

Modelo estadístico para pronóstico de intensidad de ciclones tropicales en el océano Atlántico

MSc. Ing. Miguel Ángel Hernández Martínez

miguel.hernandez@insmet.cu

Centro de Pronósticos, Instituto de Meteorología, Cuba.

Resumen

Se pretende mejorar el pronóstico de intensidad para ciclones tropicales a través de la introducción de nuevos predictores en el modelo CT91CI, dando lugar al CT07CI. Se utiliza la información referida a intensidad de los ciclones tropicales, que conforman las «mejores trayectorias» de 1 441 casos, ocurridos en el océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México, entre los años 1989-2000, los datos fueron obtenidos de la base del HURDAT (Landse y Gray, 1992). En el modelo se utiliza la temperatura media semanal superficial del mar, a través del potencial máximo de intensidad determinado empíricamente por Merrill (1988), y los efectos de la cizalladura vertical del viento sobre la intensificación o debilitamiento de los ciclones tropicales, en una capa profunda de la atmósfera, entre 850 y 200 hP. Para la obtención de las ecuaciones se hace una selección de predictores potenciales de carácter climático, empírico y sinóptico, que se someterá a un proceso de análisis estadístico de regresión por tamizado de variables para cada ecuación. Para la extracción de los predictores de campo se toman las coordenadas centrales de la posición de los ciclones tropicales que conforman cada trayectoria. Como resultado se obtiene un método climatológico persistente, capaz de pronosticar la intensidad del viento máximo del ciclón tropical, en las próximas 12, 24, 36, 48 y 72 horas, con una adecuada habilidad predictiva, lo cual permite conocer la evolución futura del sistema. Los resultados pueden calificarse de satisfactorios y novedosos, dado el caso de la utilización del valor de la cizalladura vertical del viento para construir las ecuaciones.

Palabras claves: Pronóstico intensidad, ciclones.

Introducción

Es importante conocer cuál será el momento aproximado cuando el ciclón tropical alcanzará el máximo de intensidad por los efectos destructivos del campo de vientos que genera, del campo de olas, pero también de las lluvias y de la surgencia. Así como conocer cuándo comenzará el debilitamiento, lo cual puede significar el cese de la afectación o que no exista, pues todo ello determina la magnitud de los daños que podrá causar. Sin embargo, hasta el presente la mayoría de los trabajos de investigación han estado encaminados principalmente al pronóstico de la trayectoria de esos organismos atmosféricos y en menor medida al pronóstico de intensidad.

Teniendo en cuenta esta realidad, se planteó como objetivo crear un nuevo modelo estadístico para pronosticar la intensidad de los ciclones tropicales, CT07CI, para disminuir la magnitud de los errores que se comenten en la práctica operativa, tomando en cuenta la experiencia acumulada en cuanto a estratificación de la muestra y los predic-

tores a emplear, de forma que se combine el aporte de los predictores climatológicos y persistentes con aquellos de carácter sinóptico.

Materiales y métodos

En nuestro trabajo se utilizan todas las trayectorias de los ciclones tropicales que transitan por el océano Atlántico y afectan directa o indirectamente el área de pronóstico bajo nuestra responsabilidad, por eso se consideran también las trayectorias de aquellos ciclones tropicales, que además se internan en las aguas del Mar Caribe a través del Arco de las Antillas, las que se originan en el propio Mar Caribe y cruzan hacia el Golfo de México y las que se originan también en el citado Golfo.

De manera tal que las trayectorias utilizadas están enmarcadas aproximadamente dentro de las latitudes desde 10 ° de latitud norte y hasta los 35 ° de latitud norte, y desde la costa occidental de África, hasta el Golfo de México y barriendo la costa oriental de los EE.UU, como puede observarse en la figura 1.



Fig. 1. Área de interés en la presente investigación.

Características de la muestra de ciclones tropicales utilizada

Como se pronostica sólo a partir de los plazos de 00 y 12 UTC, por ser estos los que cuentan con datos de aire superior, toda la información sobre los ciclones se obtiene de los horarios de las observaciones sinópticas. De estos casos se extraen los datos referidos al viento máximo inicial de los ciclones tropicales, las intensidades referidas a 12, 24, 36, 48 y 72 horas, el cambio de intensidad del ciclón tropical en las últimas 24 horas, así como la posición geográfica del centro ciclón.

Al disponer del dato de la fecha, se tienen los días transcurridos desde la formación del organismo. Las trayectorias de los ciclones utilizadas en la extracción de los datos se ubican indistintamente en el océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de Méjico.

La posición media de estos fue de 20,7 ° de latitud norte y los 62,9 ° de longitud oeste, con un desplazamiento en las últimas 24 horas próximo al noroeste. La intensidad media de los ciclones tropicales de la muestra fue de 59 nudos (110 km por horas), lo que sitúa al ciclón medio dentro del rango de las tormentas tropicales, según el *Manual de Procedimientos del Instituto de Meteorología*.

Diseño del modelo

El nuevo modelo estadístico ha sido diseñado teniendo en cuenta las siguientes características:

1. Las ecuaciones de pronóstico de la intensidad de los ciclones tropicales abarcan los plazos de 12, 24, 36, 48 y 72 horas.
2. La muestra estará estratificada a partir del grado de desarrollo e intensidad del ciclón, formando cuatro grupos definidos de la siguiente forma:
 - a) Depresiones tropicales V_{max} hasta 62 km/h (33 nudos).
 - b) Tormentas tropicales 63 km/h, 34 nudos $< V_{max} < 119$ km/h (64 nudos).
 - c) Huracanes 120 km/h, (65 nudos) $< V_{max} < 185$ km/h (100 nudos).
 - d) Huracanes intensos $V_{max} > 185$ km/h (100 nudos).
3. Autores como Gray (1968 y 1975) y McBride and Zehr (1981) enfatizan en sus investigaciones que la presencia de patrones de cizalladura vertical del viento zonal, producen condiciones favorables a la intensificación. Por tal motivo se realizó la estratificación de la muestra en base a la cizalladura vertical del viento zonal, en las variantes cuando es baja (Sb) y cuando es alta (Sa),

por lo que adicionalmente la muestra se estratifica además teniendo en cuenta el valor de la cizalladura vertical, zonal del viento, a través de una capa profunda de la atmósfera entre 850 y 200 hPa, formando otros dos grupos, definidos de la siguiente forma:

- a) Cizalladura zonal baja, S_b : $U < 28$ km/h (15 nudos).
 - b) Cizalladura zonal alta, S_a : $U > 28$ km/h (15 nudos).
4. Inclusión como predictor potencial del valor medio semanal de la temperatura superficial del mar (TSM) y de su influencia en la intensidad máxima potencial de los ciclones tropicales, a través de la función desarrollada por Merrill (1989).
 5. Consideración de la disipación de los ciclones tropicales, no producida por el movimiento del centro sobre tierra o por la extratropicalización de este, a partir de asignar un valor promedio del viento (15 nudos), para los intervalos de tiempo en que se haya producido la disipación.

Predictores potenciales

Para el desarrollo de las ecuaciones de regresión fue seleccionada como variable dependiente el valor medio del viento máximo en el momento de validez del pronóstico, o sea para las 00 y las 12 del *Universal Time Coordinate*. Los predictores potenciales utilizados aparecen a continuación.

Predictores

1. V_{mo} : Viento máximo inicial.
2. L_{To} : Latitud inicial.
3. L_{No} : Longitud inicial.
4. V_{m24} : Cambio del viento máximo en las últimas 24 horas.
5. LT_{24} : Desplazamiento latitudinal en las últimas 24 horas.
6. LN_{24} : Desplazamiento longitudinal en las últimas 24 horas.
7. DT : Número de días transcurridos desde la formación del CT.
8. SF : Seno de la fecha.
9. CF : Coseno de la fecha modificada.
10. TSM : Temperatura superficial del mar.
11. V_{mo2} : Cuadrado del valor del viento máximo inicial.
12. L_{To2} : Cuadrado del valor de la latitud inicial.
13. L_{No2} : Cuadrado del valor de la longitud inicial.

14. V_{m24} : Cuadrado del cambio del viento máximo.
15. LT_{242} : Cuadrado del valor del desplazamiento latitudinal.
16. LN_{242} : Cuadrado del valor del desplazamiento longitudinal.
17. DT_2 : Cuadrado del número de días transcurridos desde la formación del CT.
18. DLT : $L_{to} - LT_{24}$.
19. DLN : $L_{no} - LN_{24}$.
20. PI : $PI = A \text{ Exp } B$ (TSM-25,0), Potencial de intensidad, según Merrill, 1989.
21. VMP : $V_{mo} + V_{m24}$.
22. POT : $PI - V_{mo}$.
23. POS : LN/LT .
24. $POSCT$: $POS \times CT$.
25. CP_1 : $V_{mo} \times POS \times CT$.

Los predictores numerados del 1 al 9 son los considerados predictores primarios y han sido utilizados con anterioridad por diversos autores. No obstante a partir de las experiencias acumuladas en investigaciones anteriores se decidió realizar una modificación en el predictor número 8. Esta consistió en hacer coincidir el valor mínimo de la función coseno como el momento del año en que aproximadamente ocurren las intensidades máximas de los ciclones tropicales en cada temporada ciclónica, el cual fue estimado como el día primero de septiembre. Para ello se utilizó el criterio de que:

$$T = F - 60$$

y en consecuencia:

$$\cos T = \cos (F - 60)$$

El predictor número 10 (TSM) es el valor de la temperatura superficial del mar, media semanal.

Aquellos predictores entre el 11 y el 17, no son más que el valor del cuadrado de los predictores primarios, con la excepción de aquellos referidos al valor consecutivo de los días del año (F: fecha). El predictor 18, se define como la diferencia entre la latitud inicial (L_{To}) y la latitud de las últimas 24 horas (LT_{24}). Asimismo se define el predictor 19, como la diferencia entre la longitud inicial (L_{No}) y la longitud de las últimas 24 horas (LN_{24}).

De forma adicional fueron definidos varios predictores a partir de combinar los predictores primarios. Tales combinaciones debían cumplir el requisito indispensable de poseer un sentido empírico bien determinado. El predictor 20 (PI) se de-

nomina como «Potencial de intensidad», fue determinado empíricamente por Merrill (1988) y está dado por la expresión:

$$PI = A \text{ Exp } B (TSM - 25,0)$$

Donde: A = 74 km, B = 0,2 °C y TSM es la temperatura superficial del mar en grados Celsius, para la que se utiliza la media semanal, en este caso el predictor 10. Este predictor potencial sólo se utiliza en el caso de la estratificación de depresiones y tormentas tropicales.

El predictor 21 (VMP) ha sido denominado como «Viento máximo de persistencia», definido como la suma algebraica de los predictores: viento máximo inicial (Vmo) y cambio del viento máximo en las últimas 24 horas (Vm24), por lo que representa una forma alternativa de persistencia. Este predictor sólo fue utilizado en los plazos de 12 horas, y no se utilizó en el caso de los huracanes intensos para ninguno de los plazos.

El predictor 22 (POT), representa los posibles efectos de la temperatura superficial del mar sobre los cambios de intensidad del ciclón tropical. A partir de los estudios observacionales realizados por Merrill (1988) y la experiencia obtenida por De María y Kaplan (1991), así como Limia *et al.* (1993), se decidió utilizar como predictor potencial la diferencia existente entre el valor de la intensidad inicial (Vmo) y el del potencial de intensidad (PI). Este predictor sólo se utilizó en el caso de la estratificación de huracanes intensos con la cizalladura vertical del viento zonal alto, en los plazos 12, 24 y 72 horas.

Así está también al predictor 23 (POS), determinado por la combinación de LN/LT y representa en un valor único la posición geográfica del ciclón tropical. Este predictor sólo se utilizó en el caso de las depresiones tropicales y los huracanes intensos en los plazos de 12 a 48 horas.

El predictor 24 (POSCT) está determinado por la combinación de POS x CT, la cual involucra la posición geográfica del ciclón tropical con la época del año. Este predictor se utilizó para todos los plazos de pronóstico en el caso de la estratificación de huracanes intensos.

Y por último el predictor 25 (CP1), que está determinado por la combinación de Vmo x POS x CT, la cual involucra la intensidad inicial de la tormenta con la posición geográfica y la época del año. Este predictor sólo se utilizó en los huracanes intensos, para todos los plazos de pronóstico. Se hizo el análisis del coeficiente de correlación simple existente entre los predictores potenciales seleccionados y los predictandos para caracterizar la

intensidad máxima de los ciclones tropicales, según Fisher and Yates, 1957, con un valor del nivel de significación por encima de 0,1946 % para un valor de n de 5 %.

Resultados

Se obtiene un análisis de las correlaciones entre los predictores y los predictandos de interés y se construye un modelo estadístico para el pronóstico de la intensidad de los ciclones tropicales de la siguiente forma:

- Para cada uno de los 12 grupos de estratificaciones fueron halladas ecuaciones de regresión múltiple referidas a cada uno de los plazos de pronósticos, 12, 24, 36, 48 y 72 horas.
- Las ecuaciones son construidas a través del método de selección de predictores paso a paso, para ello se utilizó el paquete estadístico S-Plus 2000.
- Las ecuaciones definitivas son seleccionadas a partir del criterio de que para cada estratificación se incluyeran los mismos predictores primarios, de forma directa o incorporadas a través de los predictores combinados.

Efectividad del nuevo modelo. Muestra de datos dependiente

Para valorar la efectividad del nuevo modelo CT07CI, se utilizan varios índices estadísticos tales como: el error medio absoluto, el error medio cuadrático, la desviación estándar y la reducción de la varianza, obtenidos al realizar las estimaciones sobre la muestra dependiente. El análisis se realiza de manera independiente para todas las estratificaciones obtenidas y el conjunto de sus ecuaciones pronóstico.

En la tabla 1 (ver figura 2) se muestran los valores para la estratificación de depresiones tropicales, se puede constatar que los errores medios absolutos y cuadráticos son menores en todos los plazos que para las ecuaciones climáticas, excepto en el caso cuando las tormentas se mueven en un ambiente con cizalladura baja los errores de las ecuaciones son mayores.

Sin embargo, de manera general los errores medios y cuadráticos son inferiores para el total de las ecuaciones en todos los plazos, excepto en el plazo de 48 horas, en relación con las estratificaciones por separado. O sea, que las ecuaciones obtenidas en su totalidad se muestran efectivas al pronosticar a corto plazo.

Tabla 1. Comparación entre los resultados alcanzados por el nuevo modelo CT07CI, para la estratificación de depresiones tropicales; n: número de casos, ema: error medio absoluto, E: error medio cuadrático, DS: desviación estándar, CT: climatológicas persistentes, Sb: cizalladura vertical del viento zonal baja, Sa: cizalladura vertical del viento zonal alta. TOT: suma de todas las ecuaciones. Los errores se expresan en nudos

Índice	Estratos	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
n	CT	244	244	244	244	244
	Sb	150	150	150	150	150
	Sa	94	94	94	94	94
	TOT					
ema	CT	3,8	6,6	9,5	11,7	14,7
	Sb	3,3	6,7	9,9	12,2	14,5
	Sa	3,6	5,5	8,8	10,8	13,4
	TOT	3,4	6,2	9,5	13,5	14,1
E	CT	4,9	8,5	12,3	14,6	18,5
	Sb	4,7	8,5	12,5	15,0	18,3
	Sa	4,8	7,0	11,0	13,9	17,5
	TOT	4,7	7,9	11,9	14,3	18,0
DS	CT	4,8	8,5	12,3	14,6	18,5
	Sb	4,7	8,5	12,5	15,0	18,3
	Sa	4,8	7,0	11,0	13,4	17,5
	TOT	4,7	7,9	11,9	14,4	18,0
RV	CT	43,6	32,8	29,0	28,8	24,8
	Sb	51,8	44,0	34,9	30,1	28,2
	Sa	32,6	34,4	28,2	33,6	31,5
	TOT	46,3	41,5	33,1	31,4	29,1

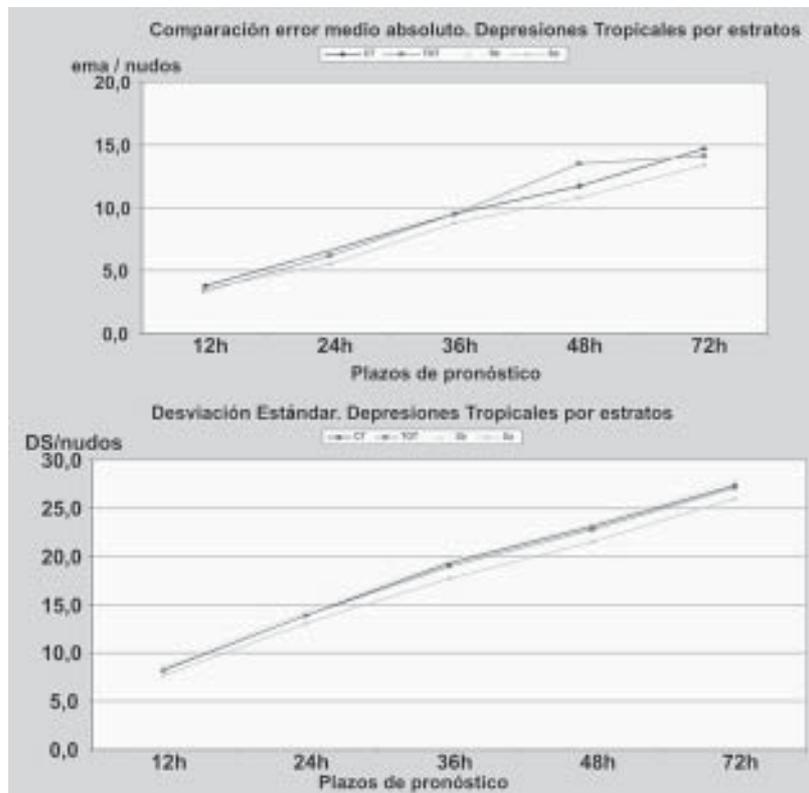


Fig. 2. Comparación de los errores medios absolutos ema, la correspondiente desviación estándar, DS y la reducción de la varianza, RV, alcanzados por el nuevo modelo CT07CI para los diferentes conjuntos de ecuaciones en la estratificación depresiones tropicales.

Las dispersiones totales están por debajo de los valores alcanzados para las ecuaciones que consideran los predictores climáticos. Destacar que en el caso de las ecuaciones para cuando la cizalladura es alta, las dispersiones son menores a medidas que el plazo de pronóstico es mayor.

Con relación al análisis de la reducción de la varianza las ecuaciones tienen un mayor aporte para el plazo de 12 a 24 horas, después no es muy poco significativa la reducción, no obstante, se utiliza la combinación de las ecuaciones S_b+S_a que denominamos TOT, y se elevan los aportes a la reducción de la varianza en todos los plazos por encima del resto de las estratificaciones, siendo mayor a corto plazo de pronóstico. Se puede concluir que los predictores sinópticos tienen un mayor peso en las estratificaciones donde las tormentas comienzan a organizarse y alcanzar algún grado de desarrollo. Demuestra además, que cuando la tormenta está en el estrato de menor intensidad, los errores crecen en la medida que se alejan del plazo inicial, aunque las dispersiones se presentan en rangos muy semejantes.

En la tabla 2 (ver figura 3) están los resultados alcanzados para la estratificación de tormentas tropicales. La tabla refleja que los errores medios absolutos y cuadráticos de las ecuaciones en total, son inferiores al valor alcanzado por el resto de las ecuaciones para todos los plazos; se aprecia una disminución del valor de los errores, principalmente en la ecuación para la estratificación cuando la cizalladura es alta. También hay valores de dispersiones por debajo de las presentadas incluso por las ecuaciones climáticas.

Respecto a las reducciones de la varianza aportada por las ecuaciones en esta estratificación, el mayor aporte lo brindan las ecuaciones para la estratificación en presencia de un bajo valor de la cizalladura y solo en el plazo de 12 horas. En esta estratificación de tormentas tropicales las ecuaciones resultantes de la combinación de las de cizalladura baja con alto, ofrecen el mayor aporte para la reducción de la varianza en todos los plazos, lo que apunta a que en esta estratificación utilizando la combinación de estas ecuaciones se obtienen los mejores resultados del pronóstico de las intensidades para todos los plazos con mayor efectividad a muy corto plazo.

Como muestra la tabla 3 (ver figura 4) en el caso de la estratificación de los huracanes, los mayores errores medios absolutos y cuadráticos se producen en los plazos entre las 12 y 36 horas, cuando la cizalladura es baja, y disminuyen en el resto de los

plazos. Sin embargo, el total de los errores es menor inclusive comparado con los de las ecuaciones climáticas.

En cuanto a los valores de la dispersión en el caso del estrato de las ecuaciones con cizalladura baja obtienen la menor dispersión, el total de las dispersiones aportadas por todas las ecuaciones es menor que las obtenidas para las climáticas.

Las reducciones de la varianza de las ecuaciones se mantienen poco significativas para casi todos los plazos. Se producen las mayores reducciones al combinar el resultado de las ecuaciones en presencia de cizalladura baja y alto, para todos los plazos, y los mayores valores se alcanzan en los plazos de 12, 24 y después en 72 horas. Lo que indica que los huracanes dependen de los factores sinópticos del medio circundante para su intensificación más que de los climáticos.

Al analizar los resultados obtenidos para los huracanes intensos que se muestran en la tabla 4 (ver figura 5) los valores obtenidos para los errores medios absolutos y cuadráticos, así como las correspondientes dispersiones de los valores obtenidos, son menores en el caso de las ecuaciones que se construyeron para cuando la cizalladura vertical del viento zonal sobre el huracán es baja, esto está relacionado con el hecho de que los huracanes en su máxima plenitud, dependen mucho más de los elementos del medio circundante que pesan más sobre las fluctuaciones de intensidad.

Por eso las mayores dispersiones se observan en las ecuaciones que se construyen para cuando el valor de la cizalladura es bajo, ya que se producen las mayores fluctuaciones en las intensidades, o bien se intensifican rápidamente o se debilitan. No obstante es muy diferente el comportamiento de las reducciones de la varianza en este estrato, donde se han obtenido los mayores aportes a las reducciones de la varianza para todos los plazos y estratos, que aumentan al avanzar en los plazos y de manera significativa para el caso cuando la tormenta está en un ambiente con condiciones de cizalladura vertical del viento zonal bajo.

Ello indica que los resultados obtenidos con las ecuaciones para el pronóstico de las intensidades máximas de los huracanes intensos son las de mayor efectividad, algo muy importante en este trabajo ya que los huracanes en su máximo esplendor son los más peligrosos, teniendo en cuenta los fenómenos severos que producen. Y la efectividad mostrada por estas ecuaciones pudiera facilitar el pronóstico de la evolución de los referidos organismos tropicales.

Tabla 2. Comparación de los resultados de las ecuaciones del nuevo modelo CT07CI, para la estratificación de tormentas tropicales; n: número de casos, ema: error medio absoluto, E: error medio cuadrático, DS: desviación estándar, CT: climatológicas persistentes, Sb: cizalladura vertical del viento zonal baja, Sa: cizalladura vertical del viento zonal alta. TOT: suma de Sb+Sa. Los errores se expresan en nudos

Índice	Estratos	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
n	CT	644	644	644	644	644
	Sb	332	332	332	332	332
	Sa	312	312	312	312	312
ema	CT	6,2	11,0	15,7	18,9	22,3
	Sb	6,4	11,2	16,2	19,6	22,0
	Sa	5,8	10,4	14,0	17,3	21,5
	TOT	4,9	8,7	12,3	14,9	17,7
E	CT	8,3	13,9	19,3	23,1	27,3
	Sb	8,6	14,3	19,5	23,3	27,7
	Sa	7,7	13,1	17,7	21,4	25,9
	TOT	7,3	12,4	17,0	20,4	24,3
DS	CT	8,3	13,9	19,3	23,1	27,3
	Sb	8,6	14,3	19,6	23,4	27,8
	Sa	7,7	13,1	17,7	21,5	26,0
	TOT	8,2	13,9	19,0	22,8	27,1
RV	CT	51,2	29,5	20,7	20,3	20,8
	Sb	51,9	34,1	26,6	26,8	26,6
	Sa	51,8	26,4	18,1	18,4	15,2
	TOT	52,3	31,7	25,6	25,2	23,1

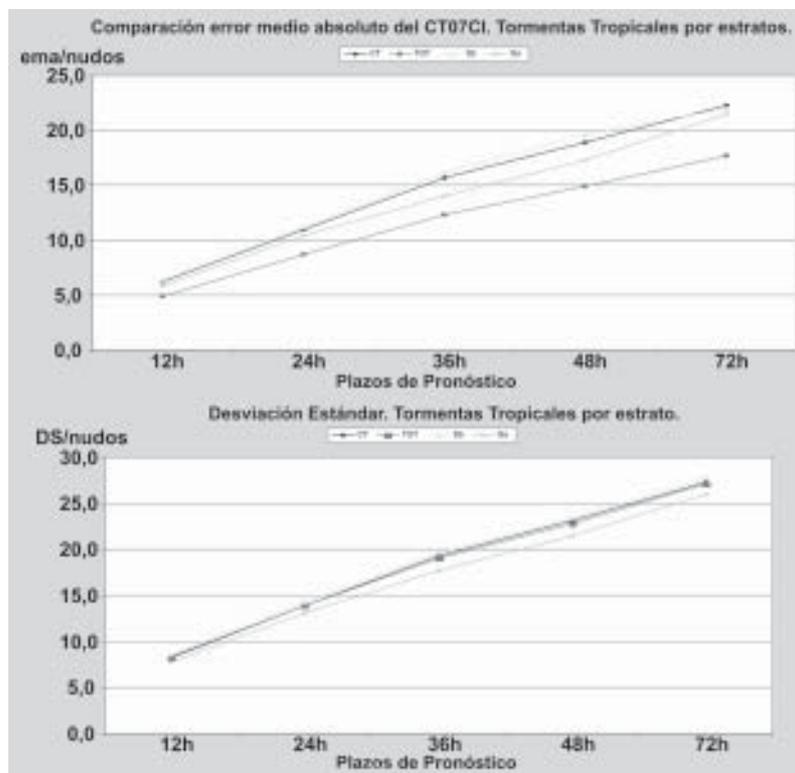


Fig. 3. Comparación de los errores medios absolutos ema, la correspondiente desviación estándar, DS y la reducción de la varianza, RV, alcanzados por el nuevo modelo CT07CI para los diferentes conjuntos de ecuaciones en la estratificación tormentas tropicales.

Tabla 3. Comparación de los resultados de las ecuaciones del nuevo modelo CT07CI, para la estratificación de huracanes; n: número de casos, ema: error medio absoluto, E: error medio cuadrático, DS: desviación estándar, CT: climatológicas persistentes, Sb: cizalladura vertical del viento zonal baja, Sa: cizalladura vertical del viento zonal alta. TOT: suma de Sb+Sa. Los errores se expresan en nudos

Índice	Estratos	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
n	CT	380	380	380	380	380
	Sb	212	212	212	212	212
	Sa	168	168	168	168	168
ema	CT	8,1	14,0	17,9	19,3	19,6
	Sb	8,6	15,0	18,5	18,9	18,8
	Sa	7,4	13,1	16,4	19,9	20,6
	TOT	8,0	14,0	17,7	19,3	19,5
E	CT	10,9	18,0	22,3	24,2	24,8
	Sb	11,7	18,8	22,8	23,6	23,5
	Sa	9,7	16,6	21,0	24,7	25,6
	TOT	10,9	17,9	22,1	24,1	24,6
DS	CT	10,9	18,0	22,3	24,2	24,8
	Sb	11,7	18,8	22,8	23,6	23,5
	Sa	9,7	16,6	21,0	24,7	25,6
	TOT	10,9	17,9	22,1	24,1	24,6
RV	CT	47,8	29,9	26,1	27,5	38,0
	Sb	44,2	32,5	28,3	33,7	46,5
	Sa	54,2	29,1	27,9	20,7	30,7
	TOT	48,0	31,0	27,8	28,3	39,8

Tabla 4. Comparación de los resultados de las ecuaciones del nuevo modelo CT07CI, para la estratificación de huracanes intensos; n: número de casos, ema: error medio absoluto, E: error medio cuadrático, DS: desviación estándar, CT: climatológicas persistentes, Sb: cizalladura vertical del viento zonal baja, Sa: cizalladura vertical del viento zonal alta. TOT: suma de Sb+Sa. Los errores se expresan en nudos

Índice	Estratos	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
n	CT	172	172	172	172	172
	Sb	115	115	115	115	115
	Sa	57	57	57	57	57
ema	CT	10,0	14,2	14,9	15,3	14,6
	Sb	12,5	15,3	14,6	16,2	12,2
	Sa	8,3	9,0	10,5	12,0	16,5
	TOT	8,9	11,6	14,1	15,0	14,1
E	CT	13,7	18,7	19,5	19,6	18,5
	Sb	16,2	20,0	20,3	21,0	16,2
	Sa	9,7	10,8	13,1	15,7	20,0
	TOT	12,9	16,7	18,8	19,5	18,1
DS	CT	13,8	18,8	19,5	19,7	18,6
	Sb	14,6	20,0	20,3	20,9	16,3
	Sa	9,7	10,8	13,2	15,8	20,2
	TOT	13,9	18,1	18,8	19,5	18,1
RV	CT	40,2	40,8	52,7	63,8	71,7
	Sb	41,7	34,8	53,3	60,8	76,1
	Sa	64,2	79,8	81,1	74,9	72,1
	TOT	46,2	48,9	62,8	65,0	74,5

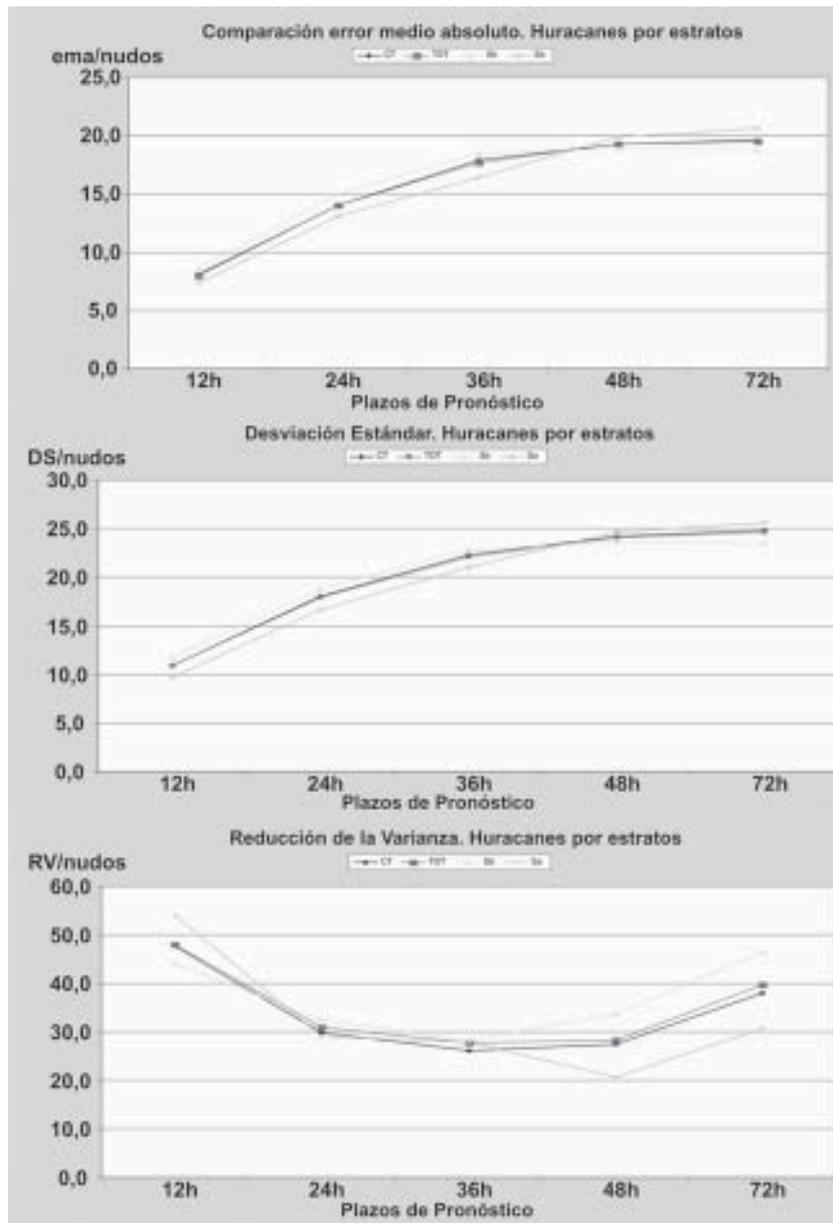


Fig. 4. Comparación de los errores medios absolutos *ema*, la correspondiente desviación estándar, *DS* y la reducción de la varianza, *RV*, alcanzados por el nuevo modelo CT07CI para los diferentes conjuntos de ecuaciones en la estratificación huracanes.

Como resultado de este análisis se puede señalar que los resultados obtenidos para el conjunto de ecuaciones por los diferentes estratos, o sea climáticas, de cizalladura baja y alta, para todos los estadios de desarrollo de la tormenta, o sea para las depresiones, tormentas tropicales, huracanes y huracanes intensos, son de inferior calidad que las obtenidas al combinar el conjunto de ecuaciones utilizadas para las dos estratos que tienen en cuenta el efecto de la cizalladura vertical del viento zonal, validado esto por los índices estadísticos analizados.

El conjunto de ecuaciones principales para todas las estratificaciones muestra muy bajos valores de reducción de la varianza para los plazos de 48 a 72 horas. Algunos autores relacionan esto con la cantidad de casos utilizados, lo cual se refleja en el aumento de la reducción de la varianza para todos los plazos de pronóstico, en el caso de los huracanes intensos, donde la cantidad de casos se reduce significativamente y se obtienen los mayores resultados.

Todas las ecuaciones resultaron significativas, según la prueba del estadígrafo F, a 99 o a 95 %.

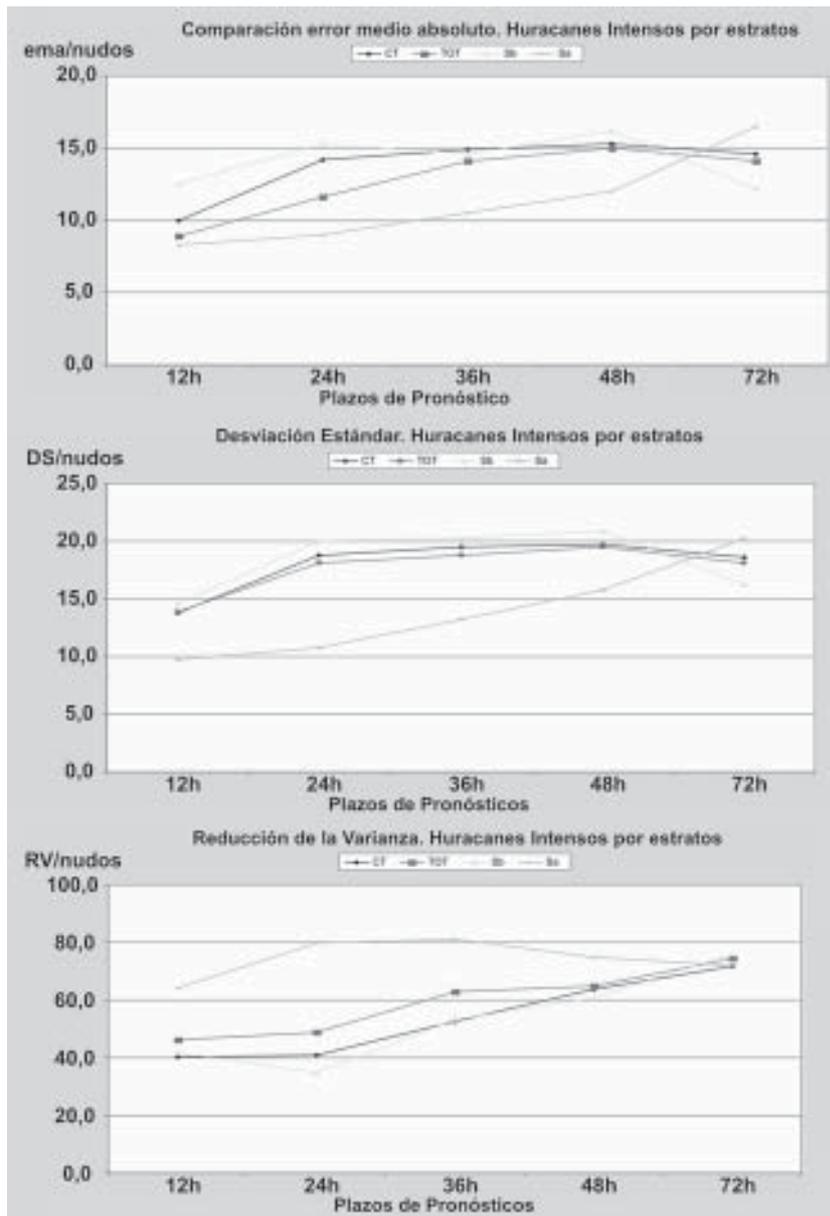


Fig. 5. Comparación de los errores medios absolutos *ema*, la correspondiente desviación estándar, *DS* y la reducción de la varianza, *RV*, alcanzados por el nuevo modelo CT07CI para los diferentes conjuntos de ecuaciones en la estratificación huracanes intensos.

Muestra de datos independiente

Una vez realizado el análisis de la efectividad del modelo, a través de la aplicación de las ecuaciones obtenidas sobre la muestra de datos dependientes, se pasó a aplicarlas sobre una muestra independiente, para lo cual se utilizó el caso del huracán Bertha, de la temporada ciclónica 2008. El análisis de estos resultados fue realizado de forma independiente entre todo el conjunto de ecuaciones pronóstico.

El conjunto de ecuaciones aplicadas, desde que apareció el sistema como la depresión tropical no. 2 en el Atlántico oriental, día 3 de julio a las 0900 UTC, hasta que alcanzó el grado de tormenta tropical, a las 1500 UTC, del propio día 3 de julio de 2008, fueron el conjunto de ecuaciones climatológicas persistentes y de la cizalladura vertical del viento bajo, con 15 casos respectivamente. Los resultados del análisis pueden apreciarse en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la prueba de las ecuaciones del nuevo modelo CT07CI, en la tormenta tropical Bertha; n: número de casos, ema: error medio absoluto, E: error medio cuadrático; DS: desviación estándar, CT: climatológicas persistentes, Sb: cizalladura vertical del viento zonal baja. Los errores se expresan en nudos

Índice	Estratos	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
n	CT	15	15	15	15	15
	Sb	15	15	15	15	15
ema	CT	6,2	18,3	26,0	25,6	18,8
	Sb	6,7	18,2	25,3	20,6	18,7
E	CT	8,2	22,1	29,0	28,6	22,9
	Sb	8,7	22,1	28,4	23,0	23,0
DS	CT	8,5	22,9	30,0	29,6	23,7
	Sb	9,0	22,8	29,4	23,8	23,8

Se observa que los resultados de los errores no muestran deterioro de las ecuaciones, este conjunto de ecuaciones en su totalidad presenta rangos aceptables para este caso en específico.

Los errores medios absolutos son menores para el caso en que se utilizaron las ecuaciones del estrato con cizalladura vertical del viento bajo.

Como dato adicional las ecuaciones sugirieron la intensificación de Bertha a partir del plazo de 36 horas, en la mayoría de los casos a los que se le aplicó el conjunto de ecuaciones climatológicas persistentes, y en el caso de las ecuaciones de cizalladura vertical del viento bajo a partir del plazo de 48 horas con mayor probabilidad, por lo que este se aproximó algo más a la situación real.

El día 7 de julio de 2008 a las 0900 UTC, Bertha alcanzó la categoría de huracán. Para un total de 10 casos, se aplicó el conjunto de ecuaciones climatológicas persistentes y el de la cizalladura alta. Los resultados del análisis pueden apreciarse en la tabla 6.

Aquí la muestra independiente fue menor, pero al igual que el caso anterior los errores son aceptables, las ecuaciones no presentan deterioro con respecto a la muestra dependiente. Las ecuaciones

utilizadas se aprecian con una efectividad mejor para el caso cuando fueron utilizadas el conjunto de ecuaciones que contempla la cizalladura vertical del viento alta.

Conclusiones

El análisis mostró que la intensidad inicial de la tormenta posee una alta correlación con el viento máximo que alcanzan los CT en las siguientes 36 horas, para todas las etapas del desarrollo, con la peculiaridad de que en los huracanes intensos lo hacen hasta las 48 horas. Esto reafirma la importancia de la persistencia en el pronóstico de intensidad de los ciclones tropicales.

La correlación existente entre los predictores relacionados con la posición geográfica del CT, y sus desplazamientos, y la intensidad máxima de las tormentas es alta en todas las estratificaciones, lo que reafirma que los CT en su avance al oeste tienen más posibilidades de intensificarse y por el contrario debilitarse en su desplazamiento al norte.

Los predictores potenciales que se relacionan con el ciclo de vida de la tormenta y la época del año, poseen una alta correlación con la intensidad máxima de los CT en los estadios de formación y

Tabla 6. Resultados de la prueba de las ecuaciones del nuevo modelo CT07CI, en el huracán Bertha; n: número de casos, ema: error medio absoluto, E: error medio cuadrático, DS: desviación estándar, CT: climatológicas persistentes, Sb: cizalladura vertical del viento zonal baja. Los errores se expresan en nudos.

Índice	Estratos	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
n	CT	10	8	6	4	2
	Sa	10	8	6	4	2
ema	CT	20,1	27,2	12,3	13,2	0,4
	Sa	20,3	23,1	13,1	14,5	0,1
E	CT	23,9	28,7	14,0	13,3	0,4
	Sa	24,1	24,4	15,1	14,5	0,1
DS	CT	24,2	30,7	15,4	15,3	0,0
	Sa	24,4	26,0	16,6	16,8	0,0

organización de la tormenta, mientras que en los huracanes y su fase superior pierden significación.

El predictor temperatura superficial del mar mantiene una alta correlación con los predictandos y participa en la mayoría de las ecuaciones, pero a partir de que los organismos alcanzan alguna madurez. Por ello su mayor peso aparece en el conjunto de ecuaciones de tormentas tropicales, los huracanes y huracanes intensos.

Respecto al predictor potencial (POT), que combina la diferencia entre la intensidad inicial del CT y el potencial de intensidad máxima (PI), es relevante sólo en el caso de los huracanes intensos, aunque también aparece en la estratificación de las DT.

Las ecuaciones de las estratificaciones muestran la mayor reducción de la varianza en los plazos de pronóstico inferiores, con la excepción de los huracanes intensos.

Esta investigación permite obtener un método persistente y climatológico de una adecuada habilidad predictiva de la intensidad de los ciclones tropicales, lo que se corresponde con los objetivos planteados.

Han contribuido a lograr este resultado la estratificación de la muestra dependiente en doce grupos, según la intensidad inicial del ciclón tropical y el valor de la cizalladura vertical del viento. Esta última característica, diferencia al nuevo modelo sustancialmente del modelo anterior, utilizado actualmente en el Centro de Pronósticos del INSMET.

Recomendaciones

Realizar una introducción operativa en la presente temporada ciclónica y lograr comparar sus resultados con los pronósticos oficiales del NHC.

Elaborar una base de datos, de las «mejores trayectorias», con la inclusión de las «mejores intensidades», para CT que afectan a Cuba y de la cuenca Atlántica, que garantice la calidad adecuada de la información y permitiría mejorar periódicamente la capacidad predictiva del modelo, e incrementar la muestra dependiente cada cinco años.

Bibliografía

- Agrevich, E. A., A. P. Hain, R. Pérez y L. Álvarez (1991): «Resultados de la explotación de los métodos de pronóstico de intensidad de los ciclones tropicales». *Meteorología e Hidrología*, 9: 102-105.
- Arakawa, H. (1961): «Prediction of Moments and surface pressures of typhoon centers in the Far East by

statistical methods». *National Hurricane Research Project. Report no. 43*; US Weather Bureau. Citado por Pérez Suárez, 1987, en Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Geográficas.

- _____ (1963): «Studies on statistical prediction of typhoons». *Nat. Hurr. Res. Pro. Rep.* 61, 15 p.
- Brand, S. (1973): «Rapid intensification and low-latitude weakening of tropical cyclones of the western North Pacific Ocean». *J. of Appl. Meteorology*. 12: 94-103 pp. Citado por Pérez Suárez, 1987, en Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Geográficas.
- Blake, E. S., J. D. Jarrell (retired), M. Mayfield, and E. N. Rappaport, C. W. Landsea (2004): «The deadliest, costliest, and most intense united states tropical cyclones from 1851 to 2004 (and other frequently requested hurricane facts) NOAA/NWS/ Tropical Prediction Center/National Hurricane Center and NOAA/AOML/Hurricane Research Division Miami, Florida.
- Cook, B.J. (1985): «An application of discriminant analysis to a tropical cyclone intensification forecasting algorithm». NAVENVPREDRSCHFAC Tech. Rep. TR85-02, Naval env. Pre. Res. Fac., Monterrey, CA 93943- 5006, 36 p.
- De Maria, M. and J. Kaplan (1991): «Prediction of Tropical Cyclone Intensity. A statical model for predicting tropical cyclone intensity changes. The 19th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology». Miami (American Meteorological Society), pp. 521- 527.
- _____ (1993): «Verification of a statistical hurricane intensity prediction model». Extended abstracts, 20th Conf. On Hurricane and Tropical Meteorology, Amer. Meteor. Soc., Boston, MA.
- _____ (1994): A statistical hurricane intensity prediction scheme (ships) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, 9: 209- 220.
- Deppermann, C. E. (1946): «Is there a ring of violent upward convection in hurricanes and typhoons». *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 27: 6-8.
- Dropco, K. M. (1981): «Tropical cyclone intensity changes- a quantitative forecast scheme». Dept. Atmos. Sci. Paper 333. Colorado State University, Ft. Collins, CO 80523, 89 p.
- Dvorak, V. F. (1975): «Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery». *Monthly Weather Rev.* 103: 420- 430.
- _____ (1984): «Tropical cyclone intensity analysis using satellite data». NOAA Tech. Rep. NEDIS- 11, 47 p.
- Elbeserry, R. L., G. G. Caltrane and P. L. Krueger, Jr. (1974): «Typhoons and tropical storm intensity forecast for 24, 48, and 72 hours using statistical regression equations», ENVPREDRSCHFAC Tech. Note 15 Naval Env. Pred. Res. Fac. Monterrey, CA 93943-5006, 25 p.

- Enmanuel, K. A. (1988): «The maximum intensity of Hurricane». *J. Atmosf. Sci.*, 45, 1143-1155.
- Frank, N. L. and C.L. Jordan (1960): «Climatological aspects of the intensity of typhoons». *Nat. Hurr. Res. Proj. Rep.* 36, 16 p.
- Fisher and Yates (1957): *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*. Published by Oliver and Boyd Ltd; Edinburgh. And by permission of the authors and pub. Table VII. Values of r (Simple Correlation coefficient) for different levels of significance, New York: Hafner, 890 p.
- Fung, Yat-Roug (1970): «A statistical analysis of the intensity of typhoons 1950-1968». Royal Observatory tech. Note (local) No. 9, Hong Kong. Citado por Pérez Suárez, 1987, en Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Geográficas.
- García, O., J. M. Serra, y A. Hernández (1991): «Evaluación de la técnica de Dvorak para el análisis y pronóstico de la intensidad de los ciclones tropicales mediante imágenes infrarrojas, durante el experimento Tifón 90». En *V Simposium de Meteorología Tropical*, Obninsk (Editorial Hidrometeorológica, Leningrado).
- Gray, W. M. (1968): «Global view of the origin of tropical disturbances and storms», *Mon. Wea. Rev.*, 96, 669-700.
- _____ (1975): «Tropical cyclone genesis». *Atmos. Sci. Paper*, no. 234, Colorado State University, 121 p.
- Haurwitz, B. (1935): «The height of tropical cyclones and the eye of the storm». *Mon. Weather. Rev.* 63. 45-49 pp. Citado por Pérez Suárez, Conferencia de Meteorología Tropical, última corrección, 1997.
- Hebert, P. J. and G. Taylor (1979): *Hurricanes; Weather-wise*, V. 32, 100-107.
- Hernández Yzal, S. (1969): *Tratado de meteorología náutica*. Ediciones de Ciencia y Técnica, Instituto del Libro, La Habana, 307-312.
- Holland, G. J. (1985): «Tropical cyclone intensity and structure change», en *Topic chairman and Rapporteur Reports of WMO International Workshop on Tropical Cyclones*. WMO TP- No. 73, vol. II.
- Holland, G. J. and R. T. Merrill (1984): «On the dynamics of tropical cyclone structural changes». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 110, 723-725 pp.
- Holliday, C. A. and A. H. Thompson (1979): «Climatological characteristic of rapidly intensify typhoons». *Mon. Rev.* 107, 1022-1034.
- Jarvinen, B. R. and J. Neumann (1979): *Statistical forecast of Tropical Cyclone Intensity for the North Atlantic Basin*. NOAA Technical Memorandum. NWS. NHC. 10: 1- 22.
- Landsea C. W. and W. M. Gray (1992): «The strong association between western sahel monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes». *Journal of Climate*, vol. 5, no. 5, May 1992.
- Leslie, L. M. and G. J. Holland (1991): «Predicting regional forecast skill using single and ensemble forecast techniques». *Monthly Weather Rev.* 119: 425-435.
- Limia, M. y A. García (1985): Informe final del tema de investigación: «Realización del análisis físico-estadístico del pronóstico de traslación y evolución de los ciclones tropicales». Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba.
- Limia, M., R. Pérez, M. González, A. García, y R. Ortiz (1993): Informe final del resultado 415.513: «Modelos estadísticos, dinámicos-estadísticos y sistema experto sobre la evolución y el movimiento de los ciclones tropicales», Instituto de Meteorología, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, pp. 4-61.
- Merrill, R. T. (1984): «A comparison of large and small tropical cyclone». *Monthly Weather Rev.*, 112: 1408-1418.
- _____ (1988): «Environmental influence on hurricanes intensification». *J. Atmos. Sci.* no. 45: 1678- 1687.
- _____ (1989): «An experiment in statistical prediction of tropical cyclone intensity change». *NOAA Technical Memorandum*. NWS. NHC. 34: 1- 33.
- Michaels, J. (1973): Changes en the maximus winds in Atlantic tropical cyclones as deduced from central pressure changes. *NOAA Tech. Memo*. ERL. WMPO-6, Weather Mod. Program Office. Boulder, CO, 43 p.
- Niu, X. Y W. Teng. (1987): «Dynamic-statistic method for forecasting the intensity of tropical cyclone». *Kexue Tongbao*. 32: 973-977.
- Riehl, H. (1972): «Intensity of recurved Typhoons». *J. Appl. Meteor.* 11: 614-615.
- Riehl, H. and J. S. Malkus (1961): Some aspects of Hurricane Daisy, 1958. *Tellus* 13, 181- 213.
- Rodríguez Ramírez, M. (1976): *Cronología clasificada de los Ciclones (1800-1975)*, Instituto de Meteorología, La Habana.
- Rubiera Torres, J. M., et al. (2006): *Curso sobre ciclones tropicales*, Suplemento Especial, Editorial Academia, La Habana.
- Pérez Suárez, R. (1987): «Diagnóstico y pronóstico de la Distribución del Viento en las Perturbaciones Ciclónicas y Huracanes». Tesis opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas, Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Meteorología, La Habana.
- _____ (1991): «Pronóstico de intensidad de los ciclones tropicales». *Revista Cubana de Meteorología*, La Habana, Cuba, 4: 58-60.
- _____ (1991): «Un método para el pronóstico de la distribución del viento en las perturbaciones ciclónicas y los huracanes». *Revista Cubana de Meteorología*, La Habana, Cuba.
- _____ (1991): «Método complejo para el pronóstico de la intensidad de los ciclones tropicales». *Revista Cubana de Meteorología*, La Habana, Cuba.

- Pike, C. (1985): «Geopotential height and thicknesses as predictors of Atlantic tropical cyclone motion and intensity». *Mon. Weather. Rev.* 113: 931-939.
- Steranka, J., E. B. Rodgers and R. C. Gentry (1986): «The relationship between satellite measured convective bursts and tropical cyclone intensification». *Mon. Weather. Rev.* 114: 1539-1546.
- Shen, W., R. E. Tuleya and I. Ginis (2000): «A sensitivity study of the thermodynamic environment on GDFL model hurricane intensity: Implications for global warning». *Journal of Climate*, 13(1), 109-121.
- Weatherford, C., L. (1985): «Typhoon structure variability». *Atmospheric Science Paper no. 391*, Colorado State University, Ft. Collins, CO 80523, 77 p.
- WMO/OMM/BMO- No. 182 (1992): *Vocabulario Meteorológico Internacional*, World Meteorological Organization, Geneva.
- WWW.Lighthouse Foundation (2004): Org, Die Stiftung Fur Meere und Ozeane. Hamburg, Alemania.

Abstract:

This investigation seeks to diminish magnitude errors that are found in the operational practice of high intensity hurricane forecasting through the introduction of new predictions in pattern CT91CI that give place at CT07CI. The information used was referenced from intensity storms that conformed to the best trajectories of 1441 hurricane cases in the Atlantic Ocean, the Caribbean Sea, and the Gulf of Mexico from 1989-2000. The data was obtained from HURDAT (Landse and Gray, 1992). In the pattern superficial weekly half sea temperature will be used, through the certain maximum potential intensity empirically derived from Merrill (1988), with the effects of vertical wind shear on the escalation or weakness of hurricanes in a deep layer atmosphere between 200 and 850 hectoPascal. For obtaining equations a selection potential predictor of climatic, empiric and synoptic characters was subjected to a process of statistical regression analysis that sifted the variables for each equation. For extraction field predictors, the central coordinate positions of hurricanes that conform to each trajectory were taken. As a result, a persistent climatological method was obtained which is able to predict the maximum wind intensity of the hurricane for the next 12, 24, 36, 48, and 72 hours, with an appropriate forecast ability for the future evolution of the system. The results can be considered novel and satisfactory given the use of vertical shear wind values to build equations.

Key words: Forecast intensity, hurricane