

# Evaluación del pronóstico de viento del modelo Weather Research Forecast (WRF) en torres de prospección eólica

*Wind forecast evaluation of the weather research forecast model (WRF) inprospecting wind towers*

**Lic. Alfredo Valdés Verde** | [alfredo.valdes@cav.insmet.cu](mailto:alfredo.valdes@cav.insmet.cu) | Centro Meteorológico Provincial de Ciego de Ávila, Instituto de Meteorología

**Lic. Roberto Carlos Cruz Rodríguez** | [roberto.cruz@insmet.cu](mailto:roberto.cruz@insmet.cu) | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

**Msc. Alfredo Roque Rodríguez** | [alfredo.roque@insmet.cu](mailto:alfredo.roque@insmet.cu) | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Recibido: octubre 5 de 2015; aceptado: noviembre 24 de 2015.

## Resumen

Se realizó la evaluación del pronóstico de la variable viento a corto plazo en Cuba con el modelo numérico mesoescalar Weather Research Forecast (WRF); para ello, se utilizaron valores de la fuerza del viento del año 2008 en nueve torres de referencia meteorológica para el programa eólico cubano en los horarios 09 y 21 UTC, agrupadas en dos grupos según su ubicación geográfica: las situadas hacia el interior y las cercanas a las costas. Se emplearon salidas del modelo Global Forecast System (GFS) para la ejecución del WRF. El nivel utilizado fue el de 10 m, que constituye uno de los niveles más significativos para la generación de energía eólica donde se calcularon los errores de las predicciones y sus correcciones. Los mayores errores se detectaron en el grupo cercano a las costas. El método empleado en las correcciones resultó efectivo, y logró reducir significativamente los errores.

**PALABRAS CLAVE:** Energía eólica, viento, pronóstico, evaluación.

## Abstract

The short-term forecast assessment of the variable wind for Cuba with the mesoscale numerical model Weather Research Forecast (WRF) was performed; for this, was used wind power values of 2008 on 9 Me-

teorological towers of Reference to the Cuban wind program at 09 and 21 UTC, grouped into two clusters according to their geographical location, offshore to inland and near to the costs. Outputs of the Global Forecast System (GFS) model for the implementation of WRF were used. The level used to work was 10 meters which is one of the most significant for wind power generation levels, where errors of the predictions and corrections were calculated. The largest errors were detected in towers near shore. Finally the method used to make corrections was effective and achieved to reduce the errors significantly.

**KEYWORDS:** wind power, wind, forecast, evaluation.

## Introducción

La generación de energía eléctrica resulta de vital importancia en el desarrollo humano actual; sin embargo, los altos costos de los combustibles fósiles y el fuerte impacto ambiental negativo que provoca su explotación, constituyen elementos importantes en la proyección de su obtención.

Además de las energías primarias (petróleo, carbón y gas natural), las cuales son fuentes susceptibles de agotamiento y que, además, deterioran el medio ambiente, existen otras energías más seguras y me-

nos contaminantes: las renovables o energías del futuro; por ejemplo, aquellas que producen electricidad a partir del sol, el viento y el agua. Por su carácter autóctono, las energías renovables contribuyen a disminuir la dependencia del país de los suministros externos, aminoran el riesgo de un abastecimiento poco diversificado, y favorecen el desarrollo tecnológico y la creación de empleos (IDAE, 2011).

Una de estas fuentes renovables de energía es la eólica, de gran interés en todo el mundo por considerarse una de las alternativas más beneficiosas para países en vías de desarrollo (McElroy, 2009), la cual constituye para Cuba una premisa económico-ambiental. Por ello, desde 2005 se han realizado investigaciones con miras a aumentar la exactitud de las predicciones para la velocidad del viento, encaminadas a generar pronósticos energéticos con mayor precisión.

La predicción del tiempo se efectúa de disímiles formas: desde el análisis de mapas sinópticos, los datos de aire superior, imágenes de satélite y radares, mediante el uso de métodos estadísticos, hasta la modelación computacional de extraordinaria importancia como una herramienta en la elaboración de los pronósticos a corto y mediano plazos (Díaz, 2010). Tres tipos de modelos se utilizan para la elaboración de los pronósticos: los *globales*, que se integran sobre todo el globo con un tratamiento numérico en coordenadas esféricas de resolución horizontal y se caracterizan por el número de modos esféricos que consideren en el desarrollo de las soluciones; los *regionales*, con una resolución y una exactitud mayores para reproducir fenómenos a pequeña escala (como las tormentas), de mejores forzamientos orográficos que los anteriores; y los más recientes, los *mesoescales*, que aportan una resolución a menor escala y permiten que los modelos regionales aumenten hasta alcanzar pocos kilómetros, con objeto de mejorar la resolución de fenómenos conectivos locales (tormentas) y otros procesos físicos de pequeña escala (Gutiérrez *et al.*, 2004).

Gracias al desarrollo de la informática, los modelos numéricos fueron prácticos solo hasta la segunda mitad del siglo XX (Charney *et al.*, 1950; Richardson, 1916; Magaña, 2004). Los cambios y adecuaciones de los modelos numéricos se han enfocado a la creación de modelos de *circulación general* (en inglés, GCM) y *atmosféricos de área limitada* (en inglés, LAM), los cuales consideran solo una subregión del globo para simulaciones de tiempo; entre estos se destacan el MM5, el ETA y el WRF (Stauffer y Seaman, 1990; Reyes *et al.*, 2010).

El análisis de cierta actividad mediante la realización de una evaluación admite determinar su valor o importancia; de hecho, la evaluación específica de un pronóstico es el proceso de medición de su valor, y se verifica o compara con una observación correspondiente en el espacio y el tiempo de lo que realmente ocurrió. Puede ser cuantitativa o cualitativa, en cualquier caso brinda una información sobre la naturaleza del error ([http://www.cawcr.gov.au/staff/eee/verif/verif\\_web\\_page.html](http://www.cawcr.gov.au/staff/eee/verif/verif_web_page.html)). Los enfoques de la evaluación de los pronósticos proveen información sobre el desempeño de estos (Brown, 2010); es por naturaleza comparativa y aunque muchos métodos se desarrollan para manejar nuevos tipos de evaluaciones, los de verificación típica involucran el cálculo de índices relativamente simples. Existen razones para su evaluación: monitorear su calidad y mejorarla a partir de la determinación de parametrizaciones más acertadas para el modelo, así como la comparación de diferentes sistemas de pronóstico.

El proceso evaluativo de los pronósticos numéricos del estado del tiempo es de gran significación para la sociedad contemporánea, puesto que garantiza la exactitud, y conduce a una buena planificación y una acertada toma de decisiones.

En muchas organizaciones, la relación entre la función de pronósticos y la toma de decisiones es débil porque los encargados de la toma de decisiones y los pronosticadores tienen puntos de vista diferen-

tes en cuanto a las prioridades. Entonces, surge la interrogante siguiente: ¿Cuáles son los diseños corporativos más favorables para lograr una coincidencia entre ambos? (<http://www.eumed.net/libros-gratis/2009b/543/Evaluacion%20de%20los%20metodos%20de%20pronosticos.htm>)

Al respecto, Fildes *et al.* (1979), Wheelwright y Clarke (1980) proponen algunas soluciones. Sugieren que la clave para evaluar los resultados de los pronósticos en la organización es examinar la manera cómo se emplean los pronósticos y no solamente cómo se producen.

Por su parte, Hanke y Reich (1996) refieren que la aceptación de que las técnicas de pronósticos funcionan sobre datos generados en sucesos históricos pasados, conduce a la identificación de cuatro pasos en el proceso de pronóstico: la recopilación de datos, la reducción o condensación de datos, la construcción del modelo y la extrapolación del modelo (el pronóstico en sí).

Existen tres factores que garantizan un buen pronóstico: la compatibilidad o el grado en que el pronóstico numérico corresponde al juicio del pronosticador, la calidad o el grado en que el pronóstico corresponde con lo ocurrido, y el valor o el grado en el cual el pronóstico ayuda a la toma de decisiones (Díaz, 2010). Allan Murphy (1997) se interesó en obtener detalles de los estadígrafos importantes en la evaluación con miras a investigar nuevas formas de interpretar la verificación desde un punto de vista estadístico, lo cual posibilitó hacer frente a la incertidumbre asociada con la verificación; además, Murphy expresó que la calidad de un sistema de pronóstico no puede resumirse a un único número. De hecho, para representar los atributos vinculados con la calidad de un pronóstico se requiere una variedad de métricas:

1. *Sesgo*: Correspondencia entre el pronóstico medio y la observación media.

2. *Asociación*: Fuerza de la relación lineal entre el pronóstico y la observación.

3. *Exactitud*: Nivel de acuerdo entre el pronóstico y lo ocurrido. La diferencia entre el pronóstico y la observación es el error; un error menor significa una exactitud mayor).

4. *Habilidad*: Relativa exactitud del pronóstico sobre otros de referencia, por ejemplo las predicciones al azar, a través de la persistencia o climatológicos.

5. *Confiabilidad*: Acuerdo medio entre los valores del pronóstico y los observados.

6. *Resolución*: Capacidad del pronóstico para ordenar o resolver un conjunto de eventos en subconjuntos con diferentes distribuciones de frecuencia.

7. *Nitidez*: Tendencia del pronóstico a predecir valores extremos.

8. *Discriminación*: Capacidad del pronóstico para tener mayor frecuencia de predicción en un resultado cada vez que este se produce.

9. *Incertidumbre*: Variabilidad de las observaciones.

En la actualidad, muchas actividades socioeconómicas se planifican de acuerdo con los pronósticos meteorológicos; de ahí, la necesidad de aunar esfuerzos en aras de incrementar cada vez más la certeza en la predicción del tiempo. Una muestra de esa relación es la producción de energía eléctrica mediante fuentes de energía renovables, por ejemplo, la energía eólica; de acuerdo con los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución: “Potenciar el aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía: se utilizará el biogás, la energía eólica, hidráulica y otras; priorizando aquellas que tengan el mayor efecto económico a corto plazo”. (Partido Comunista de Cuba, 2011).

El objetivo del trabajo es evaluar la calidad de las salidas de la variable *fuerza del viento* del modelo WRF, como fase decisiva para su utilización en la elaboración de pronósticos energéticos renovables.

## Materiales y métodos

Se utilizaron los pronósticos de fuerza del viento del modelo WRF compilado y ejecutado en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología de Cuba para 2008, en dominios anidados con una resolución espacial de 27 km y 9 km. Como la mayoría de los modelos de pronóstico, el WRF resuelve las ecuaciones matemáticas que describen la dinámica de la atmósfera; sin embargo, estas ecuaciones solo son una aproximación de la realidad, que suele ser bastante buena para ciertas escalas. Por tanto, otros fenómenos que tienen lugar a escalas menores que las del modelo deberán representarse de forma aproximada mediante parametrizaciones. Las potencialidades del WRF en este aspecto son amplias; para este trabajo las corridas utilizadas (Tabla 1) son las que mejor describen los fenómenos en Cuba (Informe de modelo SISPI, 2014). Como condiciones iniciales y de frontera se tomaron salidas actualizadas cada 3 h e inicializadas a las 00 UTC (*coordinated universal*

*time*) del modelo Global Forecast System (GFS), con una resolución de 0.5 grados (55.55 km).

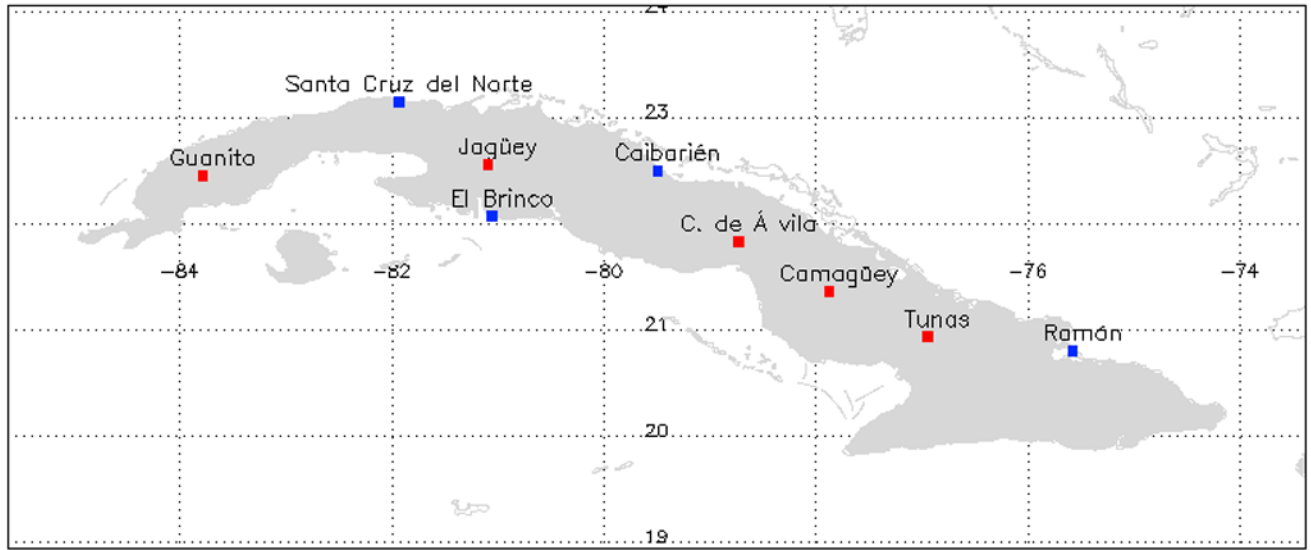
Se escogió el nivel de 10 m de altura para el análisis de evaluación por ser de gran interés en la generación de energía eólica, y se tomaron como referencia los valores observados en nueve torres de gradiente que componen la red de referencia meteorológica para el Programa Eólico Cubano, distribuidas en el territorio nacional, cuya localización geográfica aparece representada en la figura 1, además de otras características que complementan las torres de gradiente (Tabla 2) para los horarios de 09 y 21 UTC, por ser los horarios en que se registran los valores extremos de fuerza del viento.

Con el propósito de determinar la mejor habilidad de las estimaciones del modelo se determinó comparar los valores de viento real y pronosticado por el WRF corrido para esos nueve puntos; estos resultados, además, permiten esclarecer la posible influencia de la ubicación geográfica de cada torre en la calidad de las predicciones. De igual forma, se analizó

TABLA 1

Parametrizaciones físicas empleadas en la corrida del modelo

Parámetro	Clasificación	Descripción
Microfísica	WSM5	Esquema de momento de cinco categorías ( <i>mp_physics=4</i> )
Parametrización de cúmulos	-	No necesaria para dominios con celdas menores de 4 km; para mayores celdas se utiliza el esquema Grell-Devenyi ( <i>cu_physics=3</i> )
Radiación de onda corta	Dudhia scheme	Esquema descendente simple, que considera la absorción y la dispersión en cielos claros o en presencia de nubes. ( <i>ra_sw_physics=1</i> )
Radiación de onda larga	RRTM scheme (Rapid Radiative Transfer Model)	Esquema preciso, que considera múltiples anchos de banda, gases trazadores y especies microfísicas ( <i>ra_lw_physics=1</i> )
Capa atmosférica superficial	Monin-Obukhov (JanjicEta)	Calculo basado en la ecuación de Monin-Obukhov ( <i>sf_sfclay_physics=2</i> )
Modelo de superficie	Noah land-surface model	( <i>sf_surface_physics=2</i> )
Capa límite planetaria (PBL)	MYNN 2.5 level TKE	Esquema moderno, con tratamiento explícito de la capa de arrastre de la cima de la capa límite ( <i>bl_pbl_physics=5</i> )



■ Torres en el interior      ■ Torres cercanas a costas

Fig. 1 Localización geográfica de la torres de viento seleccionadas.

TABLA 2

Alturas y niveles de medición de viento en las torres de gradiente seleccionadas

Emplazamiento	Altura media (m)	Altura de las torres (m)	Niveles de medición (m)
Guanito	212	92	10, 30, 50, 75
SCN	70	60	10, 30, 60
COCC Jagüey	10	60	10, 30, 60
El Brinco	1	150	10, 30, 50, 100
Caibarién	20	80	10, 30, 50, 100
Ciego de Ávila	44	183	10, 30, 50, 100
Camagüey	110	219	10, 30, 50, 100
Las Tunas	120	130	10, 30, 50, 100
Ramón	50	154	10, 30, 50, 100

la marcha anual de los valores reales y pronosticados, con el fin de distinguir visualmente los momentos en que se acercan o alejan ambas líneas.

Asimismo, se realizó un análisis exhaustivo del comportamiento de la fuerza del viento en relación con los valores pronosticados por el modelo; para ello, se calculó la magnitud de los errores de la predicción, que resulta una etapa decisiva para el análisis de la calidad del modelo. Se elaboraron tablas y gráficos que permiten un mejor entendimiento del comportamiento de la variable y brindan una mayor

claridad en la detección de los errores cometidos por el modelo. Los estadígrafos empleados para este trabajo fueron los siguientes:

Valor promedio de las variables pronosticadas:

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (1)$$

Valor medio de las variables observadas:

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \quad (2)$$

Error:

$$Error = \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (3)$$

Error medio:

$$Error_{medio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (4)$$

Error absoluto:

$$Error_{absoluto} = \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (5)$$

Error absoluto medio:

$$Error_{absolutomedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (6)$$

Error cuadrático medio (o su raíz):

$$Error_{cuadraticomedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \quad (7)$$

Error relativo:

$$Error_{relativo} = \sum_{i=1}^N \frac{(F_i - O_i)}{O_i} * 100 \quad (8)$$

Error relativo medio:

$$Error_{relativomedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(F_i - O_i)}{O_i} * 100 \quad (9)$$

Error sistemático:

$$Error_{Sistemático} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (10)$$

Índice de correlación de Pearson:

$$Índice_{de}correlación_{de}Pearson = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(F_i - \bar{F})}{\sigma(O) \sigma(F)} \quad (11)$$

Con vistas a encontrar un factor de corrección, teniendo en cuenta la ocurrencia de errores, se planteó utilizar la media del error sistemático para cada plazo de pronóstico de acuerdo con el signo del error medio, que indica si el pronóstico es mayor o menor que el valor observado:

$$P_{corregido} = P - \frac{E_m}{|E_m|} E_s \quad (12)$$

Donde:  $P$  es el pronóstico emitido por el modelo WRF,  $E_m$  es el error medio para cada plazo de pronóstico y  $E_s$  es la media del error sistemático para cada plazo de pronóstico.

Se tuvo en cuenta el error promedio anual y los errores por temporada (lluviosa y poco lluviosa) y se realizaron comparaciones entre ambas para determinar la existencia de diferencias, y en qué medida estas afectaban la calidad del pronóstico. Asimismo, se efectuó un análisis de correlación entre los valores observados y pronosticados para el nivel de 10 m en cada horario; para ello se aplicó la prueba de significación estadística T de Student.

## Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se muestran a continuación: Los errores resultantes determinados para cada torre evidencian notables diferencias con respecto a la ubicación geográfica: los de mayor magnitud se detectan en las estaciones cercanas a las costas, mientras que las ubicadas en el interior presentan una notable disminución de estos (Fig. 2). En general, los errores (relativo, absoluto, medio y cuadrático medio) poseen un comportamiento similar.

En el caso de torres cercanas a las costas, durante los primeros horarios 09 UTC, la magnitud de los errores es mayor y luego disminuye. En el caso de las estaciones que se encuentran situadas en el interior del territorio, el comportamiento es de forma inversa, y los errores son menores en magnitud; en el horario de las 21 UTC no ocurre de este modo y se aprecia un aumento, aunque siempre en menor medida a los valores registrados en las costas.

El análisis de correlación entre los valores observados y pronosticados para el nivel de 10 m en cada horario (Tabla 3) demostró que la mayor correlación estadísticamente significativa se obtuvo para los horarios de las 21 UTC en el interior 0.79.

TABLA 3  
Coeficientes de correlación entre los valores observados y pronosticados para una altura de 10 m en los horarios 09 y 21 UTC

Variables	Obs 09 Int	Obs 21 Int	Obs 09 Cost	Obs 21 Cost
Pro 09 Int	0.72			
Pro 21 Int		0.79		
Pro 09 Cost			0.60	
Pro 21 Cost				0.63

Nota: Los valores rojos son significativos para  $p < 0.05$ .

Los índices de correlación de Pearson para los va-

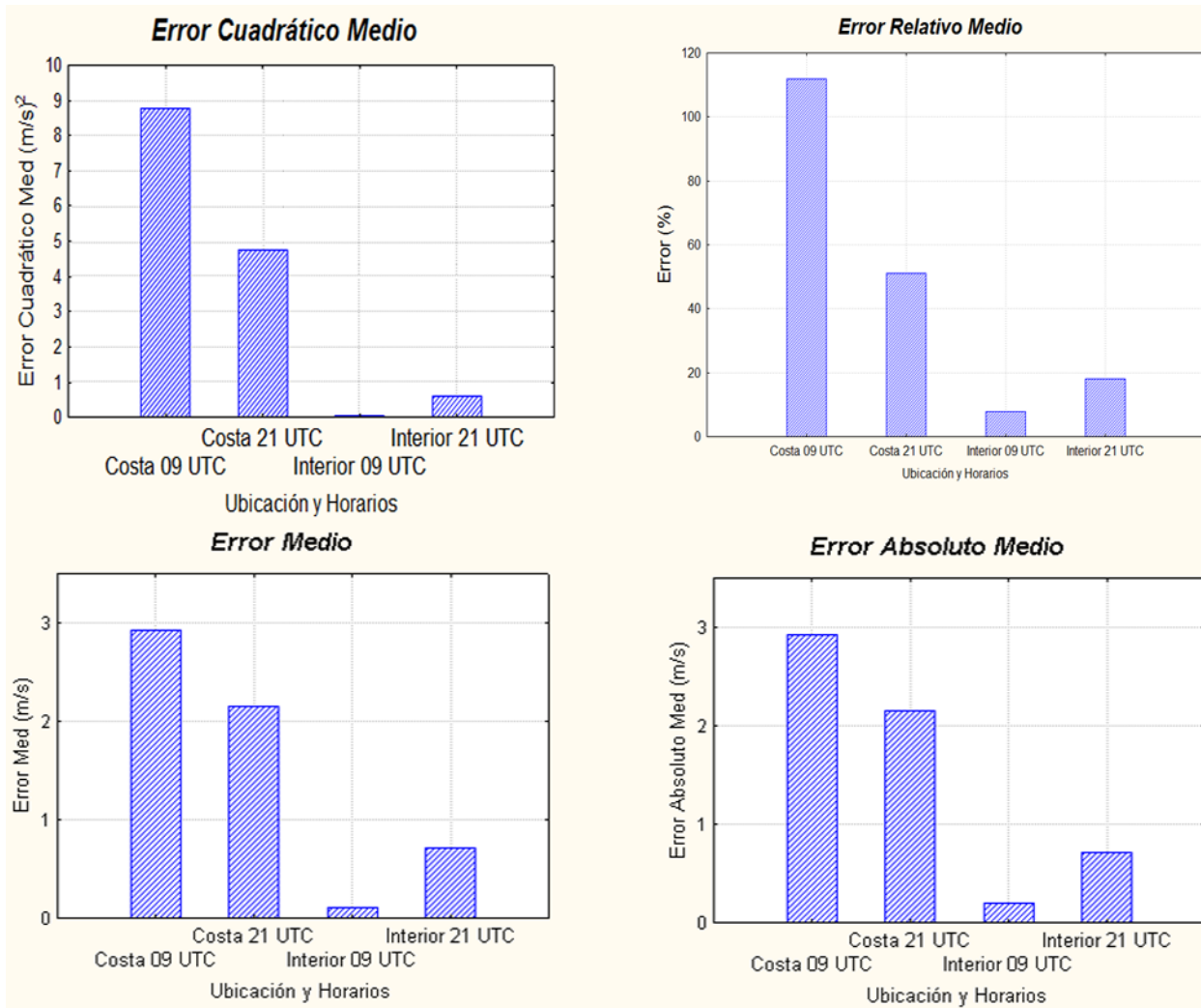


Fig. 2 Comportamiento de los errores detectados en la marcha anual de los vientos, según horarios de 09 y 21 UTC en estaciones del interior y cercanas a las costas.

lores reales y pronosticados por el modelo WRF presentaron valores de correlación que oscilaban entre 0.59 y 0.79 (Tabla 4).

TABLA 4

Coefficientes de correlación entre los valores observados y pronosticados en interior y en las costas para una altura de 10 m en los horarios 09 y 21 UTC

Horarios	Índice de correlación (interior)	Índice de correlación (costas)
09 UTC	0.71	0.79
21 UTC	0.59	0.62

Nota: Los valores rojos son significativos para  $p < 0.05$ .

La figura 3 muestra la exactitud de la marcha media anual de la variable estudiada para los doce meses del año; se constata cuánto se aleja el pronóstico de los valores reales de la fuerza del viento observados. Se aprecia que el modelo tiende a sobrestimar los valores de esta variable todo el año, en especial para las estaciones de costas (ver Fig. 2). El modelo de pronóstico es capaz de predecir con una exactitud superior la marcha anual y se evidencia una mayor similitud de sus valores entre las predicciones y los valores registrados, fundamentalmente, en la temporada lluviosa (mayo–octubre).

La figura 4 muestra la marcha media anual de los

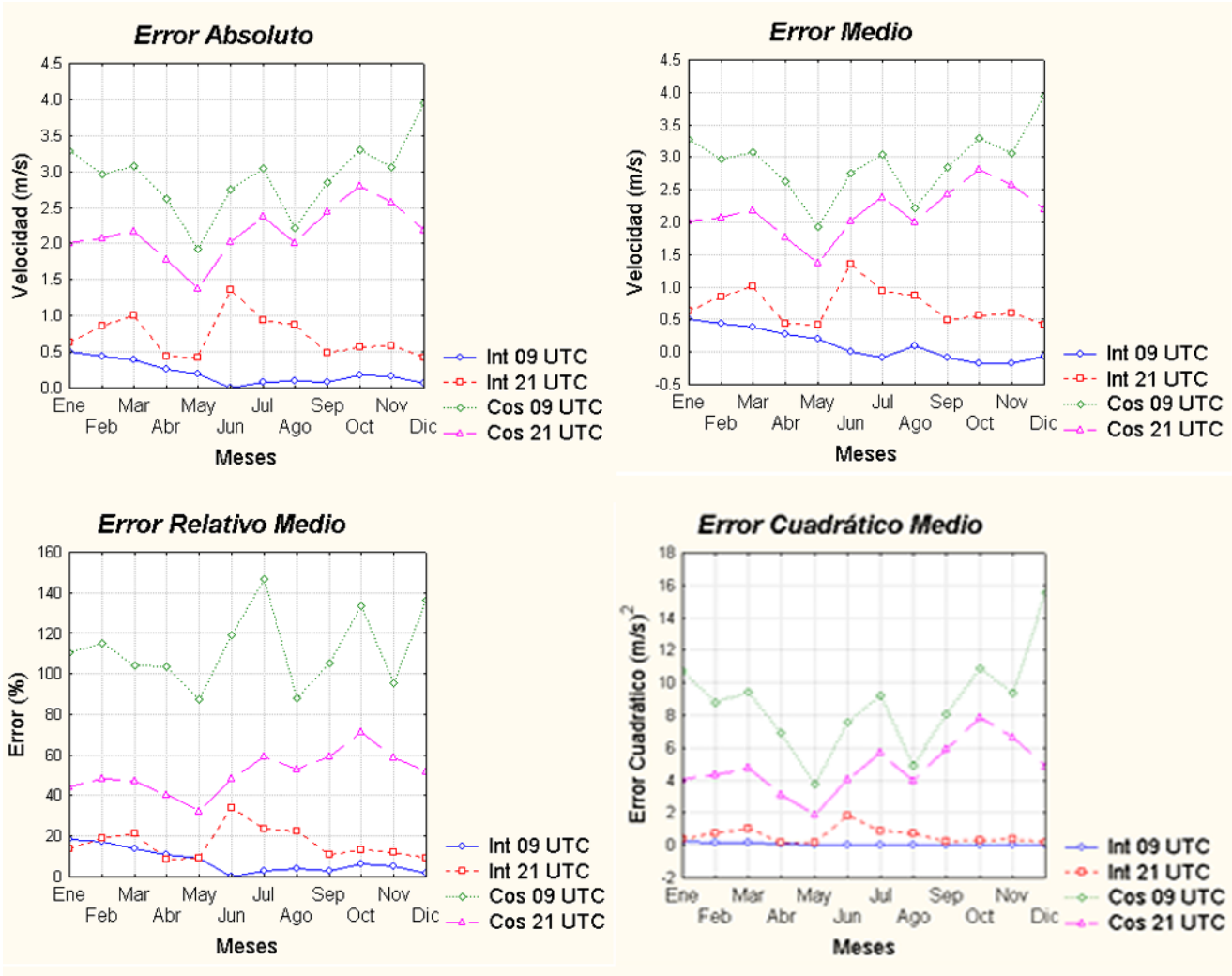


Fig. 3 Comportamiento de la marcha media anual del viento a 10 m de altura.

errores para los doce meses del año; se observa que los errores cuadrático medio y absoluto medio presentan un comportamiento semejante todo el año, dado que ambos estadígrafos representan la diferencia neta entre los valores pronosticados y observados. En general, los errores son mayores para los meses del período poco lluvioso; este comportamiento puede responder a que las parametrizaciones con que se corre el modelo están ajustadas para una mayor efectividad a los meses del período lluvioso.

La determinación del error medio reafirma lo expuesto: el modelo realiza una sobrestimación de la fuerza del viento con registros superiores a cero, ex-

cepto algunos casos en las estaciones del interior a las 09 UTC, donde se aprecian valores inferiores.

La obtención de cifras para el error medio muy cercanas a cero indica que los valores predichos, indistintamente, pueden ser mayores o menores que los observados, lo cual significa que aunque el pronóstico tiene valores cercanos a los reales, estos no poseen una tendencia a representar el comportamiento real de la variable.

En cuanto al error absoluto medio, este alcanzó valores máximos en las estaciones situadas en las costas, con valores de 3.94 m/s durante diciembre a las 09 UTC y en junio a las 21 UTC, con una velocidad



de 1.3 m/s. Los valores mínimos se presentan en las localizadas en el interior durante junio, con valores muy cercanos a cero a las 21 UTC. Se destaca que para este mismo horario se registran los valores mínimos durante mayo, con valores de 1.37 m/s en las estaciones ubicadas en las costas.

El error relativo medio alcanzó valores mínimos en las estaciones del interior durante el horario de las 09 UTC, con 0.15 % para el interior en junio y 32 % en mayo para las de las costas, pero a las 21 UTC. Se registraron las cifras máximas para estas últimas en el horario de las 09 UTC, con 146 % en julio, mientras que para las del interior resultaron en junio a las 21 UTC, con 34 %. Este índice es importante para la ca-

racterización del comportamiento del pronóstico de las variables meteorológicas según Díaz (2010), quien, además, señala que este registro demuestra la significación que tiene el error con respecto a la magnitud de la variable y cuál porcentaje representa con respecto al valor que toma la variable.

El resultado de las correcciones del pronóstico WRF fue efectivo y se logró reducir la magnitud de los errores presentados por el modelo. La figura 5 muestra los errores promedios cometidos durante el año, primero corregidos y luego de la forma original de salida. Es considerable la reducción de los errores que representó la corrección realizada, y demostró ser una opción factible con miras a aumentar el nivel

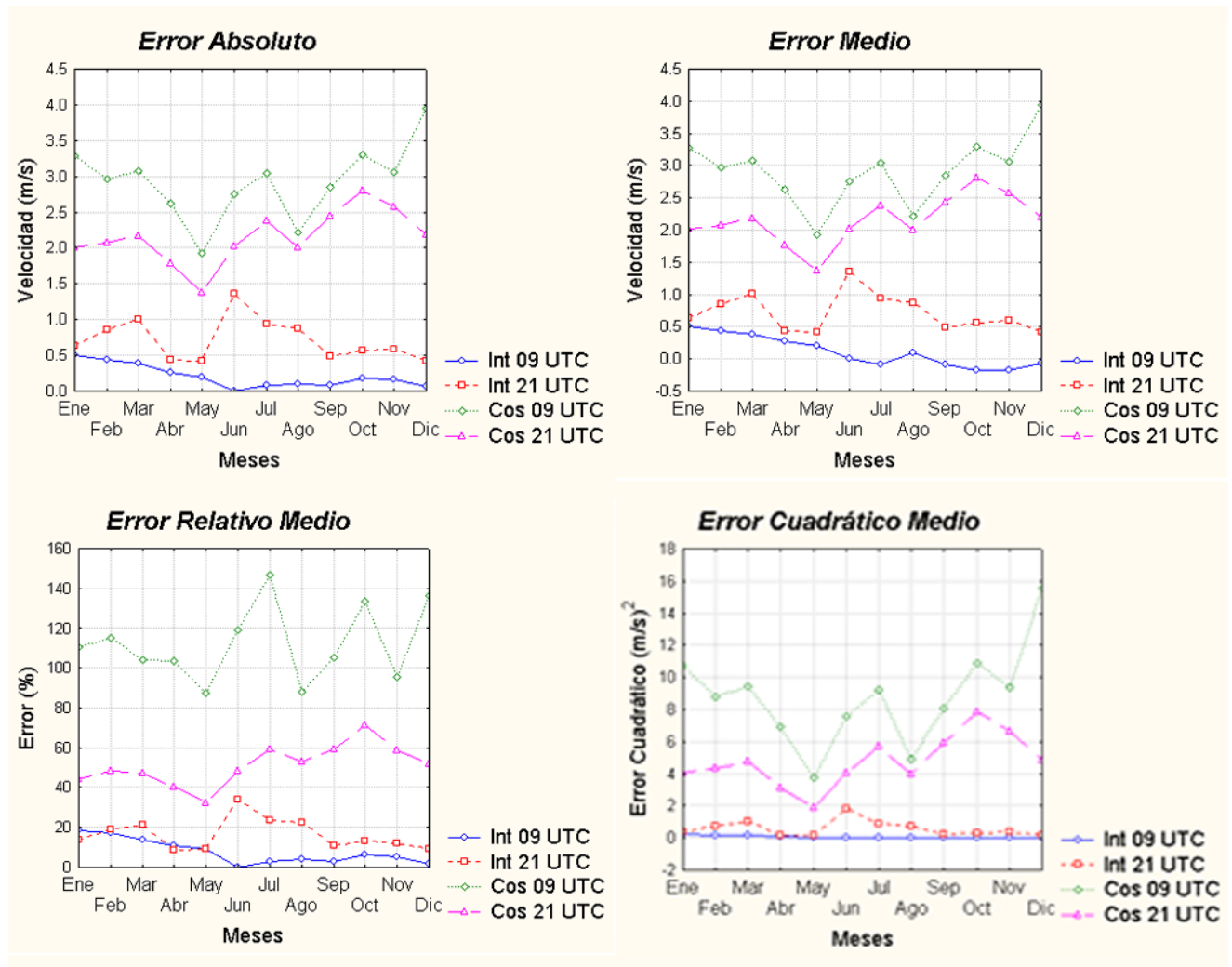


Fig. 4 Marcha media anual de los errores para los doce meses del año.

de exactitud necesario para la elaboración de los pronósticos de la fuerza del viento durante la puesta en funcionamiento de los parques eólicos.

Para todos los casos se obtuvo errores de los pronósticos corregidos con valores por debajo de los originales que presentaba el modelo. El error máximo relativo se redujo considerablemente de 112 % (presentado por el modelo) a 7.62 %; el absoluto descendió de 2.9 m/s a 0.21 m/s, aunque después de realizar la corrección el cálculo del error mostró una subestimación de los valores reales.

De forma similar ocurre con los análisis mensuales de los pronósticos para los dos horarios (Fig. 6), en los cuales se reducen los errores presentados por

el modelo. Se aprecia que el error relativo se redujo considerablemente: valores que superaron 140 % para julio descienden en mayo a porcentajes cercanos a 50 %, en ambos casos durante el horario de las 09 UTC.

A continuación, se presentan los resultados referentes a la exactitud del modelo WRF en el pronóstico de fuerza del viento a 10 m.

La tabla 5 muestra los valores medios de los errores del pronóstico durante el período analizado. Se aprecian los promedios de los menores errores relativos correspondientes al pronóstico de las 09 y 21 UTC en las estaciones localizadas en el interior, ambos inferiores a 17 %, lo cual evidencia una buena calidad en

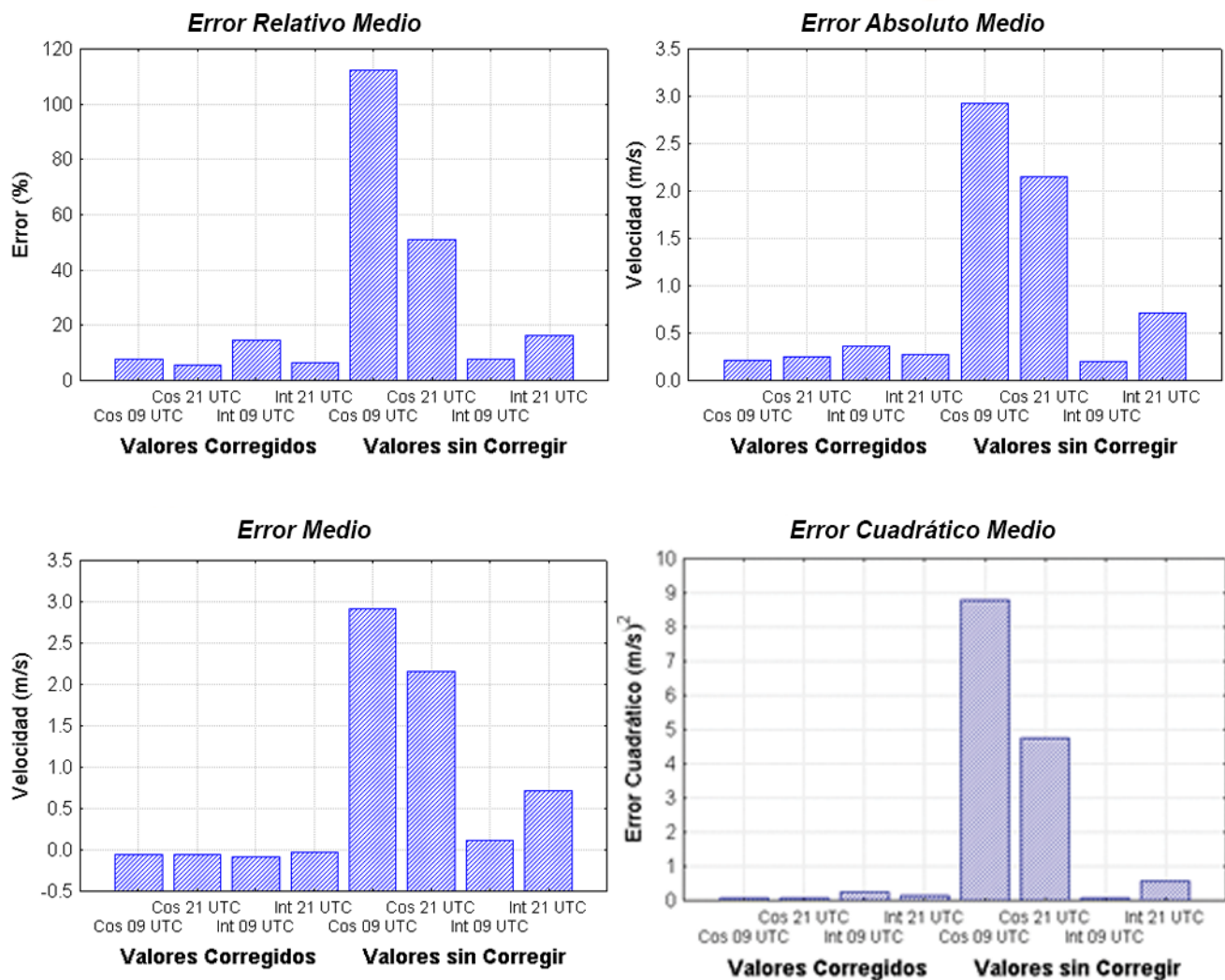


Fig. 5 Comportamiento de medio de los errores corregidos y sin corregir cometidos durante el año.

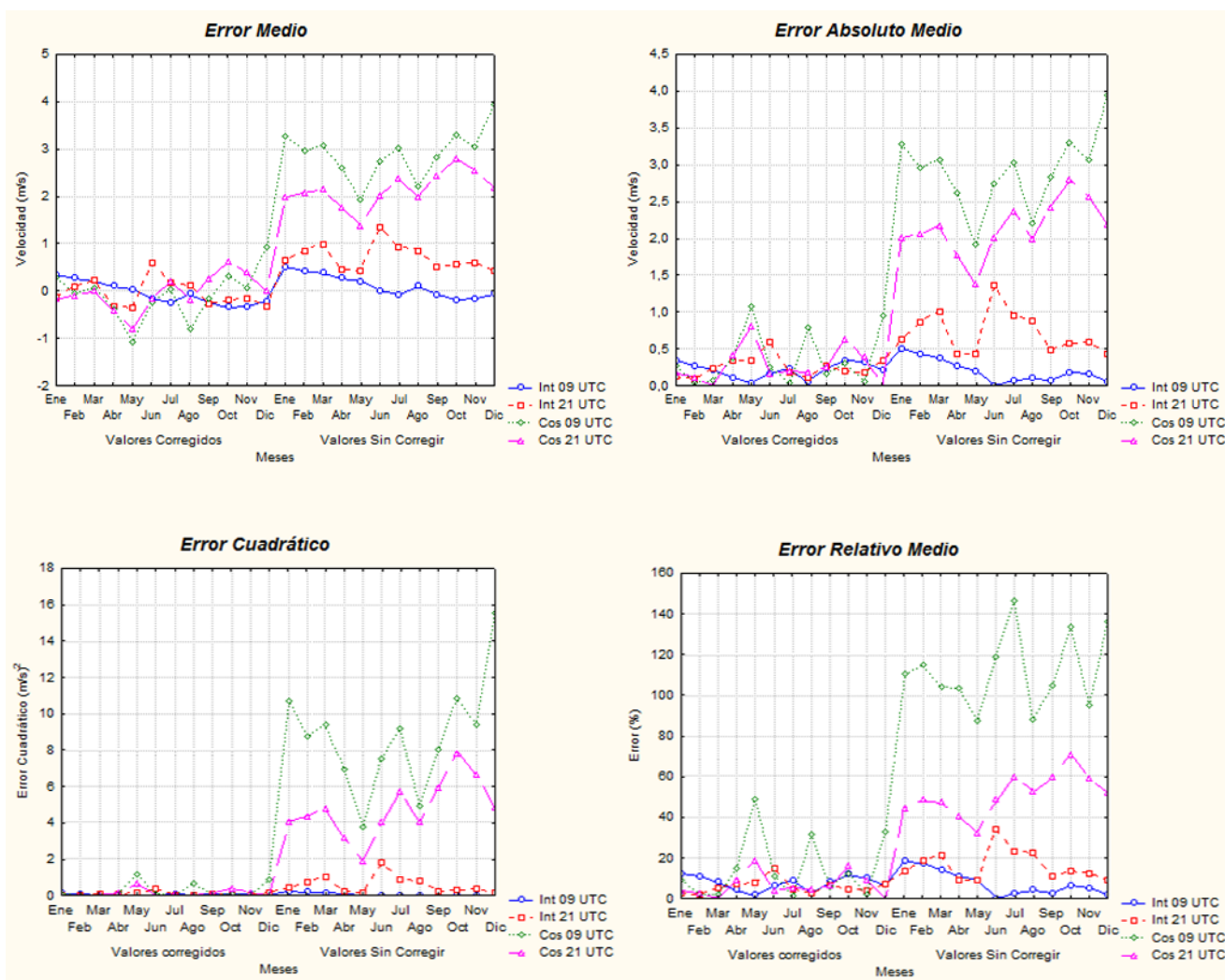


Fig. 6 Comportamiento promedio de los errores corregidos y sin corregir cometidos por meses.

la predicción calculada para esos horarios, a pesar de que, por su gran variabilidad, resulta difícil la elaboración de pronósticos de viento. Por el contrario, en los mismos horarios, pero en las localizaciones de costas, los errores relativos fueron elevados (112.13 % y 51.22 %, respectivamente), lo que demostró una

pobre habilidad del modelo para el pronóstico de la fuerza del viento en estas localidades, al menos para la configuración escogida.

Los errores absolutos permitieron identificar el rango de exactitud del pronóstico de la variable estudiada a partir de 0.30 m/s y 0.80 m/s para el valor de

TABLA 5  
Valores medios de los estadígrafos calculados para el período analizado

Horario	Valor medio pronosticado	Valor medio observado	Error cuadrático medio	Error absoluto medio	Error medio	Error relativo medio	Error sistemático
09 UTC interior	2.82	2.71	0.06	0.20	0.10	7.71	0.30
21 UTC interior	5.17	4.46	0.58	0.71	0.71	16.43	0.76
09 UTC costas	5.53	2.61	8.77	2.92	2.92	112.13	3
21 UTC costas	6.37	4.22	4.75	2.15	2.15	51.22	2.18

la velocidad del viento a las 09 y 21UTC en las localidades del interior, mientras que en los mismos horarios para las costas resultaron de 3 m/s y 2.20 m/s. En aras de expresar la exactitud de un pronóstico numérico es necesario analizar los valores del error absoluto medio, puesto que esta medida se relaciona con el sesgo de una estimación, de modo que cuanto menor es el sesgo, más exacto es una estimación (Díaz, 2010).

## Conclusiones

1. El pronóstico numérico del modelo WRF para la variable fuerza del viento se caracterizó por el predominio de sobrestimación de los valores reales registrados por las torres para localizaciones de costas en 100 % de los valores promediados mensualmente, en las zonas del interior en 90 % a las 21UTC y en 52 % a las 09UTC. Existen diferencias en cuanto al comportamiento de los errores absolutos y relativos según la localización de las torres; en general, estos son de mayor magnitud para las situadas en las costas con respecto a las ubicadas en zonas del interior para ambos horarios. El de las 09UTC presenta los extremos (máximos en las costas y mínimos en el interior).
2. Los criterios y procedimientos estadísticos para la realización de las correcciones al pronóstico arrojaron resultados que mejoran notablemente el nivel de exactitud de la calidad de las salidas, dado el incremento de la precisión y la disminución de los errores.
3. Los pronósticos realizados logran representar adecuadamente la marcha anual del viento, tanto en las torres cercanas a las costas, como del interior.

## Referencias bibliográficas

BROWN, B. 2010. Forecast evaluation. No longer just Root-Mean-Squared Error. *Weather and Society*

Watch. 4. Tomado de: [http://www.sip.ucar.edu/news/pdf/WSW\\_January\\_2010.pdf](http://www.sip.ucar.edu/news/pdf/WSW_January_2010.pdf).

CHARNEY, J. G., FJORTOFT, R. AND VON NEUMAN, J. 1950 “Numerical integration of the barotropic vorticity equation”, *Tellus* 2,237-254.

DÍAZ, Y. 2010. Evaluación del pronóstico numérico del tiempo a corto plazo para Cuba con el modelo de mesoescala MM5V3. Tesis de grado, INSTEC.

Informe de sistema de predicción a muy corto plazo basado en el acoplamiento de modelo de alta resolución y asimilación de datos. Colectivo de autores. 2014. Instituto de Meteorología. Cuba.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA. 2011. Plan de Energías Renovables 2011-2020.

FILDES, R. AND LUSK, J. E. 1984, “The choice of a forecasting model”, *International Journal of Management Science*, 12, 427-435.

GUTIÉRREZ, J. M. *et al.*, 2004. Redes Probabilísticas y Neuronales de las Ciencias Atmosféricas, Madrid, Ministerio del Medio Ambiente, ISBN 84-8320-281-6

HANKE, J AND REICH, J. G. 1996. Kohonen Map As A Visualization Tool For The Analysis Of Protein Sequences-Multiple Alignments, Domains And Segments Of Secondary Structures, *Computer Applications In The Biosciences*, 12(6). 447-454

LECHA, L. B., PAZ, L. R. AND LAPINEL, B. 1994. *El clima de Cuba*, La Habana, Editorial Academia, 65-82, ISBN 959-02-006-0.

MAGAÑA, R. V. 2004. *Los impactos del niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México. 229.

MCELROY, M. 2009. “Potential for Wind-Generated Electricity in China”. *Science/ AAAS*, 11 September 2009. 325. 1378-1380

MURPHY, A. H. 1997. *Economic values of weather and climate forecast*, New York, Cambridge Univ. Press, ISBN 0-521-43420-3

PARTIDO COMUNISTA DE CUBA. *Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución*. VI Congreso del Partido Comunista de Cuba. Aprobado el 18 de Abril del 2011, La Habana. Cuba, lineamiento 247.

RICHARDSON, L. F. 1916. *Weather prediction by numerical process*. London, Cambridge Univ. Press, 236.

ROQUE, A. 2010. Caracterización físico-meteorológica de las capas bajas de la atmósfera a partir de la implementación de una red de torres altas de gradiente y su aplicación de al estudio de viento como fuente de energía. Informe de proyecto, Desarrollo energético sostenible. Instituto de Meteorología.

STAUFFER, D. R. AND SEAMAN, N. L. 1990. "Use of four-dimensional data assimilation in a limited-areamesoscale model. Part 1: Experiments with synoptic-scaledata". *Mon. Wea. Rev.*118:1250-1277.

WHEELWRIGHT, S. C. AND CLARKE, D. G. 1976. "Corporate fore-casting: promise and reality", *Harvard Business Review*, 54, 40-42, 47-48, 52, 60, 64,198.