mediante varios esquemas de microfísica y de parametrización de cúmulos, y como objetivos específicos verificar por hora y por trimestres el pronóstico de nubosidad del modelo sobre la base de cuatro combinaciones de los esquemas mencionados, y comparar los resultados utilizando dos períodos diferentes de *spin-up* del modelo.

## Materiales y Métodos

Se obtuvo el pronóstico de nubosidad del modelo WRF-ARW, en su versión 3, para cincuenta días distribuidos en los doce meses de 2014. Las corridas del modelo para cada día se efectuaron dos veces, y con miras a comparar los resultados obtenidos en dos períodos de *spin-up* diferentes, como condiciones iniciales se utilizaron las inicializaciones del modelo GFS a las 0 UTC (la primera) y los pronósticos del GFS para las 6 UTC (la segunda). Como condiciones de frontera se utilizaron los pronósticos del GFS para las horas 0, 6, 12 y 18 UTC.

Esta información fue descargada del sitio <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php>. El modelo se corrió utilizando tres dominios anidados con resoluciones de 27 km, 9 km y 3 km. El estudio de sensibilidad se realizó en el dominio de 3 km, el cual abarca la mitad occidental de Cuba.

Las corridas del modelo se realizaron con cuatro configuraciones diferentes determinadas por las combinaciones de dos esquemas de microfísica (Thompson y WSM6), con dos esquemas de parametrización de cúmulos (Grell-Freitas y Kain-Fritsch) (Tabla 1). El resto de los esquemas y parámetros se mantuvo fijo (Tabla 2). Para la selección de las configuraciones que se utilizarían en el análisis se tuvo en cuenta la bibliografía revisada sobre este tema.

**Tabla 1.** Configuración variada

Configuración	Microfísica	Parametrización de cúmulos
1	Thompson (Thom)	Grell-Freitas (GF)
2	WSM-6	Grell-Freitas
3	Thompson	Kain-Fritsch (KF)
4	WSM-6	Kain-Fritsch

**Tabla 2.** Configuración fija

Resolución espacial	3 km
Niveles verticales	27
Modelo tierra-superficie	Noah LSM
Radiación de onda corta	Dudhia
Radiación de onda larga	RTTM
Capa frontera planetaria	YSU

Las salidas del WRF-ARW fueron posprocesadas mediante el NCEP Unified Post Processor (UPP). Este posprocesador incorpora el Community Radiative Transfer Model (CRTM), que permite simular la temperatura de brillo que los canales 2, 3, 4

y 5 del GOES detectarían para el estado de la atmósfera pronosticado o simulado por el modelo WRF. En este trabajo se obtuvo, en los plazos analizados, la temperatura de brillo pronosticada por el WRF-ARW-UPP para el canal IR-4 del GOES-13. Estas salidas fueron comparadas con las imágenes del canal infrarrojo IR-4 (10,7  $\mu\text{m}$ ) del GOES-13 (resolución 4 km), con la finalidad de evaluar el pronóstico de nubes del modelo.

Las imágenes recibidas del satélite GOES-13 vienen en valores del modo-A (Xa), que es una escala de 8 bits en la cual los píxeles pueden tomar valores entre 0 y 255, y se relaciona con los valores de temperatura de brillo ( $T$ ) mediante las ecuaciones siguientes:

$$\text{Para: } 163^{\circ}\text{K} \leq T \leq 242^{\circ}\text{K}, Xa = 418 - T \quad (1)$$

$$\text{Para: } 242^{\circ}\text{K} \leq T \leq 330^{\circ}\text{K}, Xa = 660 - 2T \quad (2)$$

Dado que los umbrales con que se trabajó para la detección de nubes también pertenecían al modo-A, se decidió, utilizando las ecuaciones 1 y 2, convertir los valores de temperatura de brillo de las salidas del modelo a valores del modo-A; luego se realizó la georreferenciación de las imágenes del satélite y las salidas del modelo para llevar ambos campos a mallas regulares idénticas.

Con miras a identificar la presencia o la ausencia de nubes en ambos campos, se utilizaron los umbrales determinados por [Trujillo \(2011\)](#), para la detección de nubes sobre Cuba en el canal IR-4 del GOES-13. Estos umbrales fueron empleados en los dos métodos de evaluación de nubes utilizados: la comparación punto a punto entre las temperaturas de brillo detectadas por el satélite y simuladas por el modelo, y el MODEMod\_1.0 (Figura 1a-f).

Como caso de ejemplo se seleccionó el día 22 de junio de 2014, a las 18:15 UTC. La imagen IR-4 del satélite (Figura 1a) es georreferenciada y llevada a una malla regular (Figura 1b).

En las figuras 1c-f se observan las salidas del WRF-ARW-UPP con las cuatro configuraciones para el mismo dominio, una vez georreferenciadas. En este caso, la escala de colores de las imágenes corresponde a la temperatura, expresada en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), pero en la comparación real los valores utilizados son los del modo-A.

## Métodos de verificación empleados

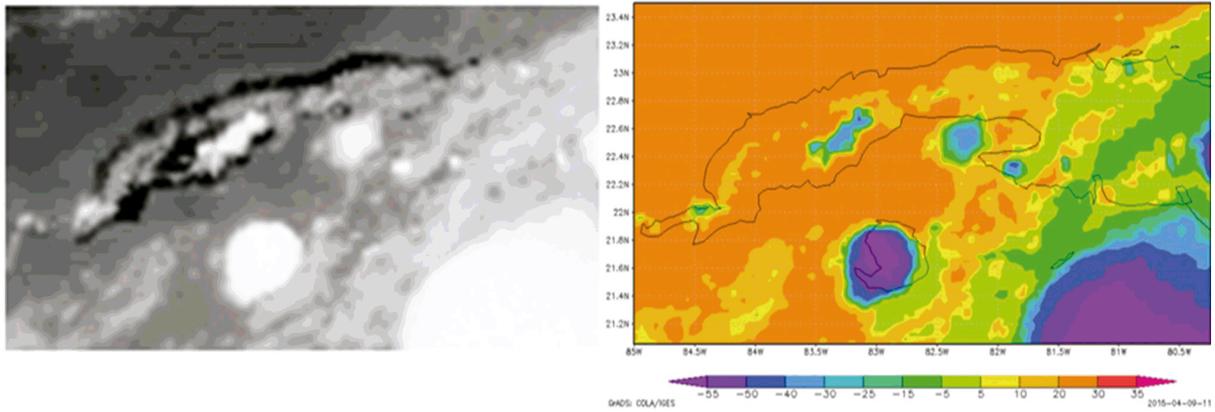
### Comparación punto a punto

Es un método de verificación tradicional. Primero, se determina la “presencia” o “ausencia” de nubes en cada píxel de los campos pronóstico y observación utilizando los umbrales determinados por [Trujillo \(2011\)](#). Luego se comparan los resultados de los píxeles correspondientes de ambos campos; para ello, se utiliza la tabla de contingencia 2x2 (Tabla 3), cuyas variables indican distintas relaciones entre la cantidad de eventos observados y pronosticados.

**Tabla 3.** Tabla de contingencia 2x2

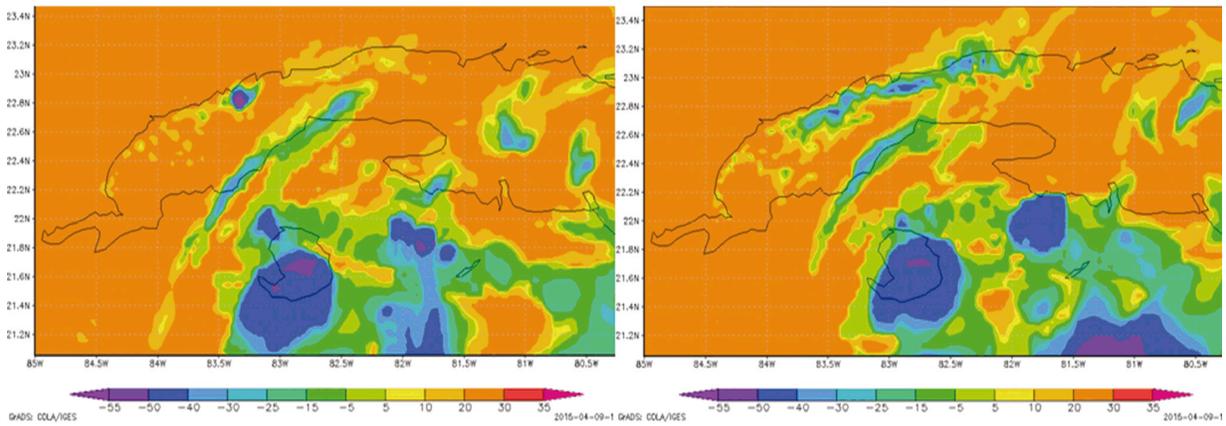
Evento (nube)	Observado		
	Sí	No	
Pronosticado	Sí	A	B
	No	C	D

Las variables de la tabla de contingencia son las siguientes:  $A$ , aciertos (eventos pronosticados que corresponden a eventos observados);  $B$ , falsas alarmas (cantidad de eventos pronosticados que no corresponden con las observaciones);  $C$ , fallos (cantidad de elementos observados que no fueron pronosticados);  $D$ , rechazo correcto (número de eventos no pronosticados que no fueron observados).



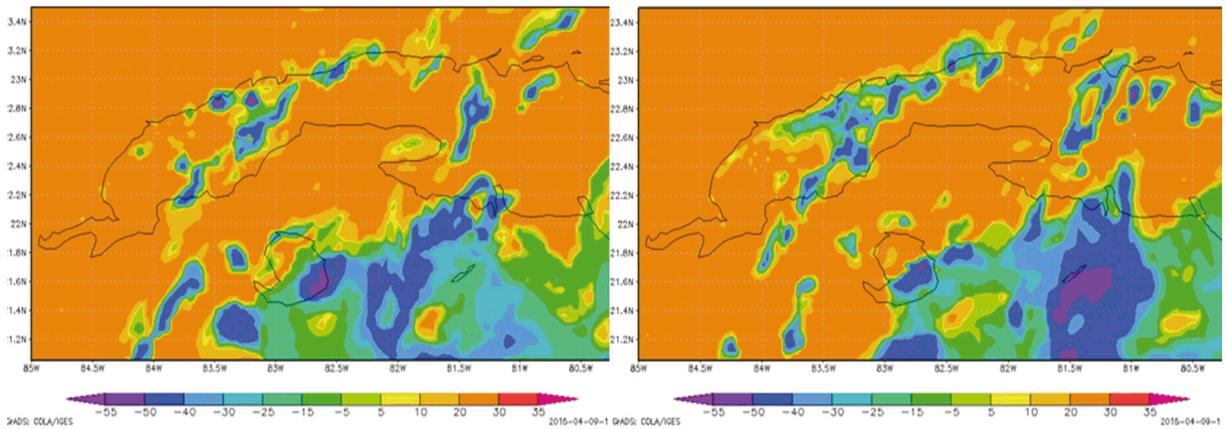
(a) Imagen satélite

(b) Imagen satélite georreferenciada



(c) Thom-GF

(d) WSM6-GF



(e) Thom-KF

(f) WSM6-KF

**Figura 1.** Imagen de satélite y salidas del modelo con las cuatro configuraciones para el 22 de junio de 2014, a las 18:15 UTC

A partir de los valores obtenidos para cada variable en la tabla de contingencia se calculan varias medidas que brindan información sobre la efectividad del pronóstico, entre las cuales pueden mencionarse las siguientes:

Proporción correcta (PC)/Hit rate (HR):  $PC=HR=(A+D)/(A+B+C+D)$ . Indica qué fracción de los pronósticos fue correcta incluyendo nubosidad o cielo despejado. Rango: 0 a 1. Puntuación perfecta: 1.

Índice de éxito crítico o de amenaza/ *Critical success index* (CSI):  $CSI=A/(A+B+C)$ . Permite conocer qué tan bien los pronósticos positivos de eventos corresponden a eventos “sí” observados. Rango: 0 a 1. 0 indica ninguna habilidad. Puntuación perfecta: 1

Probabilidad de detección/ *Probability of detection* (POD):  $POD=A/(A+C)$ . Indica qué fracción de los eventos “sí” observados fueron correctamente pronosticados. Rango: 0 a 1. Puntuación perfecta: 1

Probabilidad de falsa detección / *Probability of false detection* (POFD):  $POFD=B/(D+B)$ . Indica qué fracción de los eventos “no” observados fueron incorrectamente “sí” pronosticados. Rango: 0 a 1. Puntuación perfecta: 0

Proporción o razón de falsa alarma/ *False alarm rate* (FAR):  $FAR=B/(A+B)$ . Indica qué fracción de los eventos “sí” pronosticados no ocurrieron (fueron falsas alarmas) Rango: 0 a 1. Puntuación perfecta: 0

*Discriminante Hanssen y Kuipers* (HK):  $HK=POD-POFD$ . Expresa qué tan bien el pronóstico separa los eventos “sí” de los “no”. Usa todos los elementos de la tabla de contingencia. Rango de -1 a 1. 0 indica ninguna habilidad.

Bias:  $BIAS=(A+B)/(A+C)$ . Razón entre la frecuencia de eventos positivos pronosticados y la frecuencia observada de eventos positivos. Rango: 0 a infinito. Puntuación perfecta: 1

### **Método de evaluación y diagnóstico orientado a objetos modificado (MODEMod\_1.0)**

El MODEMod\_1.0 se utilizó con la finalidad de evaluar la cubierta nubosa pronosticada por el modelo WRF. Para su uso operativo, fue implementado por [Rodríguez \(2014\)](#), quien modificó el MODEMod de [Roque \(2013\)](#). Es un método para evaluar el pronóstico de variables discretas a partir de las imágenes procesadas provenientes de los satélites meteorológicos. Constituye una modificación del MODE, técnica de evaluación espacial perteneciente al Model Evaluation Tools (MET), el cual es un conjunto de herramientas de verificación desarrolladas por el Developmental Testbed Center (DTC) de los Estados Unidos.

El MODEMod\_1.0 reconoce las áreas de nubosidad como resultado de la convolución y aplicación de umbrales. De acuerdo con los valores de interés determinados por el usuario, se agrupan los objetos (nubosidad) de un mismo campo (pronóstico u observación), mientras que los objetos similares que se encuentran en campos diferentes se hacen corresponder. Esta información se procesa utilizando medidas para la evaluación de predicciones categóricas calculadas a partir de la elaboración de una tabla de contingencia 2x2.

Al ser un método de verificación espacial que tiene en cuenta las nuevas formas que se plantean en la actualidad con vistas a la evaluación de pronósticos de variables discretas, el MODEMod\_1.0 puede hallar correspondencia entre objetos (en este caso, áreas nubosas) de los campos pronóstico y observación que no se encuentren exactamente en el mismo lugar en ambos campos. Por tanto, este método supera la dificultad de la doble penalización que caracteriza a las medidas de verificación puntuales.

Los análisis de los resultados con ambos métodos de verificación se realizaron de dos maneras: por hora y por trimestres solapados. La evaluación por hora se efectuó para el período comprendido entre las 12 y las 23 UTC (7:00 a.m. a 6:00 p.m., hora de Cuba), con el objetivo de verificar el pronóstico de nubosidad durante el horario diurno, pues se pretende que los resultados de este trabajo contribuyan a estudios posteriores sobre el pronóstico de radiación solar del WRF en Cuba. Todos los valores obtenidos para la evaluación por trimestres constituyen el promedio de los meses que forman cada trimestre. Los trimestres se confeccionaron del modo siguiente: trimestre 1 (diciembre, enero, febrero), trimestre 2 (enero, febrero, marzo), trimestre 3 (febrero, marzo, abril)... trimestre 12 (noviembre, diciembre, enero), y con ello se logró suavizar las fluctuaciones en los valores observados cuando se obtuvieron los resultados de forma mensual, los cuales se debieron, en buena medida, a que solo pudieron analizarse entre cuatro y seis días de cada mes.

## Resultados y Discusión

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos, los cuales, para su análisis, se reflejan en las figuras de la 2 a la 6. En cada figura, los gráficos de la columna izquierda corresponden a las corridas (1) cuyas condiciones iniciales fueron las inicializaciones del modelo GFS a las 0 UTC, mientras que la columna derecha concierne a las corridas (2) que tuvieron como condiciones iniciales los pronósticos del GFS para las 6 UTC.

### Comparación general

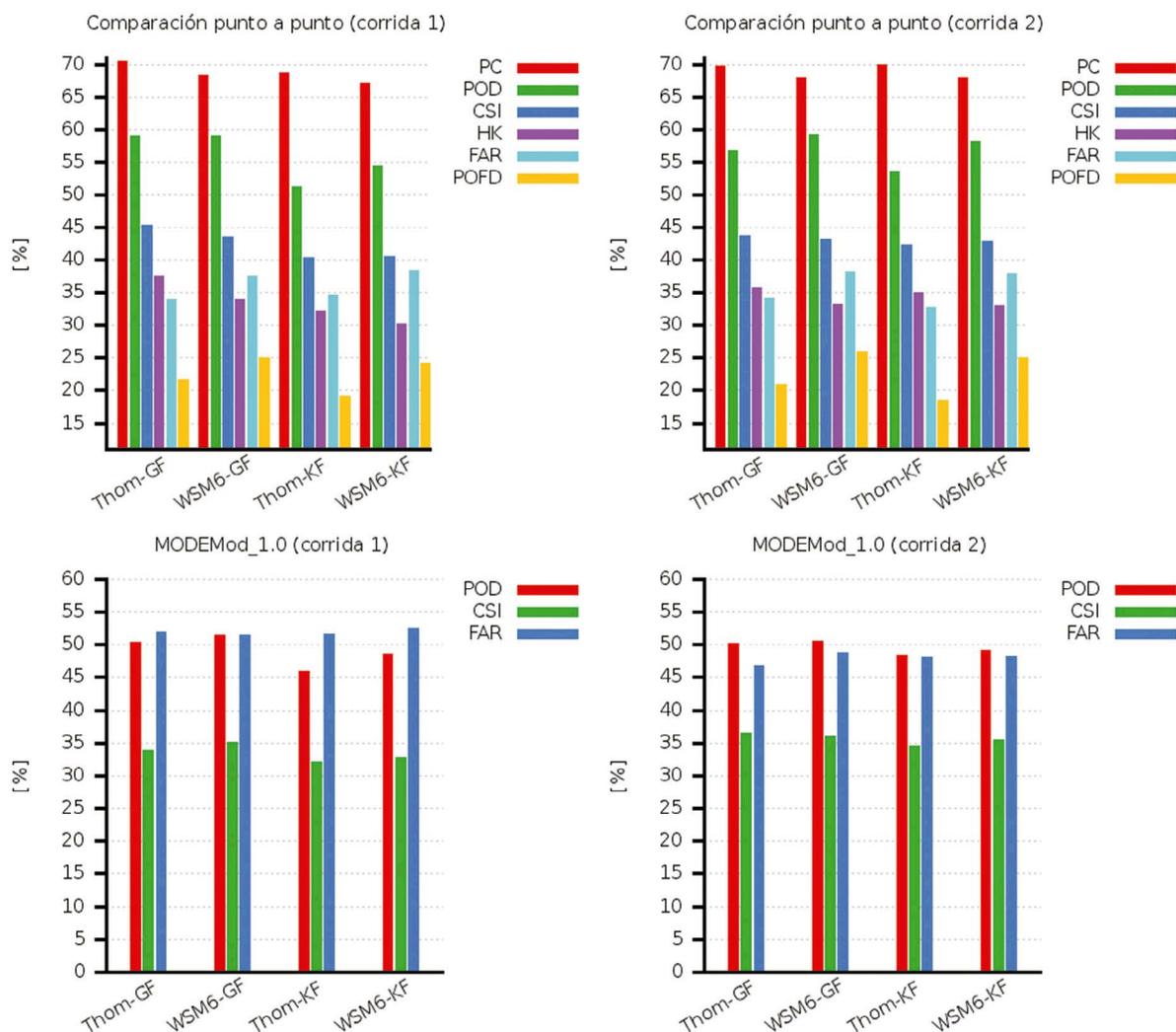
La figura 2 muestra los resultados totales obtenidos con la comparación punto a punto y el MODEMod\_1.0 para cada configuración, con todos los días de 2014 estudiados.

La confrontación entre las corridas 1 y 2 realizadas con la comparación punto a punto presenta resultados similares. En ambas, se observa que para configuraciones con el mismo esquema de parametrización de cúmulos, las que emplearon el esquema de microfísica Thompson obtuvieron menores valores de FAR y POFD que las que usaron el esquema WSM6. Aquellas que recurrieron al esquema Kain-Fritsch mostraron una mejoría pequeña en los resultados de POD, CSI y HK en las corridas 2. Sin embargo, para la configuración Thom-GF ocurrió lo contrario, puesto que los valores de estas medidas disminuyeron ligeramente.

La evaluación con el MODEMod1.0, asimismo, muestra pocas diferencias entre ambas corridas. No se observan cambios notables en los valores de POD; el más significativo fue el aumento de esta medida en las corridas 2 para la configuración Thom-KF. De igual modo, se obtuvieron mayores valores de CSI y menores valores de FAR en las corridas 2, lo cual significa que estas corridas con el MODEMod1.0 tuvieron resultados ligeramente mejores.

### Comparación punto a punto. Verificación por hora

La figura 3 muestra los resultados obtenidos por hora para las medidas POD, CSI y FAR en ambas corridas. A partir de las 14 UTC, en ambas corridas, se observa un incremento de los valores de CSI y una disminución de la FAR. Luego de las 14 UTC, en las corridas 1, los valores de POD y CSI fueron más semejantes para las configuraciones que utilizaron el mismo esquema de parametrización de cúmulos; aquellas que emplearon Grell-Freitas obtuvieron mejores puntuaciones que las que usaron Kain-Fritsch.



**Figura 2.** Evaluación general para ambas corridas con la comparación punto a punto y el MODEMod1.0

En las corridas 2, los resultados de las cuatro configuraciones se mantuvieron más agrupados y las que utilizaron el esquema WSM6 de microfísica alcanzaron las mejores puntuaciones. En cuanto a la FAR, en ambos casos, las configuraciones con el esquema Thompson de microfísica consiguieron menores valores que las que se rigieron por el esquema WSM6.

### Comparación punto a punto. Verificación por trimestres

La figura 4 muestra los resultados obtenidos con la comparación punto a punto en la verificación por trimestres. En la mayoría de los casos, el trimestre 11 obtuvo los mayores valores de POD y CSI combinados con valores relativamente bajos de FAR. En este sentido, también sobresalen los trimestres 5, 6, y 7.

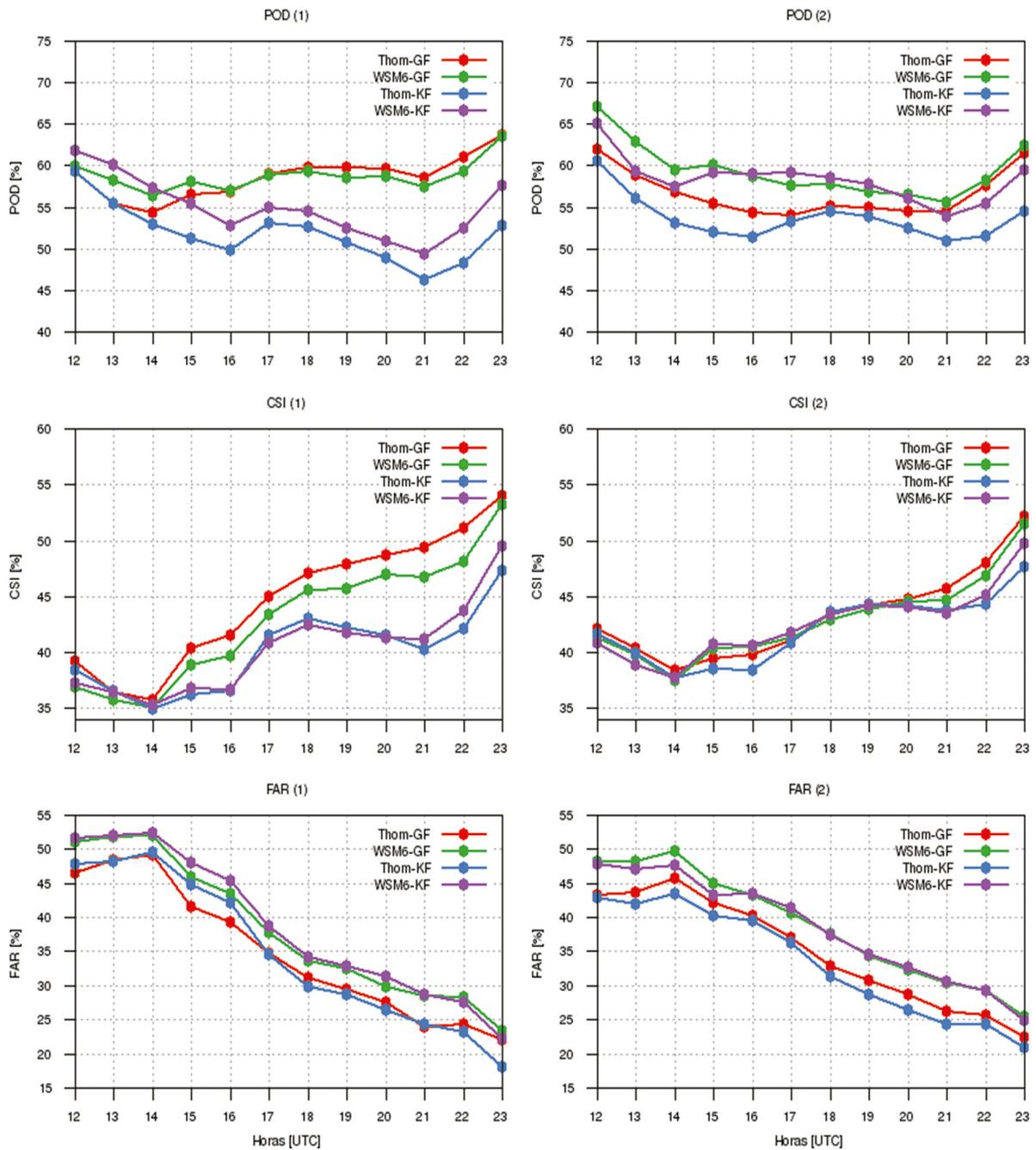
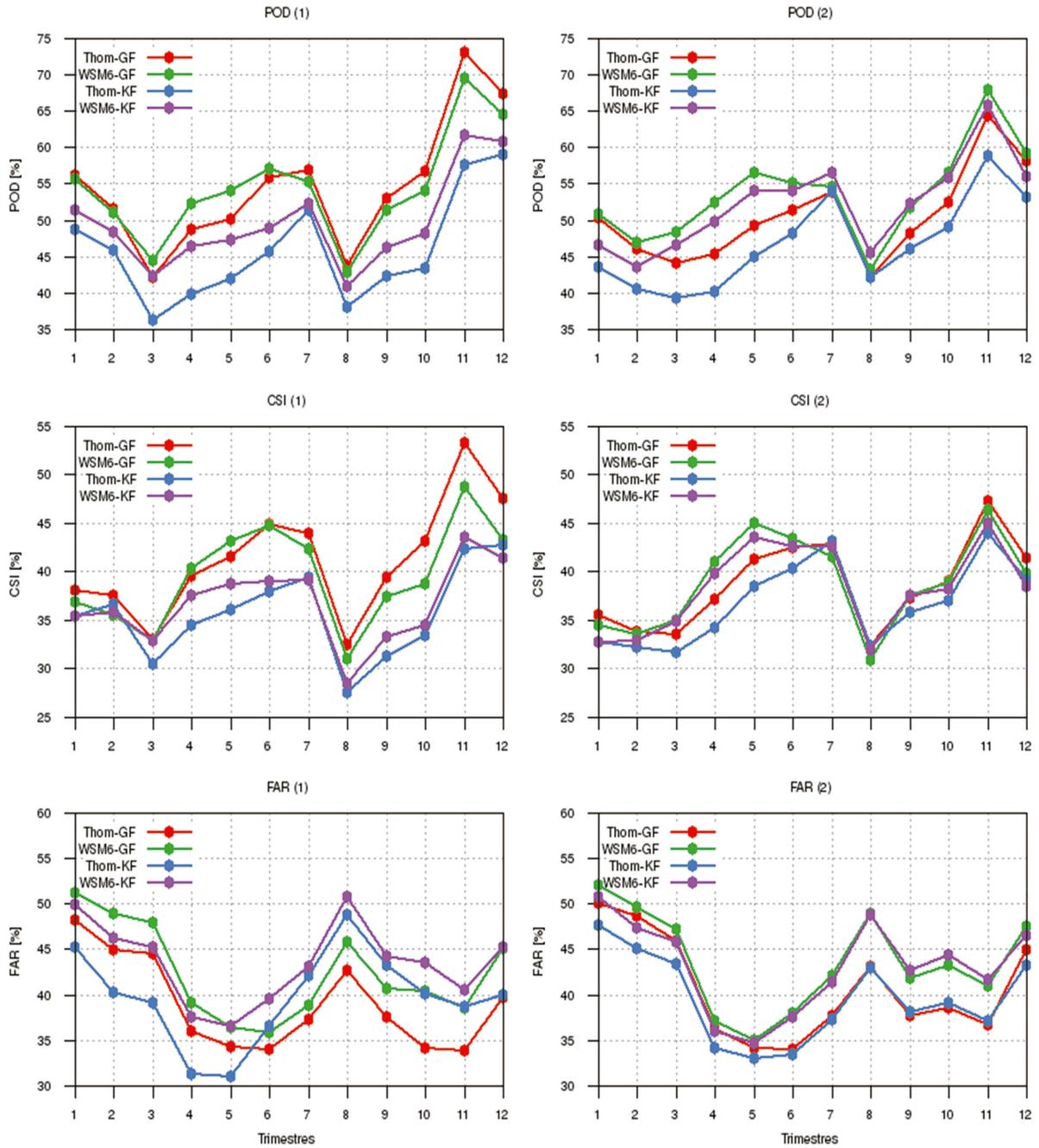


Figura 3. Resultados de la comparación punto a punto. Verificación por hora



**Figura 4.** Resultados de la comparación punto a punto. Verificación por trimestres

El trimestre 8 se destaca por sus bajos valores de POD y CSI, así como por sus altos valores de FAR. Las configuraciones con el esquema de parametrización de cúmulos Grell-Freitas alcanzaron mejores resultados para las corridas 1, en las cuales se aprecia que estas configuraciones obtienen mayores valores de POD y CSI que las que usan Kain-Fritsch. Para las corridas 2, las diferencias entre las configuraciones fueron menores, sobre todo en los valores de CSI. En cuanto a los valores de FAR, para ambas corridas, las configuraciones con el esquema de microfísica Thompson tuvieron menores valores que aquellas que utilizaron WSM6.

### **MODEMod\_1.0. Verificación por hora**

La figura 5 muestra los resultados de la evaluación con MODEMod\_1.0 por hora. Se observan comportamientos similares entre las dos corridas para el POD, CSI y FAR. En general, esta tendencia es similar a la obtenida con la verificación por hora de la comparación punto a punto. A partir de las 14 UTC se constata una tendencia al incremento en los valores de POD y CSI. En el caso de la FAR, la tendencia es a la disminución a partir de las 14-15 UTC, aunque se observan grandes fluctuaciones. En las corridas 1, las configuraciones con el esquema de parametrización de cúmulos Grell-Freitas obtuvieron mejores resultados que las que usaron Kain-Fritsch. En las corridas 2 no se observa una diferencia clara en el gráfico; se aprecia el aumento, respecto a las corridas 1, de los valores de CSI y la disminución de los valores de FAR.

### **MODEMod\_1.0. Verificación por trimestres**

La figura 6 muestra los resultados obtenidos con el MODEMod\_1.0 por trimestres. El comportamiento de los valores

de POD, CSI y FAR es similar al observado en la comparación punto a punto; los mejores resultados se constatan en los trimestres 5, 6, 7 y 11, mientras que los peores se obtienen durante los trimestres 2, 3 y 8. Se vuelve a observar resultados más agrupados en las corridas 2, sobre todo en los valores de POD y CSI. En corridas 1, es evidente que las configuraciones con el esquema de parametrización de cúmulos GF obtienen mejores resultados de POD y CSI durante los primeros y los últimos trimestres. Esta situación también se observa en las corridas 2, aunque con menos claridad. Los valores de CSI son superiores en la mayoría de los trimestres en las corridas 2 con respecto a las corridas 1.

Se observó que, tanto para la verificación por trimestres, como para la horaria, la mejoría de los valores de POD, CSI y FAR ocurría cuando se detectaba mayor cantidad de nubes en el satélite y la salida del modelo de manera conjunta.

### **Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon**

Con el objetivo de determinar si las series de resultados obtenidos con ambas corridas (1 y 2) podían considerarse semejantes o no, se aplicó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon ([Wilcoxon, 1945](#)) a las parejas de series de las corridas 1 y 2 para cada indicador (PC, POD, FAR, CSI, etc.) en las horas 15, 18, 21 y 23 UTC.

Para un nivel de significación de 5 %, la prueba de Wilcoxon arrojó que las diferencias entre las series de las corridas 1 y 2 no fueron significativas en, prácticamente, todos los casos comprobados; solo el Bias de la configuración 1 mostró diferencias significativas para los horarios 15, 21 y 23 UTC, con el nivel de significación 5 %.

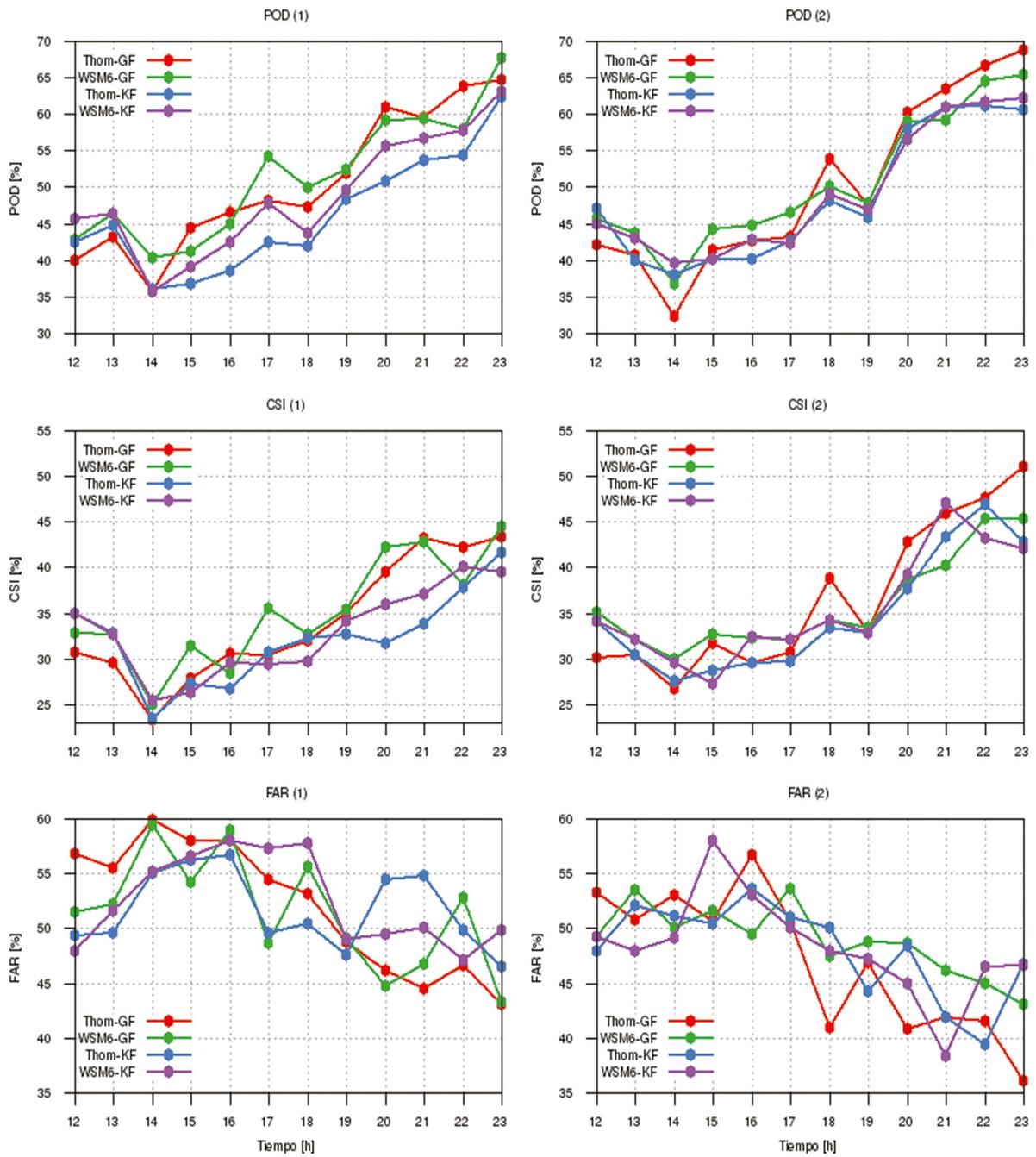


Figura 5. Resultados de la verificación por hora con MODEMod1.0

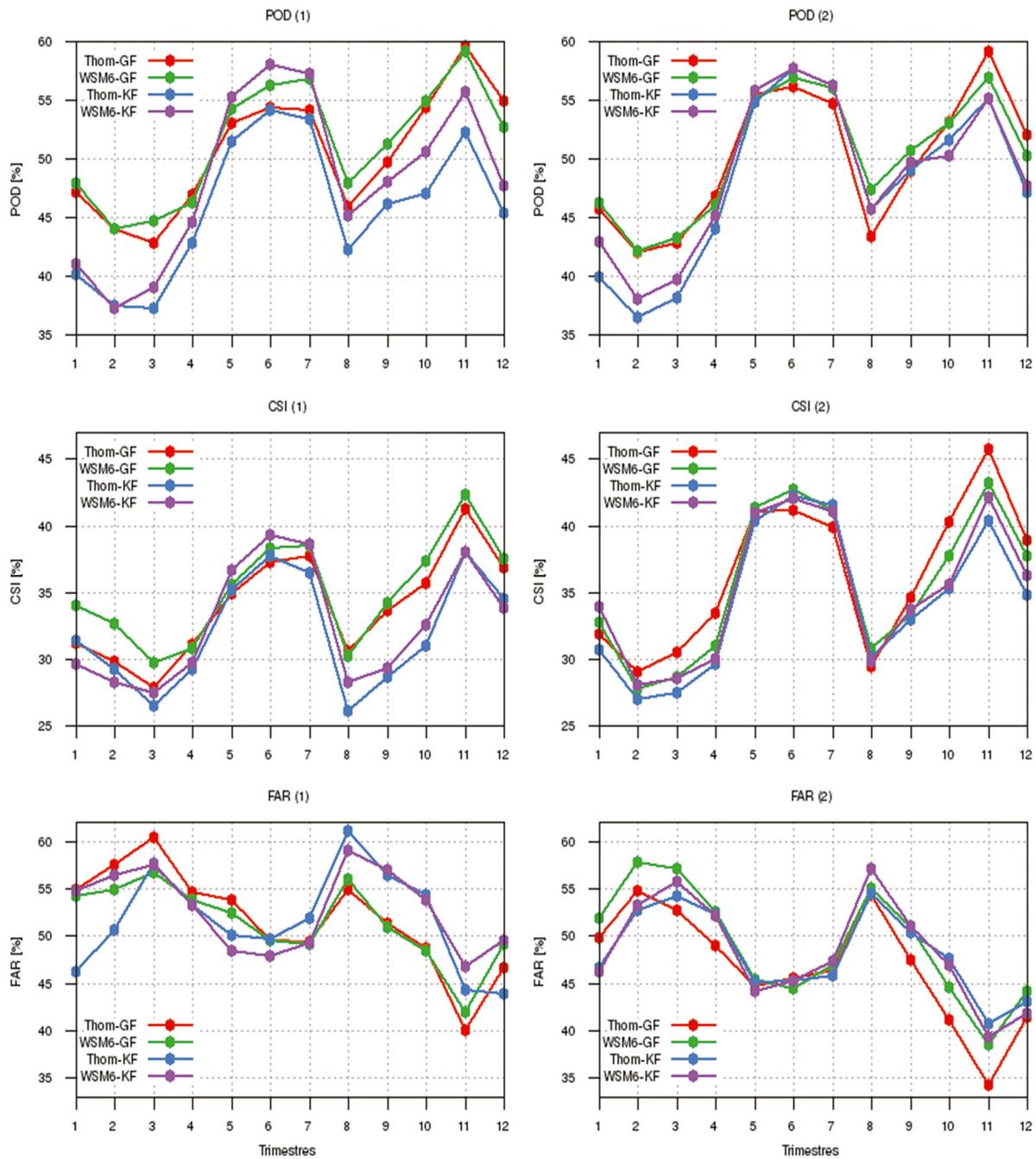


Figura 6. Resultados de la verificación por trimestres con MODEMod1.0

## Conclusiones

- ◆ Con ambos métodos de verificación se obtuvieron resultados similares en cuanto al comportamiento de la marcha por hora y por trimestres de los valores de las medidas utilizadas en la evaluación.
- ◆ En las corridas 1 se evidenció una sensibilidad mayor del pronóstico al cambio del esquema de parametrización de cúmulos en los valores de POD y CSI obtenidos por ambos métodos de evaluación. Las configuraciones que utilizaron el esquema de parametrización de cúmulos Grell-Freitas obtuvieron, de forma global, los mejores resultados en la evaluación por ambos métodos.
- ◆ En las corridas 2, las diferencias entre los resultados de las configuraciones fueron menores; además, en la evaluación con el MODEMod1.0 se observó una mejoría discreta con respecto a las corridas 1.
- ◆ La aplicación de la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon con un nivel de significación de 5 % evidenció que las diferencias entre las corridas 1 y 2 no fueron significativas en la gran mayoría de las series comprobadas. Este resultado permite afirmar que es factible utilizar el período de *spin-up* correspondiente a las corridas 2 (6 horas), puesto que, de este modo, se obtienen resultados similares a los de las corridas 1 (12 horas de *spin-up*) con un ahorro de cálculo y tiempo en cada corrida.
- ◆ Para estudios posteriores sobre este tema se recomienda emplear el sistema de asimilación de datos del modelo WRF, con el objetivo de incorporar imágenes de satélite a las condiciones iniciales del modelo. Las imágenes de satélite utilizadas corresponden

al horario nocturno o temprano en la mañana, cuando, generalmente, existe una estabilidad atmosférica mayor sobre el país y una nubosidad menor; sin embargo, estos datos son de mucha importancia en el caso de afectación por sistemas sinópticos generadores de nubosidad.

## Referencias

- Lara, F. V.; Ruiz, A. J. A.; Pozo, V. A. D.; Gueymard, C. A. & Tovar, P. J. 2012a. "Evaluation of DNI forecast based on the WRF mesoscale atmospheric model for CPV applications". In: *AIP Conference Proceedings, VIII International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems*, 6 October, vol. 1477, Toledo, Spain: AIP Publishing, pp. 317–322, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4753895>, Available: <<http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.4753895>>, [Consulted: October 27, 2016].
- Lara, F. V.; Ruiz, A. J. A.; Pozo, V. D.; Santos, A. F. J. & Tovar, P. J. 2012b. "Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain)". *Solar Energy*, 86(8): 2200–2217, ISSN: 0038-092X, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.014>.
- Mathiesen, P.; Collier, C.; Parkes, J.; Landberg, L. & Kleissl, J. 2014. "Improved Solar Power Forecasting Using Cloud Assimilation into WRF". In: *LII Annual Conference Australian Solar Energy Society*, Melbourne: Australian Solar Council, pp. 703–708, ISBN: 948-0-646-92219-5, Available: <[http://solar.org.au/papers/14papers/121\\_final.pdf](http://solar.org.au/papers/14papers/121_final.pdf)>, [Consulted: October 27, 2016].

- Morcrette, J. J. 1991. "Evaluation of Model-generated Cloudiness: Satellite-observed and Model-generated Diurnal Variability of Brightness Temperature". *Monthly Weather Review*, 119(5): 1205–1224, ISSN: 0027-0644, 1520-0493, DOI:10.1175/1520-0493(1991)119<1205:EOMGCS>2.0.CO;2.
- Nielsen, K. P. 2009. "Verification of HIRLAM cloud forecasts with MSG cloud physical products". In: *HIRLAM All Staff Meeting*, Netherlands: HIRLAM Newsletter, pp. 11–17, No. 55B, Available: <[http://www.hirlam.org/index.php/component/docman/doc\\_download/943-hirlam-newsletter-no-55-part-b-january-2010?Itemid=70](http://www.hirlam.org/index.php/component/docman/doc_download/943-hirlam-newsletter-no-55-part-b-january-2010?Itemid=70)>, [Consulted: October 27, 2016].
- Otkin, J. A. & Greenwald, T. J. 2008. "Comparison of WRF Model-Simulated and MODIS-Derived Cloud Data". *Monthly Weather Review*, 136(6): 1957–1970, ISSN: 0027-0644, 1520-0493, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2007MWR2293.1>.
- Otkin, J. A.; Greenwald, T. J.; Sieglaff, J. & Huang, H. L. 2009. "Validation of a Large-Scale Simulated Brightness Temperature Dataset Using SEVIRI Satellite Observations". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8): 1613–1626, ISSN: 1558-8424, 1558-8432, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JAMC2142.1>.
- Rincón, A. A. 2013. *Sistema de pronóstico de radiación solar a corto plazo a partir de un modelo meteorológico y técnicas de post-proceso para España*. Tesis de Doctorado, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 253 p.
- Rodríguez, C. 2014. *Modificación e implementación del método de evaluación espacial MODEMod para su uso operativo en Cuba*. Tesis de Diploma, La Habana, Cuba: INSTECA, 53 p.
- Roque, A. 2013. *Método de Evaluación Diagnóstico Orientado a Objetos Modificado (MODEMod) utilizando la información de los satélites meteorológicos*. Tesis de Diploma, La Habana, Cuba: INSTEC, 56 p.
- Shah, S.; Rao, B. M.; Kumar, P. & Pal, P. K. 2010. "Verification of cloud cover forecast with INSAT observation over western India". *Journal of Earth System Science*, 119(6): 775–781, ISSN: 0253-4126, 0973-774X, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-010-0062-1>.
- Söhne, N.; Chaboureau, J. P. & Guichard, F. 2008. "Verification of Cloud Cover Forecast with Satellite Observation over West Africa". *Monthly Weather Review*, 136(11): 4421–4434, ISSN: 0027-0644, 1520-0493, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2432.1>.
- Trujillo, G. 2011. *Estimación de la cobertura nubosa sobre Cuba a partir de las imágenes del satélite GOESE*. Tesis de Diploma, La Habana, Cuba: INSTEC, 55 p.
- Wilcoxon, F. 1945. "Individual Comparisons by Ranking Methods". *Biometrics Bulletin*, 1(6): 80, ISSN: 0099-4987, DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/3001968>.
- Zingerle, C. 2005. "Satellite Data in the Verification of Model Cloud Forecasts: A convective case in summer 2003 seen from NOAA satellites". *Hirlam Newsletter*, 48: 173–177.
- Zingerle, C. & Nurmi, P. 2008. "Monitoring and verifying cloud forecasts originating from operational numerical models". *Meteorological Applications*, 15(3): 325–330, ISSN: 1350-4827, 1469-8080, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/met.73>.