

Las inversiones de temperatura en Cienfuegos y Guantánamo

LUCIANO AMARO, V. G. VOLOSHIN, e IBIS RIVERO

RESUMEN

Se obtuvo la distribución espacio-temporal de las inversiones de temperatura en el período 1977-1979. Se comprobó que la ocurrencia de inversiones tiene una distribución periódica, con valores máximos cada 24 horas.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos principales de las investigaciones aerológicas en regiones de construcción de grandes objetivos industriales es conocer las características de la dispersión de las impurezas que van a la atmósfera expulsadas por las fuentes emanadoras. El traslado de las impurezas y su concentración en las capas de la atmósfera cercanas a la tierra está fundamentado por las diferentes categorías de estabilidad. Las inversiones de temperatura¹ superficiales y elevadas (hasta 1 km de altura) crean condiciones desfavorables a la dispersión de las impurezas para fuentes emanadoras cercanas a la superficie de la tierra.

Anteriormente, AMARO y CARNESOLTAS (1978) estudiaron algunas características de las inversiones de temperatura en Camagüey, a partir de los sondeos de temperatura realizados en esa ciudad durante el período 1966-1968, a las 07:00 hora local del meridiano 75° W. En el presente trabajo se estudia por este método, por primera vez en nuestro país, las características de la distribución vertical y temporal de las inversiones de temperatura en dos estaciones aerológicas, para dos horarios de observación. Las estaciones escogidas fueron Cienfuegos y Guantánamo.²

Trabajo presentado en la V Jornada Científica del Instituto de Meteorología, de la Academia de Ciencias de Cuba, junio de 1982. Manuscrito aprobado el 26 de noviembre de 1983.

L. Amaro e I. Rivero pertenecen al Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba. V. G. Voloshin pertenece al Instituto Hidrometeorológico de Odessa, del Ministerio de Educación Superior de la URSS.

¹ Capas en las cuales la temperatura aumenta o se mantiene constante con la altura.

² Se refiere a la estación aerológica ubicada en la Base Naval de Guantánamo, perteneciente a los EUA.

Tomando como base los resultados preliminares de las observaciones aerológicas realizadas en Cienfuegos durante 1977-1979 (L. Amaro y V. G. Voloshin, inédito)³, ajustamos el gradiente de las inversiones de temperatura a una curva exponencial negativa (e^{-2x}) cumpliéndose el criterio de la bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov; la periodicidad de la oscilación diaria de la frecuencia de ocurrencia de inversiones de temperatura superficiales permitió aproximar los valores obtenidos para Cienfuegos a una serie de Fourier.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para confeccionar este trabajo los autores procesaron los datos de observaciones del aire superior, 890 realizados en Cienfuegos y 550 en Guantánamo, en el período comprendido entre diciembre de 1977 y noviembre de 1979. Las observaciones se realizaron a las 01, 07, 13 y 19 horas del meridiano 75° W.

Los datos fueron agrupados para hacer análisis en dos períodos: Período I (noviembre-abril); Período II (mayo-octubre).

Las inversiones de temperatura fueron analizadas de acuerdo con la altura de su base para capas de 0,25 km de espesor, a partir de la superficie de la tierra hasta 1 km; para las inversiones por encima de 1 km y hasta los 4 km, las capas escogidas fueron de 0,5 km de espesor.

Teniendo en cuenta los errores que se producen en la determinación de las inversiones de temperatura mediante el radiosondeo de la atmósfera con radiosondas de procedencia soviética (VOLOSHIN y AMARO, 1982), solamente consideramos las inversiones de temperatura con un espesor mayor o igual a 80 m.

Debido a que en Guantánamo solamente se realizaron observaciones a las 07 y 19 horas, cuando analicemos en conjunto ambas estaciones sólo nos referiremos a estos horarios de observación.

3. RESULTADOS

3.1 Distribución vertical de las inversiones de temperatura

3.11 PERÍODO NOVIEMBRE-ABRIL

Al analizar la frecuencia de ocurrencia (en %) para las diferentes capas escogidas, comprobamos la existencia de dos máximos en ambas estaciones, en las capas a partir de la superficie de la tierra y desde 1,5 a 3,0 km (Fig. 1A). El máximo absoluto de frecuencia de ocurrencia en ambas estaciones fue registrado para las inversiones superficiales con valores del orden del 44 y 40% en Cienfuegos y Guantánamo, respectivamente. El máximo relativo para las inversiones elevadas fue de un 23% para Cienfuegos, en la capa entre 1,0 y 1,5 km, y de un 10% para Guantánamo entre 2,0 y 2,5 km.

La distribución de las inversiones superficiales para los diferentes horarios de observación nos permite afirmar que la mayoría de las inver-

³ "Algunas características del estudio de las inversiones de temperatura en la Isla de Cuba".

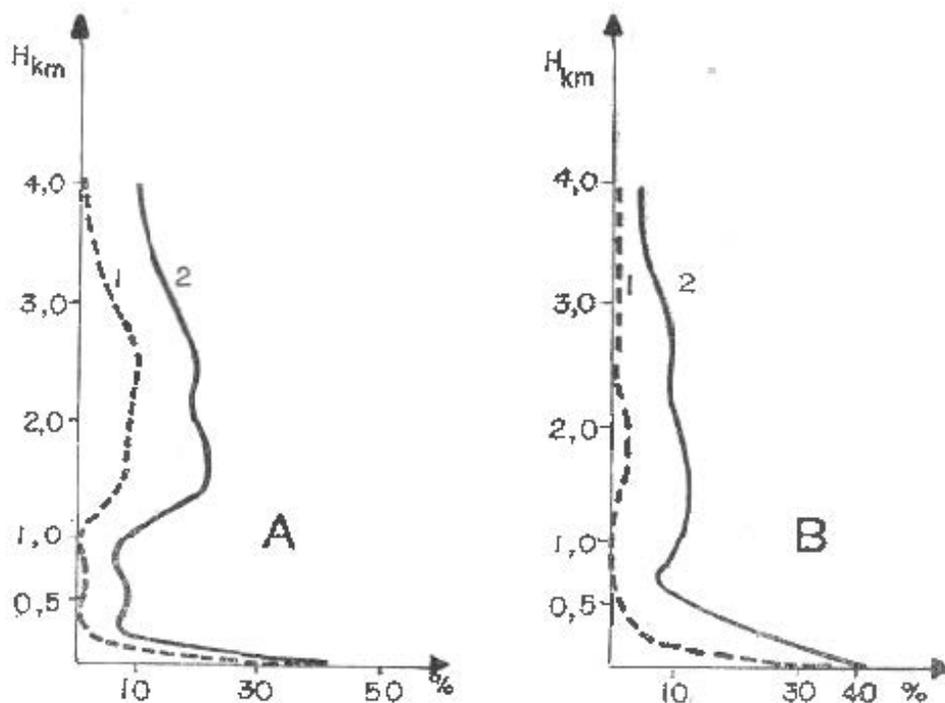


FIG. 1. Frecuencia de ocurrencia de las inversiones de temperatura para las capas escogidas. A, Período I; B, Período II; 1, Guantánamo; 2, Cienfuegos.

siones registradas en esta capa tienen un origen radiativo al enfriarse en horas de la noche la tierra más rápido que el aire. Los valores máximos de la frecuencia de ocurrencia de inversiones elevadas en ambas estaciones para este período están estrechamente vinculadas a la subsidencia producida por el anticiclón continental al ejercer su influencia sobre la región estudiada (48,6%), aunque en menor grado un grupo de inversiones estuvieron relacionadas con situaciones de tipo anticiclónico subtropical (18,9%).

Es significativo también que en un porcentaje no despreciable las inversiones en esta capa estaban asociadas al paso de un frente frío sobre la región de estudio (24,3%). En este período las inversiones de temperatura elevadas estuvieron relacionadas con dos causas fundamentales: (a) la influencia anticiclónica sobre la región de estudio, y (b) el paso de un frente sobre la región de estudio.

3.12 PERÍODO MAYO-OCTUBRE

En este período se registraron también dos máximos en la frecuencia de ocurrencia de las inversiones de temperatura en ambas estaciones, aunque en las inversiones elevadas fue de magnitud inferior al del Período I.

El máximo absoluto fue para las inversiones superficiales con valores de 44 y 38% en Cienfuegos y Guantánamo, respectivamente. Estos son valores muy semejantes a los obtenidos para el período noviembre-abril; los valores máximos para las inversiones elevadas fueron mucho menores que en el Período I, y se registraron en la capa de 1,0 a 1,5 km en Cienfuegos, con un 14%, y en Guantánamo en la capa de 1,5 a 2,0 km, con un valor del 4% (Fig. 1B).

Al igual que en el período anterior, consideramos que el máximo de ocurrencia de inversiones superficiales está asociado a fenómenos de carácter radiativo en ambas estaciones, siendo los valores obtenidos para esta capa muy parecidos con independencia de la época del año analizada. Los valores máximos de frecuencia de ocurrencia para las inversiones elevadas en las capas 1,0 a 1,5 km en Cienfuegos y 2,0 a 2,5 km en Guantánamo están asociados en 84,6% y 81,0% de los casos a situaciones sinópticas de tipo anticiclónicos subtropical o relacionados al mismo. Con éstos resultados podemos afirmar que, en su mayoría, en este período las inversiones ocurridas en las capas entre 1,0 y 2,5 tienen un origen dinámico por la subsidencia producida por el anticiclón del Atlántico (RHIEL, 1954, 1979), confirmándose los resultados obtenidos para Camagüey por AMARO y CARNESOLTAS (1978) sobre el máximo de frecuencias en estas capas.

Es significativa la diferencia en la frecuencia de ocurrencia de ambas estaciones para las inversiones elevadas en los períodos analizados. Los autores opinan que estas diferencias significativas están asociadas a dos causas fundamentales: (a) las características orográficas de las regiones de ubicación de ambas estaciones, y (b) la diferencia en los sistemas de observación utilizados.

3.2 Distribución de frecuencias de los gradientes de temperatura para las inversiones en Cienfuegos y Guantánamo

Al analizar las particularidades de la distribución del gradiente de temperatura en las inversiones para los diferentes intervalos de clase escogidos (desde 0°C/100 m hasta 2,4°C/100 m), demostramos que su distribución de frecuencias se puede ajustar a una ecuación de tipo exponencial (Fig. 2) con una función de distribución del tipo:

$$F_{\lambda v}(x) = \int^x f_{\lambda v} u \, du = 1 - e^{-\lambda v(x)} \quad (1)$$

donde

$$f_{\lambda v}(x) \begin{cases} \lambda v e^{-\lambda v(x)} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

se estima para la muestra aplicando el principio de máxima verosimilitud,

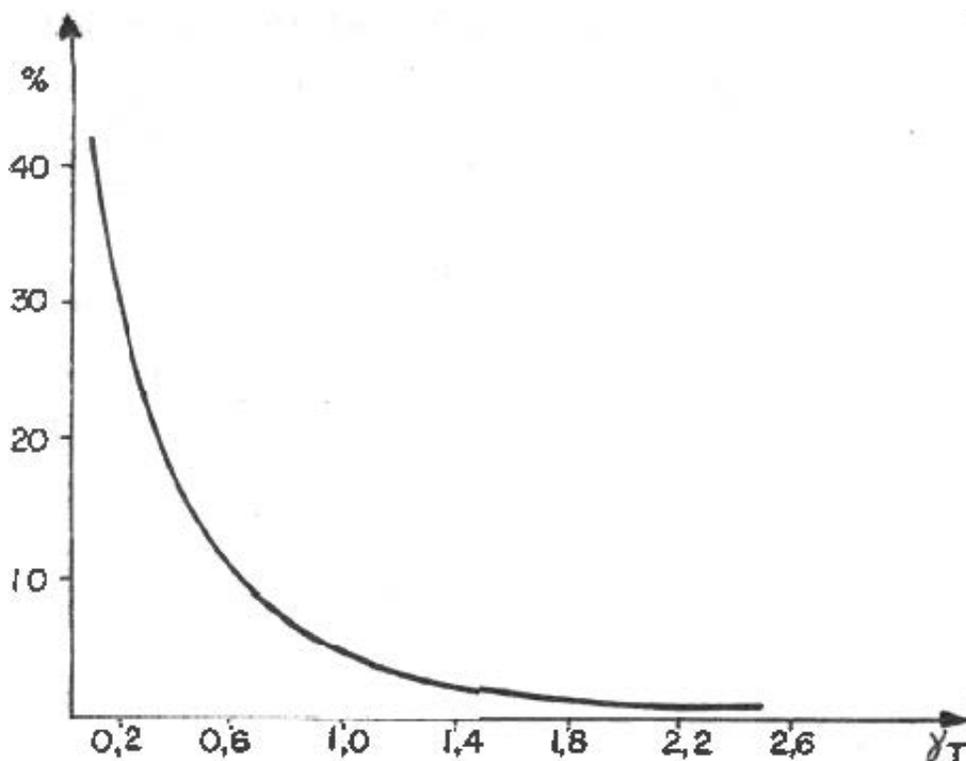


FIG. 2. Frecuencia de ocurrencia del gradiente de temperatura en las inversiones de temperatura para los intervalos escogidos en Guantánamo (Período II).

Tomando como hipótesis que la distribución del gradiente para las diferentes inversiones tiene forma exponencial, respecto al porcentaje de casos, para los intervalos escogidos la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov dio resultados satisfactorios, no rechazando la hipótesis. Los mejores resultados del ajuste fueron obtenidos para la estación aerológica de Guantánamo en el período mayo-octubre (Fig. 2).

3.3 Potencia y gradiente de temperatura en las inversiones de temperatura en Cienfuegos y Guantánamo

De los valores mostrados en la Tabla 1, podemos inferir que las inversiones de temperatura superficiales son más potentes⁴ en Cienfuegos para los períodos I y II; en la mayoría de los casos los valores medios del espesor de las inversiones de temperatura elevadas en las capas por encima de los 750 m son mayores para el período noviembre-abril que para el período mayo-octubre. En nuestra opinión, estos altos valores medios se asocian a la influencia cercana del anticiclón continental sobre

⁴ Se refiere a la diferencia de altura entre los límites superior e inferior de las inversiones.

TABLA 1. Valores medios de la potencia y la intensidad de las inversiones de temperatura en Guantánamo y Cienfuegos.

Capas escogidas (en km)	Sup.	0,01-0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0
Guantánamo (Período I)							
ΔH km	0,184	0,321	0,230	0,328	0,318	0,481	0,484
$^{\circ}C/$ 100 m	0,67	0,25	0,25	0,0	0,18	0,38	0,61
Guantánamo (Período II)							
ΔH km	0,167	0,302	0,258	0,182	0,319	0,219	0,323
$^{\circ}C/$ 100 m	0,61	0,48	0,32	0,0	0,09	0,30	0,07
Cienfuegos (Período I)							
ΔH km	0,216	0,178	0,166	0,168	0,247	0,238	0,256
$^{\circ}C/$ 100 m	0,86	0,51	0,22	0,15	0,41	0,69	0,46
Cienfuegos (Período II)							
ΔH km	0,258	0,167	0,166	0,174	0,135	0,165	0,142
$^{\circ}C/$ 100 m	0,58	0,45	0,32	0,29	0,49	0,29	0,38

las estaciones estudiadas en el Período I, provocando una fuerte subsidencia en las capas analizadas, lo que aumenta la profundidad de las mismas.

El análisis realizado con los valores de los gradientes de temperatura de las inversiones, para ambas estaciones, no permite caracterizar la distribución de los valores medios de los mismos, por lo que opinamos deben realizarse estudios adicionales considerando solamente los casos en que la temperatura aumenta con la altura, prescindiendo de las isotermas.

3.4 Oscilación diurna de la frecuencia de ocurrencia de las inversiones superficiales de temperatura en Cienfuegos

La distribución diurna de la frecuencia de ocurrencia de las inversiones superficiales de temperatura en Cienfuegos está en dependencia de las

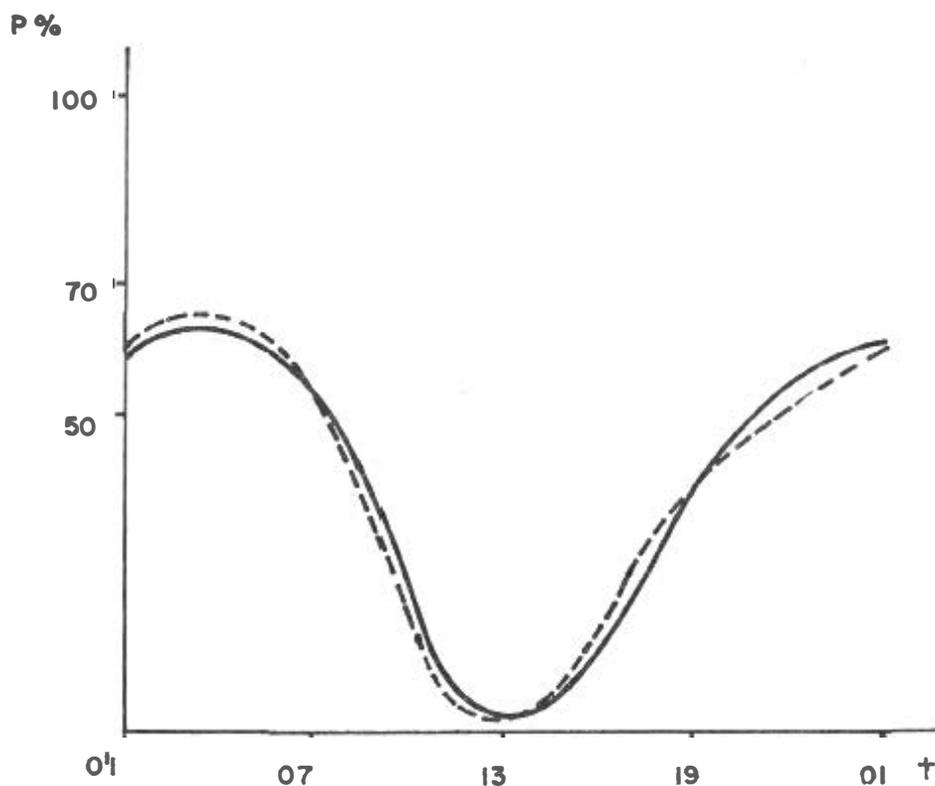


FIG. 3. Oscilación diurna de las inversiones superficiales de temperatura en Cienfuegos en el período noviembre-abril.

horas del día en que se realizaron las observaciones, teniendo en cuenta la periodicidad de la oscilación diurna de las inversiones y considerando el criterio establecido por ELEKOEBA (1979) para calcular la oscilación diurna de las inversiones por medio de una serie de Fourier del tipo:

$$P(t) = a_0 + \sum a_i \cos(2\pi it/T) + \sum b_i \text{sen}(2\pi it/T) \quad (3)$$

donde $P(t)$ = frecuencia de ocurrencia de las inversiones en (%) para los diferentes horarios de observación; t = hora de la observación; T = período de observaciones de 24 horas, a y b = coeficientes de la serie de Fourier.

Los resultados obtenidos al calcular las curvas teóricas para los períodos I y II satisfacen la prueba de Student con un 95% de confiabilidad. En la Fig. 3 presentamos la curva de frecuencia de ocurrencia calculada por medio de la serie de Fourier, para los diferentes horarios escogidos. Los resultados obtenidos dan la posibilidad de usar en forma práctica la ecuación (3) en Cuba para calcular la frecuencia de ocurrencia

cia de las inversiones de temperatura superficiales. Los valores máximos se registraron en la noche y al amañecer (01:00 y 07:00) para ambos períodos; en horas próximas al mediodía se registraron los mínimos valores en ambos períodos.

3.5 Coeficiente de asociación temporal para las inversiones superficiales de temperatura en Cienfuegos

Con la finalidad de conocer la probabilidad de ocurrencia de las inversiones de temperatura para diferentes intervalos de tiempo, escogimos intervalos desde 6 hasta 144 horas cada 6 horas, calculando el coeficiente (τ) para cada uno de ellos mediante la fórmula siguiente:

$$\tau = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a + b)(c + d)(a + c)(b + d)}} \quad (4)$$

donde a = cantidad de casos en que, si existe inversión a una hora de observación dada, habrá una inversión en el próximo intervalo de tiempo escogido; b = cantidad de casos en que, si no existe inversión a una hora de observación dada, habrá una inversión en el próximo intervalo de tiempo escogido; c = cantidad de casos en que, si no hay una inversión

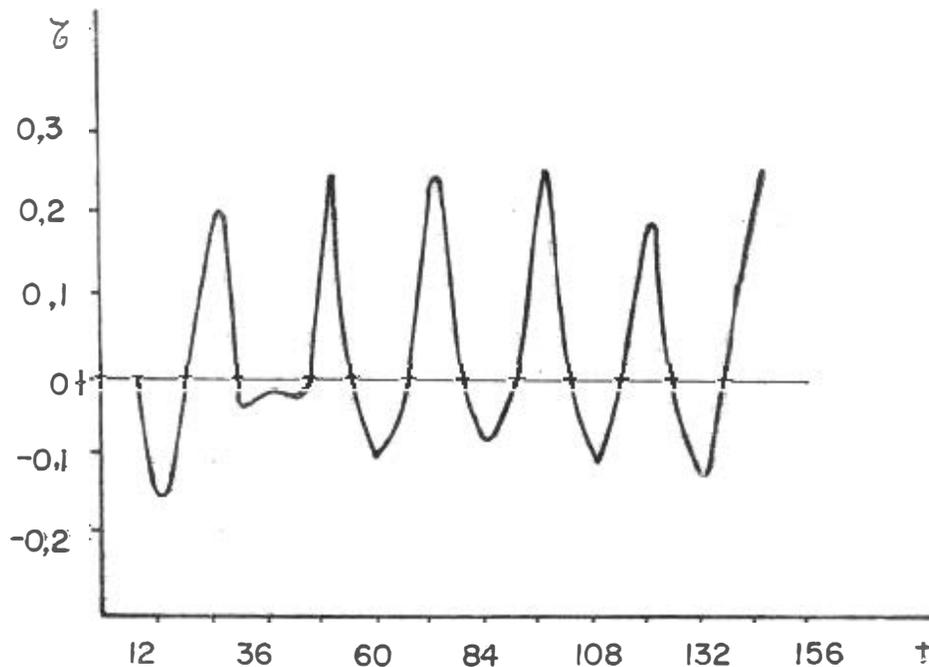


FIG. 4. Coeficiente de asociación temporal de las inversiones superficiales en Cienfuegos.

a una hora de observación dada, habrá inversión en el próximo intervalo escogido; d = cantidad de casos en que, si no hay inversión en un horario de observación escogido, tampoco habrá inversión en el próximo intervalo de tiempo escogido.

Los resultados escogidos permiten afirmar que la ocurrencia de inversiones en Cienfuegos (Fig. 4) tiene una distribución periódica uniforme con un ciclo de 24 horas. Los valores obtenidos corroboran lo planteado anteriormente sobre la oscilación diurna de las inversiones superficiales de temperatura en nuestro país. A partir de la distribución del coeficiente mostrado en la Fig. 4, se puede apreciar la periodicidad de la ocurrencia de las inversiones de temperatura para intervalos de 24 horas.

Esto significa que en caso de que existan (no existan) inversiones superficiales de temperatura a una hora en un intervalo de 24 horas es alta la probabilidad de que exista (no exista) inversión. Lo anteriormente planteado, explica el carácter local de las inversiones superficiales en Cuba.

4. SUMARIO

- a) Los valores máximos registrados para la frecuencia de ocurrencia de las inversiones elevadas, en la capa de 1,0 a 2,5 km, están asociados en más de un 75% de los casos a la influencia, sobre las estaciones analizadas, de situaciones de tipo anticiclónico (ya sea continental u oceánico), para los períodos analizados.
- b) Los valores tan semejantes obtenidos para la frecuencia de ocurrencia de las inversiones de temperatura en ambas estaciones, para los dos períodos estudiados, demuestran que la mayoría de las inversiones superficiales tienen un origen de tipo radiativo.
- c) Es posible ajustar la distribución de frecuencia de las inversiones de temperatura a una ecuación exponencial negativa del tipo $e^{-\lambda x}$.
- d) Se demostró la periodicidad de las inversiones de temperatura superficiales a partir de los resultados obtenidos al calcular el coeficiente τ .
- e) La oscilación diurna de las inversiones de temperatura se calculó a partir de una serie de Fourier, y se demostró que la ecuación utilizada puede usarse en forma práctica en Cuba.

RECONOCIMIENTO

Expresamos nuestro agradecimiento al Lic. Mario Carnesoltas y al C. Sc. Rosendo Álvarez por sus útiles consejos en la revisión del trabajo, así como a la Meteoróloga Eloida Hechavarría y auxiliares del Departamento de Aerología que prepararon los materiales utilizados.



REFERENCIAS

- AMARO, L., y CARNESOLTAS, M. (1978): Análisis de las inversiones e isotermas en la capa comprendida entre los 122 y 4 000 metros en la estación aerológica de Camagüey. *Inf. Cien.-Téc.*, 75:1-13.
- ELEKOEBA, L. I. (1979): Oscilación diurna de las inversiones de temperatura superficiales en la URSS [en ruso]. *Trab. Observ. Geofís. Principal*, Leningrado, 417:90-95.
- LAKIN, G. F. (1973): *Biometría* [en ruso]. Moscú, 250 pp.
- LERCH, G. (1977): *La experimentación en las ciencias biológicas y agrícolas*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, 452 pp.
- RHIEL, H. (1954): *Tropical meteorology*. McGraw-Hill, Nueva York, 329 pp.
- (1979): *Climate and weather in the tropics*. Academic Press, Londres Nueva York, San Francisco, 626 pp.
- TARAKANOV, G. C. (1980): *Meteorología tropical* [en ruso]. Editorial Hidrometeorológica, Leningrado, 176 pp.
- VOLOSHIN, V. G., y AMARO, L. (1982): Errores en la medición de las inversiones de temperatura en la capa límite planetaria durante el radiosondeo [en ruso]. *Meteorol. Climatol. Hidrol.*, 18:78-84.

TEMPERATURE INVERSIONS IN CIENFUEGOS AND GUANTÁNAMO

ABSTRACT

Temperature inversion distribution for the period 1977-1979 was obtained, and it is shown that its occurrence attains a periodic distribution with maximal values each 24 hours.