

Dispersión local de contaminantes en la ciudad de Pinar del Río.

Modelo Screen3

Local dispersion of pollutants in the city of Pinar del Río. Model Screen3

MSc. Dagoberto Rodríguez Valdés | dagoberto@vrect.upr.edu.cu | Universidad de Pinar del Río,

Ing. Liuben Echevarría Pérez | liuben.echevarria@lp.ensa.avianet.cu | Universidad de Pinar del Río

Dr. Osvaldo Cuesta Santos | osvaldo.cuesta@insmet.cu | Instituto de Meteorología

Lic. Ernesto R. Carrillo Vitale | ernesto.carrillo@insmet.cu | Instituto de Meteorología

MSc. Almara Sánchez Díaz | almara@pri.insmet.cu | Centro Meteorológico Provincial de Pinar del Río

MSc. María Victoria Miló | maria@desarrollopr.co.cu | Dirección Provincial de Planificación Física, Pinar del Río. Cuba

Recibido: julio 31 de 2015; aceptado: noviembre 25 de 2015.

Resumen

En la ciudad de Pinar del Río existe un número importante de fuentes estacionarias de alta y mediana significación, identificadas según la *Norma Cubana* (NC 39:1999). El objetivo del presente trabajo es analizar la modelación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos del dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el monóxido de carbono (CO) y el material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀), generada por estas fuentes en la zona mencionada, resulta de gran importancia para los estudios de calidad del aire. Para ello, se aplicó como metodología el modelo gaussiano Screen3 y se utilizaron la serie de datos meteorológicos de cinco años (2006-2010) obtenidos del Centro Meteorológico Provincial de Pinar del Río y el inventario de emisiones de 2011; el procesamiento de los gráficos se realizó con el auxilio de Microsoft Excel. Los resultados muestran que los valores de las concentraciones máximas estimadas por el modelo para el NO₂ en 1 h y para el SO₂ y el NO₂ en 24 h superan en varias veces las concentraciones máximas admisibles (*Cma*), según la NC 39:1999. Se proponen medidas tecnológicas con miras a mitigar la contaminación atmosférica.

PALABRAS CLAVE: Modelo Screen3, emisiones directas, calidad del aire, fuentes estacionarias.

Abstract

In the city of Pinar del Río there is an important number of stationary sources of high and medium significance, identified according to the NC 39:1999. Conducting a local dispersion modeling of air pollutants from gaseous compounds: particulate sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO) and (PM_{2,5} and PM₁₀) generated by these sources in this area is of great importance for studies of air quality, constituting this, the objective of this work. As methodology the Gaussian model Screen3 was applied using a series of meteorological data of five years (2006-2010) obtained from the Provincial Meteorological Center of Pinar del Río and the emissions inventory for 2011. the processing of graphics was performed in Microsoft Excel. The results show that the values of the maximum concentrations estimated by the model for an hour NO₂ and SO₂ and NO₂ in 24 hours exceed several times the maximum admissible concentration (*Cma*) according to the NC 39:1999. It proposes technological measures to mitigate air pollution.

KEYWORDS: Model Screen3, direct emissions, air quality, stationary sources.

Introducción

En las últimas décadas, la modelación se convirtió en una herramienta habitual de diversas disciplinas que buscan explicar o reproducir sus respectivas observaciones. Es así como Higashi y Burns (1991) señalan que: “La modelación matemática es una metodología sistemática de comprobado éxito en el descubrimiento y entendimiento de los procesos y causas subyacentes en la naturaleza basada sobre sus partes observables y sus relaciones”. La modelación de procesos ambientales y del transporte de contaminantes se convirtió también en una labor habitual de los científicos e ingenieros modernos (Kiely, 1999; Granier, 2003).

La modelación permite determinar los resultados o predecir qué podría ocurrir a un sistema a partir de un conjunto de datos de entrada. Suponiendo que se desea modelar un contaminante descargado a la atmósfera a través de una chimenea, los datos de partida serán, de forma general: la altura de la fuente, el diámetro interior, la temperatura de la mezcla gaseosa emitida, la tasa de emisión del contaminante (concentraciones basales), la velocidad de salida de la mezcla gaseosa emitida, el flujo máximo del gas emitido, las condiciones meteorológicas, la topografía del terreno, etc., mientras que los resultados esperados serán los niveles del contaminante(s) a cierta distancia de la fuente o las tasas de deposición del contaminante sobre el terreno.

Múltiples autores (Higashi y Burns, 1991; Tanji, 1994; Kiely, 1999; Chase *et al.*, 2000) indicaron la modelación como una metodología sistemática; ellos convinieron en que esta sigue o se ajusta a un conjunto de reglas o principios interrelacionados, aunque no resulta coincidente para estos autores el número y el alcance de sus etapas, pero concuerdan a su vez en la necesidad de analizar y definir el problema, construir o seleccionar el modelo, especificar los valores de las variables y los paráme-

tros, ejecutar la modelación, evaluar y validar los resultados.

La modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos se aplica para conocer, entre otros tópicos, cómo varía en el tiempo y el espacio la concentración o la razón de mezcla de una sustancia o traza identificada como un contaminante criterio, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire, para así constituir una herramienta muy útil en el ámbito de la toma de decisiones políticas y de planificación, de gran aplicación en la gestión, y que se utiliza en el desarrollo de los planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire (Bustos, 2004): En este sentido, en el contexto de la estimación de la calidad del aire, en la escala local, la implementación de normas regulatorias para el control de la contaminación atmosférica que generan las fuentes industriales, tiene, entre otras ventajas, un favorable impacto en la preservación de la salud de los seres humanos y en la conservación de los bienes. Estas estimaciones pueden efectuarse mediante diferentes tipos de modelos.

Para el cálculo de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera existen tres sistemas teóricos clásicos: las teorías de Transporte-Gradiente, de Estadística (Taylor, 1921) y de la Similitud (Monin, 1959; Batchelor, 1959 y 1964; Gifford, 1962), a los que se han brindado múltiples soluciones numéricas (modelos) para facilitar su aplicación en estudios de impacto ambiental provocado por emisiones desde fuentes estacionarias, cada uno de los cuales presentan características que definen el principio de su campo de aplicación (Álvarez *et al.*, 1978).

El Modelo de Transporte-Gradiente tiene por hipótesis que la longitud de la mezcla y los flujos turbulentos de concentración y contaminantes se asumen proporcionales al gradiente medio de la concentración. La aplicación de este modelo requiere una rigurosa evaluación de la turbulencia atmosférica en la capa superficial, aspecto que ha sido abordado

en Cuba por López (1984) y Curiel (1990). El modelo Gaussiano de fuente puntual continua, con una amplia divulgación y aceptación a nivel mundial, supone como hipótesis que las concentraciones de contaminante en cualquier punto considerado vientos abajo están estabilizadas y no dependen del tiempo (Seinfeld y Pandis, 2006). Este modelo describe el comportamiento de los gases o vapores de fuerza ascensional neutra, dispersados en la dirección del viento y arrastrados a la misma velocidad.

En Cuba se han realizado múltiples estudios sobre calidad del aire mediante la modelación de contaminantes atmosféricos; entre estos se pueden citar: Sánchez *et al.* (2004), Collazo *et al.* (2004), Collazo (2011), González (2010), Fonseca (2010), Rodríguez *et al.* (2012) y Turtós (2012). En la ciudad de Pinar del Río, en la provincia cubana homónima, la mayoría de las fuentes estacionarias presentan tecnologías atrasadas debido al tiempo de explotación, lo cual incide negativamente en las emisiones de contaminantes; la situación se agrava por la ubicación neurálgica de algunas, específicamente las que están en el sector urbano. Todo ello conduce al deterioro de la calidad del aire, y afecta a la población y el medio ambiente de forma general.

En el desarrollo del presente trabajo se utiliza el modelo de tipo gaussiano Screen3, que permite conocer de forma rápida la dispersión de los contaminantes. Se propone como *objetivo general* conocer la distribución de los contaminantes en la ciudad de Pinar del Río y se propondrán acciones para la mitigación de sus efectos.

Materiales y métodos

El modelo de Screen3 utilizado fue la versión EPA-454/B-95-004 (EPA, 1995). Está basado en un modelo de penacho Gaussiano que relaciona datos de fuente y variables meteorológicas para obtener estimaciones fáciles y rápidas de las concentraciones de

contaminantes provenientes de fuentes estacionarias. Asume que el contaminante no sufre reacción química y que no ocurren procesos de remoción, tales como deposición húmeda o seca.

Entre sus facilidades, EPA (1992) posibilita incorporar: estimaciones de concentraciones a corto plazo, máxima en superficie, efectos de descenso aerodinámico por edificaciones y otros obstáculos. Calcula las concentraciones promedio de 24 h ocasionadas por el impacto de la pluma en terreno complejo (elevación del terreno superior a la altura de la chimenea), la dispersión de emisiones procedentes de fuentes de área y volumétricas simples. Examina un rango completo de condiciones meteorológicas, incluidas todas las categorías de estabilidad (Turner, 1964), y rangos de velocidades del viento con miras a encontrar impactos máximos. Calcula explícitamente los efectos de múltiples reflexiones de la pluma, fuera de la zona de inversión elevada y lejos del nivel del terreno para concentraciones bajo condiciones limitadas de mezclado. Estima la altura de la capa de mezcla de forma muy simplificada. Para condiciones inestables o neutrales (clase A-D), de forma conservadora, considera solo los efectos mecánicos a partir de la velocidad de fricción (u_*) y el parámetro de Coriolis (f); en el caso de condiciones estables, se asume una altura de la mezcla de 10 000 m, que representa un mezclamiento total.

Entre las principales limitantes de Screen3 se tiene que no puede determinarse explícitamente los impactos máximos de múltiples fuentes, excepto en el proceso para utilizar múltiples chimeneas cercanas, por medio de la unión de las emisiones en una sola chimenea representativa. Calcula las concentraciones máximas horarias y para terrenos complejos.

La ecuación fundamental para determinar los niveles de concentración es la siguiente:

$$X = \frac{Q}{(2\pi U_s \sigma_y \sigma_z) \left\{ \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z_r - h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z_r - h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + K}{\sum \left[\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z_r - h_e - 2NZ_i}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z_r - h_e - 2NZ_i}{\sigma_z}\right)^2\right] + N = 1 \right]} \right\}}$$

Donde: X es la concentración (g/m^3), Q es la velocidad de emisión (m/s), $\pi = 3.141593$, U_s es la velocidad del viento (m/s), σ_y es el coeficiente de dispersión lateral (m), σ_z es el coeficiente de dispersión vertical (m), Z_r es la altura del receptor (m), h_e es la altura de la pluma (m), Z_i es la altura de mezcla y K es el límite de sumatoria, por lo general ≤ 4 .

El mapa topográfico de la figura 1 muestra las fuentes estacionarias de la ciudad de Pinar del Río, clasificadas por categorías de acuerdo con la NC 39:

1999. La ciudad posee la categoría de *primer orden*; capital de la provincia homónima y cabecera municipal, se encuentra situada en el centro de la provincia, 146 km al oeste de la Ciudad de La Habana, en los $22^\circ 25' 00''$ N y los $83^\circ 41' 43''$ O, a 35.0 m de altitud. Tiene 31.7 km^2 de área y posee 154.063 habitantes en 42.762 viviendas (ONE, 2009).

El tejido urbano se caracteriza por tres grandes zonas, claramente diferenciadas y divididas por el río Guamá: el nuevo desarrollo, después del triun-

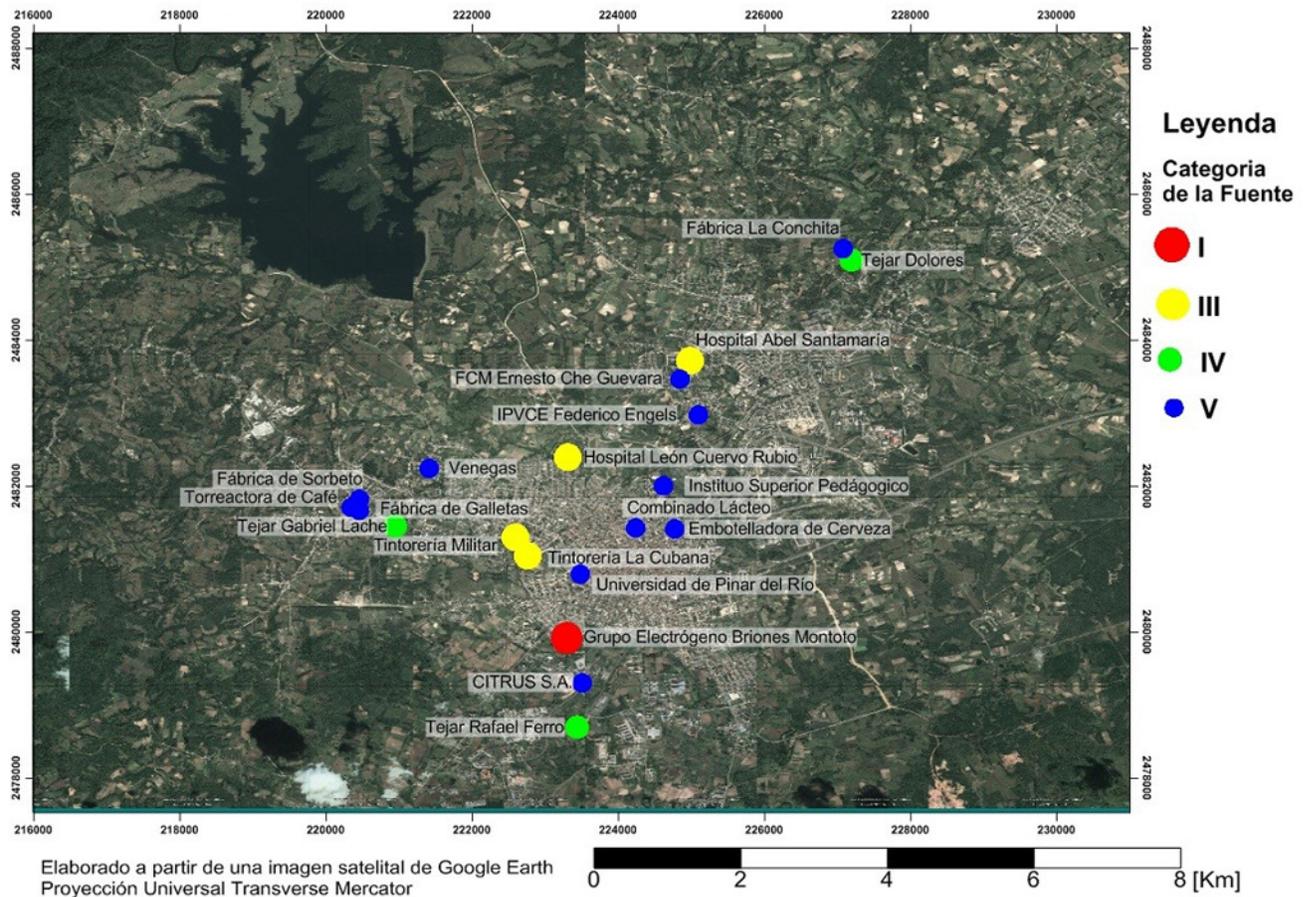


Fig. 1 Esquema de ubicación de las fuentes contaminantes y categorías según radio mínimo admisible de protección sanitaria. Ciudad de Pinar del Río.

fo de la Revolución, resalta los bloques de edificios aislados y articulados por grandes espacios públicos; la ciudad tradicional y los repartos que la circundan, con un trazado bastante irregular y una morfología compacta en sus edificaciones, fruto de un proceso de evolución que tiene sus inicios en el siglo XVII, y la zona industrial, al suroeste de la ciudad, concebida en grandes praderas y edificaciones aisladas donde predominan los almacenes y la industria de la construcción. La población está vinculada, fundamentalmente, con los servicios. A las industrias sideromecánica, electrónica, alimentaria y de materiales de la construcción corresponden los mayores valores de emisión de dióxido de azufre (SO₂), mientras que los de nitrógeno (NO_x) atañen a la industria energética. La tabla 1 presenta las concentraciones C_{ma} para muestras instantáneas según la NC 39: 1999.

TABLA 1
Concentraciones máximas admisibles de contaminantes según NC 39: 1999

Contaminantes	C _{ma} NC 39		
	20 min	24 h	anual
Dióxido de azufre	500 µg/m ³	50 µg/m ³	*40 µg/m ³
Dióxido de nitrógeno	85 µg/m ³	40 µg/m ³	*35 µg/m ³
Monóxido de carbono	5000 µg/m ³	3000 µg/m ³	-
Material particulado en suspensión, menor de 10 µm	*200 µg/m ³	*50 µg/m ³	*30 µg/m ³
Material particulado en suspensión, menor de 2,5 µm	*100 µg/m ³	*25 µg/m ³	*15 µg/m ³

Nota: Propuesta de Norma Cubana (Molina et al., *2012).

Para realizar la modelación se utilizó el inventario de emisiones de las fuentes estacionarias de la ciudad de Pinar del Río, realizado por Rodríguez et al. (2013) (Tabla 2), el cual fue obtenido del software SAGIFC (Rodríguez, 2007).

Los problemas de contaminación a escala local se asocian a la presencia de una o varias fuentes de emisión potentes o a un gran número de fuentes pequeñas dispersas en el área. En estos casos, la magnitud de los impactos derivados será mayor mientras más baja sea la altura de las chimeneas, siendo de-

TABLA 2
Principales fuentes de emisión (g/s) a la atmósfera de la ciudad de Pinar del Río

ID fuente	Descripción fuente	SO ₂	NO _x	CO	MP ₁₀	MP _{2.5}
EMBLE	Embotelladora de Cervezas	1.9	0.23	0.024	0.098	0.096
CITRUS	CITRUS S. A.	1.76	0.18	0.019	0.09	0.06
SORBE	Fábrica de Galletas Dulces y Sorbetos	0.0042	0.0014	0.00025	0.00014	0.0001
GALLE	Fábrica de Galletas La Pinareña	0.085	0.03	0.0052	0.003	0.002
FCMCH	Facultad de Ciencias Médicas	0.04	0.013	0.0024	0.0013	0.001
HOSAB	Hospital Abel Santamaría	0.85	0.1	0.011	0.044	0.043
HOSLE	Hospital León Cuervo Rubio	0.72	0.086	0.0092	0.04	0.04
CONCH	Fábrica de Conservas La Conchita	1.95	0.23	0.025	0.1	0.098
LACTE	Combinado Lácteo	2.27	0.23	0.025	0.12	0.07
TINMI	Lavandería Militar	0.14	0.003	0.0003	0.0014	0.0009
ISPRA	ISP Rafael María de Mendive	0.04	0.013	0.0024	0.0013	0.0009
HOSPE	Hospital Pediátrico Provincial	0.083	0.03	0.005	0.003	0.002
TEDOL	Tejar Dolores	0.00005	0.13	0.014	0.00002	0.04
TEFE	Tejar Rafael Ferro	0.0006	1.18	0.02	0.0003	0.06
TELAC	Tejar Gabriel Lache	0.00005	0.13	0.014	0.00002	0.04
TINCU	Tintorería La Cubana	0.03	0.003	0.0003	0.0014	0.0009
TCAFE	Torreafactora de Café	0.086	0.029	0.005	0.003	0.002
UNIVE	Universidad de Pinar del Río	0.04	0.015	0.003	0.0014	0.0009
VENEG	Fábrica de Embutidos Venegas	0.12	0.042	0.0075	0.004	0.003
IPVCE	Vocacional Federico Engels	0.3	0.04	0.0043	0.017	0.017
GEBRI	Grupo Electrógeno Briones Montoto	36.84	48.84		0.83	

terminante, además, la influencia de las condiciones meteorológicas. La tabla 3 muestra los parámetros técnicos de las fuentes.

La información meteorológica primaria para realizar la modelación se consiguió del Centro Meteorológico Provincial (CMP) de Pinar del Río, mientras que la información meteorológica secundaria (categoría de estabilidad atmosférica) se obtuvo del software SAGIFC (Rodríguez, 2007); la rosa de los vientos se realizó con el software WRPlot View, desarrollado por la compañía Lakes Environmental de Canadá. La tabla 4 muestra la información meteorológica para desarrollar la modelación con Screen3.

El uso de la rosa de los vientos para los tratamientos de dispersión atmosférica en la estación de Pinar del Río se presenta en las figuras 2, 3 y 4.

TABLA 3

Parámetros técnicos de las fuentes de emisión

ID fuente	Altura (m)	Diámetro (m)	Vs (m/s)	T (°C)
EMBLE	10.1	0.74	3.23	280
CITRUS	15	0.75	2.47	280
SORBE	5	0.15	0.86	245
GALLE	28	2.1	0.11	365
FCMCH	8.5	0.25	1.06	230
HOSAB	12	0.2	20.4	300
HOSLE	9	0.62	1.24	120
CONCH	10.1	0.5	7.1	270
LACTE	9	0.7	3.46	250
TINMI	10	0.21	18.2	350
ISPRA	8.5	0.5	0.7	270
HOSPE	15	0.4	2.4	250
TEDOL	5	4	0.17	222
TEFIE	5	4	0.17	222
TELAC	4	1.5	0.4	222
TINCU	6	0.5	0.08	250
TCAFE	16.5	2	0.11	300
UNVE	12	0.25	3.3	250
VENEG	13	0.7	1.2	260
IPVCE	15	0.2	7.4	250
GEBRI	37	1.57	5.6	380

TABLA 4

Datos meteorológicos

Datos meteorológicos	Horas				
	7 a.m.		1 p.m.		24 horas
	Mayor ocurrencia	Peores condiciones	Mayor ocurrencia	Peores condiciones	
Categoría de estabilidad atmosférica	3	6	3	4	6
Fuerza del viento (m/s)	2,1	1,0	4,6	3,9	3,0
Temperatura (°C)	21,7	21,7	28,4	28,4	24,0

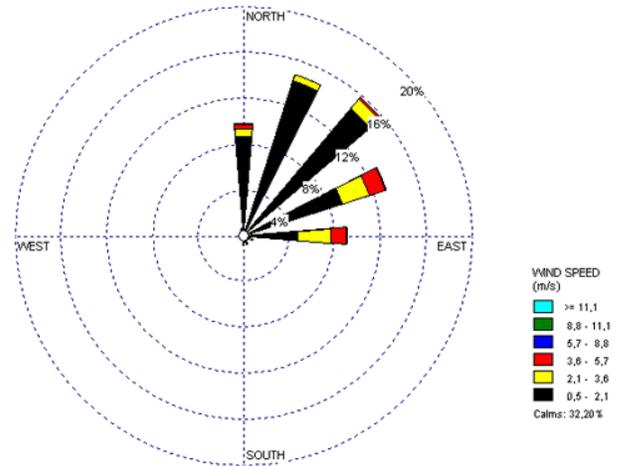


Fig. 2 Rosa de los vientos 7 a. m.

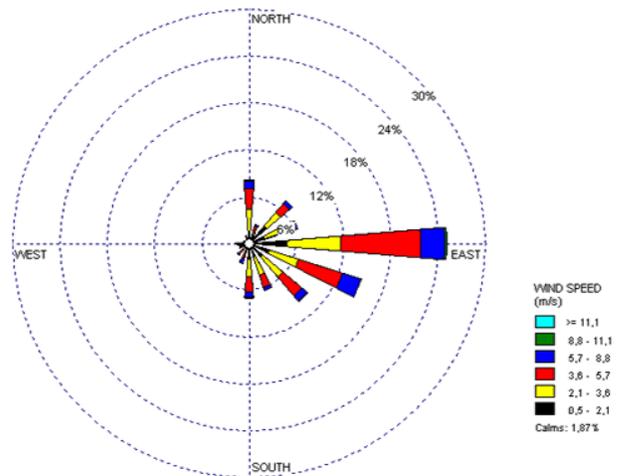


Fig. 3 Rosa de los vientos 1 p. m.

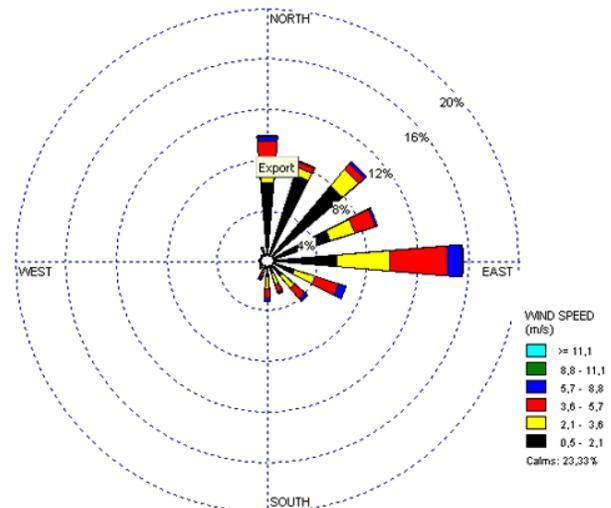


Fig. 4 Rosa de los vientos 24 h.

Discusión de los resultados

Se modelaron dos horarios de interés (las 7 y las 13 horas), además del período de 24 h; en los casos de las 7 y las 13 horas, se modelaron dos condiciones: mayor ocurrencia y peores condiciones. A las 7 horas, las condiciones representativas son de calmas y vientos débiles, lo cual favorece el estancamiento de los contaminantes alrededor de las fuentes de emisiones; a las 13 horas, existe mayor dispersión y transporte de contaminantes en la zona de estudio; mientras que en las condiciones medias de 24 horas, la contaminación se atenúa durante el día al combinarse las emisiones de las 24 horas completas de algunas fuentes con las emisiones de los horarios de trabajo diurnos de la mayoría de las fuentes. El cálculo de las concentraciones de los principales compuestos gaseosos (SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$) se muestra a continuación:

Cálculo de la concentración de contaminantes a las 7:00 y 13:00 horas

La figura 5 muestra los resultados de la modelación de la dispersión y transporte del SO_2 en las condiciones de mayor ocurrencia a las 7 y 13 horas. Se aprecia que ningún valor de las concentraciones máximas estimadas por el modelo para este contaminante en cada fuente supera la *Cma*, que es de $0,5 \text{ mg/m}^3$ para 20

min, según establece la NC 39:1999. Solo resultaron superiores al valor promedio de las máximas concentraciones ($0,071 \text{ mg/m}^3$) las fuentes siguientes: la Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE) y el Grupo Electrónico Briones Montoto (GEBRI), por lo que no se produce afectación a la calidad del aire ni a la salud humana, bajo condiciones de mayor ocurrencia en los horarios analizados.

La figura 6 muestra los resultados de la modelación de la dispersión y el transporte para el SO_2 en las peores condiciones a las 7 y las 13 horas. Se observa que ningún valor de las concentraciones máximas estimadas por el modelo para cada fuente supera la *Cma* para este contaminante, que es de $0,5 \text{ mg/m}^3$ para 20 min, según establece la NC 39:1999. Solo fueron superiores al valor promedio de las máximas concentraciones ($0,097 \text{ mg/m}^3$) las mismas fuentes que para las condiciones de mayor ocurrencia: la Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo

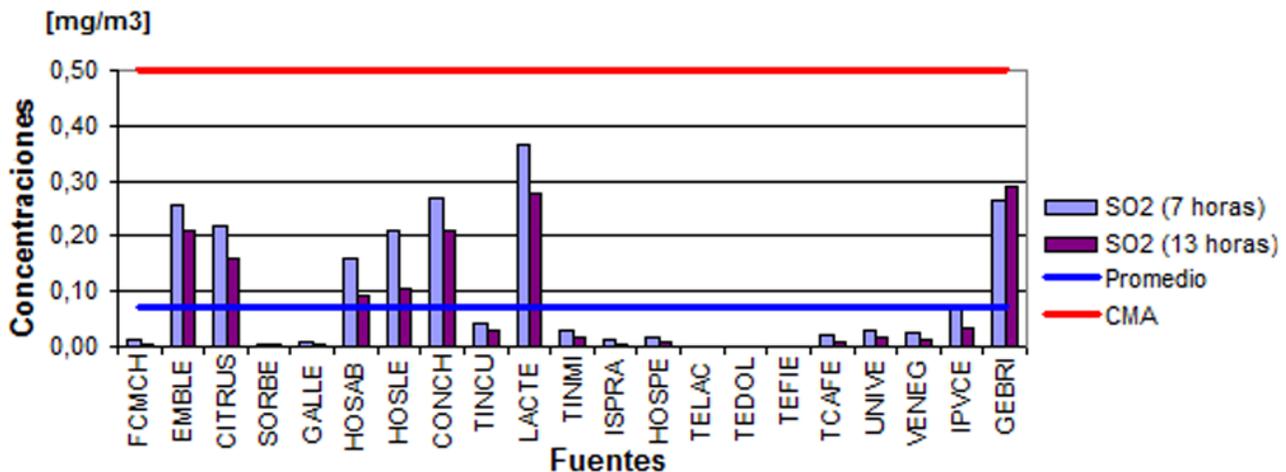


Fig. 5 Concentraciones estimadas de SO_2 en la ciudad de Pinar del Río para las condiciones de mayor ocurrencia.

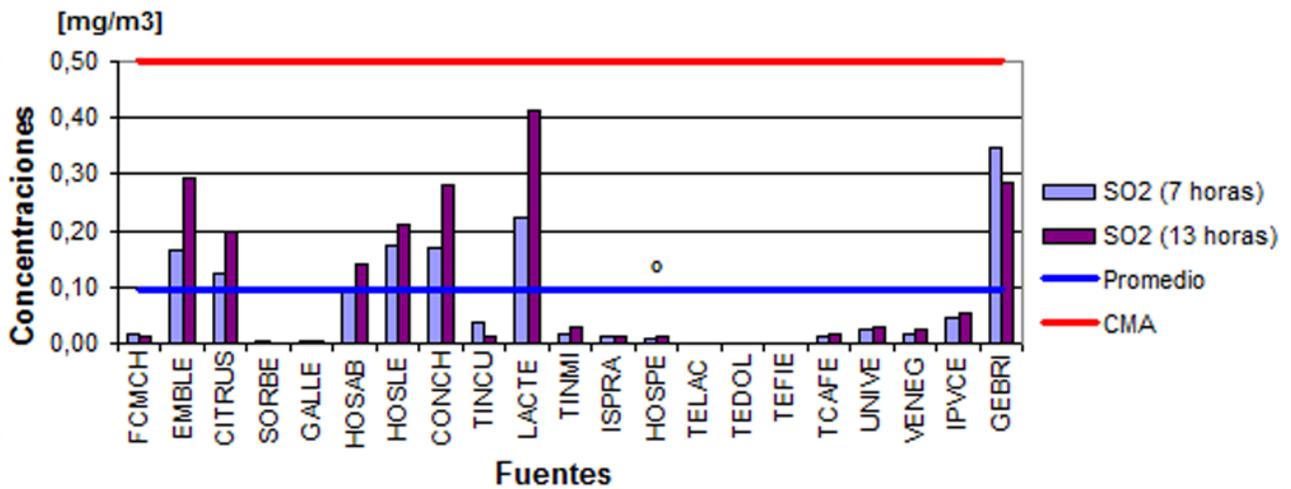


Fig. 6 Concentraciones estimadas de SO₂ en la ciudad de Pinar Río para las peores condiciones.

teo (LACTE) y el Grupo Electrógeno Briones Montoto (GEBRI). Existe una buena calidad del aire para estas condiciones en los horarios analizados.

En el caso del NO₂ en las condiciones de mayor ocurrencia a las 7 y las 13 horas, los valores de las concentraciones calculadas para las principales fuentes estacionarias de emisión a la atmósfera de la ciudad de Pinar del Río se muestran en la figura 7; se observa que los valores de las concentraciones máximas estimadas por el modelo a partir de las fuentes Tejar Gabriel Lache (TELAC) y Grupo Electrógeno Briones Montoto (GEBRI) superan la *Cma*, que es de 0,085 mg/m³ para

20 min, según establece la NC 39:1999. Esto produce un deterioro de la calidad del aire, y causa daños a la salud humana y el medio ambiente en general. En el caso del TELAC, solo supera la *Cma* para las 13 horas en casi dos veces la norma, mientras que el GEBRI supera la norma en tres veces para los dos horarios. Las fuentes Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE), el Tejar Dolores (TEDOL) y el Tejar Rafael Ferro (TEFE) alcanzaron el valor promedio calculado para todas las fuentes (0,04 mg/m³); en el caso del Tejar Gabriel Lache (TELAC) también se alcanzó el valor promedio, pero solo para las 7 horas.

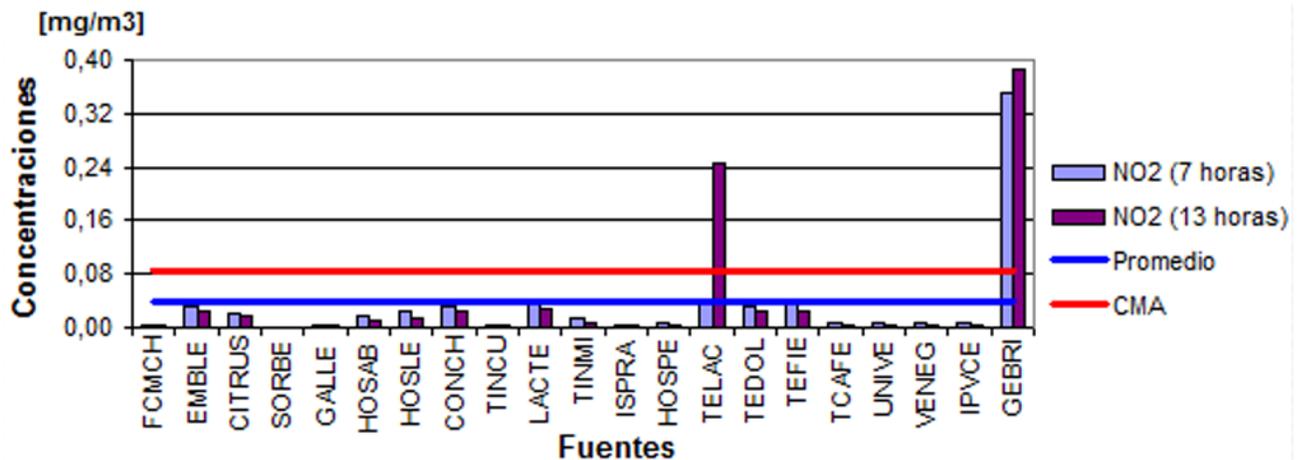


Fig. 7 Concentraciones estimadas de NO₂ en la ciudad de Pinar Río para las condiciones de mayor ocurrencia.

Para el NO_2 en las peores condiciones a las 7 y las 13 horas, los resultados de la modelación de la dispersión y el transporte se muestran en la figura 8. Se aprecia que la única fuente que supera la *Cma*, que es de $0,085 \text{ mg/m}^3$ para 20 min, según establece la NC 39:1999, es el Grupo Electrónico Briones Montoto (GEBRI), por lo cual se produce una afectación a la calidad del aire, cuyos efectos podrían implicar daños a la salud humana. A las 7 horas, se supera la norma cuatro veces, mientras que a las 13 horas se supera tres veces. El Combinado Lácteo (LACTE), el Tejar Gabriel Lache (TELAC), el Tejar Dolores (TEDOL) y el Tejar Rafael Ferro (TEFE) superaron el valor promedio calculado para todas las fuentes ($0,035 \text{ mg/m}^3$).

Los valores de las concentraciones calculadas para el CO en las condiciones de mayor ocurrencia a las 7 y las 13 horas en las principales fuentes estacionarias de la ciudad de Pinar del Río se muestran en la figura 9. Se constata que ninguna fuente supera el valor de concentración establecido por la NC 39:1999 ($5,0 \text{ mg/m}^3$), solo las fuentes la Embotelladora de Cervezas (EMBLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE) y los tejares Gabriel Lache (TELAC), Dolores (TEDOL) y Rafael Ferro (TEFIE) superaron el valor promedio calculado para todas las fuentes ($0,0025 \text{ mg/m}^3$). En el caso del TELAC, se observa que a las 13 horas, el valor de concentración es mucho mayor que en las demás fuentes porque el valor máximo de concentración ocurrió a 10 m de distancia, lo cual obedece a que la altura de esta fuente es la menor de todas las estudiadas; combinado con una mayor fuerza del viento que a las 7 horas da como resultado este comportamiento, las demás fuentes presentaron sus máximas concentraciones de 100 m en adelante. Este resultado evidencia que, bajo las condiciones de mayor ocurrencia, no existe afectación a la calidad del aire ni a la salud humana.

En el caso de las peores condiciones, la modelación de la dispersión y el transporte del CO a las 7 y las 13 horas se comportó como se muestra en la fi-

gura 10. Se aprecia que ninguna fuente supera el valor de concentración establecido por la NC 39:1999 para el CO ($5,0 \text{ mg/m}^3$), mientras que las fuentes la Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE), los tejares Gabriel Lache (TELAC), Dolores (TEDOL) y Rafael Ferro (TEFIE) superaron el valor promedio calculado para todas las fuentes ($0,0021 \text{ mg/m}^3$). Este comportamiento evidenció la presencia de una buena calidad del aire. Para las partículas con un radio aerodinámico inferior a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) en las condiciones de mayor ocurrencia a las 7 y las 13 horas, los valores de las concentraciones calculadas para las principales fuentes estacionarias de emisión a la atmósfera en la ciudad de Pinar del Río se muestran la figura 11.

Se aprecia que los valores de las concentraciones máximas estimadas por el modelo a partir de las fuentes la Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE) y el Grupo Electrónico Briones Montoto (GEBRI), aunque no superan la *Cma*, que es de $0,2 \text{ mg/m}^3$ para 20 min, según establece la propuesta de norma de Molina *et al.* (2012), fueron superiores al valor promedio calculado para todas las fuentes ($0,0045 \text{ mg/m}^3$), y con ello se evidenció una buena calidad del aire, sin riesgos sanitarios. La figura 12 muestra el comportamiento del PM_{10} a las 7 y 13 horas para las peores condiciones.

En las peores condiciones, el comportamiento del PM_{10} mostró que los valores de las concentraciones máximas estimadas por el modelo a partir de las fuentes la Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE) y el Grupo Electrónico Briones Montoto (GEBRI)

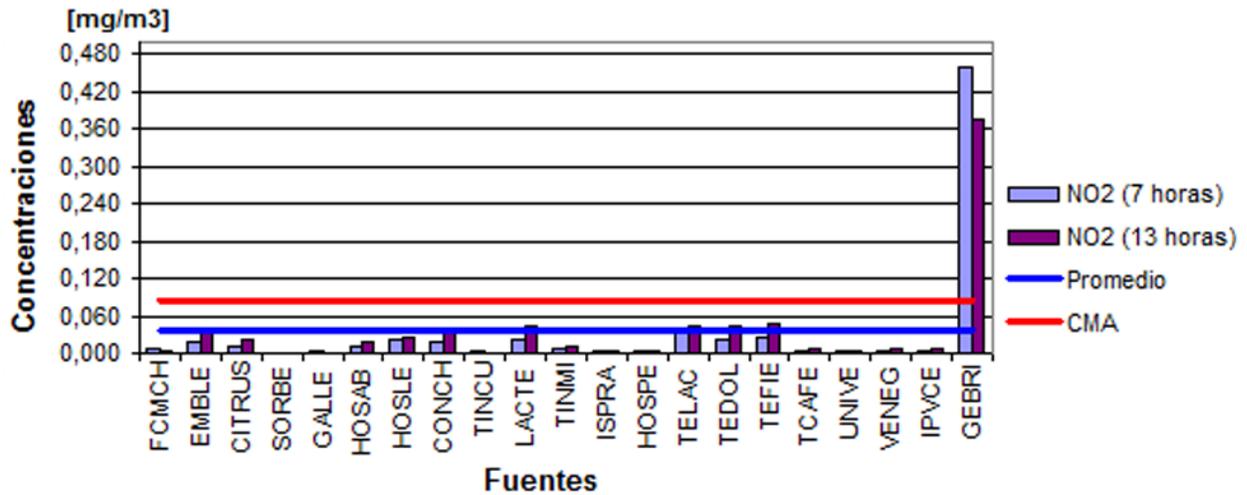


Fig. 8 Concentraciones estimadas de NO₂ en la ciudad de Pinar Río para las peores condiciones.

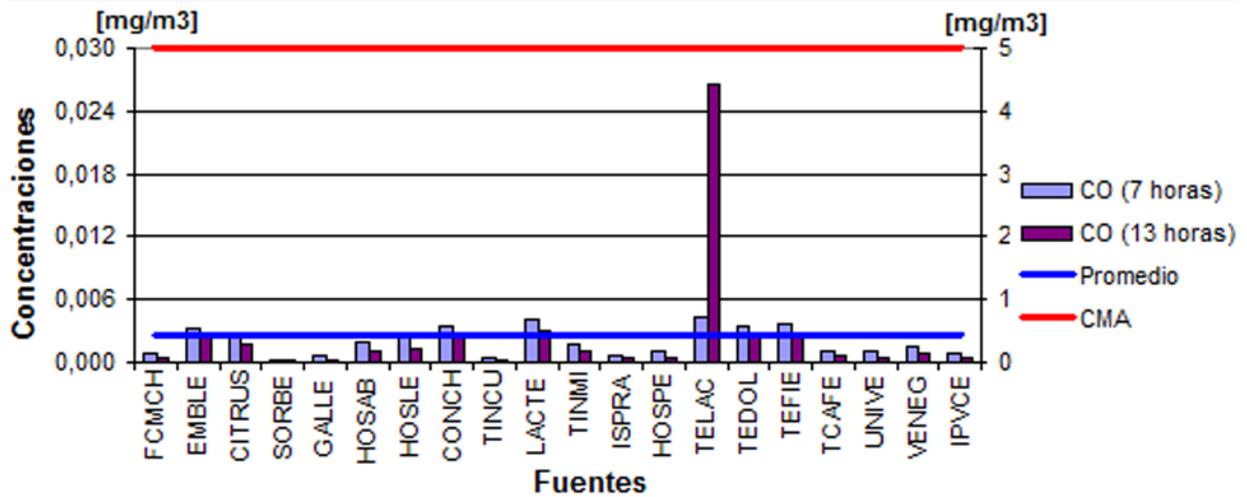


Fig. 9 Concentraciones estimadas de CO en la ciudad de Pinar Río para las condiciones de mayor ocurrencia.

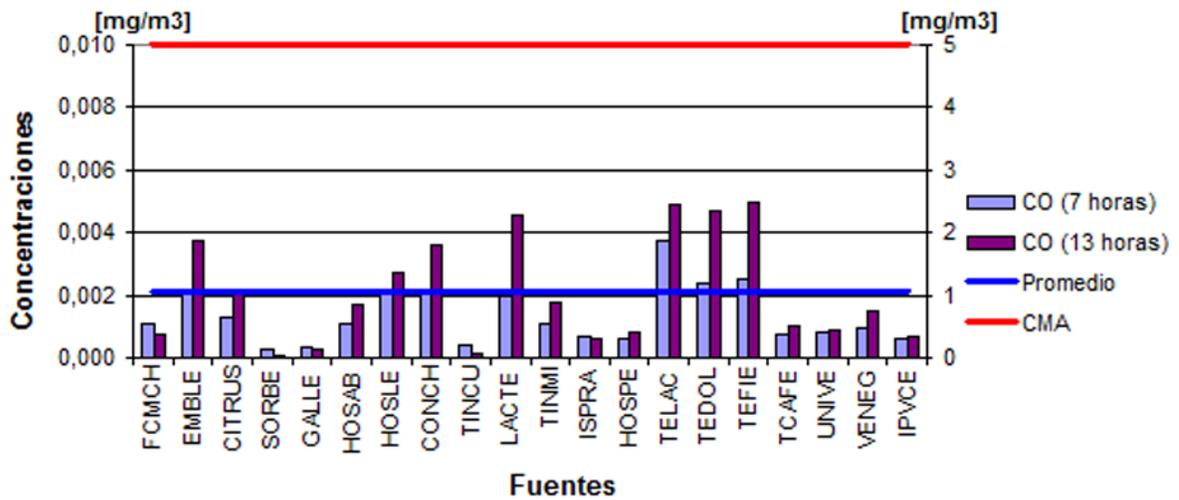


Fig. 10 Concentraciones estimadas de CO en la ciudad de Pinar Río para las peores condiciones.

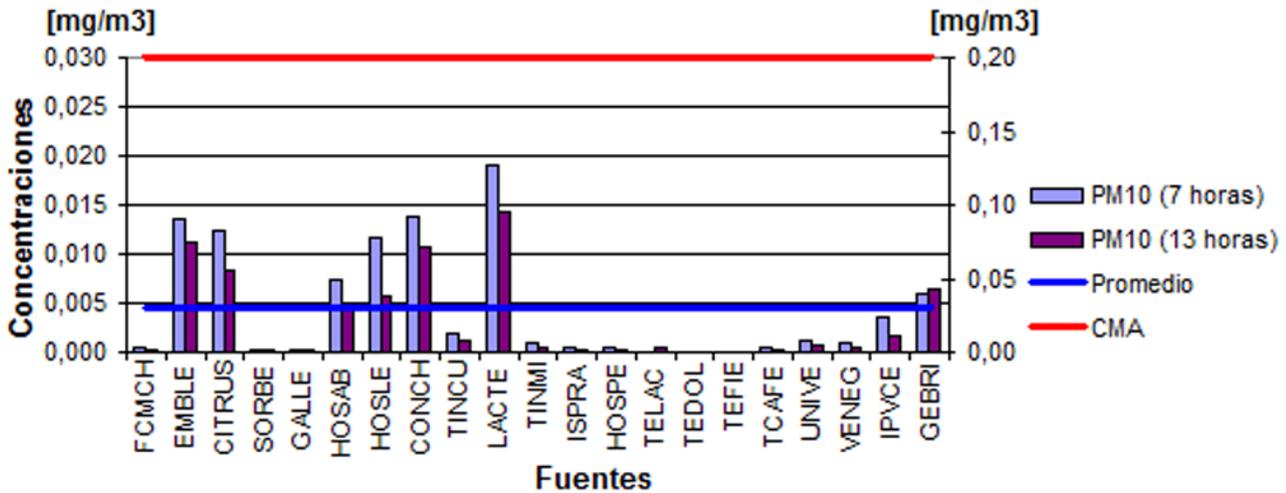


Fig. 11 Concentraciones estimadas de PM10 en la ciudad de Pinar Río para las condiciones de mayor ocurrencia.

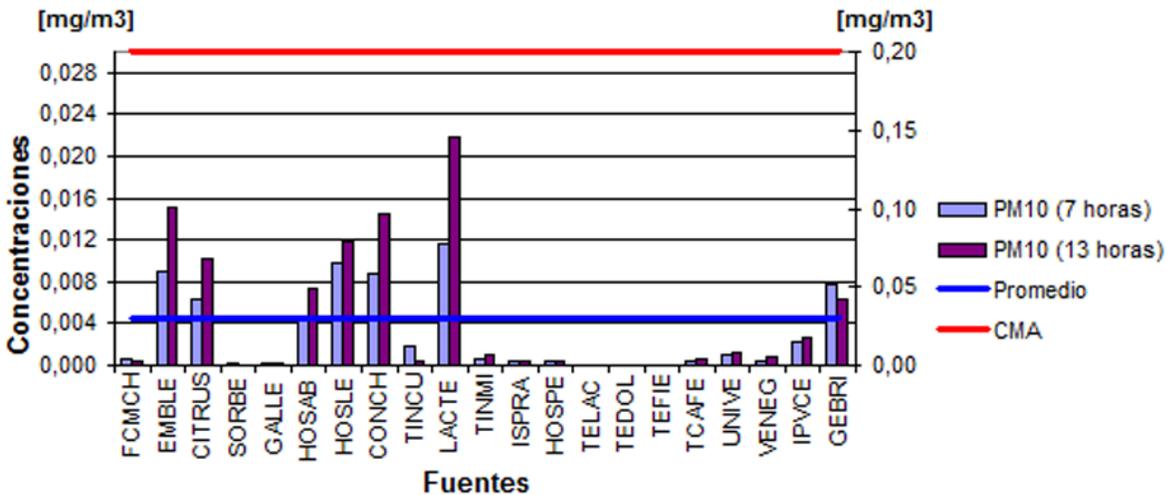


Fig. 12 Concentraciones estimadas de PM10 en la ciudad de Pinar Río para las peores condiciones.

tuvieron el mismo comportamiento que en la condición de mayor ocurrencia, no superaron el valor establecido por la *Cma*, que es de $0,2 \text{ mg/m}^3$ para 20 min, según establece la propuesta de norma de Molina *et al.* (2012), pero resultaron superiores al valor promedio calculado para todas las fuentes ($0,0045 \text{ mg/m}^3$), y de este modo se evidenció también una buena calidad del aire en las peores condiciones. En el caso de las partículas con un radio aerodinámico inferior a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$), para las condiciones de mayor ocurrencia a las 7 y las 13 horas, los valores de las concentraciones calculadas para las principales

fuentes estacionarias de la ciudad de Pinar del Río se muestran en la figura 13.

Se aprecia que los valores de las concentraciones máximas estimadas por el modelo a partir de las fuentes la Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE), los tejares Dolores (TEDOL), Rafael Ferro (TEFE) y Gabriel Lache (TELAC), aunque no superan la *Cma*, que es de $0,1 \text{ mg/m}^3$ para 20 min, según establece la propuesta de norma de Molina *et al.* (2012), fueron superiores al valor pro-

medio calculado para todas las fuentes (0,0071 mg/m³). En el caso del TELAC, se constata que a las 13 horas, el valor de concentración es mucho mayor que en las demás fuentes, debido a que el valor máximo de concentración ocurrió a 10 m de distancia, dada la poca altura de la fuente y la mayor fuerza del viento a esta hora; las demás fuentes presentaron sus máximas concentraciones de 100 m en adelante. Este comportamiento mostró una buena calidad del aire y las condiciones sanitarias. La figura 14 muestra el estudio de las partículas con un radio aerodinámico inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}) a las 7 y las 13 horas para las peores condiciones.

Se observa que las concentraciones máximas estimadas por el modelo (Fig. 14) a partir de las fuentes la Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE), los tejares Dolores (TEDOL), Rafael Ferro (TEFE) y Gabriel Lache (TELAC), aunque no superan la Cma de 0,1 mg/m³ para 20 min, según establece la propuesta de norma de Molina *et al.* (2012), fueron superiores al valor promedio calculado para todas las fuentes (0,0061 mg/m³). Las mismas presentan mayor valor de concentración a las 13 horas que a las 7 horas, debido a una mayor fuerza del

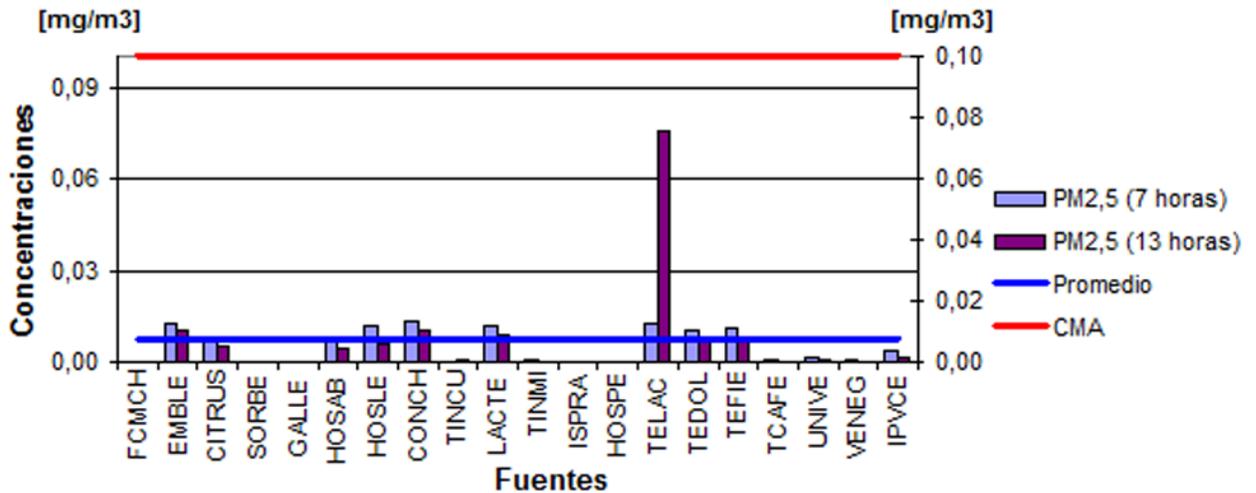


Fig. 13 Concentraciones estimadas de PM_{2,5} en la ciudad de Pinar Río para las condiciones de mayor ocurrencia.

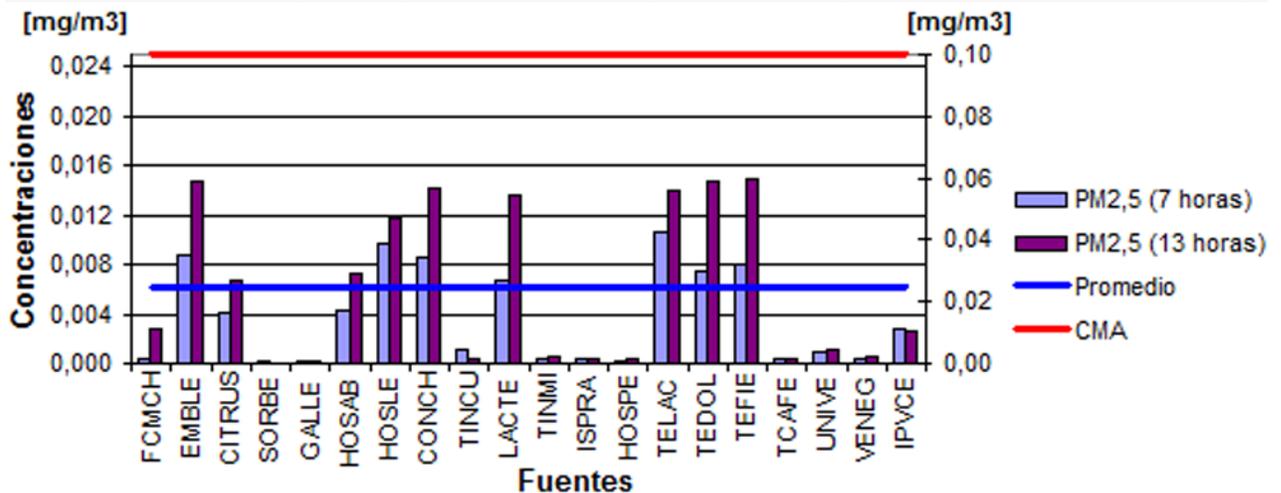


Fig. 14 Concentraciones estimadas de PM_{2,5} en la ciudad de Pinar Río para las peores condiciones.

viento a las 13 horas, lo cual provoca el impacto del contaminante en el terreno a 100 m de distancia en todas las fuentes, no siendo así a las 7 horas, cuando las concentraciones de algunas fuentes comienzan a impactar el terreno después de 200 m. Este resultado evidencia la existencia de una buena calidad del aire, sin riesgos para la salud humana ni el medio ambiente.

Cálculo de la concentración de contaminantes en 24 h

La figura 15 muestra los resultados de la modelación de la dispersión y el transporte del SO₂ en 24 h.

Se aprecia que las únicas fuentes que superaron la Cma para el SO₂, que es de 0,05 mg/m³ para 24 h, según establece la NC 39:1999, son el Combinado Lácteo (LACTE) y el Grupo Electrógeno Briones Montoto (GEBRI); esta última alcanzó el mayor valor de concentración. La Empresa Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE) y la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH) superaron el valor promedio de las máximas concentraciones (0,016 mg/m³); las demás fuentes estuvieron por debajo de este valor. Existió afectación a la calidad del aire

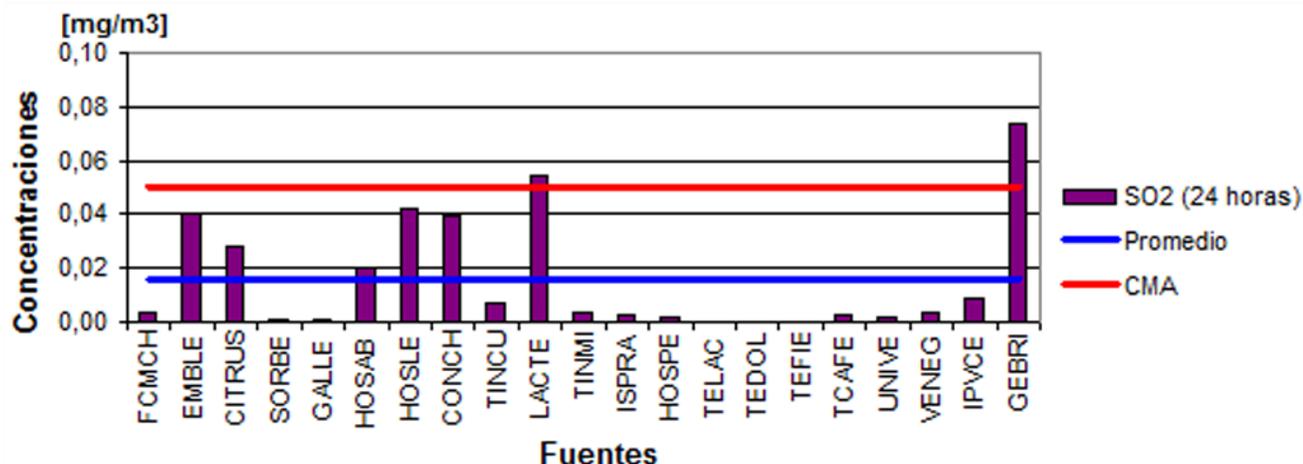


Fig. 15 Concentraciones estimadas de SO₂ en la ciudad de Pinar del Río en 24 h.

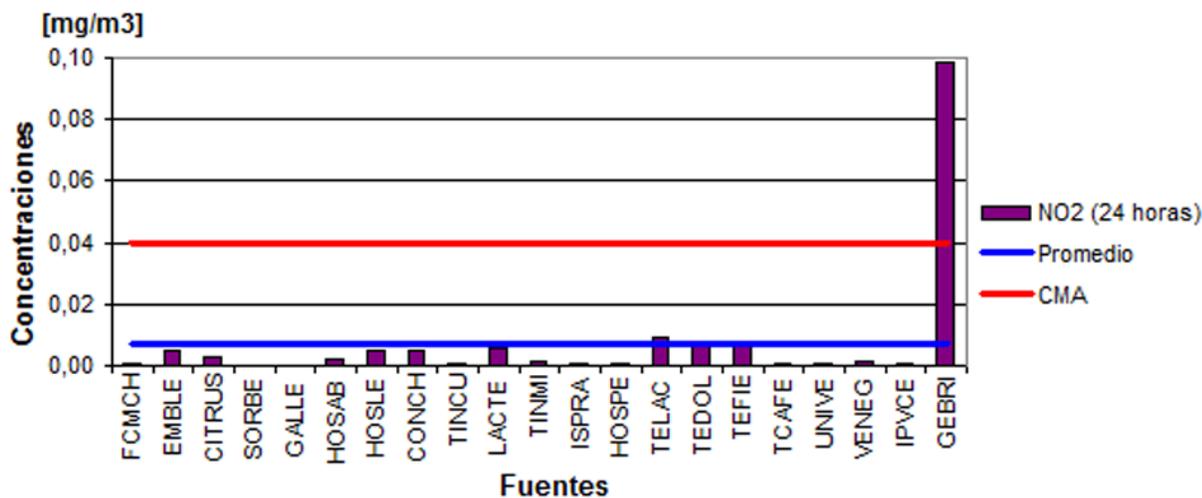


Fig. 16 Concentraciones estimadas de NO₂ en la ciudad de Pinar del Río en 24 h.

y riesgos a la salud humana en el comportamiento medio de 24 horas. En el caso del NO_2 , la figura 16 muestra los valores de las concentraciones calculadas para las principales fuentes estacionarias de emisión a la atmósfera de la ciudad de Pinar del Río, en 24 h.

Se observa que la única fuente que supera la *Cma* para el NO_2 , que es de $0,04 \text{ mg/m}^3$ para 24 h, según establece la NC 39:1999, es el Grupo Electrónico Briones Montoto (GEBRI), y lo hace en un poco más del doble de su valor permisible, lo cual evidencia una afectación a la calidad del aire, que podría implicar daños a la salud humana y el medio ambiente. Las demás fuentes no superaron

el valor promedio de las máximas concentraciones de todas las fuentes ($0,0074 \text{ mg/m}^3$). La figura 17 muestra los valores de las concentraciones calculadas para el CO en las principales fuentes estacionarias de emisión a la atmósfera de la ciudad de Pinar del Río en 24 h.

Como se aprecia, ninguna fuente alcanza el valor de la *Cma* para el CO, que es de 3 mg/m^3 para 24 h, según establece la NC 39:1999. Solo sobrepasaron el valor promedio de las máximas concentraciones de todas las fuentes ($0,0003 \text{ mg/m}^3$) las siguientes: la Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE)

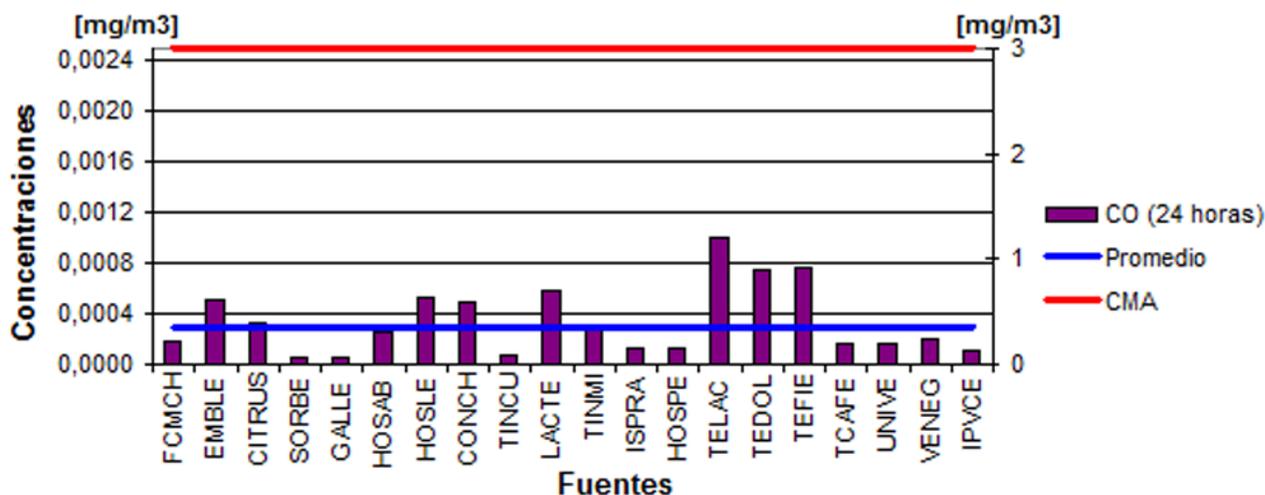


Fig. 17. Concentraciones estimadas de CO en la ciudad de Pinar Río en 24 h.

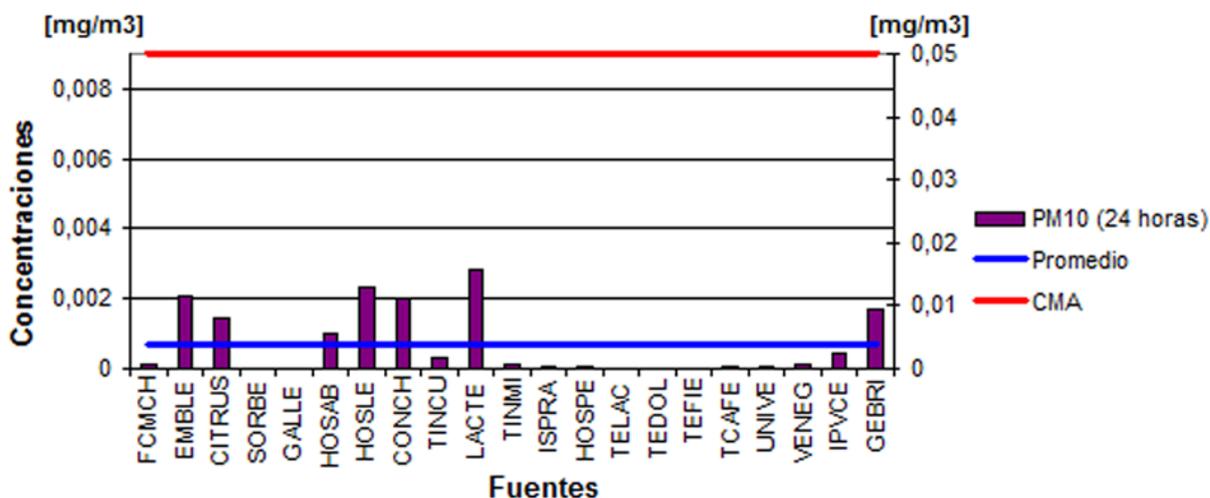


Fig. 18 Concentraciones estimadas de PM10 en la ciudad de Pinar Río en 24 h.

y los tejares Gabriel Lache (TELAC), Dolores (TEDOL) y Rafael Ferro (TEFIE); las demás fuentes estuvieron por debajo de este valor, y se evidenció una buena calidad del aire en el análisis de las 24 horas. La figura 18 muestra los valores de las concentraciones calculadas para el PM_{10} en las principales fuentes estacionarias de emisión a la atmósfera de la ciudad de Pinar del Río en 24 h.

Se observa que ninguna fuente alcanza el valor de la *Cma* para el MP_{10} , que es de $0,05 \text{ mg/m}^3$ para 24 h, según establece la propuesta de norma de Molina *et al.* (2012). Solo estuvieron por encima del valor promedio de las máximas concentraciones de todas las fuentes ($0,0007 \text{ mg/m}^3$) las siguientes: la Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE) y el Grupo Electrógeno Briones Montoto (GEBRI); las fuentes restantes estuvieron por debajo de este valor. Este comportamiento muestra una buena calidad del aire, por lo cual no existe riesgo para la salud humana. En el caso de las partículas con un radio aerodinámico inferior a $2,5 \mu\text{m}$ ($PM_{2,5}$), la figura 19 muestra los valores de las concentraciones calculadas para las principales fuentes estacionarias de

emisión a la atmósfera de la ciudad de Pinar del Río en 24 h.

Como se observa, ninguna fuente alcanza el valor de la *Cma* para el $MP_{2,5}$, que es de $0,025 \text{ mg/m}^3$ para 24 h, según establece la propuesta de norma de Molina *et al.* (2012); solo sobrepasaron el valor promedio de las máximas concentraciones de todas las fuentes ($0,0008 \text{ mg/m}^3$) las siguientes: la Embotelladora de Cervezas (EMBLE), el Combinado de Cítricos (CITRUS), el Hospital Abel Santamaría (HOSAB), el Hospital León Cuervo Rubio (HOSLE), la Fábrica de Conservas La Conchita (CONCH), el Combinado Lácteo (LACTE) y los tejares Gabriel Lache (TELAC) y Rafael Ferro (TEFIE), alcanzando esta última fuente un valor de concentración mayor. Por tanto, se evidencia la existencia de buena calidad del aire para este contaminante, sin daños al medio ambiente ni a la salud humana.

Medidas tecnológicas para mitigar la contaminación atmosférica

1. Aumentar la altura de la chimenea del Tejar Gabriel Lache por encima de 6 m, para que la concentración máxima en los receptores ocurra a una distancia mayor de la fuente y disminuya su magnitud.
2. Se propone un aumento de la temperatura de los gases de salida hasta $250 \text{ }^\circ\text{C}$ para las fuentes si-

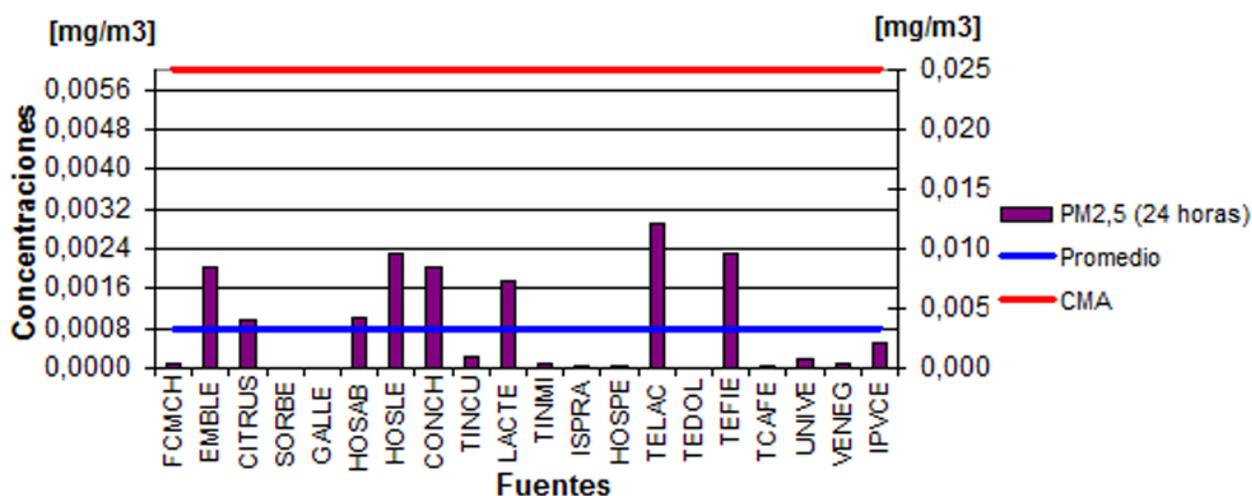


Fig. 19 Concentraciones estimadas de $PM_{2,5}$ en la ciudad de Pinar Río en 24 h.

guientes: la Fábrica de Galletas Dulces y Sorbetos, la Facultad de Ciencias Médicas, el Hospital León Cuervo Rubio y los tejares Dolores, Rafael Ferro y Gabriel Lache, con miras a que la concentración máxima en los receptores ocurra a una distancia mayor de la fuente.

3. Empleo de petróleo con bajo contenido de azufre para evitar la expulsión a la atmósfera de grandes cantidades de partículas y SO_2 , en las fuentes siguientes: la Universidad de Pinar del Río, el Hospital Abel Santamaría, la Vocacional Federico Engels, el Hospital León Cuervo Rubio, la Embotelladora de Cervezas, el Combinado Lácteo, los tejares Dolores, Rafael Ferro y Gabriel Lache, la Tintorería La Cubana y la Planta de Sulfometales.
4. Aumentar la velocidad de salida de los gases hasta 1 m/s a las fuentes siguientes: la Fábrica de Galletas Dulces y Sorbetos, la Fábrica de Galletas La Pinareña, el ISP Rafael María de Mendive, los tejares Dolores, Rafael Ferro y Gabriel Lache, la Tintorería La Cubana y la Torrefactora de Café, con miras a incrementar el ascenso inicial de la pluma de contaminantes.

Conclusiones

1. A las 7 y las 13 horas, el único contaminante que sobrepasa la *Cma* es el NO_2 . En este sentido, resultaron responsables para la condición de mayor ocurrencia el Tejar Gabriel Lache (TELAC) y el Grupo Electrógeno Briones Montoto (GEBRI); el TELAC solo supera la *Cma* a las 13 horas en casi dos veces la norma, mientras que el GEBRI supera la norma en tres veces para los dos horarios. En las peores condiciones, el GEBRI es la única fuente que supera la *Cma* a las 7 horas en cuatro veces la norma y en tres veces a las 13 horas.
2. El estudio de la modelación en 24 h mostró que los compuestos gaseosos SO_2 y NO_2 emitidos por las principales fuentes estacionarias son los únicos

que superan la *Cma*. Para el SO_2 , fueron responsables el Combinado Lácteo (LACTE) y el Grupo Electrógeno Briones Montoto (GEBRI); está última fuente alcanzó el mayor valor de concentración ($0,074 \text{ mg/m}^3$), mientras que para el NO_2 fue el GEBRI, que superó la *Cma* en casi 2,5 veces su valor.

3. Existe afectación a la calidad del aire producida por las concentraciones de NO_2 y SO_2 a sotavento del Grupo Electrógeno Briones Montoto, el Tejar Gabriel Lache y el Combinado Lácteo; por ello, pueden ocurrir efectos negativos a la salud humana. Para contrarrestar este problema se proponen medidas de mitigación que actúen sobre los procesos tecnológicos que las produce.

Recomendaciones

1. Potenciar el uso de sistemas de monitoreo de emisiones y calidad del aire, para trabajar con información más precisa en los modelos de dispersión de contaminantes.
2. Aplicar las medidas de mitigación de la contaminación atmosférica propuestas en el trabajo para las fuentes estacionarias en la zona de estudio, con la finalidad de reducir los niveles de contaminación.
3. Realizar los planes de gestión ambiental integrada con miras a mitigar los efectos, impactos de las fuentes de emisión a la atmósfera sobre la salud de la población, y los patrimonios natural y cultural en la ciudad de Pinar del Río.
4. Extender el uso y la divulgación de los indicadores de calidad del aire, como una vía para facilitar la comprensión de su estado, tanto para quienes toman las decisiones, como para la población.

Referencias bibliográficas

ÁLVAREZ, R. *et al.* 1978. Diagnóstico de la contaminación del aire en la zona de Nicaro (inérito), La

- Habana, Cuba, Instituto de Meteorología.
- BATCHELOR, G. K. 1959. Some reflections on the theoretical problems raised at the symposium. *Advanc. Geophys*, 6, 442-449.
- BATCHELOR, G. K. 1964. Diffusion from Sources in a Turbulent Boundary Layer, *Arch. Merch, Stosowane*, 3, 661-670.
- BUSTOS, C. 2004. *Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso*. Tesis para optar al grado de magíster en Gestión y Planificación Ambiental.
- COLLAZO, A. *et al.* 2004. Modelación de las transformaciones químicas a escala local del SO₂ a sulfato. Resultado del Programa Ramal Científico-Técnico Protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible cubano. Subprograma Previsión, prevención y mitigación de impactos ambientales de la contaminación atmosférica y sus variables físicas conexas. *Proyecto 0030230*. 15-80.
- COLLAZO, A. 2011. *Análisis de la contaminación transfronteriza y local de los compuestos gaseosos precursores de la deposición ácida húmeda y formación de ozono en Cuba*, 58-110.
- CURIEL, L. D. 1990. *Diagnóstico y pronóstico de la contaminación por SO₂ en la Ciudad de Matanzas*. Tesis de doctor en Ciencias Técnicas, I. S. P. de Matanzas.
- CHASE, R., AQUILANO, N. & JACOBS, R. 2000. *Administración de producción y operaciones*, Madrid, Mc Graw-Hill.
- EPA 1992. Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, *Revised*, EPA-450/R-92-019.
- EPA 1995. *Screen33 Model User's Guide*, EPA-454/B-95-004.
- FONSECA, Y. 2010. *Implementación y aplicación del sistema de modelación Calmet-Calpuff-Calpost a escala local*, 32-46.
- GIFFORD, F. A. 1962. Diffusion in the adiabatic surface layer, *J. Geophys*, 67, 3207-3212.
- GONZÁLEZ, Y. 2010. *Estudio preliminar de la eficiencia y efectividad de los generadores terrestres de yoduro de plata en Cuba*, 20-68.
- GRANIER, G. P. 2003. Modeling. In *The changing atmosphere: an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research*, Brasseur *et al.* (eds.), Springer-Verlag.
- HIGASHI, M. & BURNS, T. P. 1991. Enrichment of ecosystem theory, en Higashi M & T. P. Burns (eds.), *Theoretical Studies of Ecosystems. The network perspective*, London, Cambridge University Press.
- KIELY, G. 1999. *Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*, Madrid, McGraw-Hill, 1330.
- LÓPEZ, C. M. 1984. *Factores meteorológicos de la contaminación regional del aire en Cuba*. Tesis de doctorado.
- MOLINA, E., *et al.* 2012. Propuesta de norma: Calidad del aire-contaminantes-concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables, La Habana, Cuba (inédito).
- MONIN, A. S. 1959. The theory of locally isotropic turbulence, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 125, 515-518.
- NC: 39 (1999). *Requisitos higiénico-sanitarios*, CITMA-INN-MEP, La Habana, Cuba.
- ONE. 2009. Oficina Nacional de Estadística, Provincia de Pinar del Río.
- RODRÍGUEZ, D. 2007. *Sistema Automatizado de Gestión de Información sobre Fuentes Contaminantes (SAGIFC)*. Tesis en opción al grado de máster en Nuevas Tecnologías para la Educación, Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- RODRÍGUEZ, D., ECHEVARRIA, L., SÁNCHEZ, A., CUESTA, O., CARRILLO, E., COLLAZO, A. & VICTORIA, M. 2012. *Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Pinar del Río utilizando el modelo Screen. Convención Trópico*, ISBN: 978-959'282-079-1.
- RODRÍGUEZ, D., ECHEVARRIA, L., CUESTA, O., COLLAZO, A., SÁNCHEZ, A., NUÑEZ, V., MILÓ, M. V. & LIUDMILA, A. 2013. "Inventario de emi-

- siones de contaminantes en las fuentes fijas de la zona urbana de Pinar del Río y Santa Lucía”, *Revista Cubana de Meteorología*, 19.
- SÁNCHEZ, P. et al 2004. Impactos de la contaminación atmosférica en la salud en el municipio de Habana Vieja. Resultado del Programa Ramal Científico Técnico Protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible cubano. Subprograma. Previsión, prevención y mitigación de impactos ambientales de la contaminación atmosférica y sus variables físicas conexas. Proyecto 3114. 13-63.
- SEINFELD, J. H. & PANDIS, S. N. 2006. *Atmospheric chemistry and Physics: from Air Pollution Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 1249.
- TANJI, K. K. 1994. *Hydrochemical modeling, Class Notes, Land, Air and Water Resources*, University of California at Davis.
- TAYLOR, G. I. 1921. Diffusion by Continuous Movements. *Proc. London Math. Soc.* 20-196.
- TURNER, D. B. 1964. A Diffusion Model for an Urban Area, *Journal of Applied Meteorology*, 3, 83-91.
- 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, INSMET, La Habana.