

Determinación del coeficiente de turbulencia en la capa superficial de la atmósfera, mediante diferentes métodos experimentales

CARLOS LÓPEZ CABRERA

RESUMEN

Se presentan resultados de un estudio preliminar del régimen turbulento en la capa superficial de la atmósfera, en la estación meteorológica de Santiago de las Vegas, Cuba. Se analizan los valores del coeficiente de turbulencia k_1 , obtenidos mediante cinco métodos experimentales, su dependencia de la rapidez del viento, y el establecimiento del ciclo de variación diaria, para cada uno de los métodos utilizados.

1. INTRODUCCIÓN

Para gran cantidad de trabajos hidrometeorológicos, son fundamentales los datos de la magnitud del coeficiente de turbulencia en la capa superficial de la atmósfera. Esta necesidad adquiere gran importancia en las investigaciones sobre difusión de contaminantes en la atmósfera y en el cálculo de sus concentraciones, la valoración de las corrientes turbulentas de calor, y el gasto de calor en la evaporación.

En la caracterización de la intensidad de la turbulencia se utiliza con frecuencia el coeficiente de turbulencia k , el cual crece con la altura dentro de la capa superficial. Para lograr resultados comparables, se adecúa su obtención a la altura de 1 m sobre la superficie, la cual es conocida como altura unitaria z' . El significado de k , a esta altura, se conoce como k_1 y se expresa en m^2/s con exactitud hasta la centésima. El coeficiente k_1 se determina mediante los fundamentos semiempíricos de la teoría de la turbulencia, o por el método del balance de calor.

En este trabajo se acomete el estudio, en forma preliminar, del régimen turbulento en la capa superficial de la atmósfera, en la estación meteorológica de Santiago de las Vegas.

Manuscrito aprobado el 22 de marzo de 1981.

C. López Cabrera pertenece al Instituto de Meteorología, de la Academia de Ciencias de Cuba.

2. METODOLOGÍA

Para la ejecución de las mediciones y la aplicación de los métodos seleccionados, se montó un experimento con las siguientes observaciones horarias: (a) rapidez del viento, temperatura seca y húmeda, y tensión de vapor de agua, a las alturas 0,5 ; 1,0 ; 2,0; y 3,0 m; (b) temperatura del suelo en superficie y a 5, 10, 15, y 20 cm de profundidad; (c) estabilidad atmosférica; (d) nubosidad.

Además de estos datos, incorporamos las mediciones usuales de la estación meteorológica y datos de radiación tomados de la estación actinométrica automática ubicada en el punto. Para los sistemas de medición utilizados y la operación y control del equipamiento, se siguieron instrucciones editadas al efecto (OGP, 1977). El período utilizado para las mediciones comprendió de marzo a diciembre de 1978. A continuación detallamos los métodos utilizados en nuestros cálculos.

Los trabajos formulados para la determinación de la magnitud del coeficiente de turbulencia, con ayuda de la influencia de la estratificación térmica, por datos de mediciones de gradientes en el Observatorio Geofísico Principal de Leningrado (BÚDIKO *et al.*, 1953), se encaminan en las siguientes direcciones: (a) establecimiento de relaciones semilogarítmicas entre el coeficiente de intercambio y el número de Richardson, en la capa superficial de la atmósfera; (b) establecimiento de relaciones empíricas entre el coeficiente de intercambio y el perfil de rapidez del viento.

La ecuación para el cálculo de k_1 basada en la relación semilogarítmica de este con el número de Richardson, fue dada en los trabajos desarrollados por BÚDIKO (1946, 1948), donde:

$$k_1 = 0,104 \Delta u \{ 1 + 1,38 [\Delta t / (\Delta u)^2] \} z' \quad (1)$$

donde: $\Delta u = u_{2,0} - u_{0,5}$ (Diferencia de rapidez del viento entre 2,0 y 0,5 m)

$$\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0} \quad (\text{Diferencia de temperatura del aire entre 0,5 y 2,0 m})$$

o en la forma especificada por L. B. Dubrovin (OGP, 1977) que fue utilizada en nuestros cálculos:

$$k_1 = 0,104 \Delta u m z' \quad (2)$$

donde m es un factor que depende de la diferencia de rapidez del viento y la diferencia de temperatura entre los niveles 0,5 y 2,0 m, a través del número de Richardson, de la siguiente forma:

$$\text{Para } R_i < 0, \quad m = 1 + 2,6 |R_i| + [(1 + 2,6 |R_i|)^2 - 1]^{1/2}$$

$$\text{Para } R_i > 0, \quad m = 1 + 10,3 |R_i| - [(1 + 10,3 |R_i|)^2 - 1]^{1/2}$$

El cálculo de k_1 por la ecuación (2) se efectúa solamente para $\Delta u \geq 0,3$ m/s y cuando la unión de Δt y Δu no da $k_1 < 0$.

La ecuación para el cálculo de k_1 , basada en el establecimiento de relaciones empíricas entre el coeficiente de turbulencia y el perfil de rapidez del viento, aparece precisada en los trabajos de LAIGHTMAN (1944, 1947). En nuestro trabajo, utilizamos la fórmula de Laightman procesada por KRASNOVA (1961):

$$k_1 = u_1(0,16 \varepsilon z_0^{2\varepsilon} z_1^\omega) / (1 - \varepsilon)^2 (z_1^\varepsilon - z_0^\varepsilon) \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (3)$$

siendo $\omega \approx 1 - \varepsilon$. Aquí k_1 se determina de acuerdo con el carácter de los accidentes del relieve terrestre z_0 , con el parámetro de estabilidad ε que estipula tanto a los factores térmicos como dinámicos de la atmósfera, u_1 rapidez del viento a la altura $z_1 = 1$ m.

Utilizamos también la siguiente fórmula experimental (LAIGHTMAN, 1947):

$$k_1 = [0,16 u_1 / \rho_n (1/z_{00})] [1 + 7,5(\Delta t/u_1^2)] \quad (4)$$

donde u_1 es la rapidez del viento a la altura $z_1 = 1$ m, z_{00} es el parámetro de rugosidad para condiciones de equilibrio, y $\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0}$.

Otro de los métodos utilizados fue el desarrollado por Monin-Obujov (RASTORGUEVA, 1964)). En él, k_1 se expresa por:

$$k_1 = 0,744 \varphi_q u_1 \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (5)$$

donde φ_q es una función que depende de la rapidez del viento a 1 m y el gradiente de temperatura del aire en la capa de 0,5 a 2,0 m. El valor de esta función puede hallarse utilizando el nomograma de MOSTAJOV (1961), modificado por KAZANSKI y MONIN (1962). El término u_1 permanece con el significado de los métodos anteriores.

La fórmula de trabajo para el cálculo de k_1 por el método del balance de calor tiene la forma (OGP, 1977):

$$k_1 = 0,74 [(B - P) / (\Delta t + 1,56 \Delta e)] \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (6)$$

donde B es el balance de radiación expresado en $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ y P es la corriente de calor en el suelo en las mismas unidades. Los incrementos Δt y Δe son las diferencias de temperatura del aire y tensión de vapor de agua entre los niveles 0,5 y 2,0 m. Este método lo utilizamos solamente cuando $B - P \geq 0,20 \text{ cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ y $\Delta t \geq 0,3^\circ\text{C}$ y $\Delta e \geq 0,3$ milibar, es decir, cuando la diferencia entre el balance de radiación y la corriente de calor en el suelo es positiva.

3. RESULTADOS

En la Tabla 1 ofrecemos los valores de k_t (m^2/s) promedio por horas para los cinco métodos utilizados en el período de mediciones. En la Fig. 1 podemos apreciar el establecimiento del ciclo de variación diaria del coeficiente, por los métodos de Búdiko, Laightman, Experimental, y de Monin-Obujov, alcanzando valores máximos entre las 12:00 y las 14:00 horas. Por el método de Balance, no obtuvimos en forma tan definida, como en el resto de los métodos, la manifestación del ciclo de variación diaria.

Los resultados permiten agrupar por la cercanía de los valores alcanzados al método de Búdiko con el de Monin-Obujov, y al método Experimental con el de Laightman. Entre estos dos grupos de métodos, obtuvimos diferencias algo mayores que las planteadas por LAIGHTMAN (1944, 1947), BÚDIKO (1946, 1948), y BÚDIKO *et al.* (1953). En relación al método del Balance de calor, cuya exactitud para condiciones diurnas es reconocida, obtuvimos valores medios con diferencias aceptables a los métodos de Búdiko y Monin-Obujov, considerándose por esto, que los mejores resultados fueron alcanzados con este grupo de métodos.

TABLA 1. Valores del coeficiente de turbulencia k_t (m^2/s) promedio por horas para los cinco métodos utilizados en el periodo de mediciones del experimento.

Método	Hora						
	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Búdiko	0,02	0,08	0,12	0,14	0,15	0,16	0,16
Laightman	0,07	0,13	0,18	0,21	0,22	0,24	0,24
Experimental	0,05	0,09	0,18	0,20	0,20	0,23	0,24
Monin-Obujov	0,05	0,08	0,11	0,12	0,14	0,15	0,16
Balance		0,01	0,07	0,13	0,13	0,16	0,15

Método	Hora						
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Búdiko	0,16	0,17	0,16	0,14	0,11	0,09	0,06
Laightman	0,23	0,23	0,23	0,14	0,12	0,09	0,05
Experimental	0,24	0,24	0,20	0,18	0,13	0,10	0,07
Monin-Obujov	0,16	0,16	0,16	0,14	0,10	0,08	0,06
Balance	0,18	0,12	0,17	0,11	0,11	0,10	

TABLA 2. Valores del coeficiente de turbulencia k_1 (m^2/s) promedio por horas para rapidez del viento entre 0 y 3 m/s.

Método	Hora						
	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Búdiko	0,02	0,06	0,11	0,13	0,16	0,16	0,16
Laightman	0,05	0,11	0,18	0,20	0,21	0,22	0,22
Experimental	0,05	0,09	0,19	0,19	0,19	0,21	0,19
Monin-Obujov	0,04	0,06	0,10	0,11	0,13	0,14	0,14
Balance		0,01	0,07	0,13	0,13	0,15	0,15

Método	Hora						
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Búdiko	0,15	0,14	0,13	0,13	0,10	0,07	0,03
Laightman	0,22	0,22	0,20	0,14	0,10	0,08	0,04
Experimental	0,19	0,19	0,21	0,19	0,13	0,09	0,05
Monin-Obujov	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,07	0,04
Balance	0,15	0,10	0,10	0,08	0,08	0,06	

TABLA 3. Valores del coeficiente de turbulencia k_1 (m^2/s) promedio por horas para rapidez del viento entre 4 y 8 m/s.

Método	Hora						
	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Búdiko	0,06	0,11	0,14	0,16	0,19	0,20	0,20
Laightman	0,07	0,13	0,19	0,22	0,24	0,26	0,27
Experimental	0,09	0,18	0,22	0,24	0,25	0,25	0,27
Monin-Obujov	0,05	0,09	0,11	0,13	0,16	0,16	0,17
Balance		0,01	0,08	0,13	0,13	0,18	0,19

Método	Hora						
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Búdiko	0,21	0,21	0,19	0,15	0,13	0,10	0,08
Laightman	0,26	0,26	0,24	0,18	0,15	0,11	0,07
Experimental	0,30	0,30	0,28	0,26	0,18	0,16	0,10
Monin-Obujov	0,17	0,18	0,18	0,15	0,12	0,10	0,10
Balance	0,15	0,13	0,19	0,15	0,11	0,11	

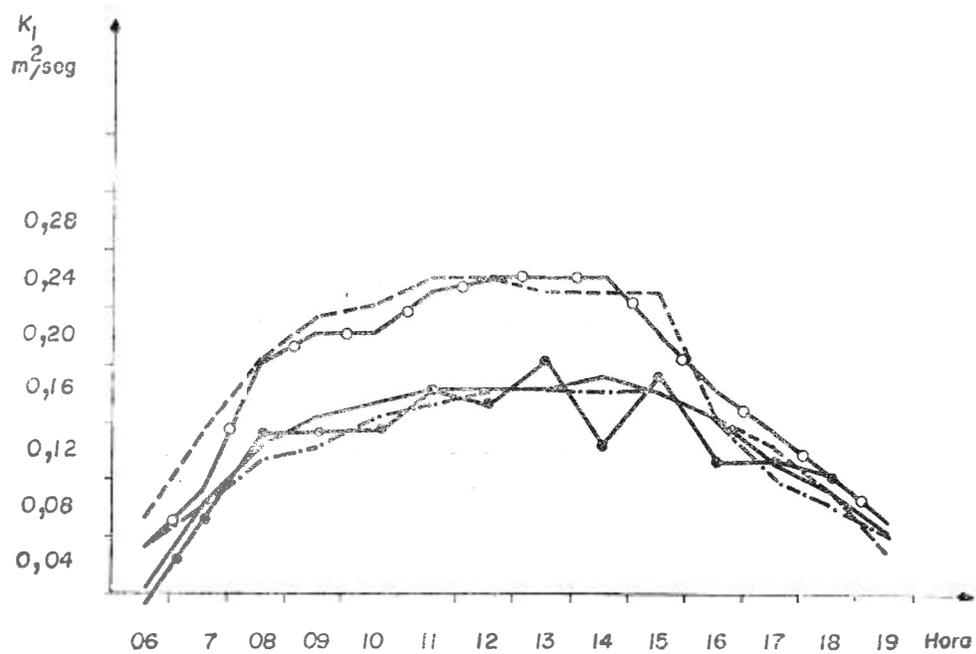


FIG. 1. Ciclo de variación diaria del coeficiente de turbulencia k_1 (m^2/s) para cada uno de los métodos experimentales utilizados. Búdiko (---); Laightman (---); Monin-Obujov (-.-.-); experimental (●-●-●); balance (○-○-○).

Los valores máximos de k_1 para mediciones individuales fueron los siguientes: Búdiko $0,37 m^2/s$ para rapidez del viento de $5,0 m/s$; Laightman $0,46 m^2/s$ para rapidez del viento de $5,4 m/s$; Experimental $0,44 m^2/s$ para rapidez del viento de $4,9 m/s$; Monin-Obujov $0,30 m^2/s$ para rapidez del viento de $5,0 m/s$ y balance de calor de $0,58 m^2/s$ para $6 m/s$.

El aumento del valor del coeficiente k_1 con el aumento de la rapidez del viento, puede observarse en las Tablas 2 y 3, donde siguiendo el criterio de RASTORGUEVA (1964), dividimos los valores obtenidos de acuerdo a la rapidez del viento en dos categorías (vientos débiles, de 0 a $3 m/s$; y vientos fuertes, de 4 a $8 m/s$). De la comparación de las tablas se pueden apreciar las diferencias entre los valores del coeficiente para cada método.

4. CONCLUSIONES

1. Los datos obtenidos por la aplicación de los métodos de Búdiko, Laightman, Experimental, y de Monin-Obujov, permiten conocer la amplitud y ritmo de variación diaria del coeficiente de turbulencia para la zona de estudio.

2. Mediante la utilización del método de Balance de calor no se pudo establecer, en forma tan definida como en el resto de los métodos, el ciclo de variación diaria del coeficiente de turbulencia.
3. Los valores de k_1 calculados para los métodos de Búdiko y Monin-Obujov coinciden aceptablemente, al igual que entre los métodos de Laightman y Experimental. Entre estos dos grupos de métodos obtuvimos diferencias algo mayores que las reportadas anteriormente.
4. Los valores medios de k_1 calculados por el método de Balance de calor presentan diferencias aceptables con los obtenidos por los métodos de Búdiko y Monin-Obujov, por lo que consideramos que con este grupo de métodos fueron obtenidos los mejores resultados del experimento.
5. Los datos obtenidos verifican la conocida relación del aumento del valor del coeficiente de turbulencia con el aumento de la rapidez del viento.

RECONOCIMIENTO

Agradecemos la valiosa cooperación brindada a este trabajo por los compañeros Jorge E. Castillo, Osvaldo Cuesta Santos, Miguel Portela Santiago, y Eudimio Martínez Chapman, así como por los trabajadores del Departamento de Contaminación de la Atmósfera y la Estación Meteorológica de Santiago de las Vegas, del Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

REFERENCIAS

- BÚDIKO, M. I. (1946): Intercambio turbulento en las capas bajas de la atmósfera [en ruso]. *Meteorol. Hidrol.*, 2.
- (1948): *Evaporación en condiciones naturales* [en ruso]. Hidrometeorizdat. Leningrado, 136 pp.
- BÚDIKO, M. I., LAIGHTMAN, D. L., y TIMOFEEB, M. P. (1953): Determinación del coeficiente de intercambio turbulento en la capa superficial de la atmósfera [en ruso]. *Meteorol. Hidrol.*, 3:27-33.
- KAZANSKI, A. B., y MONIN, A. C. (1962): Determinación de las corrientes turbulentas de cantidad de movimiento, calor, y humedad, por datos de mediciones de gradiente [en ruso]. *Meteorol. Hidrol.*, 12:3-8.
- KRASNOVA, K. C. (1961): Atlas de nomogramas meteorológicos [en ruso]. Hidrometeorizdat, Leningrado, 42 pp.
- LAIGHTMAN, D. L. (1944): Perfil del viento e intercambio en la capa superficial de la atmósfera [en ruso]. *Rev. Acad. Cien. URSS, ser. Geofís. Geogr.*, 8(1):1-5.
- (1947): Sobre el perfil del viento en la capa superficial de la atmósfera, bajo condiciones estacionarias [en ruso]. *Trudy NIU, GUGMS. ser. 1*, 39:58-76.
- MOSTAJOV, C. E. (1961): *Determinación de corrientes turbulentas de calor, bajo inversiones de temperatura del aire* [en ruso]. Academia de Ciencias de la URSS, Moscú, 190 pp.
- OBSERVATORIO GEOFÍSICO PRINCIPAL (1977): *Instrucciones para las observaciones de balance de calor* [en ruso]. Hidrometeorizdat, Leningrado, 148 pp.
- RASTORGUEVA, G. P. (1964): Sobre el cálculo del coeficiente de intercambio turbulento por datos de gradiente [en ruso]. *Trudy GGO*, 158:48-52.

ABSTRACT

Preliminary results of turbulence regime in atmospheric boundary layer at Santiago de las Vegas, Cuba, is presented. The turbulence coefficient k_1 values obtained by five experimental methods, its dependence of wind speed, and daily change cycle, are analyzed.