

Método de pronóstico de temperaturas mínimas para las estaciones meteorológicas de la región occidental

Forecasting Method minimum temperatures for weather stations in the western region

MSc. Janny González Socorro | janny.gonzalez@insmet.cu | Centro Nacional de Pronósticos. Instituto de Meteorología
Dra. Maritza Ballester Pérez | maritza.ballester@insmet.cu | Centro Nacional de Pronósticos. Instituto de Meteorología
Lic. Yinelys Bermúdez Souza | yinelys.bermudez@insmet.cu | Centro Nacional de Pronósticos. Instituto de Meteorología
MSc. Rogert Sorí Gómez | rogert.sori@cav.insmet.cu | Centro Nacional de Pronósticos. Instituto de Meteorología
Tec. Milagros Sarmiento Scull | milagro.sarmiento@insmet.cu | Centro Nacional de Pronósticos. Instituto de Meteorología
Dr. Eduardo A. Fernández Díaz | eduardo.fernandez@insmet.cu | Centro Nacional de Pronósticos. Instituto de Meteorología

Recibido: diciembre 9, 2013; aceptado: junio 20, 2014.

Resumen

Se desarrolla un método basado en el Perfect Prog con vistas a predecir la temperatura mínima en un plazo de 24 h para la región occidental de Cuba durante la temporada invernal. La muestra dependiente se constituye con los meses de noviembre a abril entre los años 1990 y 2005. Los predictores de mayor contribución al incremento de la varianza explicada por las ecuaciones obtenidas son la temperatura de las superficies isobáricas de 1 000 hPa y 925 hPa, además de la persistencia. Las ecuaciones, excepto una, son capaces de explicar la varianza entre 71 % y 82 %, y los errores absolutos medios varían entre 0.9 °C y 1.6 °C. En la validación de la muestra independiente (temporada invernal 2010–2011), los errores absolutos medios oscilan entre 0.9 °C y 2.2 °C a causa, en lo fundamental, de que los pronósticos del Global Forecast System tienden a sobrestimar la fuerza del viento en superficie a las 12 UTC y la temperatura del aire en el nivel de 1 000 hPa a las 06 y las 12 UTC. Las correcciones propuestas para el viento y la temperatura pronosticados por el Global Forecast System mejoran sustancialmente las predicciones, aproximándose los errores medios de estas a los obtenidos con la inclusión de los datos reales de las variables predictoras. En general, los pronósticos que emplean el método desarrollado superan los de per-

sistencia y muestran, en este sentido, una habilidad satisfactoria.

PALABRAS CLAVE: Pronóstico, temperatura mínima, Perfect Prog, temperatura mínima diaria, Cuba.

Abstract

A method based on “Perfect Prog” to predict the minimum temperature to 24 hours in the western region of Cuba during the winter season is developed. The dependent sample conforms the months of November through April of the years 1990 to 2005. Predictors of major contribution to increasing the variance explained by the equations are the isobaric surface temperature of 1 000 hPa and 925 hPa, and the persistence. The equations, except one, are able to explain the variance between 71 % and 82 % and the mean absolute errors vary between 0.9 °C and 1.6 °C. In the independent sample validation (winter season 2010–2011), the mean absolute errors vary between 0.9 °C and 2.2 °C. These errors are mainly due to the Global Forecast System forecasts tend to overestimate the surface wind speed at 12 UTC and underestimate the air temperature at the level of 1 000 hPa at 06 and 12 UTC. Suggested corrections for wind and temperature forecast by the Global Forecast System improve substantially the predictions, approaching the mean errors of these to those obtained with the inclusion of

the actual data of the predictor variables. In general, the predictions by the method developed improve the persistence, showing in this way a satisfactory skill.

KEYWORDS: Forecast minimum temperature, Perfect Prog, daily minimum temperature, Cuba.

Introducción

Muchos artículos sobre el pronóstico de temperaturas mínimas se refieren al estudio del comportamiento de aquellos factores que modifican y determinan sus valores, al punto de introducir gran variabilidad en el registro de esta variable dentro de la misma masa de aire; algunos de esos factores son la velocidad y la dirección del viento, la humedad relativa, la presencia o la ausencia de una capa nubosa durante el día o la noche y las características del suelo subyacente.

Ciertos autores han tenido en cuenta el papel modificador de los sistemas sinópticos sobre las temperaturas mínimas; en este sentido, debe señalarse a Dimri *et al.* (2005), quienes emplearon un modelo dinámico estadístico basado en el método Perfect Prog (Klein *et al.*, 1959) para el pronóstico de la temperatura mínima en Manali, India.

En Cuba, Mojena *et al.* (2002) elaboraron el método SATEM para el pronóstico de las temperaturas máximas y mínimas después del paso de los frentes fríos, en el cual se contempla el análisis por provincia y regiones (occidental y central). El estudio por provincias considera dos variantes en la obtención del predicando, según la presencia o no de una cuña fría. Díaz y Fernández (2003) efectuaron los pronósticos de la temperatura mínima para todas las estaciones de Cuba mediante el software CubaForecast, basado en la salida de los datos del modelo europeo ECMWF a las 12 UTC del día anterior a la emisión del pronóstico, que implementa el método de los análogos. Moya y Estrada (2007) desarrollaron el modelo de pronóstico de las variables y los fenómenos meteorológicos MEC-PT (Mesoescala-Cuba-Pronóstico del Tiempo),

el cual incluye las temperaturas, precipitaciones y una estimación probabilística de la ocurrencia de severidad. Estos modelos tienen como objetivo mejorar el pronóstico local en Cuba.

A pesar de todas las investigaciones realizadas, el pronóstico de las temperaturas mínimas continúa siendo complejo a escala mundial. En Cuba, constituye la variable meteorológica más difícil de pronosticar durante la temporada invernal o el período poco lluvioso; por ello, el presente trabajo pretende contribuir con una nueva herramienta para su pronóstico, limitado en un principio a la predicción para las estaciones de la región occidental de Cuba.

Materiales y métodos

Se estudiaron las temperaturas mínimas registradas en todas las estaciones meteorológicas de la región occidental, excepto Varadero, que no se incluyó en ninguno de los análisis por falta de información. La muestra seleccionada incluye los meses del período poco lluvioso (noviembre-abril) entre 1990 y 2005, con 2 719 casos (días). En la obtención de las ecuaciones de pronóstico para cada estación de la región occidental se utilizó la técnica de análisis de regresión múltiple.

En total, se consideraron 39 predictores potenciales con miras a desarrollar el método (Tabla 1). Las variables predictoras de superficie, como la temperatura mínima anterior y la fuerza del viento, se obtuvieron de las observaciones reportadas por las estaciones meteorológicas. Por falta de datos, la fuerza del viento a las 06 UTC no se utilizó como predictor.

Las variables referidas a los niveles de la troposfera bajos, tales como la temperatura, la humedad relativa y las componentes del viento se extrajeron del sitio: <http://nomad1.ncep.noaa.gov>. Estas variables se representan por su valor medio en el área 21.5-23° N y 82.5-85° W, para las estaciones en la provincia de Pinar del Río; la estación de Bahía Honda, correspondiente a la provincia de Artemisa y el munic-

pio especial Isla de la Juventud; y los del área, entre 22.0–23.5° N y 82.5–80.5° W, para las estaciones pertenecientes a las provincias de Mayabeque, La Habana, Matanzas y gran parte de Artemisa. Se tomaron esas dos áreas en atención a las configuraciones de los campos de temperatura y humedad en el nivel de 925 hPa obtenidas por González *et al.* (2011), donde se manifiesta un cambio en el comportamiento de estas variables en el entorno de la longitud límite seleccionada (82.5° W).

Existen dos vías en las cuales puede utilizarse la estadística y aplicar sus resultados a las predicciones realizadas por modelos numéricos: una de estas utiliza la técnica MOS (Model Output Statistics; Glahn y Lowry, 1972), que consiste en determinar una relación estadística entre el predictando y las variables pronosticadas por un modelo numérico para diferentes plazos de tiempo; la otra emplea la técnica Perfect Prog (Klein *et al.*, 1959), basada en la relación del predictando con los valores observados de los predictores que componen la muestra dependiente, la cual se aplica a las variables pronosticadas por un modelo numérico. En el presente trabajo se considera la técnica Perfect Prog, y los predictores potenciales se tomaron 12 h, 18 h y 24 h después (00, 06 y 12 UTC del siguiente día) de la hora base del pronóstico (12 UTC).

Tabla 1. Predictores potenciales: min ant (temperatura mínima del día anterior, °C), FF (fuerza del viento, km/h) en superficie y T (temperatura, °C), HR (humedad relativa, %), U y V (componentes zonal y meridional del viento, m/s) en los niveles de 1 000 hPa, 925 hPa y 850 hPa, a las 00, 06 y 12 UTC

Superficie (horas)	1 000 hPa (horas)	925 hPa (horas)	850 hPa (horas)
Min ant	T1000(00,06,12)	T925(00,06,12)	T850(00,06,12)
FF(00,12)	U1000(00,06,12)	U925(00,06,12)	U850(00,06,12)
	V1000(00,06,12)	V925(00,06,12)	V850(00,06,12)
	HR1000(00,06,12)	HR925(00,06,12)	HR850(00,06,12)

Nota: Las horas entre paréntesis se refieren al tiempo universal coordinado.

Con miras a la selección de los predictores se analizó la contribución de cada uno al modelo de regresión correspondiente a los cuatro grupos de estaciones encontrados por González *et al.* (2010); de esta manera, el orden de las variables añadidas permite discriminar progresivamente las variables que posean una contribución incremental menor sobre las existentes. El orden de parada se eligió para los predictores que aportan una varianza explicada de la variable dependiente (temperatura mínima) inferior a 2 %.

Es de señalar que no se decidió incluir la nubosidad porque para la verificación de la muestra independiente y el trabajo operativo debe tomarse una nubosidad pronosticada, lo cual no concordaría con la de la muestra dependiente estimada por el método visual.

Para evaluar la significación de las ecuaciones se utilizó la prueba-F con el nivel prefijado $\alpha = 5\%$. El análisis de la calidad del sistema se realizó mediante los indicadores de los errores estándar y absoluto medio.

La muestra independiente se integra por 180 días correspondientes a la temporada invernal 2010–2011 (noviembre–abril). Es válido mencionar que no se pudieron analizar las estaciones de Indio Hatuey y Punta del Este, por la poca cantidad de casos disponibles.

En aras de validar las ecuaciones de predicción se utilizó el coeficiente ρ_s de correlación de rangos de Spearman (Siegel, 1974), considerando el nivel de significación $\alpha = 5\%$ para la aceptación ($\alpha_1 > \alpha$) de la hipótesis nula (independencia de las variables) o rechazo ($\alpha_1 < \alpha$). Además, se estimaron los errores medio (considerando las diferencias individuales entre el pronóstico y la observación) y absoluto medio de las variables pronosticadas, y el índice de habilidad (Skill Score, SS). Los datos de la muestra independiente se extrajeron del sitio <http://nomads.ncdc.noaa.gov>.

La evaluación de la muestra independiente se realizó considerando los valores reales y pronosticados de los predictores seleccionados. Asimismo, se determinaron los errores medios para los pronósticos

del GFS, y a las variables que en las predicciones de la temperatura mínima pudieran provocar errores superiores a 0.3 °C se les aplicó una corrección al considerar los valores reales de las variables independientes. Los resultados de los pronósticos de las ecuaciones con las correcciones realizadas también fueron validados.

En la evaluación de la fuerza del viento en superficie se hallaron las diferencias entre los valores reales reportados por las estaciones y los pronosticados para los puntos de la rejilla empleada más cercanos a esas. Los puntos de la rejilla están distanciados a 0.5 grados de latitud y 0.5 grados de longitud, y se incluyen en el área comprendida entre los 21.5–23.5° N y los 80.5–85° W. Después de determinar los errores medios de los pronósticos de la fuerza del viento para cada estación, se halló cuánto repercute el error de 1 km/h al pronosticar la temperatura; para ello, se evaluó la ecuación de predicción incrementando en uno ese predictor y manteniendo constantes los demás.

Algunas características de la temperatura mínima de las estaciones meteorológicas de la región occidental de Cuba

Con la finalidad de conocer el comportamiento de la temperatura mínima T_n para cada estación durante años en el análisis de regresión y determinar las diferencias, se analizaron la media y la desviación estándar en cada estación (Tabla 2).

Las estaciones pertenecientes a los grupos 1 (interior de Pinar del Río) y 4 (costa norte e Isla de la Juventud) tienen las medias más elevadas y una variabilidad menor; mientras que los grupos 2 y 3 son los más fríos y variables. Es de significar que 62 % de las estaciones posee una desviación de la media igual o mayor de 3 °C. Las estaciones que presentan los valores mayores son Bainoa (3.8 °C) e Indio Hatuey, Güines y Tapaste (3.7 °C).

La estación meteorológica de Casa Blanca tiene la variabilidad menor y la de Punta del Este el valor medio mayor de temperatura mínima, con 20.9 °C; sin embargo presenta una desviación de 3.0 °C, por lo cual es una estación que aunque sus valores mínimos no son tan bajos, como en otros casos, posee una variación mayor.

Tabla 2. Valores medios y desviación estándar SD de la temperatura mínima por estaciones

	Estación	Media (°C)	SD
Grupo 1	78312 Santa Lucía	18.8	2.7
	78313 Isabel Rubio	17.9	3.3
	78314 San Juan y Martínez	18.3	3.1
	78315 Pinar del Río	18.4	3.0
	78316 La Palma	19.0	2.5
	78317 Paso Real de San Diego	18.5	2.8
	78318 Bahía Honda	19.4	2.8
	78373 Santiago de las Vegas	18.1	3.1
Grupo 2	78376 Bauta	17.3	3.5
	78320 Güira de Melena	17.1	3.6
	78322 Batabanó	17.1	3.4
	78323 Güines	16.3	3.7
	78374 Tapaste	16.9	3.7
	78375 Melena del Sur	17.1	3.4
	78332 Colón	16.9	3.4
	78333 Playa Girón	17.7	3.3
Grupo 3	78327 Unión de Reyes	17.2	3.6
	78340 Bainoa	15.3	3.8
	78329 Indio Hatuey	15.5	3.7
	78330 Jovellanos	16.2	3.4
Grupo 4	78331 Jagüey Grande	16.1	3.6
	78310 Cabo de San Antonio	20.6	2.5
	78325 Casa Blanca	20.1	2.2
	78309 Cuba Francia	20.1	2.7
	78321 La Fe	19.6	2.6
	78324 Punta del Este	20.9	3.0

Análisis de regresión para el grupo 1

Es de significar que la cantidad de casos utilizados en la obtención de cada ecuación se reduce con relación a la muestra general, puesto que si durante el proceso de regresión falta información de al menos un predictor, se elimina el caso correspondiente.

La tabla 3 muestra las evaluaciones de las ecuaciones de regresión obtenidas para la predicción de la temperatura mínima en el grupo 1. De acuerdo con los valores de los coeficientes de determinación, se tienen buenos resultados, con ecuaciones que pueden explicar entre 72 % y 82 % de la varianza; los mejores resultan los referidos a San Juan y Martínez, Paso Real de San Diego y Pinar del Río, en correspondencia con los menores errores presentados. En general, los errores absolutos medios varían en el entorno de 1 °C. Todas las ecuaciones resultaron significativas al nivel prefijado de 5 %.

Tabla 3. Coeficiente de determinación R^2 , estadígrafo F , valor- p , errores estándar Es y absoluto medio EAM (grupo 1)

Estación	Casos	R^2	F	p	Es (°C)	EAM (°C)
78312	2702	.72297600	1759.655	0.000000	1.42	1.11
78313	2703	.78304131	3247.052	0.000000	1.55	1.22
78314	2686	.81926427	3038.203	0.000000	1.31	1.02
78315	2647	.80897649	3730.998	0.000000	1.30	1.01
78316	2662	.73893140	1880.100	0.000000	1.30	1.02
78317	2679	.81821771	6022.453	0.000000	1.20	0.94
78318	2667	.72392321	1395.525	0.000000	1.45	1.10
78373	2694	.75330832	2052.812	0.000000	1.53	1.20

La temperatura en el nivel de 925 hPa es el predictor que más contribuye a la reducción de la varianza en todas las ecuaciones, excepto en la estación de Santiago de las Vegas, donde el primero es la temperatura en el nivel de 1 000 hPa. En todas las estaciones, la temperatura mínima del día anterior al del pronóstico (persistencia) se considera el segundo predictor (Tabla 4).

Tabla 4. Predictores que intervienen en las ecuaciones de predicción y reducción de la varianza (%) por el predictor que más contribuye (grupo 1)

Estación	Pred. 1	Pred. 2	Pred. 3	Pred. 4	Pred. 5
78312	T925(00) (56.2)	Min ant	T925(12)	FF(12)	
78313	T925(12) (65.6)	Min ant	FF(12)		
78314	T925(06) (70.6)	Min ant	(-)JU925(06)	HR925(06)	
78315	T925(00) (72.3)	Min ant	T925(12)		
78316	T925(00) (64.0)	Min ant	T1000(12)	HR1000(12)	
78317	T925(12) (74.0)	Min ant			
78318	T925(00) (56.2)	Min ant	(-)JU925(06)	FF(12)	T925(12)
78373	T1000(06) (64.0)	Min ant	HR1000(06)	FF(12)	

Nota: (-) coeficiente de regresión negativo.

Análisis de regresión para el grupo 2

En este grupo, los resultados mejores corresponden a las ecuaciones de las estaciones de Colón y Playa Girón, ambas son capaces de explicar 80 % de la varianza (Tabla 5). La ecuación para la predicción en Bauta, en cambio, obtuvo el coeficiente de determinación más bajo de todos los grupos. El resto de las ecuaciones explican de 74 % (Güines) a 79 % (Unión de Reyes) de la varianza y todas resultaron significativas al nivel prefijado de 5 %. En cuanto a los errores absolutos se destacan el mínimo de Playa Girón y el máximo de Bauta.

Tabla 5. Coeficiente de determinación R^2 , estadígrafo F , valor- p , errores estándar Es y absoluto medio EAM (grupo 2)

Estación	Casos	R^2	F	p	Es (°C)	EAM (°C)
78320	2718	.7614312	2887.39	0.000000	1.75	1.37
78322	2719	.7751290	3119.530	0.000000	1.61	1.27
78323	2717	.7359796	2520.90	0.000000	1.89	1.50
78374	2719	.7709103	1825.90	0.000000	1.80	1.41
78375	2715	.7723568	2298.64	0.000000	1.62	1.28
78376	2404	.6878489	1762.86	0.000000	1.93	1.50
78332	1767	.8015067	1778.71	0.000000	1.54	1.25
78333	2247	.8006418	3002.70	0.000000	1.50	1.13
78327	2702	.7987154	3568.63	0.000000	1.61	1.26

La tabla 6 muestra que los valores de la temperatura, tanto en el nivel de 925 hPa, como en el de 1 000 hPa, son los predictores que más aportan a la reducción de la varianza al ser los primeros seleccionados, con la excepción de la estación de Bauta, donde la persistencia (*min ant*) es el contribuyente mayor y resulta el segundo predictor para el resto de las estaciones.

TABLA 6

Predictores que intervienen en las ecuaciones de predicción y reducción de la varianza (%) por el predictor que más contribuye (grupo 2)

Estación	Pred.1	Pred.2	Pred.3	Pred.4	Pred.5
78320	T925(12)(65.6)	Min ant	(-) U1000(00)		
78322	T925(06)(68.9)	Min ant	HR925(06)		
78323	T1000(06)(58.2)	Min ant	HR1000(12)		
78374	T1000(06)(57.8)	Min ant	(-) U1000(06)	HR1000(06)	FF(12)
78375	T925(06)(67.2)	Min ant	HR925(06)	(-) U1000(06)	
78376	Min ant (50.4)	T925(12)	FF(12)		
78332	T925(12)(64.0)	Min ant	(-) U925(06)	HR925(12)	
78333	T925(12)(71.0)	Min ant	FF(12)		
78327	T925(12)(64.0)	Min ant	(-) U925(06)		

Nota: (-) Coeficiente de regresión negativo.

Análisis de regresión para el grupo 3

En este grupo, a pesar de ser el más frío y más variable, no se tienen resultados muy diferentes de los anteriores. La varianza explicada por la ecuación para Bainoa (Tabla 7) es comparable con la de Güines, en el grupo 2, y la de La Palma, en el grupo 1. Todas las ecuaciones fueron significativas al nivel prefijado de 5 % y los errores absolutos varían entre 1.3 °C y 1.6 °C.

Se mantiene la temperatura en la superficie isobárica de 925 hPa como primer predictor en las ecuaciones de pronóstico, excepto en Bainoa (Tabla 8), donde, al igual que en Bauta, la persistencia se considera el primer predictor; asimismo, también es destacable la contribución a la reducción de la varianza por la temperatura en el nivel de 925 hPa.

TABLA 7

Coeficiente de determinación R², estadígrafo F, valor-p, errores estándar Es y absoluto medio EAM (grupo 3)

Estación	Casos	R ²	F	p	Es (°C)	EAM (°C)
78340	2715	.73771451	1905.563	0.000000	1.96	1.58
78329	2450	.75628936	1896.847	0.000000	1.85	1.42
78330	2688	.77035017	3001.120	0.000000	1.61	1.26
78331	1912	.77289225	2164.433	0.000000	1.74	1.36

TABLA 8

Predictores que intervienen en las ecuaciones de predicción y reducción de la varianza (%) por el predictor que más contribuye (grupo 3)

Estación	Pred.1	Pred.2	Pred.3	Pred.4
78340	Min Ant (53.1)	T925(12)	FF(12)	HR925(12)
78329	T925(06)(57.6)	Min Ant	HR925(06)	FF(12)
78330	T925(12)(62.4)	Min Ant	HR925(06)	
78331	T925(12)(60.8)	Min Ant	HR925(06)	

Análisis de regresión para el grupo 4

La tabla 9 muestra los resultados del grupo 4. La ecuación de La Fe presenta el mayor porcentaje de varianza explicada, en contraste con la de Cuba-Francia, ambas ubicadas en la Isla de la Juventud. Todas las ecuaciones fueron significativas al nivel prefijado de 5 %. En lo referente a los errores absolutos se destaca el valor obtenido para Casa Blanca de 0.85 °C; de hecho, es la estación que presenta la variabilidad menor.

En cuanto a los predictores se mantienen la temperatura en los niveles de 925 hPa y 1 000 hPa y la persistencia como los primeros incorporados a las ecuaciones (Tabla 10). En este grupo, debe destacarse que la humedad relativa no interviene como predictor y que en la Isla de la Juventud la persistencia desempeña el papel fundamental en el pronóstico de la temperatura mínima.

En general, el nivel de 850 hPa no intervino en ninguna de las ecuaciones; en la mayoría de estas, el nivel de 925 hPa resultó predominante. En lo referente a las variables, la temperatura en la capa más

Tabla 9. Coeficiente de determinación R², estadígrafo F, valor-p, errores estándar Es y absoluto medio EAM (grupo 4)

Estación	Casos	R ²	F	p	Es (°C)	EAM (°C)
78310	2697	.74552088	1971.618	0.000000	1.25	0.96
78325	2719	.75650581	2811.721	0.000000	1.11	0.85
78309	1920	.71509911	1603.049	0.000000	1.46	1.13
78321	2706	.77367201	3078.809	0.000000	1.26	0.98
78324	2499	.73347720	1715.887	0.000000	1.56	1.22

Tabla 10. Predictores que intervienen en las ecuaciones de predicción y reducción de la varianza (%) por el predictor que más contribuye (grupo 4)

Estación	Pred.1	Pred.2	Pred.3	Pred.4
78310	T925(00) (60.8)	Min ant	T1000(12)	FF(12)
78325	T1000(00) (65.6)	Min ant	T925(12)	
78309	Min ant (64.0)	T925(12)	(-) U925(12)	
78321	Min ant (64.0)	T925(12)	FF(12)	
78324	Min ant (54.8)	T1000(12)	FF(12)	(-) U1000(12)

Nota: (-) coeficiente de regresión negativo.

baja de la troposfera y la persistencia fueron las de contribución mayor a la reducción de la varianza.

Validación de las ecuaciones de predicción utilizando datos pronosticados

La tabla 11 muestra los resultados de la aplicación de las ecuaciones de regresión durante la temporada invernal 2010–2011 de acuerdo con las predicciones del modelo GFS y los datos reales.

En los grupos 1, 2 y 3 existe una tendencia, tanto a la subestimación, como a la sobrestimación de los pronósticos; sin embargo, en el grupo 4 se sobrestiman en todos los casos, excepto para el Cabo de San Antonio. En general, se destacan las sobrestimaciones en más de 0.3 °C en Bahía Honda, Santa Lucía, Bauta, Playa Girón, Bainoa, La Fe y Punta del Este, mientras que las subestimaciones más notables se hallan en Santiago de las Vegas, Tapaste, Güines, Güira de Melena y Jagüey Grande. Se obtuvo errores absolutos medios iguales a 2 °C o superiores en las predicciones para las estaciones

de Bainoa, Isabel Rubio, Güines y Punta del Este. En 56 % de las estaciones, los errores estuvieron entre 0.9 °C y 1.5 °C; en 40 %, entre 1.6 °C y 2.0 °C; y solo en la estación de Bainoa resultaron por encima de 2.0 °C.

Con respecto al índice SS, que relaciona el error cuadrático medio de las predicciones realizadas por las ecuaciones de regresión con el de la persistencia, en la gran mayoría de las estaciones, las predicciones superaron al pronóstico persistente. Se exceptúan los resultados para las estaciones de Güines y Punta del Este, que presentan una habilidad muy pobre, y La Fe, donde el persistente superó a la predicción por el método regresivo. La mayor dependencia entre las variables calculadas y observadas se encuentra en los grupos 2 y 3, en los cuales todos los coeficientes de correlación de rangos superan el valor de 0.80, excepto el de Bauta, que presenta el valor más bajo no solo de estos grupos, sino también de todas las estaciones de la región. En general, los resultados son satisfactorios al variar los valores entre 0.73 y 0.91.

La figura 1 presenta el porcentaje de casos contenidos en los diferentes rangos de errores. Los grupos 1 y 4 tienen, aproximadamente, 48 % de la muestra con errores inferiores o iguales a 1 °C; además, son los grupos de menor cantidad de casos con errores superiores a 4 °C, con 3.6 % y 5.5 % de la muestra. El grupo 3, a

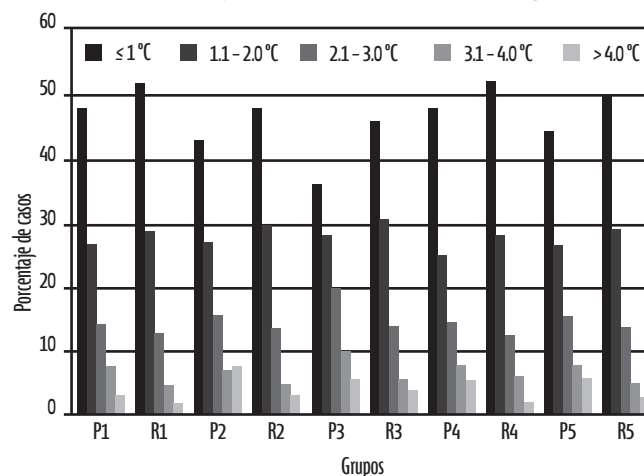


Fig. 1 Porcentaje medio de los casos contenidos en los diferentes rangos de errores (°C), considerando los datos pronosticados P y reales R para cada grupo (1, 2, 3 y 4) y el total T.

Tabla 11. Errores medio EM y absoluto medio EAM, índice de habilidad SS y coeficiente de correlación de rangos ρ_S , considerando los datos pronosticados P y reales R

Grupos	Estaciones (casos)	EM P (°C)	EM R (°C)	EAM P (°C)	EAM R (°C)	SS P	SS R	ρ_S P	ρ_S R
Grupo 1	78318 (180)	0.7	-0.2	1.4	1.2	36.8	54.2	0.8249	0.8546
	78317 (180)	-0.3	-0.1	1.2	1.1	41.4	53.2	0.8363	0.9139
	78316 (180)	-0.2	0.0	1.2	1.2	53.8	56.8	0.8363	0.8461
	78315 (178)	0.2	0.3	1.2	1.1	48.7	55.9	0.8801	0.9030
	78314 (180)	0.0	0.2	1.2	1.2	57.2	61.4	0.8876	0.9040
	78313 (178)	0.3	-0.3	2.0	1.7	44.1	56.7	0.7701	0.8186
	78312 (180)	0.9	0.1	1.7	1.2	31.4	57.6	0.7908	0.8479
	78373 (176)	-1.2	-0.5	1.9	1.3	26.6	65.9	0.8010	0.8957
Grupo 2	78376 (180)	0.5	0.0	1.9	1.6	37.7	53.6	0.7281	0.7824
	78375 (180)	-0.2	0.2	1.4	1.4	58.3	60.0	0.8788	0.8883
	78374 (180)	-1.0	-0.2	1.9	1.4	39.2	65.7	0.8216	0.8938
	78323 (180)	-1.6	-0.8	2.0	1.4	4.7	52.5	0.8278	0.8986
	78322 (180)	0.0	0.2	1.2	1.1	59.3	64.0	0.9098	0.9252
	78320 (180)	-0.6	-0.4	1.5	1.4	36.3	48.0	0.8756	0.8853
	78333 (180)	1.0	0.1	1.6	1.1	26.2	62.4	0.8582	0.8928
	78332 (180)	-0.2	0.1	1.5	1.4	51.2	58.4	0.8696	0.8876
Grupo 3	78327 (180)	0.2	0.3	1.7	1.5	38.9	49.7	0.8518	0.8719
	78340 (180)	1.0	0.2	2.2	1.5	35.2	63.5	0.8012	0.8708
	78330 (180)	-0.3	-0.1	1.5	1.4	47.8	53.2	0.8655	0.8724
Grupo 4	78331 (170)	-0.6	-0.3	1.5	1.4	49.0	56.0	0.8866	0.8924
	78310 (178)	0.0	-0.4	1.3	1.1	47.4	60.2	0.7872	0.8396
	78321 (176)	1.7	0.3	1.9	1.3	-28.7	38.7	0.8189	0.8465
	78324 (63)	0.9	-0.4	2.0	1.5	6.2	53.1	0.7355	0.8690
	78309 (172)	0.3	0.4	1.5	1.5	30.5	31.6	0.7809	0.7886
	78325 (180)	0.1	0.2	0.9	0.8	54.5	59.2	0.8916	0.9045

pesar de ser el de las estaciones con los valores más bajos de temperatura mínima, no presentó los errores más notables, sino que resultó el grupo 2, con 7.3% de la muestra. En general, tanto en el rango de 3.1 °C a 4.0 °C, como en el que supera 4.0 °C, se incluye menos de 10 % de la muestra para cada uno de estos grupos.

Validación de las ecuaciones de predicción utilizando datos reales

En la tabla 11 es de significar el incremento en la habilidad de la predicción para la estación meteorológica de La Fe, el valor del índice alcanzó 38.7 %. Sin

embargo, a pesar de que la ecuación explica con un porcentaje mayor la varianza (77 %) que la ecuación para Boina (73 %), la habilidad de la predicción es considerablemente superior en esta última, incluso si se considera la evaluación con los datos pronosticados. En general, la habilidad de la predicción, como era de esperar, mejora en todas las ecuaciones cuando se utilizan datos reales.

En cuanto a los errores medios se destacan las subestimaciones en Santiago de las Vegas, Güines, Güira de Melena, el Cabo de San Antonio y Punta del Este. De acuerdo con las diferencias entre los errores medios de ambas muestras, las posibles ecuaciones a

las que deberá aplicárseles correcciones corresponden a las estaciones de Bahía Honda, Isabel Rubio, Santa Lucía, Santiago de las Vegas, Bauta, Tapaste, Güines, Playa Girón, Bainoa, La Fe y Punta del Este. En el caso del Cabo de San Antonio, no es sugerente la aplicación de una corrección, dado que la ecuación que utiliza los predictores pronosticados no presenta sesgo, lo cual no concuerda con lo que debe suceder. Los errores medios absolutos se encuentran entre 0.8 °C (Casa Blanca) y 1.7 °C (Isabel Rubio). En la figura 1 se observa un incremento en el grupo de errores menores e iguales que 1 °C y una disminución en los mayores que 4 °C.

Validación de los pronósticos del GFS de las variables que intervienen en las ecuaciones de regresión

A partir de los análisis comparativos entre los valores pronosticados y reales se decidió hacer una evaluación de los predictores que intervinieron en las ecuaciones (Tabla 12). Es de significar el error más elevado de la temperatura en el nivel de 1 000 hPa a las 06 UTC. En las ecuaciones para Santiago de las Vegas y Tapaste, cada grado de error de esa variable equivale a 0.9 °C de error en el pronóstico de la temperatura mínima, mientras que en el pronóstico para Güines equivale 0.8 °C. Por ello, el valor de 1.2 °C presentado en la tabla se considera como una corrección.

Otro error significativo se presenta para la temperatura en el nivel de 1 000 hPa a las 12 UTC, predictor que se incluye en la ecuación de la estación de Punta del Este, donde cada grado de error equivale a 0.7 °C de error en el pronóstico de la temperatura mínima. En este caso, se tomará 0.8 °C como corrección.

El GFS subestimó la humedad relativa en el nivel de 925 hPa para ambas áreas en el plazo de pronóstico de 18 h, al igual que en el área desde Artemisa hasta Matanzas en el plazo de 24 h. En relación con la componente zonal del viento, la predicción es subes-

Tabla 12. Error medio EM de las variables de aire superior utilizadas en las ecuaciones pronóstico de las estaciones de La Habana, Artemisa (excepto Bahía Honda), Mayabeque y Matanzas y de Pinar del Río, Bahía Honda e Isla de la Juventud

	EM La Habana, Artemisa (excepto Bahía Honda), Mayabeque y Matanzas	EM Pinar del Río, Bahía Honda e Isla de la Juventud
T925(00) (°C)	-	0.4
T925(06)	0.0	0.1
T925(12)	-0.1	-0.3
T1000(00)	0.0	-
T1000(06)	-1.2	-
T1000(12)	-	-0.8
HR925(06) (%)	-5.6	-4.6
HR925(12)	-5.4	-
HR1000(06)	0.0	-
HR1000(12)	2.2	1.2
U925(06) (m/s)	0.1	0.5
U925(12)	-	0.0
U1000(00)	1.7	-
U1000(06)	1.5	1.8
U1000(12)	-	1.1

timada en todas las regiones y plazos de pronósticos. Asimismo, los errores medios mostrados por ambas variables no son capaces de incrementar los errores de los pronósticos de temperatura mínima en más de 0.3° C en las ecuaciones en que intervienen; por ello, no se harán correcciones al respecto.

La tabla 13 presenta las coordenadas de las estaciones y la distancia a la que se encuentran de los puntos de la rejilla en los cuales se tomó la fuerza del viento pronosticada por el GFS a las 12 UTC (pronóstico para 24 h) con vistas a su validación. Debe señalarse que aunque no se validan los pronósticos en una muestra independiente para la estación de Indio Hatuey, se decidió estimar el error medio del viento pronosticado con miras a incluir la corrección durante el trabajo operativo cuando se disponga de los datos para la temperatura mínima.

Tabla 13. Ubicación de las estaciones meteorológicas donde intervienen la fuerza del viento en superficie como predictor de la temperatura mínima y las distancias a que se encuentran de los puntos de la rejilla del GFS

Estaciones	Coordenadas de la estación		Coordenadas del punto de rejilla		Distancia (km)
	Latitud (° N)	Longitud (° W)	Latitud (° N)	Longitud (° W)	
78312	22.7	83.9	22.5	84	24.5
78313	22.1	84.1	22	84	15.2
78318	22.9	83.1	23	83	15.1
78376	23.0	82.6	23	82.5	10.2
78340	23.0	81.9	23	82	10.2
78329	22.8	81.0	23	81	22.2
78374	23.0	82.1	23	82	10.2
78373	23.0	82.4	23	82.5	10.2
78333	22.1	81.0	22	81	11.1
78321	21.7	82.8	21.5	83	30.4
78324	21.5	82.5	21.5	82.5	0

Las estaciones más alejadas de los puntos son La Fe y Santa Lucía; por tanto, estas estaciones son las que presentan los errores mayores (Tabla 14), además de la estación de Punta del Este; sin embargo, esta se localiza justo en un punto de la rejilla del modelo. En general, los errores de las estaciones de la Isla de la Juventud concuerdan con los encontrados por Sorí (2010) en la evaluación realizada para el bimestre enero-febrero de 2010.

Tabla 14. Error medio la fuerza del viento pronosticada por el GFS para las 12 UTC

Estaciones	EM (km/h)	Error de temperatura (°C) por cada km/h
78318	6.2	0.1
78312	11.2	0.1
78313	6.5	0.2
78373	4.7	0.1
78376	5.1	0.1
78374	4.7	0.1
78333	8.9	0.1
78340	6.2	0.2
78329	6.8	-
78321	16.3	0.1
78324	15.7	0.1

Según se aprecia en la tabla, un kilómetro por hora (1 km/h) de error en la fuerza del viento repercute en una décima de grado (0,1 °C) de error en el pronóstico de temperatura mínima en casi todas las estaciones en que interviene esta variable como predictor, y en 0.2 °C para las estaciones de Isabel Rubio y Baimoa. Dados los errores medios de los pronósticos de la fuerza del viento y la sobrestimación que puede producirse en los pronósticos de temperatura, se decide tomar esos valores medios como correcciones en las ecuaciones de predicción.

La tabla 15 presenta los resultados del pronóstico con las correcciones realizadas para el viento en superficie y la temperatura en el nivel de 1 000 hPa a las 06 y 12 UTC. Al comparar estos resultados con los presentados en la tabla 11, puede apreciarse que los errores medios, cuando se utilizan las correcciones, se aproximan a los de las ecuaciones que emplean los datos reales. Los errores medios absolutos también mejoran en la mayoría de las ecuaciones, excepto para Bauta, donde se incrementa en una décima de grado. Estos errores varían entre 1.3 °C y 2.0 °C.

Las subestimaciones de los pronósticos para Güines y Santiago de las Vegas se reducen considerablemente, aunque debe recordarse que en las evaluaciones con los datos reales también se evidencia este sesgo. De igual forma, mejora el resultado de la evaluación de la ecuación para Tapaste.

La habilidad de las predicciones con respecto a la persistencia es superior en todos los casos; resulta significativo el incremento para los pronósticos de Güines, Punta del Este y La Fe, con valores de índices que demuestran muy poca o ninguna habilidad (ver Tabla 11). La habilidad de la ecuación para la estación de Isabel Rubio se degrada ligeramente cuando se le aplica la corrección. Las correlaciones de rangos no sufren cambios de interés.

De acuerdo con las mejoras presentadas al aplicar las correcciones para el viento en superficie y la temperatura en el nivel de 1 000 hPa, es recomenda-

Tabla 15. Error medio EM y absoluto medio EMA, índice de habilidad SS y coeficiente de correlación de rangos ρ_s , considerando las correcciones

Grupos	Estaciones	EM (°C)	EMA (°C)	SS	ρ_s
Grupo 1	78318	0.3	1.3	37.7	0.80
	78312	-0.5	1.9	43.0	0.77
	78313	0.1	1.5	43.0	0.79
	78373	-0.5	1.7	42.6	0.80
Grupo 2	78376	0.0	2.0	35.2	0.71
	78374	-0.4	1.8	46.3	0.82
	78323	-0.6	1.6	35.8	0.83
	78333	0.0	1.4	42.2	0.86
Grupo 3	78340	-0.1	1.8	44.6	0.80
Grupo 4	78321	0.2	1.4	30.7	0.82
	78324	0.0	1.9	19.4	0.74

ble su inclusión en las ecuaciones de predicción que consideran estas variables y su corroboración futura durante el trabajo operativo. Dado el tamaño pequeño de la muestra utilizada, las correcciones para la ecuación de Punta del Este deben manejarse con precaución.

Conclusiones y recomendaciones

Se creó un método para el pronóstico de las temperaturas mínimas en la región occidental de Cuba durante las temporadas invernales, donde las ecuaciones son capaces de explicar la varianza entre 71 % y 82 %, con excepción de la correspondiente a la estación meteorológica de Bauta, que explica 68 %. Los errores absolutos medios varían entre 0.9 °C y 1.6 °C; este último valor se asocia con la estación meteorológica de Bainoa.

Los predictores relacionados con la temperatura de las superficies isobáricas de 1 000 hPa y 925 hPa tuvieron una contribución mayor al incremento de la varianza explicada por las ecuaciones, además de la persistencia.

Los errores absolutos medios en la validación realizada para la temporada invernal 2010–2011 va-

rían entre 0.9 °C y 2.2 °C. Según los cuatro grupos de estaciones constituidos, el porcentaje de casos con errores iguales o inferiores a 2 °C fluctúa entre 65 % y 75 %; el límite inferior corresponde al grupo de estaciones que presenta el comportamiento más frío. Las correlaciones de rango se acotan entre 0.73 y 0.91.

Los errores sistemáticos hallados en la validación de la muestra independiente se deben, fundamentalmente, a que los pronósticos del GFS tienden a sobrestimar la fuerza del viento en superficie a las 12 UTC y a subestimar la temperatura del aire en el nivel de 1 000 hPa a las 06 y 12 UTC.

Las correcciones propuestas para el viento en superficie y la temperatura en 1 000 hPa a las 06 y 12 UTC pronosticados por el GFS mejoran sustancialmente los pronósticos de temperatura mínima, y los errores medios de estas predicciones se aproximan a los obtenidos con la inclusión de los datos reales de las variables predictoras.

Las predicciones realizadas para la temporada invernal 2010–2011 mejoran los pronósticos de persistencia y, en este sentido, muestran una habilidad satisfactoria.

Referencias bibliográficas

- DÍAZ, Y. A. & FERNÁNDEZ, A. J. 2003. Cuba-Forecast para el pronóstico de variables meteorológicas, versión 3.8.
- DIMRI, A. P., MOHANTY, U. C. & RATHORE, L. S. 2005. Minimum temperature forecast at Manali, India. *Current Science*, 88, 927–934.
- GLAHN, H. R. & LOWRY, D. A. 1972. The use of model output statistics (MOS) in objective eather forecasting. *J. Appl. Meteor*, 11, 1203–1211
- GONZÁLEZ, J., BALLESTER, M., SORÍ, R., CÁRDENAS, R. & SARMIENTO, M. 2010. Agrupamiento de las estaciones meteorológicas del occidente de Cuba según el comportamiento de las temperaturas mínimas. Instituto de Meteorología.

- GONZÁLEZ, J., BALLESTER, M., SORÍ, R., CÁRDENAS, R. & SARMIENTO, M. 2011. Patrones sinópticos asociados al comportamiento de las temperaturas mínimas en la región occidental de Cuba. Instituto de Meteorología.
- KLEIN, W. H., LEWIS, B. M. & ENGER, I. 1959. Objective prediction of 5-day mean temperature during winter. *J. Meteor*, 16, 672-682.
- MOJENA, E., YÁNEZ, L., GÓNGORA, C., TORRES, H., ORTEGA, A. & BASTIDA, V. H. 2002. Pronósticos de temperaturas máximas y mínimas después del paso de los frentes fríos (SATEM). *Revista Cubana de Meteorología*, 9, 54-57.
- MOYA, A. & ESTRADA, A. 2007. Pronóstico de cobertura espacial y cantidad de precipitaciones para Cuba. Un acercamiento al pronóstico probabilístico de ocurrencia de TLS. Instituto de Meteorología.
- SIEGEL, S. 1974. Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta.
- SORÍ, R. 2010. *Modelo Sinóptico-Estadístico para el Pronóstico de la Temperatura Mínima en la Isla de la Juventud*. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.