

## Comportamiento de la estabilidad y altura de la capa de mezcla atmosférica en Santa Lucía

### Stability behavior and the atmospheric mixing height layer in Santa Lucia



<https://eqrcode.co/a/rqh0Ha>

Dagoberto Rodríguez-Valdés\*, Yosdany González-Jaime, Osvaldo Cuesta-Santos,  
Almara Sánchez-Díaz

Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba

**RESUMEN:** El estudio se realizó en la comunidad de Santa Lucía de la provincia de Pinar del Río, Cuba en el período de 2013-2017, donde se analizó el comportamiento de la estabilidad y altura promedio de la capa de mezcla atmosférica. Para determinar las categorías de estabilidad atmosférica se aplicó la clasificación de acuerdo a la longitud de Monin-Obukhov. El método utilizado para determinar la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica, se basó en el procedimiento establecido en el preprocesador meteorológico AERMET, con algunas modificaciones realizadas, por no disponer de sondeos de la atmósfera superior. Los resultados muestran el comportamiento de la variación horaria y mensual de la estabilidad y altura promedio de la capa de mezcla atmosférica. Se determinó que las mejores condiciones para la dispersión de los contaminantes en la atmósfera ocurren en los meses de verano y en las horas diurnas, fundamentalmente a las 17 horas.

**Palabras clave:** estabilidad atmosférica, altura promedio de la capa de mezcla atmosférica.

**ABSTRACT:** The study was carried out in the community of Santa Lucia in the province of Pinar del Río, Cuba in the 2013-2017 period, where the behavior of the stability and average height of the atmospheric mixture layer was analyzed. To determine the atmospheric stability categories, the classification was applied according to the length of Monin-Obukhov. The method used to determine the average height of the atmospheric mixture layer, was based on the procedure established in the AERMET weather preprocessor, with some modifications made, because it did not have surveys of the upper atmosphere. The results show the behavior of the hourly and monthly variation of the stability and average height of the atmospheric mixture layer. It was determined that the best conditions for the dispersion of pollutants in the atmosphere occur in the summer months and in the daytime hours, mainly at 17 hours.

**Keywords:** atmospheric stability, average height of the atmospheric mixture layer.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre la turbulencia de la atmósfera en sus inicios se deben en gran medida a las investigaciones desarrolladas por Taylor, a partir de la segunda mitad del siglo XX se desarrollaron avances en el conocimiento de los procesos turbulentos bajo condiciones de flotabilidad y se obtienen las relaciones de flujo-gradiente, de este modo, a partir de los trabajos realizados por

([Monin y Obukhov, 1954](#)), nace la teoría de similitud acerca de la capa superficial.

Experiencias obtenidas sobre la dispersión, a partir de experimentos de laboratorio, simulaciones numéricas y observaciones de campo, se observaron en las investigaciones de ([Izumi et al., 1971](#)) y ([Weil, 1988](#)), para la Capa Límite Estable (SBL, siglas en inglés), los avances se realizaron más lentamente.

\*Autor para correspondencia: *Dagoberto Rodríguez-Valdés*. E-mail: [dagoberto@upr.edu.cu](mailto:dagoberto@upr.edu.cu)

Recibido: 16/03/2020

Aceptado: 07/07/2020

En la década de los 80 se desarrolló un sólido marco teórico/experimental para la dispersión y la capa superficial con enfoques para fuentes elevadas ([Venkatram, 1988](#)), durante este período los investigadores ([Weil, 1985](#); [Pasquill y Smith, 1983](#); [Nieuwstadt y van Dop, 1982](#); [Venkatram y Wyngaard, 1988](#)) aplicaron esta información a modelos de dispersión simples.

Para este período se efectuó una exploración de los modelos regulatorios en los trabajos de ([Smith, 1984](#); [Hayes y Moore, 1986](#)) donde se informó que las predicciones no estaban de acuerdo con las observaciones.

Esto provocó una reforma integral de la normativa de los modelos básicos de la EPA, dando origen al modelo dispersión de corto plazo desde fuentes estacionarias, el mismo escenario manejado por la EPA en ISC3 (Complejo de Fuente Industrial de Corto Plazo), ([EPA, 1995](#)), ya en esta década se introducen nuevos conceptos como la Capa Límite Planetaria (PBL, siglas en inglés) en los modelos de dispersión de reglamentación.

En los estudios de modelación de la calidad del aire en Cuba, se han aplicado modelos de última generación para fuentes estacionarias como el ISC3 y el AERMOD (AMS/EPA Regulatory **MO**Del), para esto, resulta esencial determinar el comportamiento de la estabilidad atmosférica y de la altura de la capa de mezcla, como se observa en los resultados de ([Turtós et al, 2003, 2009, 2012](#)), ([Rodríguez, 2007](#); [Rodríguez et al, 2008, 2012a y 2012b](#)), en estos trabajos se aplican los métodos de ([Turner, 1964](#)) para obtener la estabilidad atmosférica y de ([Pasquill, 1961](#)) para conocer la altura de la capa de mezcla.

Posteriormente se realizaron estudios para conocer la influencia de las condiciones sinópticas sobre el comportamiento de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la provincia de la Habana ([Alonso, 2013](#)) y en la ciudad de Pinar del Río ([Rodríguez et al, 2015](#)), a partir de aplicar la longitud de Monin-Obukhov para conocer la estabilidad atmosférica y se determinó la altura de la capa de mezcla atmosférica durante condiciones estables y convectivas.

En la comunidad de Santa Lucía de la provincia de Pinar del Río, Cuba se encuentra ubicada la Planta de Sulfometales, que trabajó en la producción de azufre en el pasado y en la actualidad en la producción de plomo, elementos estos nocivos para la salud humana y el medio ambiente de forma general.

Disponer de estudios que contribuyan a determinar la calidad del aire en dicha comunidad, permite adoptar medidas de mitigación de la contaminación atmosférica, por lo que la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos producidos por fuentes estacionarias constituye una herramienta muy útil en estos casos.

En Cuba en la actualidad no se realizan sondeos de la atmósfera superior, por no disponer del equipamiento necesario. Obtener de forma teórica el comportamiento de la estabilidad y de la altura de la capa de mezcla atmosférica para esta localidad, constituye el objetivo del presente trabajo, lo cual permite realizar estudios de modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Clasificación de la estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica se obtiene para condiciones estables y convectivas, mediante la clasificación de la Longitud de Monin-Obukhov (*L*) ([Gryning et al. \(2007\)](#), [Tabla 1](#)):

**Tabla 1.** Clasificación de los intervalos de Longitud de Monin-Obukhov.

ID	Clasificación	Intervalo de <i>L</i>
1	Muy estable	$10 \leq L < 50$
2	Estable	$50 \leq L < 200$
3	Ligeramente estable	$200 \leq L < 500$
4	Neutra	$ L  \geq 50$
5	Ligeramente inestable	$-500 \leq L < -200$
6	Inestable	$-200 \leq L < -100$
7	Muy inestable	$-100 \leq L < -50$

## Determinación de la altura de la capa de mezcla atmosférica

La altura de la capa de mezcla atmosférica se calcula de la siguiente forma:

- En condiciones estables, cuando  $L > 0$ , la altura de la capa de mezcla atmosférica ( $Z_i$ ) es igual a la altura de la capa de mezcla mecánica ( $Z_{im}$ ), [EPA \(2004\)](#).
- Para condiciones convectivas, cuando  $L < 0$ , la altura de la capa de mezcla atmosférica ( $Z_i$ ) es el máximo entre la altura convectiva ( $Z_{ic}$ ) y mecánica ( $Z_{im}$ ). Se determinó mediante el procedimiento de la [EPA \(2004\)](#) y [Turtós \(2009\)](#).

## Altura de la capa de mezcla atmosférica durante condiciones convectivas

El cálculo de la altura de la capa de mezcla convectiva ( $Z_{ic}$ ), se obtuvo a partir de [Batchvarova y Gryning \(1991\)](#).

$$\frac{\partial Z_{ic}}{\partial t} = (1 + 2A) \frac{H}{\rho c_p \gamma Z_{ic}} + 2B \frac{u_*^3 T_{ref}}{\gamma g Z_{ic}^2} \quad (1)$$

Donde:

$A$  y  $B$  - son constantes adimensionales ( $A = 0.2$  y  $B = 5$ )

$\gamma$  - es el gradiente de temperatura potencial sobre la capa límite, propuesta por [Gill \(1982\)](#):

$$\gamma = \frac{Nu^2 T_{ref}}{g} \quad (2)$$

Donde:

$Nu$  - es la frecuencia de Brunt-Väisälä y [Thomson \(2000\)](#) sugirió el valor de 0.013.

La [Ec. \(1\)](#) fue resuelta considerando que para pequeños intervalos de tiempo, la variación de  $Z_{ic}$  con respecto al tiempo, puede ser aproximada en diferencias finitas, [Turtós \(2009\)](#):

$$\frac{\partial Z_{ic}}{\partial t} = \frac{\Delta Z_{ic}}{\Delta t} \quad (3)$$

Para  $\Delta t = 360$  s, la  $Z_{ic}$  puede ser calculada a partir del valor en el instante precedente, [Turtós \(2009\)](#):

$$Z_{ic_i} = Z_{ic_{i-1}} + \left[ (1 + 2A) \frac{H_{i-1}}{\rho_{i-1} c_p \gamma_{i-1} Z_{ic_{i-1}}} + 2B \frac{u_{*i-1}^3 T_{ref_{i-1}}}{\gamma_{i-1} g Z_{ic_{i-1}}^2} \right] \Delta t; \quad i = 2, 3, 4, \dots \quad (4)$$

Donde  $H_{i-1}$ ,  $\rho_{i-1}$ ,  $\gamma_{i-1}$ ,  $T_{i-1}$ ,  $u_{*i-1}$ , son los valores de las variables en el instante de tiempo  $t = (i - 1)\Delta t$ . Se parte del instante  $t_0 = 0$ , como el momento en el cual el flujo de calor y  $Z_{ic}$  comienzan su aumento, para esto se define las siguientes condiciones iniciales:  $Z_{ic}(0) = 0$  y  $H(0) = 0$ . El valor inicial de  $Z_{ic_1}$  se tomó igual a 50 m.

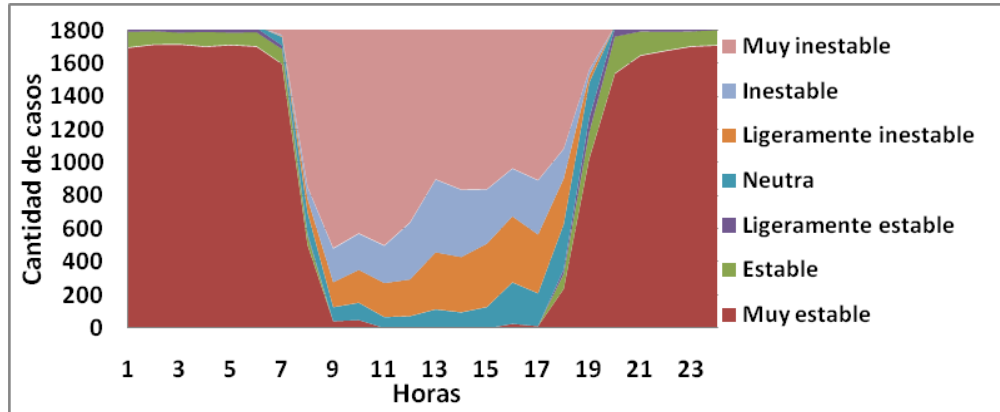
El cálculo de la estabilidad y altura de la capa de mezcla atmosférica, para condiciones estables y convectivas, se realizó con el software MLHASC [González \(2013\)](#) y los gráficos fueron realizados con Microsoft Excel. Los datos meteorológicos de superficie se obtuvieron de la estación meteorológica de la ciudad de Pinar del Río, perteneciente al Centro Meteorológico Provincial de Pinar del Río del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento de la estabilidad atmosférica

Mediante el cálculo de la estabilidad atmosférica, se determinó el comportamiento de la variación horaria y mensual en la comunidad de Santa Lucía, mostrándose a continuación los resultados.

La variación horaria de la estabilidad atmosférica se muestra en la [Figura 1](#), en las horas nocturnas ocurren las categorías muy estable, estable, ligeramente estable y neutra. Donde la categoría muy estable, presenta la mayor cantidad de casos de ocurrencia, superior a los 1700. Las demás categorías no alcanzan los 300 casos de ocurrencia para todo el período analizado de cinco años.



**Figura 1.** Variación diaria de la estabilidad atmosférica para la comunidad de Santa Lucía 2013-2017

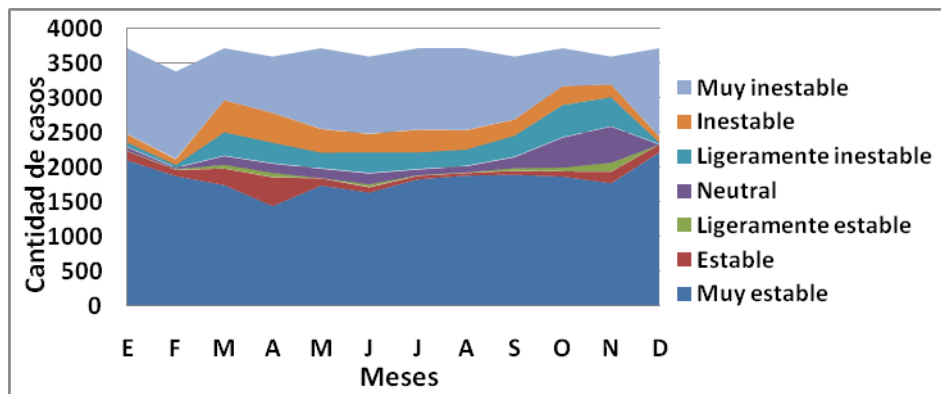
En las horas diurnas ocurren las categorías muy estable, neutra, ligeramente inestable, inestable y muy inestable, donde esta última categoría presentó la mayor cantidad de casos de ocurrencia, fundamentalmente de las 9 a las 17 horas, este comportamiento fue más marcado a las 9 horas con 1345 casos, las demás categorías no superaron los 440 casos de ocurrencia. Por último, solo ocurrió en todo el periodo analizado de 24 horas la categoría neutra.

Como se puede observar a las 7 de la mañana existe un predominio de la categoría estable, la cual no favorece la dispersión de contaminantes a esta hora, en que comienza a trabajar la Planta de Sulfometales de la comunidad de Santa Lucía, que trabaja en la producción de plomo, elemento este nocivo para la salud humana y el medio ambiente de forma general, por lo que en este asentamiento poblacional se pueden presentar episodios de

contaminación superiores a los establecidos en la norma cubana de calidad del aire a esta hora.

La variación mensual de la estabilidad atmosférica, se ilustra en la [Figura 2](#).

Donde se observa que las categorías muy estable y muy inestable, presentan la mayor cantidad de casos de ocurrencias. Se muestra una mayor presencia de la categoría muy estable y fue más marcada en los meses invernales de diciembre y enero, provocado por una menor cantidad de horas de luz solar; su menor valor ocurrió en el mes de abril, donde las categorías inestable y estable alcanzaron la mayor cantidad de casos de ocurrencia en todo el período evaluado. También disminuye su comportamiento en los meses de verano, ya que la variación estacional produce una mayor incidencia de la irradiación y duración de las horas de luz solar, provocando un aumento de la temperatura y por consiguiente de la turbulencia



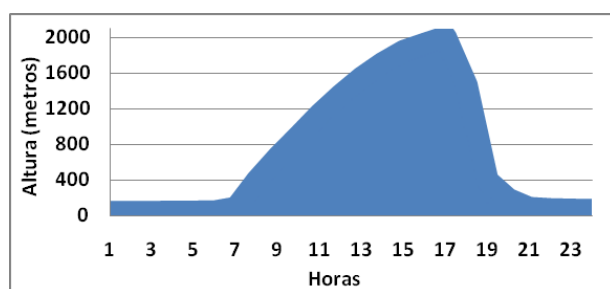
**Figura 2.** Variación mensual de la estabilidad atmosférica para la comunidad de Santa Lucía 2013-2017

atmosférica, siendo este período donde la categoría muy inestable presentó los máximos valores de ocurrencia, excepto en los meses de febrero y diciembre, debido a una transición más rápida de la categoría muy estable a la muy inestable en estos meses.

### Comportamiento de la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica

El cálculo de la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica, permitió obtener el comportamiento de la variación horaria y mensual en la comunidad de Santa Lucía, mostrándose seguidamente los resultados.

La variación horaria de la altura promedio de la capa de mezcla muestra un comportamiento muy bien definido (Figura 3).



**Figura 3.** Variación diaria de la altura promedio de la capa de mezcla para la comunidad de Santa Lucía 2013-2017

Como se observa en la figura por la noche no llega a los 200 m de altura, con el ocaso del día la superficie de la tierra deja de recibir radiación solar y la emisión de radiación de onda larga al espacio, libera el calor del suelo paulatinamente a lo largo de la noche, esto provoca un enfriamiento de la superficie terrestre y del aire que está en contacto con él, así como las capas más bajas de la atmósfera, lo que provoca un aumento de la temperatura con la altura, dando lugar a una capa térmicamente estable de la atmósfera en la superficie de la tierra, lo que produce estratificación estable del aire y suprime la turbulencia atmosférica.

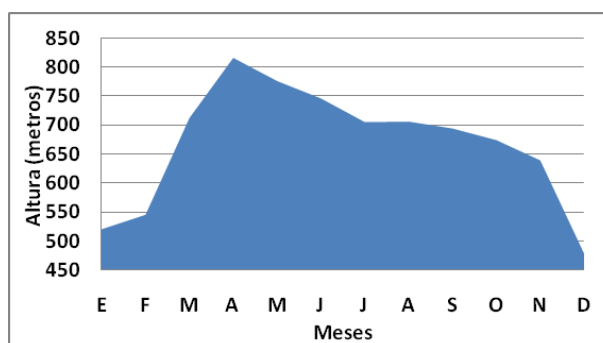
Esto puede producir episodios de contaminación atmosférica producto de las emisiones de la palta

de Sulfometales que pueden superar los valores establecidos en la norma cubana de calidad del aire, si el régimen de trabajo en las horas nocturnas es prolongado, así como a las siete horas de la mañana.

En las horas diurnas ocurre el proceso inverso, en las primeras horas de la mañana la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica comienza a crecer, producido por un aumento gradual de la temperatura en la superficie terrestre y por consiguiente de la turbulencia atmosférica, provocado por la presencia de la radiación solar, alcanzando su máximo valor a las 17 horas superior a los 2000 m de altura, este comportamiento ocurre principalmente en días despejados y de poca nubosidad.

El aumento de la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica en las horas diurnas, permite mejores condiciones para la dispersión de los contaminantes atmosféricos en la zona de estudio, por lo que es recomendable central la mayor cantidad de horas de trabajo de la planta de Sulfometales en estas horas, para disminuir los episodios de contaminación atmosféricas que puedan superar los valores establecidos en la norma cubana de calidad del aire.

La variación mensual de la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica se muestra en la Figura 4, donde se observa un comportamiento bien definido debido al ciclo estacional.



**Figura 4.** Variación mensual de la altura promedio de la capa de mezcla para la comunidad de Santa Lucía 2013-2017

En los meses invernales de diciembre a febrero se alcanzan los menores valores de altura, siendo

inferior a los 500 m de altura en el mes de diciembre, los otros dos meses superaron este valor pero no llegaron a los 550 m de altura, a partir de marzo comienza a crecer la altura de la capa de mezcla y se extiende este comportamiento hasta noviembre, alcanzando el máximo valor en el mes de abril, esto obedece a que este mes es muy seco en esta localidad, que unido al aumento de las horas de luz solar y de la intensidad de la radiación solar se incrementa la turbulencia atmosférica, producido por el aumento de la temperatura, dando lugar a que se supere los 800m de altura promedio de la capa de mezcla, mayo y junio fueron los dos meses que le siguieron con mayor altura de la capa de mezcla, en mayo se superó los 750 m y en junio estuvo muy próximo a este valor.

A partir del resultado del comportamiento de la altura de la capa de mezcla para esta localidad, se puede recomendar que las actividades de producción para la planta de Sulfometales centren su mayor peso de la producción anual en los meses a partir de marzo hasta noviembre y disminuyan un poco las actividades en los meses de diciembre a febrero, de manera tal que no se afecte el plan de producción anual para esta fábrica, así como la producción de plomo, rublo tan importante en la economía del país, de esta manera se logra una mayor armonía entre la actividad de esta fábrica y el medio ambiente, al disminuir los posibles impactos de la contaminación atmosférica sobre el medio y la población de esta localidad, con una incidencia positiva en la calidad de vida de la población local.

### CONCLUSIONES

- La variación horaria de la estabilidad atmosférica mostró que en las horas nocturnas existen las peores condiciones para la dispersión de los contaminantes atmosféricos debido a una mayor presencia de la categoría muy estable, mientras que en las horas diurnas el comportamiento es opuesto al existir las condiciones más favorables para la dispersión de contaminantes producto a una mayor presencia de la categoría muy inestable.

- La variación mensual de la estabilidad atmosférica mostró que en los meses de abril a noviembre se experimenta las mejores condiciones para la dispersión de contaminantes, debido a una menor presencia de la categoría muy estable en estos meses.
- La variación horaria de la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica, mostró que en las horas diurnas existen las mejores condiciones para la dispersión de contaminantes, principalmente a las 17 horas donde se superan los 2000 m de altura, en el caso de las horas nocturnas baja la altura promedio de la capa de mezcla de forma significativa reduciendo la altura de la dispersión vertical de los contaminantes.
- Las condiciones más favorables para la dispersión de los contaminantes atmosféricos en la variación mensual de la altura promedio de la capa de mezcla atmosférica, se observó en los meses de marzo hasta noviembre, siendo el mes de abril el de mayor valor superior a los 800 m de altura, en los restantes meses no sobrepasó los 550 m de altura.

### RECOMENDACIONES

Concentrar la mayor cantidad de la producción de plomo de la planta de Sulfometales en los meses de marzo hasta noviembre y en los horarios diurnos fundamentalmente de las 10 horas hasta las 17 horas y trabajar de noche la menor cantidad de horas, para disminuir los episodios de contaminación que superen los valores establecidos en la norma cubana de calidad del aire.

### REFERENCIAS

- Alonso, A.2013. Estudio de algunos factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación atmosférica en La Habana. Trabajo de Diploma. INSTEC, 98 p.
- Batchvarova, E.;Gryning, S. E. 1991.Applied model for the growth of the daytime mixed layer. *Boundary Layer Meteorology*, 56: 261-274.

- EPA. 1995. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, 42 p., EPA-454/B-95-003a.
- EPA. 2004. AERMOD. Description of model formulation, 91 p., EPA-454/R-03-004.
- Gill, A. E. 1982. Atmospheric-Ocean Dynamics. Academic Press, 54 p.
- González, Y. 2013. MLHASC Mixing Layer Height and Atmospheric Stability Condition. Instituto de Meteorología (INSMET), La Habana, Cuba.
- Gryning, S. E. et al. 2007. On the extension of the wind over homogeneous terrain beyond the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 24: 251-262.
- Hayes, S. R.; Moore, G. E. 1986. Air quality model performance: a comparative analysis of 15 model evaluation studies. *Atmospheric Environment*, 20: 1897-1911.
- Izumi, Y. 1971. Kansas 1968 Field Program Data Report. No. 379, AFCRL-72-0041, Air Force Cambridge Research Laboratory, Bedford, MA, 79 p.
- Monin, A. S.; Obukhov M. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Akad. Nauk. SSSR, Geofiz. Inst. Tr.*, 151:163-187.
- Nieuwstadt, F. T. M.; Dop H. Van. 1982. Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling. Reidel, 35 p.
- Pasquill, F. 1961. The estimation of the dispersion of wind-borne material. *Meteorological Magazine*, 90: 33-49.
- Pasquill, F.; Smith F. R. 1983. Atmospheric Diffusion. John Wiley and Sons Inc., New York, 440 p.
- Rodríguez, D. 2007. Sistema Automatizado de Gestión de Información de Fuentes Contaminantes (SAGIFC). Publicación electrónica del IV Congreso Cubano de Meteorología. La Habana, Centro de Convenciones Capitolio, Cuba, pp. 7-18, ISBN: 978-959-7167-12-9.
- Rodríguez, D.; Echevarria, L.; Cuesta, O.; Sánchez, A.; Díaz, J. M.; Vargas, R. 2008. Resultados preliminares de cálculo de la altura de la capa de mezcla a través del uso del Global Forecast System. Convención Trópico 2008, pp. 59-71, ISBN: 978-959-282-079-1.
- Rodríguez, D.; Echevarria, L.; Sánchez, A.; Cuesta, O. 2012<sup>a</sup>. Estudio de variables meteorológicas secundarias que intervienen en la difusión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio ciudad de Pinar del Río. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(1): 35-50.
- Rodríguez, D.; Echevarria, L.; Sánchez, A.; Cuesta, O.; Gato, A. L. 2012<sup>b</sup>. Estudio de variables meteorológicas secundarias que intervienen en la difusión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio la comunidad de Santa Lucía. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2): 77-92.
- Rodríguez, D.; Arely, Q.; González, Y.; Cuesta, O.; Sánchez, A. 2015. Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas. *Revista Brasileira de Meteorología*, 30(1): 1 - 15.
- Smith, M. E. 1984. Review of the attributes and performance of 10 rural diffusion models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65: 554-558.
- Thomson, D. J. 2000. The meteorological input module, ADMS 3 Technical Specification. Cambridge Environmental Research Consultants, 116 p.
- Turner, D. B. 1964. A diffusion model for an urban area. *Journal of Applied Meteorology*, 3: 83-91.
- Turtós, L.; Roque, A.; Soltura, R.; Sánchez, M. 2003. "Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos". *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, pp. 32-45, ISBN: 959-7136-20-1: 266-277.



- Turtós, L.; Rivero, J.; Curbelo, L.; Gácita, M. S.; Meneses, E.; Díaz, N. 2009. Method for the estimation of the convective mixing height aimed to atmospheric local dispersion modeling. Aprobado para publicar como capítulo del libro "Environmental Impact Assessments.", ISBN: 978-1-60692-667-3, Nova Science Publishers, Inc.
- Turtós, L. 2012. Implementación de modelos refinados de dispersión local de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes estacionarias. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Meteorológicas, Instituto de Meteorología, La Habana, 162 p.
- Venkatram, A. 1988. Dispersion in the stable boundary layer. Lectures on Air Pollution Modeling. Journal of Climate, 1: 229-265,
- Venkatram, A.; Wyngaard, J. C. 1988. Lectures on Air Pollution Modeling. Journal of Climate, 390 p.
- Weil, J. C. 1988. Dispersion in the convective boundary layer. Lectures on Air Pollution Modeling. Journal of Climate, 1: 167-227.
- Weil, J. C. 1985. Updating applied diffusion models. Journal of Applied Meteorology, 24(11): 1111-1130.