

Evaluación de la calidad del aire en Güira de Melena a partir de las emisiones de sus principales fuentes fijas

Air pollution assessment in Guira de Melena from its principal emissions point sources

Lic. Idel Rodríguez Rodríguez | *idel.rodriguez@insmet.cu* | Centro Meteorológico Provincial Artemisa-Mayabeque, Instituto de Meteorología

Dr. Osvaldo Cuesta Santos | *osvaldo.cuesta@insmet.cu* | Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Lic. Yosdany González Jaime | *yosdany.gonzalez@insmet.cu* | Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

MSc. Arnaldo E. Collazo Aranda | *arnaldo.collazo@insmet.cu* | Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Lic. Lázaro R. Batule Águila | *lazaro.batule@insmet.cu* | Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Recibido: 16 de septiembre, 2014; aceptado: 31 de marzo, 2015.

Resumen

En la presente investigación se realizó una evaluación de la calidad del aire en el municipio de Güira de Melena, perteneciente a la provincia de Artemisa; se relacionaron las emisiones de contaminantes de las fuentes fijas, producidas por la quema de *desechos sólidos urbanos* y combustibles fósiles, con el comportamiento local del *viento y la temperatura*. Los contaminantes principales considerados fueron NO_2 , SO_2 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y COVDM . Se utilizó el modelo de dispersión local de contaminantes atmosféricos NC (versión 3.0), con el fin de caracterizar la distribución espacial de los contaminantes. Se seleccionaron tres escenarios de modelación para los horarios de las siete de la mañana, la una de la tarde y el promedio diario (24 h), en los que se emplearon los valores del viento y la temperatura período para el período 2008–2012. Las concentraciones estimadas obtenidas de los compuestos gaseosos y las partículas superan los valores máximos admisibles en varias zonas del municipio. Asimismo, se realizó la evaluación de la calidad del aire según la Norma Cubana NC 111: 2004. Por último, debe señalarse que este estudio constituye un aporte significativo para el conocimiento del estado del medio ambiente atmosférico en el municipio de Güira de Melena.

PALABRAS CLAVE: Calidad del aire, índice, contaminación atmosférica, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas, Güira de Melena.

Abstract

In the present research shows air quality assessment from Güira de Melena municipality, Artemisa province, where was studied the relationship between pollutant emissions from stationary sources, produced by burning solid urban waste and fossil fuels and the behavior of local meteorological variables such as temperature, wind, cloudiness, precipitation, atmospheric pressure and relative humidity. The main pollutants were considered: NO_2 , SO_2 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and NMVOC . Models used local dispersion of air pollutants (DISPER 4.0) and (NC version 3.0), in order to characterize the spatial distribution of pollutant concentrations. Three scenarios were selected for modeling seven o'clock in the morning, one o'clock in the afternoon and the average daily (24 hours), in which we used the values of variables and meteorological parameters for the period 2008–2012. The estimated concentrations of gaseous and particulate compounds exceed the maximum permissible in several areas from municipality. Also, we realized an air quality assessment according to the Cuban Standard

NC 111: 2004. Lastly, this study constitutes a significant contribution to knowledge about Atmospheric Environmental state of Guira de Melena municipality.

Keywords: Air quality index, air pollution, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, particles, Guira de Melena.

Introducción

La contaminación atmosférica es la alteración de la composición química media de la atmósfera a niveles de concentración de los contaminantes, que produce efectos medibles e indeseables sobre la salud humana y otros elementos del medio ambiente, tales como los animales, la vegetación, los materiales de construcción y ecosistemas (Seinfeld., Pandis, 2006). Esta se ha convertido en unos de los principales problemas que enfrenta la humanidad; para Cuba, constituye uno de los principales problemas medioambientales, lo cual fue ratificado en la Estrategia Ambiental Nacional (CITMA, 2011/2015). La contaminación tiene, entre otras, las causas siguientes: los aspectos relacionados con la planificación territorial de los asentamientos humanos, la presencia de industrias, la utilización de tecnologías obsoletas en las actividades productivas y la existencia de otras fuentes contaminantes, tales como el transporte automotor.

En distintos países, los índices de calidad del aire se utilizan como indicadores de la calidad del aire en una región determinada; por ejemplo, el índice de calidad del aire (ICA) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA Air Quality Index) (AQI, 2000) enfoca sus esfuerzos hacia los efectos que puede provocar en la salud la contaminación atmosférica en un período que comprende desde algunas horas hasta varios días después que es respirado el contaminante. En Castilla La Mancha (ICA, 2003), se toma únicamente un nombre sin unidades como indicador global de la calidad del aire en un día para cierta estación de medida. El ICA de Castilla La Mancha se interpreta como un indicador orientativo de la calidad del aire

enfocado, en general, al público. Es importante entender que no es el resultado de hacer una media de una serie de valores, sino que es una cifra que pondera la aportación de la concentración medida para cada contaminante de la calidad del aire.

En Cuba, la situación de la calidad del aire en los asentamientos humanos se evalúa mediante el ICA establecido en la Norma Cubana (NC 111: 2004), el cual se determina utilizando como criterio el valor resultante del cociente de las concentraciones reales de cada contaminante principal (dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas suspendidas totales) y tomando como denominador las concentraciones máximas admisibles (*Cma*) correspondientes al período evaluado, según la NC 39: 1999 (Wallo, 2005). Los niveles o categorías de la contaminación de la atmósfera (*calidad del aire*) se caracterizan por las concentraciones máximas de las sustancias contaminantes en espacio y tiempo, expresadas en mg/m^3 .

Este trabajo tuvo como objetivo principal evaluar la calidad del aire en Güira de Melena, a partir de los cálculos de las concentraciones y su distribución espacial, con el modelo NC (versión 3.0). Los resultados obtenidos permitirán determinar la calidad del aire teniendo en cuenta cinco contaminantes principales, los cuales incurren de forma negativa en la calidad de vida de los habitantes y en la vegetación. La aplicación de un método eficaz de análisis científico para evaluar el aire, posibilitará que la sociedad pueda valorar la adopción de medidas de mitigación de la contaminación, tanto socialmente, por las mejoras de calidad de vida de los pobladores, como por la reducción de los gastos económicos en la agricultura, la ganadería y otros sectores de interés.

Materiales y métodos

Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio abarca un territorio del municipio de Güira de Melena, provincia de Artemisa, la

cual se encuentra limitada, por el noreste, en los 22°48'48.60" N, con 82°28'37.17" O; por el sureste, en los 22°46'27.59" N, con 82°28'37.17" O; por el suroeste, en los 22°46'27.59" N, con 82°32'34.81" O; y por el noroeste, en los 22°48'48.60" N, con 82°32'34.81" O. La figura 1 presenta la distribución espacial de las principales fuentes fijas emisoras de sustancias contaminantes a la atmósfera, que influyen sobre la calidad del aire, y la estación meteorológica del municipio, donde se obtuvieron los datos meteorológicos del período 2008–2012, para la implementación del modelo NC 3.0.

Inventario de fuentes fijas en Güira de Melena

El inventario de las principales fuentes fijas de emisión de contaminantes a la atmósfera, se realizó vi-

sitando cada fuente. Se tomaron fotografías, se conversó con los trabajadores y las autoridades de cada identidad; de este modo, se recopiló información y datos de interés con los cuales se construyó la base de datos para las fuentes fijas locales (Tabla 1) teniendo como guía la tabla de captación de datos de emisión del Anexo B de la Norma Cubana (NC 242: 2005), que incluye: DE 1 “Información general del proceso”, DE 2 “Información estática para cada fuente” y DE 3 “Información del combustible”.

Cálculo de las emisiones de las fuentes fijas en Güira de Melena

Los cálculos realizados para el análisis de la tasa de emisión E (ton/año), empleando la base datos con-



Fig. 1 Ubicación de las principales fuentes emisoras y la estación meteorológica.

TABLA 1

Inventario de las fuentes fijas de Güira de Melena

Fuentes	GEE grandes	Vertedero	Fábrica de conservas	GEE pequeños	Motores de riego
Empresa	Eléctrica	Comunales	Alimentaria	Eléctrica	Hidráulica
Organismo	MINBAS	OLPP	OLPP	MINBAS	MINAGRI
Combustible	Diesel	Desecho sólidos	Fue Oil	Diesel	Diesel
(m ³) quemados al año	582.193	152 700	60.12	33.43	2 021.0677
Horas trabajo al año	346.54	*	6 570	100.09	404.2
Modo de operación	Emergencia	Diario	Continuo a 75 %	Emergencia	Depende de las precipitaciones
Cantidad de motores (M) calderas (C)	4 M	*	1 C	23 M	456 M
Altura de la chimenea (m)	5	1	7	2 a 5	1,5 a 2,5
Diámetro (m) chimenea (CH) o área (A)	0.5 CH	11.28 A	0.45 CH	0.08 a 0.2 CH	0.1 a 2.5 CH
Datos de otras fuentes	*	Quema abierta	*	*	*

Nota: (*) No se dispone de la información.

feccionada con el inventario de las fuentes fijas del municipio, se hicieron con la ayuda de Microsoft Excel y se tomaron como criterio seis contaminantes primarios (NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO y COVDM) con miras a calcular las emisiones por contaminantes y fuentes; en ambos casos, se utilizó la ecuación 1, que depende de los factores de emisión FE (ton/m³) presentados en la tabla 1.1, por cada contaminante y fuente, de acuerdo con el tipo de combustible o material incinerado y las cantidades de combustible o

material quemado por años A (m³/año).

$$E = A \times FE \times \frac{(100 - CE)}{100} \quad (1)$$

donde: E es la emisión (ton/año), FE es el factor de emisión (ton/m³), A es el nivel de intensidad de la actividad (consumo de combustibles, producción), en unidades de masa o volumen por tiempo (m³/año) y (100-CE/100) es la eficiencia del dispositivo de control de la contaminación atmosférica (si está presente).

TABLA 1.1

Factores de emisión

Elementos	FE (kg/m ³) 1 calderas		FE (kg/m ³) Grupos electrógenos (para 4 motores)		FE (kg/m ³) Grupos electrógenos (para 23 motores)		FE (kg/m ³) Vertedero (Quema a campo abierto)		FE (kg/m ³) para 456 motores de riego	
	Fuel Oil	Refer	Diesel	Refer	Diesel	Refer	Desecho sólidos	Refer	Diesel	Refer
NO ₂	5.63	AP-42	72.86	CUJAE CUBAENERGIA	220.8	CUJAE CUBAENERGIA	0.75	AP-42	61.6	AP-42
SO ₂	75.16	AP-42	68.57	CUJAE CUBAENERGIA	207.8	CUJAE CUBAENERGIA	0.125	AP-42	4.1	AP-42
PM ₁₀	2.42	AP-42	1.071	AP42 CUBA ENERGIA	0.308	AP42 CUBA ENERGIA	1.0	AP-42	4.4	AP-42
PM _{2.5}	1.82	AP-42	0.536	AP42 CUBA ENERGIA	1.623	AP42 CUBA ENERGIA	0.5	AP-42	2.2	AP-42
CO	0.60	AP-42	6.171	CUJAE CORINAIR	18.7	CUJAE CORINAIR	10.5	AP-42	13.3	AP-42
CO-VDM	0.042	AP-42	0.771	CORINAIR	2.337	CORINAIR	3.75	AP-42	2.8	IPCC

Información meteorológica

Se utilizó la rosa del viento para los tres escenarios de modelación (Fig. 1.1). En la figura 1.1a, en 24 h, la dirección predominante del viento en Güira de Melena, para el período 2008-2012, es del primer cuadrante, y la componente norte (N) presenta mayor frecuencia diaria, con 29.3 %; la máxima velocidad media diaria del viento por rumbo es de 8.7 km/h, del sureste (SE) y las calmas tienen una frecuencia de 14.6 %. En la figura 1.1b, para las 07:00, la dirección predominante es del primer cuadrante; la mayor frecuencia es del este (E), con 22.6 %; la velocidad máxima media del viento por rumbo es de 7.5 km/h, del sureste (SE); y las calmas tienen una frecuencia de 20.8 %. En la figura 1.1c, a las 13:00, la dirección predominante es del segundo cuadrante; la mayor frecuencia es del sureste (SE) y sursureste (SSE), con 15.5 %; la velocidad máxima media del viento por rumbo es de 11.3 km/h, del norte (N); las calmas tienen una frecuencia de 1.0 %. La temperatura media para cada escenario se aprecia en la tabla 1.2.

Tabla 1.2
Temperatura media por escenario

Escenarios	TT (°C)
24 horas	24.6
7:00 a.m.	21.5
13:00 p.m.	28.9

Modelo NC 3.0 de dispersión local de contaminantes atmosféricos

Para la modelación se utilizó la implementación del modelo NC 3.0, que establece la Norma Cubana (NC 39: 1999) desarrollada por González (2011), del Grupo Técnico de Modelación de la Calidad del Aire, perteneciente al Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera del Instituto de Meteorología. Se tuvo como precedente las versiones anteriores de Álvarez (1991) y Collazo (1999). Para la implementación, se utilizó el software MATLAB 7.8.0, lo cual permitió una mejor capacidad de cálculo y la posibilidad de mostrar los resultados en forma de gráficas y archivos de datos. El aspecto más novedoso en esta versión es la obtención de una salida en archivo de datos que puede llevarse a un Sistema de Información Geográfica (SIG) y realizar los mapas correspondientes; además, posee una opción con la cual puede obtenerse la contribución de varias fuentes en un mapa. Asimismo, se considera el efecto del viento en los dieciséis rumbos para los cuales se tiene información sobre este.

Las salidas numéricas de este modelo son: a) concentración la máxima de un contaminante expulsado caliente a la atmósfera a través de una chimenea, b) la velocidad crítica del viento (asociada a la ocurrencia de la concentración máxima), y c) la distancia entre la fuente y el punto donde ocurre la concentración máxima.

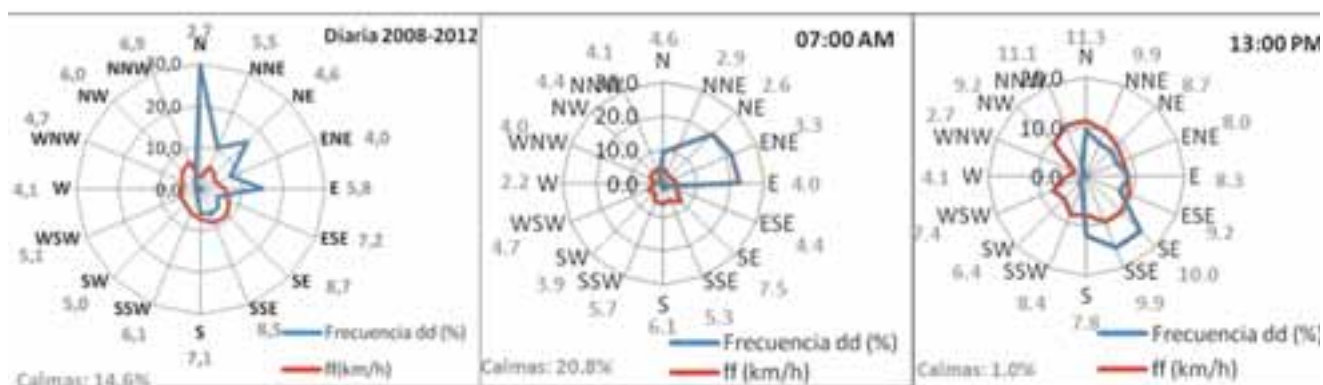


Fig. 1.1 Rosas del viento en dieciséis rumbos, 2008-2012.

La ecuación 2 muestra la aproximación a la solución numérica de transporte-gradiente obtenida por Berlyand (1975), que constituye la formulación principal del modelo y permite calcular el valor de la concentración máxima de un contaminante expulsado a la atmósfera, bajo condiciones meteorológicas desfavorables, para condiciones de terrenos uniformes y planos.

$$Cm_o = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}} \quad (2)$$

donde: Cm es el valor máximo probable de la concentración de un contaminante expulsado a la atmósfera ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); A es la constante de estratificación térmica atmosférica que define las condiciones de difusión de los contaminantes del aire. (El valor de esta constante fue calculado para Cuba por López (1984) mediante experimentos realizados en siete zonas del país durante cinco años. A partir de los resultados, él recomendó utilizar el valor de 210.); M es el flujo máximo de la sustancia contaminante expulsada al aire; F es el coeficiente de precipitación de la sustancia contaminante en el aire; m y n son los coeficientes de condiciones de emisión a la atmósfera de la mezcla de gases y aire; H es la altura de la chimenea sobre el nivel del suelo; ΔT es la diferencia de temperatura entre la mezcla de los gases y aire; y V es el caudal total de la mezcla de gases y aire.

Para la implementación del modelo se utilizaron los datos del inventario de fuentes fijas, para tres escenarios de modelación: las 07:00, las 13:00 y el promedio diario en 24 h. De cada uno, se necesitó la frecuencia (en porcentaje) de la dirección del viento, la fuerza media del viento por cada rumbo y la temperatura media. Se contemplaron tres fuentes (Emplazamiento del grupo electrógeno, Fábrica de conservas y Vertedero); las demás fuentes inventariadas, tales como los grupos electrógenos de emergencia de los diferentes organismos y los motores estacionarios de riego hidráulico, por estar muy dispersas, no se tuvieron en cuenta.

Análisis de la calidad del aire

Este análisis se le realizó a cinco contaminantes principales que afectan la calidad del aire (SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) a partir de las concentraciones obtenidas con los modelos de dispersión de contaminantes aplicados a las tres fuentes y los tres escenarios de modelación mencionados, teniendo en cuenta los valores de referencia para comparar las concentraciones de los contaminantes en períodos de 20 min y 24 h. Se utilizaron los valores de la concentración máxima admisible (Cma) establecidos en la Norma Cubana NC 39:1999 que se muestran en la tabla 1.3.

TABLA 1.3
Períodos de modelación y valores de referencia

	Períodos	Valor [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Referencia
SO_2	20 min	500	NC 39-1999
	24 h	50	NC 39-1999
NO_2	20 min	85	NC 39-1999
	24 h	40	NC 39-1999
CO	20 min	5 000	NC 39-1999
	24 h	3 000	NC 39-1999
PM_{10}	20 min	200	*
	24 h	50	*
$\text{PM}_{2.5}$	20 min	100	*
	24 h	25	*

Nota: (*) Propuesta de concentraciones máximas admisibles de contaminantes del aire en asentamientos humanos en Cuba (Molina. E. E. et al., 2009).

De acuerdo con el tipo de toxicidad de cada contaminante principal, se establece la evaluación del índice de calidad del aire para cada contaminante evaluado, en un período diario e instantáneo o ambos.

Índice de valor 0: Corresponde a un nivel de concentración inferior al límite de detección del método analítico normalizado.

Índice de valor 100: Corresponde al valor 100 % de la Cma del contaminante principal evaluado, según la NC 39: 1999.

Índice de valor 200: Corresponde a un valor de concentración real que supera en dos veces la *Cma* del contaminante principal evaluado, según la NC 39: 1999.

Índice de valor 300: Corresponde a un valor de concentración real que supera en tres veces la *Cma* del contaminante principal evaluado, según la NC 39: 1999.

Índice de valor 400: Corresponde a un valor de concentración real que supera en cuatro veces la *Cma* del contaminante principal evaluado, según la NC 39: 1999.

Índice de valor 500: Corresponde a un valor de concentración real que supera en cinco veces la *Cma* del contaminante principal evaluado, según la NC 39: 1999.

Una vez determinada individualmente la concentración promedio diaria o instantánea de cada contaminante principal, se divide por la *Cma* correspondiente al contaminante y el período evaluados; de acuerdo con su magnitud, el valor obtenido se interpola linealmente en la categoría que corresponde, según los límites establecidos en la tabla 1.4, y se calculan los subíndices.

Discusión de los resultados

Caracterización

de las fuentes fijas en Güira de Melena

La tabla 1.5 muestra las características de las principales fuentes fijas del municipio de Güira de Melena, las cuales están determinadas por los parámetros físicos de la fuente (la altura y el diámetro de la chimenea), los datos tecnológicos del proceso de emisión (la velocidad y la temperatura de salida de la mezcla gaseosa) y la estimación de las emisiones de los diversos contaminantes (en g/s).

Determinación de las emisiones, de las fuentes fijas en Güira de Melena

Los resultados de los cálculos de las emisiones confirman que en Güira de Melena se emite 2 822.5 ton/año, lo cual representa 100 % del total. La tabla 1.6 muestra el CO como el elemento más emitido (1 634.5 ton/año), que representa 57.9 % del total de las emisiones de los contaminantes; asimismo, se constata que el menos emitido es el SO₂ (76.8 ton/

TABLA 1.4

Relación entre el índice de calidad del aire y las posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada categoría de calidad

Índice	Categoría	Comentarios
0-79	Buena	No sobrepasa 79 % del valor de la <i>Cma</i> prescrito en la NC 39. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados)
80-99	Aceptable	No supera 99 % de la <i>Cma</i> . Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual del umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones
100-199	Deficiente	Sobrepasa entre 100 % y 199 % el valor de la <i>Cma</i> prescrito en la NC 39. Ligeros incrementos en la frecuencia y la severidad de los efectos adversos, agudos y crónicos, en la población general, sobre todo en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas, así como en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles
200-299	Mala	Supera entre dos y tres veces (200 % a 300 %) el valor de la <i>Cma</i> . Aumento de la frecuencia y la gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, medibles mediante investigaciones específicas a escalas individual y ecológica, basadas en registros de morbilidad. Conduce a una situación de atención
300-499	Pésima	Supera entre tres y cinco veces el valor de la <i>Cma</i> . En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición, continúa el aumento de la frecuencia y la gravedad de los efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Ocasiona una situación de alerta
≥ 500	Crítica	Se supera el límite de cinco veces la <i>Cma</i> , lo cual provoca un incremento mayor del riesgo o la probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y grupos de riesgo; ello implica un evidente incremento agudo de la morbilidad y la mortalidad, que sobrecarga los servicios asistenciales. Conduce a una situación de emergencia ambiental

TABLA 1.5

Principales características de las fuentes fijas locales

	Fuentes	Vertedero	Grupos electrógenos de emergencia	Fábrica de conservas	Grupos electrógenos de organismos	Motores estacionarios de riego
Características	Coordenadas	22°49'31,78" N 82°29'58,65" W	22°48'30,39" N 82°30'07,81" W	22°48'10,14" N 82°30'16,51" W	*	*
	Tipo de fuente	Área	Puntual	Puntual	Puntual	Puntual
	Dispositivos emisores por fuente	1	4 motores	1 chimenea	23 motores	456 motores
	Tipo de material quemado	Desechos sólidos	Diesel	Fuel Oil	Diesel	Diesel
Parámetros físicos	Altura (m)	1	5	7	De 2 a 5	De 1.5 a 2.5
	Diámetro (m)	11.28	0.5	0.45	De 0.08 a 0.2	De 0.1 a 0.25
	Velocidad de salida de la mezcla (m/s)	3.0	25.0	0.9	*	*
	Temperatura de salida de la mezcla (°C)	150	317.9	265	317.9	*
Emisiones estimadas (g/s)	SO ₂	0.6	1.3	0.08	0.2	0.26
	NO ₂	3.6	1.3	0.007	0.2	3.9
	CO	50.8	1.1	0.001	0.02	0.9
	PM 10	4.8	0.02	0.0005	0.0003	0.3
	PM 2,5	2.4	0.01	0.0004	0.002	0.1

Nota: (*) No se dispone de los datos por tratarse de fuentes dispersas.

TABLA 1.6

Emisiones por fuentes y elementos en Güira de Melena

Fuentes	Emisiones (ton/año)						Total por fuente	Porcentaje por fuente
	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	CO	COVDM		
Vertedero	114.5	19.1	152.7	76.4	1 603.4	572.6	2 538.6	89.9
GEE G 4 motores	42.42	39.92	0.62	0.31	3.59	0.45	87.3	3.1
Fábrica de conservas	0.207	2.554	0.017	0.011	0.036	0.003	2.8	0.1
GEE P 23 motores	7.380	6.945	0.010	0.054	0.625	0.078	15.1	0.5
456 motores de riego	124.50	8.286	8.893	4.446	26.880	5.659	178.7	6.3
Total por contaminante	289.0	76.8	162.2	81.2	1634.5	578.8	2 822.5	↓
Porcentaje por contaminante	10.2	2.7	5.7	2.9	57.9	20.5	→	100.0

año), que representa 2.7 % del total de las emisiones de los contaminantes. La fuente más emisora es el Vertedero (2 538.6 ton/año), que representa 89.9 % del total de las emisiones por fuentes y la menos emisora es la fábrica de conservas (2.8 ton/año), que representa 0.1 % del total de las emisiones de las fuentes.

La figura 1.2 presenta los resultados de los cálculos para las emisiones por cada contaminante emitido desde las fuentes fijas del municipio.

La figura 1.3 muestra los resultados de los cálculos de las emisiones para cada fuente contaminante de la localidad.

Resultados de las concentraciones estimadas con el modelo

Con el modelo utilizado se obtuvo, en cada escenario, las concentraciones máximas estimadas de cada contaminante por fuente (Fig. 1.4). Se identifica el Vertedero como la fuente con mayor aporte a la con-

– **Artículos originales:** Evaluación de la calidad del aire en Güira de Melena a partir de las emisiones de sus principales fuentes fijas –

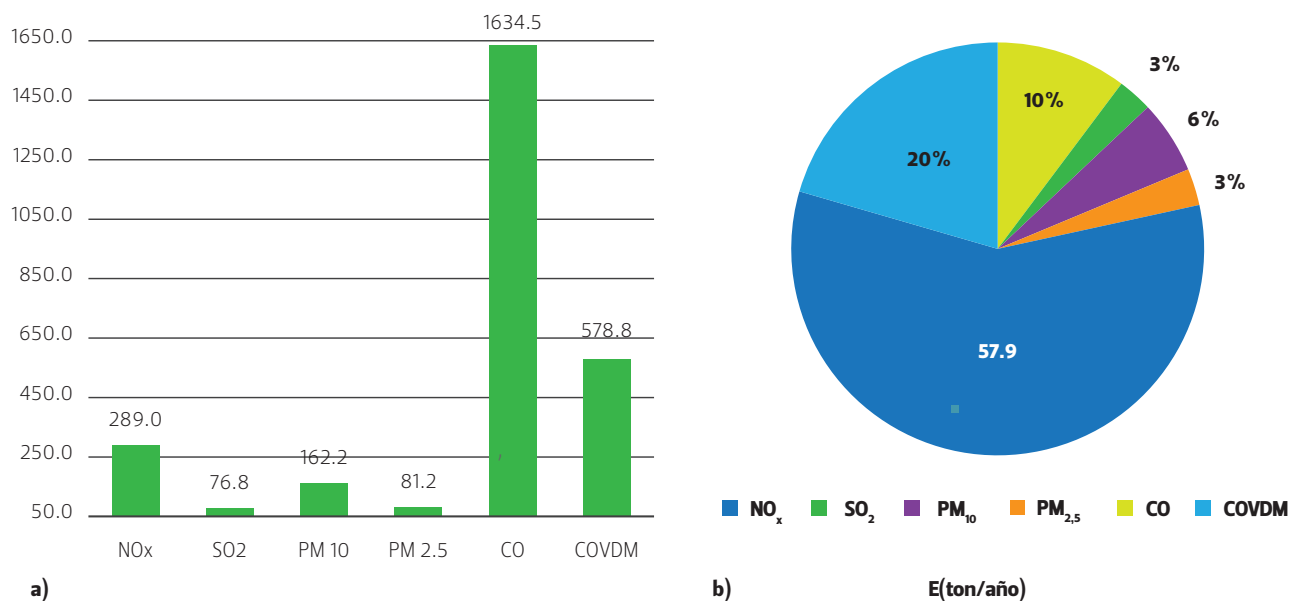


Fig. 1.2 Emisión para cada elemento en Güira de Melena: a) Cantidad de ton/año y b) Porcentaje de ton/año.

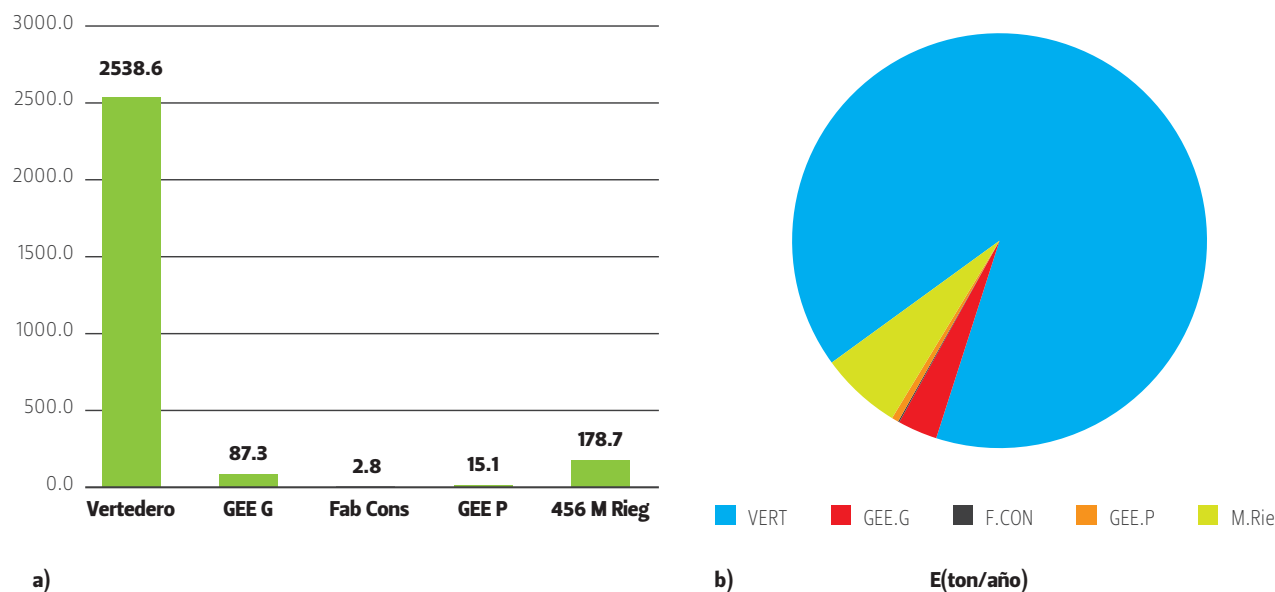


Fig. 1.3 Emisión por fuentes en Güira de Melena: a) Cantidad de ton/año y b) porcentaje de ton/año.

centración de NO₂, SO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5}, seguido por el Grupo electrógeno y, con los menores aportes, la Fábrica de conservas.

En el escenario de las 7:00, la mayor contribución negativa a la calidad del aire se identifica con el NO₂, en el Vertedero, el cual supera 38 veces la concentración máxima admisible *Cma* establecida por la Norma Cubana NC 111: 2004. Para el escenario de las 13:00, el

contaminante con mayor contribución negativa a la calidad del aire es el NO₂, en el Vertedero, superando 39 veces la *Cma* implantada por la norma citada. En 24 h, el PM₁₀ supera 22 veces la *Cma* establecida por esta norma, y resultó el contaminante con mayor influencia negativa sobre la calidad del aire para este escenario.

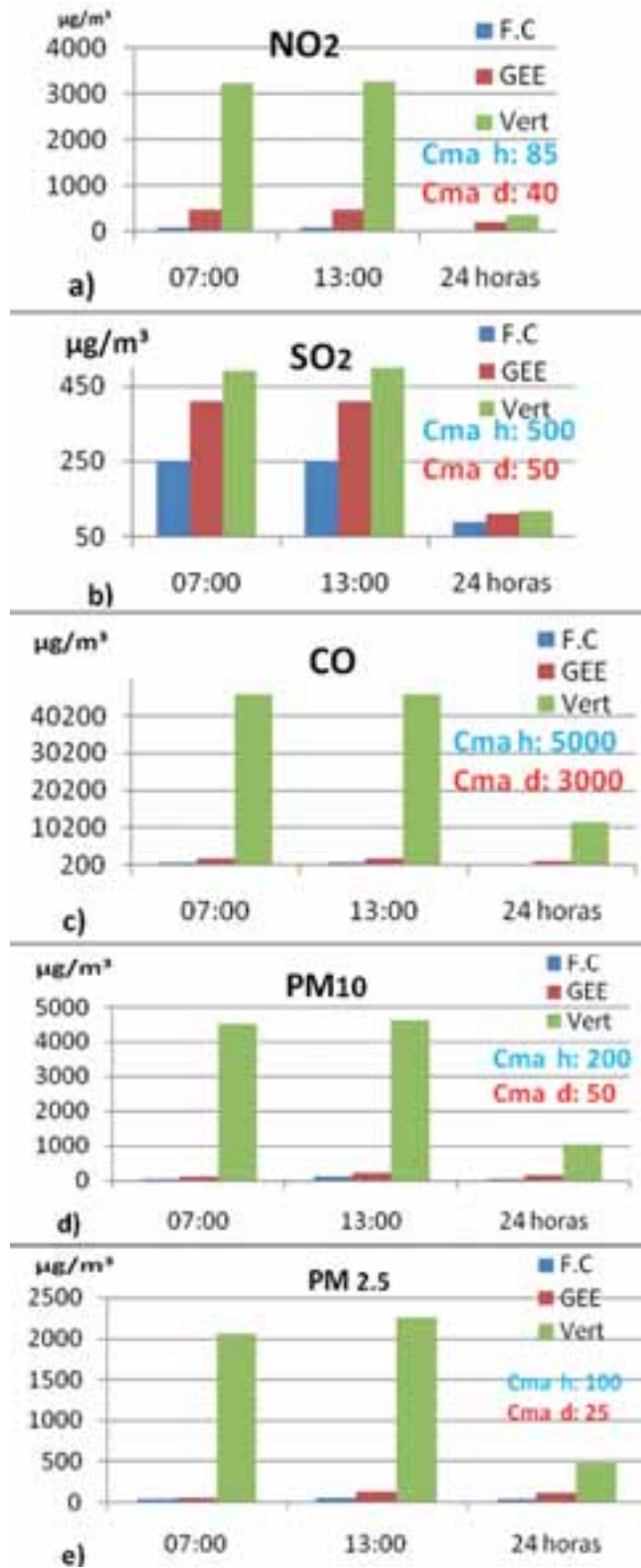


Fig. 1.4 Comportamiento de las concentraciones por fuente y escenario en Güira de Melena: a) NO₂, b) SO₂, c) CO, d) PM₁₀ y e) PM_{2.5}.

Análisis espacial de las concentraciones obtenidas con los modelos

El análisis espacial muestra el resultado de la corrida del modelo NC 3.0 para los tres escenarios evaluados teniendo en cuenta las fuentes y los contaminantes de mayor influencia en el deterioro de la calidad del aire, según establece la NC 111: 2004, por los cuales se evalúo el ICA para el municipio de Güira de Melena.

En el escenario de las 07:00 (Fig. 1.5) se observa cómo la dispersión de la concentración de NO₂ supera la Cma establecida por la NC 39: 1999 y afecta la mitad norte (N) del pueblo, en los alrededores del Vertedero, con un radio aproximado de 1 000 m y una ligera desviación en forma de cuña al oeste-suroeste (WSW), y del Grupo electrógeno, con un radio de 200 m, se alcanza el nivel máximo de este contaminante y se supera en más de cinco veces la Cma de la NC 39: 1999.

Para el escenario de las 13:00 (Fig. 1.6) se muestra cómo la dispersión de la concentración de NO₂ supera la Cma establecida por la NC 39: 1999 y afecta la mitad noreste (NE) de la zona urbana de Güira de Melena, en los alrededores del Vertedero, con un radio de 1 000 m y una ligera inclinación en forma de cuña al noroeste (NW), y del grupo electrógeno, con un radio de 200 m y ocupando toda la parte entre las dos fuentes, se alcanza el nivel máximo de concentración para este contaminante y se supera en más de cinco veces la Cma de la NC 39: 1999.

En el escenario diario en 24 h (Fig. 1.7) se aprecia cómo la dispersión de la concentración de PM₁₀ supera la Cma establecida por la NC 39: 1999 y afecta el noreste (NE) del pueblo de Güira de Melena, en los alrededores del Vertedero, con un radio de 800 m y una prolongación hacia el sur (S) en forma de cuña hasta el grupo electrógeno, se alcanza el valor máximo de contaminación de este elemento contaminante y se supera en **más de** cinco veces la Cma de la NC 39: 1999.

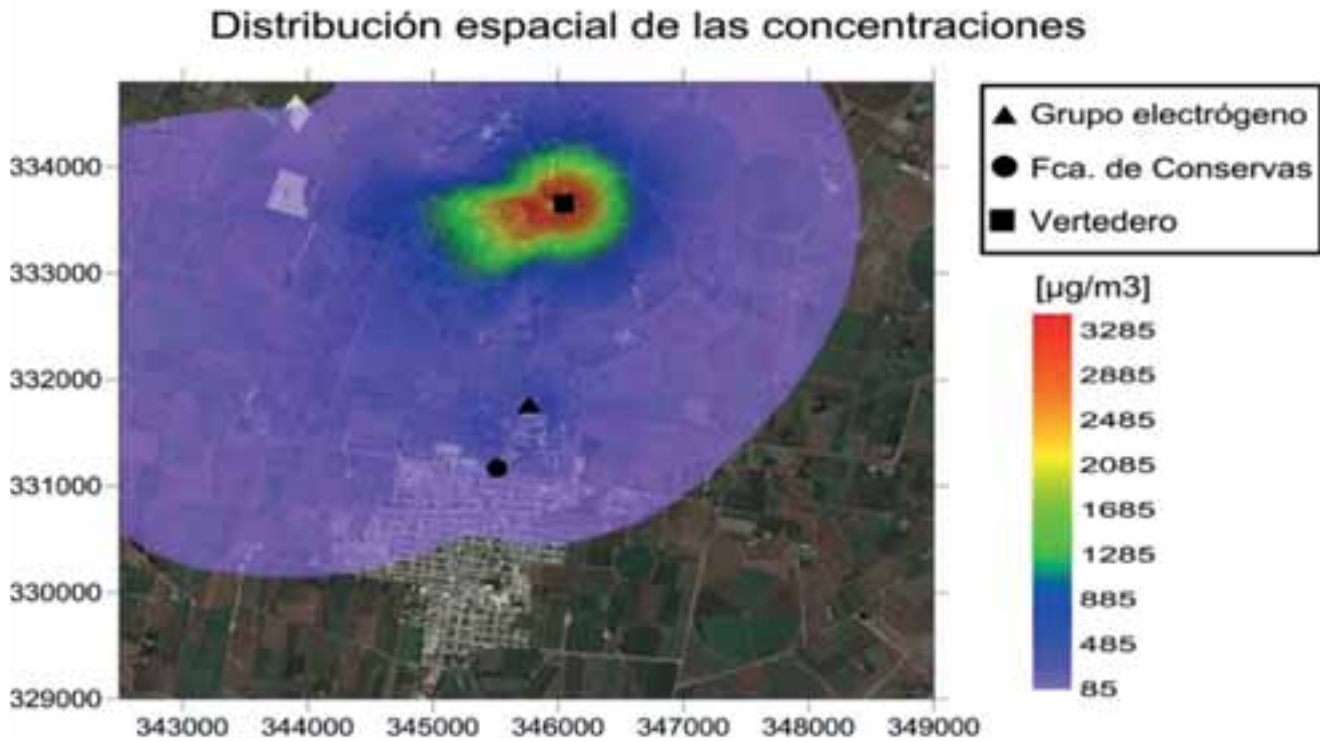


Fig. 1.5 Dispersión de las concentraciones de NO₂ a las 07:00.

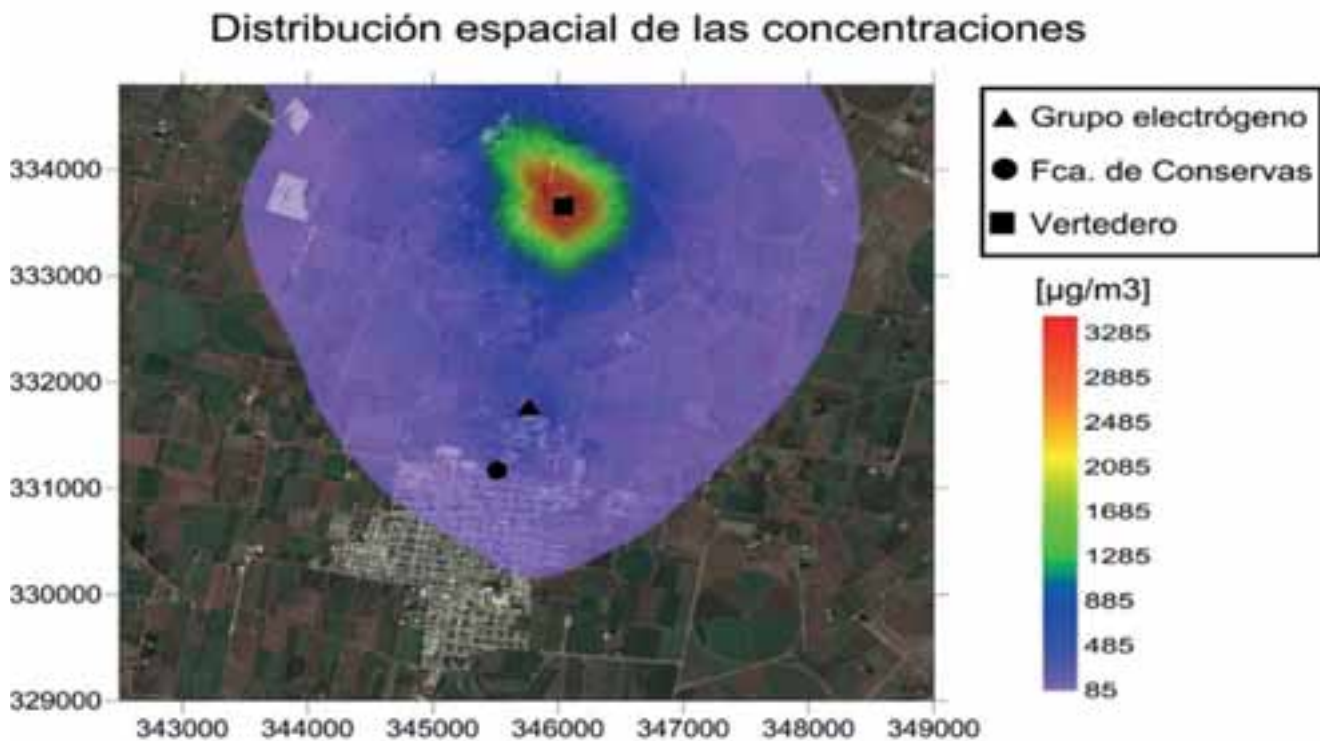


Fig. 1.6 Dispersión de las concentraciones de NO₂ a las 13:00.

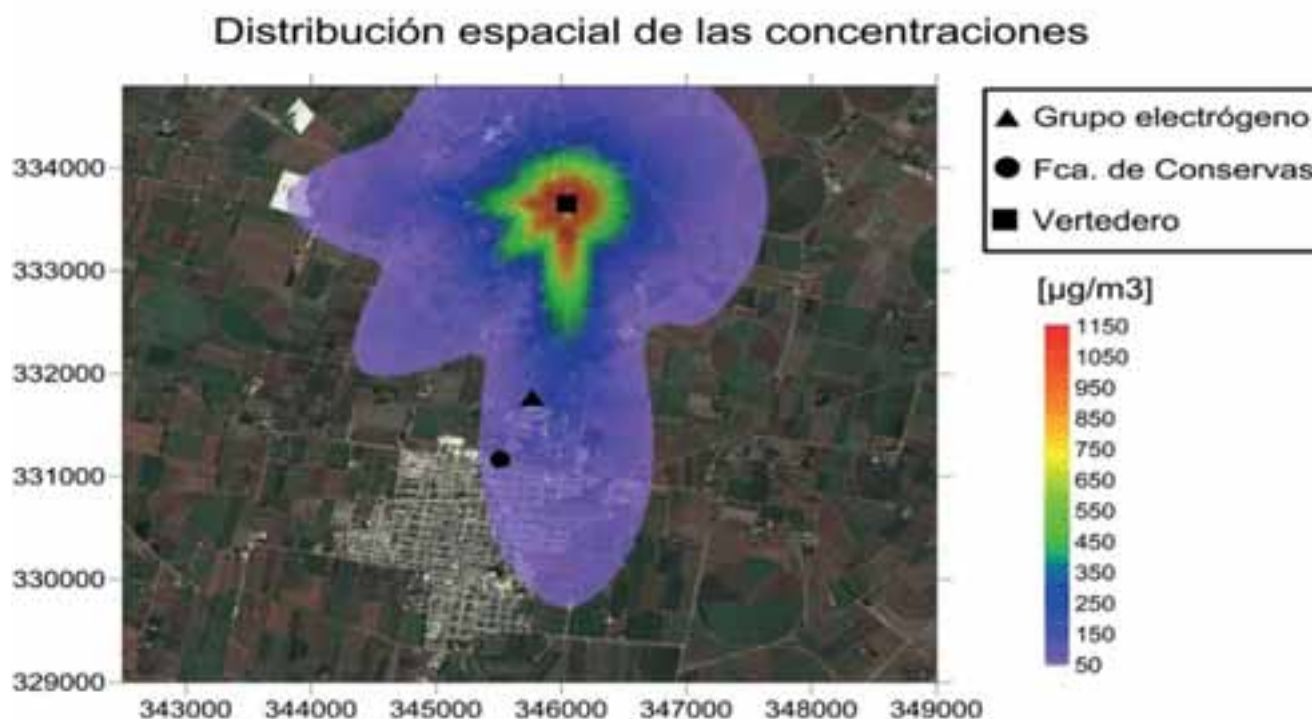


Fig. 1.7 Dispersión de las concentraciones de PM10 diario.

Evaluación de la calidad del aire a partir de las concentraciones obtenidas

Para evaluar la calidad del aire de una zona se tiene en cuenta el contaminante que más supera la *Cma* en cada escenario, según establece la NC 111: 2004; en Güira de Melena se consideraron las concentraciones de NO₂ para los escenarios de las 07:00 y las 13:00, mientras que para el diario en 24 h se tuvo en cuenta el PM₁₀.

En el escenario de las 07:00 (Fig. 1.8), donde se observa cómo la calidad del aire es buena para la parte sur (S) del pueblo, en la parte centro-sur se evaluó como aceptable; en el centro-norte, como deficiente; en el norte del poblado, incluyendo la Fábrica de conservas, como mala; en los alrededores del Vertedero, con un radio de 1 000 m, y del grupo electrógeno, con 200 m, con una desviación en forma de cuña hacia el oeste-suroeste (WSW), es crítica; y más alejado de estas dos fuentes, ocupando la zona entre estas, se considera pésima.

La figura 1.9 muestra la evaluación del escenario de las 13:00; se aprecia una calidad del aire buena para la parte suroeste (SW) de la zona urbana; en la parte del centro-suroeste, esta se evalúa como aceptable; en el centro-noreste, como deficiente; y en el noreste del pueblo, incluyendo la Fábrica de conservas, como mala. En los alrededores del Vertedero, con un radio aproximado de 1 000 m, y del grupo electrógeno, con 200 m, con una desviación en forma de cuña hacia el noroeste (NW), ocupando la zona comprendida entre estas dos fuentes, es crítica; y más alejado de las fuentes se considera pésima.

La figura 1.10 muestra el escenario diario de las 24 h en Güira de Melena; se observa cómo en la parte oeste-suroeste (WSW) del poblado la calidad del aire es buena; en el centro, de norte a sur, se aprecia una estrecha banda de 150 m de ancho evaluada como aceptable y otra banda un poco más ancha, de 250 m, valorada como deficiente; al noreste del pueblo, incluyendo la Fábrica de conservas, se evalúa de

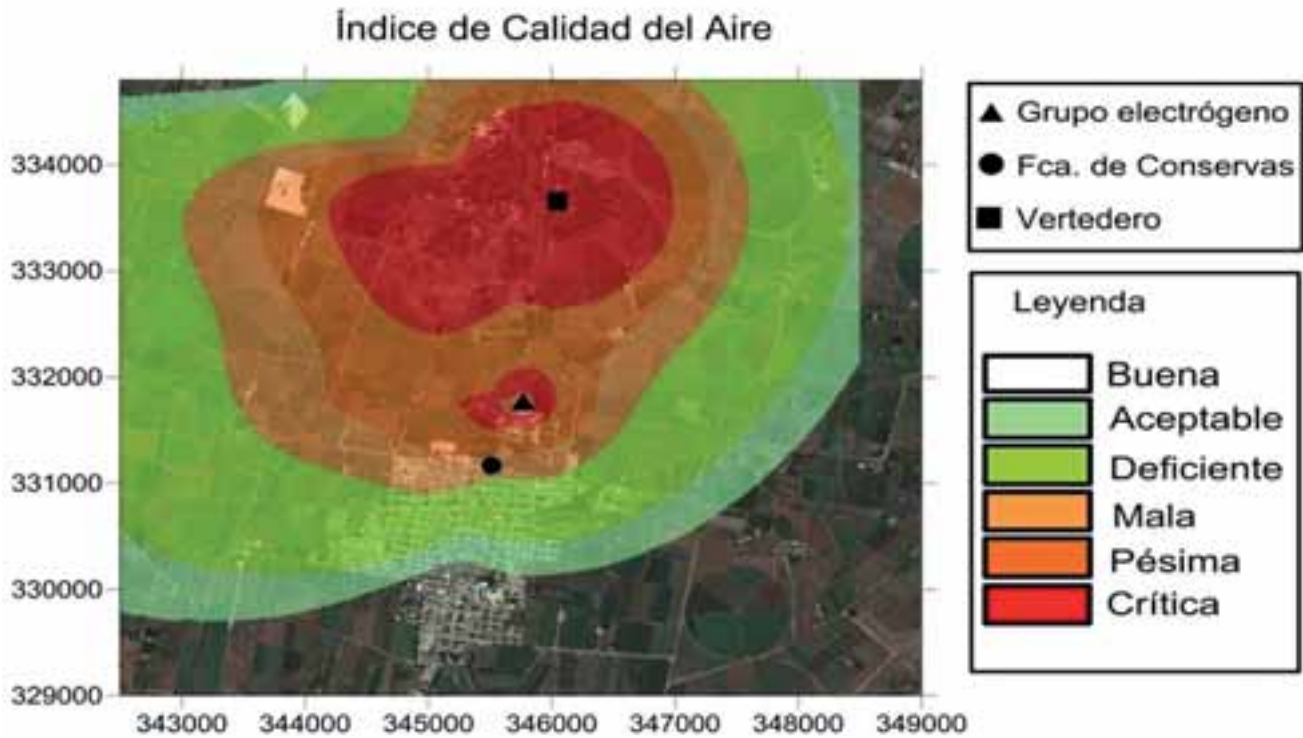


Fig. 1.8 Evaluación de la calidad del aire a las 07:00 en Güira de Melena.

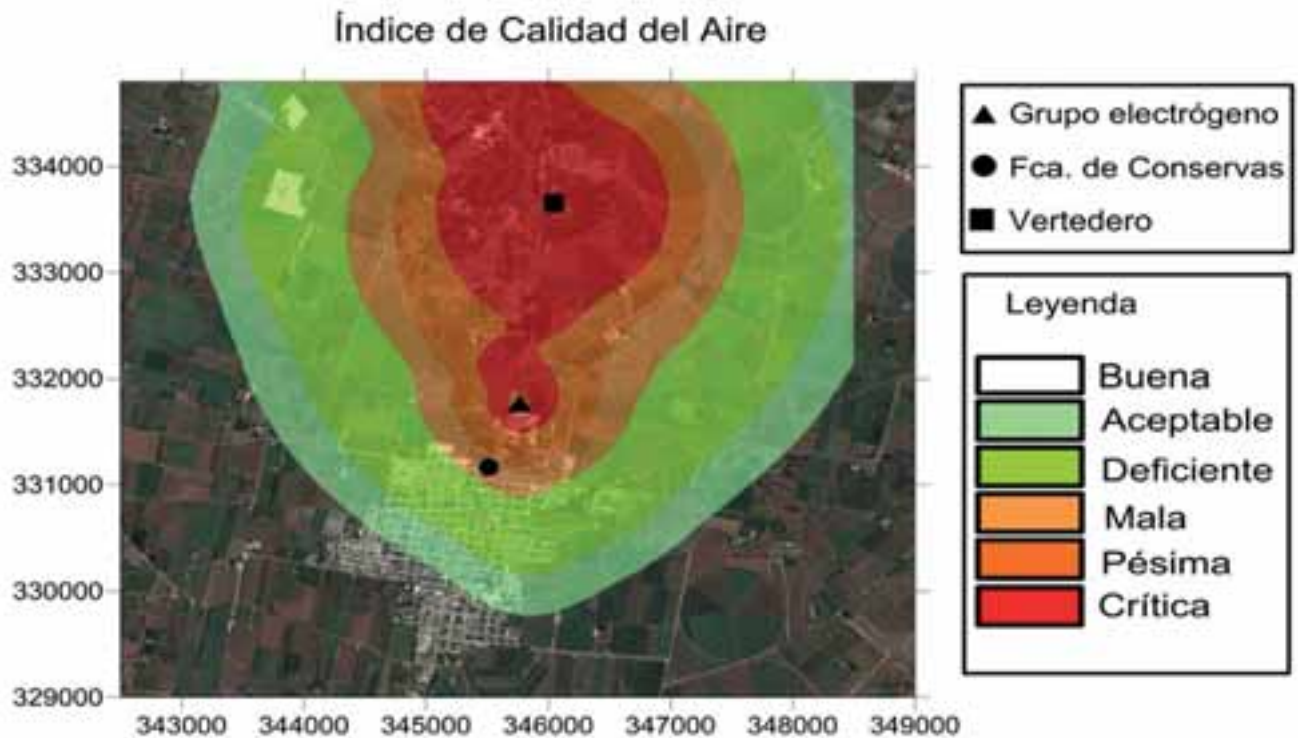


Fig. 1.9 Evaluación de la calidad del aire a las 13:00 en Güira de Melena.

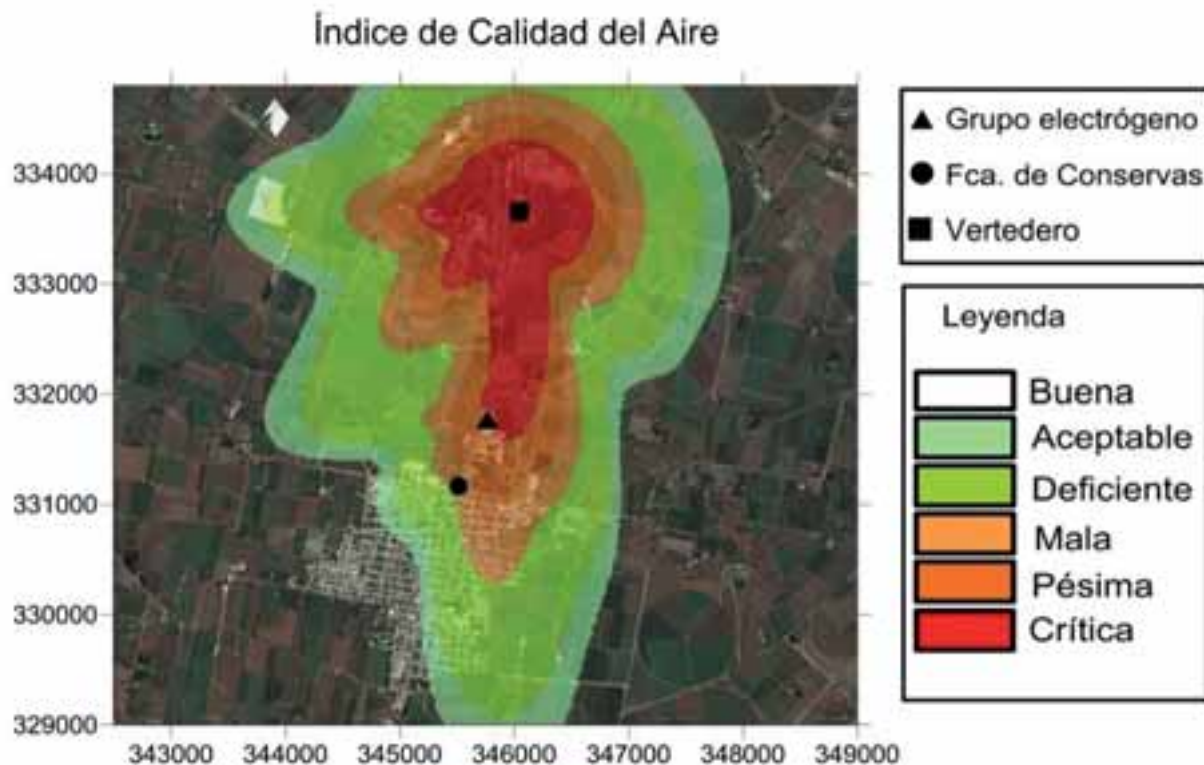


Fig. 1.10 Evaluación de la calidad del aire diaria en Güira de Melena.

mala alrededor del Vertedero, con un radio de 800 m. Existe una prolongación en forma de cuña hasta la cercanías del Grupo electrógeno donde es crítica, mientras que **más alejado del** Vertedero, incluido el Grupo electrógeno y las primeras seis cuerdas del noreste del pueblo, se cataloga de pésima.

Conclusiones

Con el estudio realizado en esta investigación se arriba a las conclusiones siguientes

1. Los cálculos de las emisiones de las fuentes fijas en **Güira de Melena demuestran cómo** el Vertedero es la fuente más emisora (89.9 %) del total de emisiones por fuentes, y el CO resulta el contaminante más emitido, con 57.9 % del total de emisiones por contaminantes.
2. El Vertedero se identifica como la fuente más emisora, con el mayor impacto negativo sobre la calidad

del aire y un mayor aporte a las concentraciones de contaminantes.

3. El escenario de las 13:00, con el viento del norte, resultó el más perjudicial; se alcanzan los valores máximos de concentración de todas las fuentes y se dispersan los contaminantes sobre el pueblo de Güira de Melena. Los sectores más afectados son el norte y el noreste.
4. La calidad del aire en el asentamiento urbano de Güira de Melena se considera buena para la zona sur; es de aceptable a deficiente en su parte central, y alcanza la categoría de mala en los sectores norte y noreste.

Recomendaciones

1. Continuar evaluando la calidad del aire en Güira de Melena a partir de las emisiones de otros tipos de fuentes, como los 800 tractores con que cuenta el municipio, los cuales emiten 103.9 ton/año de con-

taminantes, no tomados en cuenta para esta investigación en la cual, solamente, se trabajó con fuentes fijas.

2. Extender este tipo de investigaciones a otros municipios de la provincia, e involucrar en estas a las autoridades de los gobiernos municipales, los centros de gestión contra riesgo y catástrofe, el CITMA y la población en general; a la vez, propiciar la creación de una conciencia y una cultura ambientales con miras a reducir en lo posible las emisiones de contaminantes a la atmósfera.
3. Tomar medidas de mitigación con respecto a las emisiones de contaminantes a la atmósfera en Güira de Melena; se aconseja no quemar el Vertedero cuando la dirección del viento está entre el norte y el este-noreste.

Referencias bibliográficas

- ÁLVAREZ, O. 1991. Diagnóstico y pronóstico de la contaminación del aire por SO₂ y H₂S, en Moa. Modelación con condiciones de terreno plano. Tesis de doctorado, Instituto de Meteorología.
- BATCHVAROVA, E. & GRYNING, S. E. 1991. "Applied model for the growth of the daytime mixed layer", *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 261-274.
- BERLYAND, M. E. 1975. Problemas actuales de la difusión atmosférica y la contaminación de la atmósfera (en ruso).
- CITMA. 2011. Estrategia Ambiental Nacional 2011-2015, Versión 1.10 23-05-2011.
- CUESTA, O. & CABRERA, A. 1994. "El NO₂ troposférico en diferentes sistemas meteorológicos en dos localidades de la Ciudad de La Habana", *Atmósfera*, 7, 31-46.
- CUESTA, O. 1995. Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del Nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situación sinóptica. Tesis de doctorado en Ciencias Geográficas, INSMET.
- CUESTA, O., et al., (2000): Caracterización del Medio Ambiente Atmosférico en la Ribera Este de la Bahía de La Habana. Informe científico-técnico, Instituto de Meteorología, La Habana, 43 pp.
- CUESTA, O., WALLO, A., COLLAZO, A., ARRIBA, A., GONZÁLEZ, M., LABRADOR, R., SÁNCHEZ, P., ANANÍAS, G., ORTÍZ, P., LEÓN, A., GUEVARA, V., CAMPOS, A., SARDIÑAS, M., IGLESIAS, R. & GATTORNO, E. Enfermedades respiratorias y calidad del aire en la zona de la ribera este de la bahía de La Habana. Memorias publicadas en el Congreso Iberoamericano de Meteorología, 2003b, La Habana, 58-72.
- CUESTA, O., WALLO, A., COLLAZO, A. & CASTELLANOS, P. 2005. "Contaminación atmosférica en el municipio Regla: Aplicación del índice de calidad del aire (ICA)", *Revista Cubana de Meteorología*, 12, 38-44.
- CUESTA, O., COLLAZO, A., WALLO, A., LÓPEZ, R. & MAREN, Á. 2008. Deposición de Nitrógeno Atmosférico en Zonas Urbanas y Rurales en Cuba. V Simposio Universitario Iberoamericano Sobre Medio Ambiente (V SUIMA), 102-116.
- CUESTA, O., COLLAZO, A., GONZÁLEZ, Y., CARRILLO, E., SOSA, C., MANRIQUE, R., SÁNCHEZ, P., VALDES, A., MANSO, R., BATULE, L., LÓPEZ, R., FONSECA, M., GARCÍA, E., MARCELO, G. & ALONSO, A. 2012. Inventario de emisiones de las principales fuentes fijas industriales de la Habana, La Habana, Instituto de Meteorología.
- EMEP/CORINAIR. 1996. Atmospheric emission inventory guidebook, Vol I and II. European Environment Agency. Copenhagen. Recuperado el 1ro. de abril de 2013, de: <https://books.google.com.cu/books?id=3YgLuMnXM0AC>
- EMEP/CORINAIR. 2007. Guía para la realización del inventario de emisiones atmosféricas de la Agencia Europea de Medioambiente. Recuperado el 1ro. de abril de 2013, de: www.obsa.org/PaginasOBSA/Navegacion/DetalleDocumentacion.aspx

- GONZÁLEZ, M. 2010. Estudio de la calidad del aire en el entorno de la CUJAE. Tesis presentada en opción al título de máster en Ingeniería en Saneamiento Ambiental, ISPJAE.
- GONZÁLEZ, Y. & COLLAZO, A. 2011. Modelo NC Versión 3.0, La Habana, Instituto de Meteorología.
- GONZÁLEZ, Y. 2012. Manual de Usuario, Modelo NC v3.0, La Habana, Instituto de Meteorología.
- GONZÁLEZ, Y., COLLAZO, A., RODRÍGUEZ, D. & CUESTA, O. 2012. Evaluación de la calidad del aire, en la ciudad de Pinar del Río, considerando las emisiones de sus principales fuentes estacionarias. 16 Convección Científica de Arquitectura e Ingeniería, La Habana, 1-12.
- GOOGLE EARTH. 2013. Image U. S. Geological Survey. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO.
- GRYNING, S. E. et al., 2007. "On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface layer", *Boundary-Layer Meteorology*, 124(2):251-268. doi: 10.1007/s10546-007-9166-9.
- LÓPEZ, C. 1978. Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en la Ciudad de la Habana, Informe científico-técnico, no. 46, Instituto de Meteorología, 14 pp.
- LÓPEZ, C. 1984. Factores meteorológicos de la contaminación regional del aire en Cuba, Tesis de doctorado, Instituto de Meteorología, Ciudad de La Habana.
- LÓPEZ, C. 2006. Introducción a la gestión de la calidad del aire (versión electrónica), Registro de derecho de autor no: 583-2007, INSMET, Centro de Química y Contaminación Atmosférica, Ciudad de la Habana, 703 pp.
- MOLINA, E. E. et al., 2009. Propuesta de concentraciones máximas admisibles de contaminantes del aire en asentamientos humanos en Cuba 3.0, Informe científico-técnico, La Habana, 2009, 58 pp.
- NC: 39. 1999. NORMA CUBANA, Calidad del aire. Requisitos higiénicos sanitarios. Enmienda 1, Comité Estatal de Normalización, CITMA, La Habana, Cuba.
- NC: 111. 2004. NORMA CUBANA, Calidad del aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos, Comité Estatal de Normalización, CITMA, La Habana, Cuba.
- NC: 242. 2005. NORMA CUBANA, Guía de datos tecnológicos para el inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos desde fuentes industriales estacionarias, Comité Estatal de Normalización, CITMA, La Habana, Cuba.
- NC: TS 803. 2010. NORMA CUBANA, Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor, Comité Estatal de Normalización, CITMA, La Habana, Cuba.
- ONE. 2010. Oficina Nacional de Estadística. Recuperado el 5 de mayo de 2013, de: <http://www.one.cu/aed2010/02La%20Habana/Municipios/17%20Guira%20de%20Melena/Index.htm>
- SEINFELD, J. H. & PANDIS, S. N. 2006. *Atmospheric and Physics from Air Pollution Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2nd. ed.
- THOMSON, D. J. 2000. The meteorological input module, ADMS 3 Technical Specification. Cambridge Environmental Research Consultants. Recuperado el 5 de mayo de 2013, de: www.weblakes.com/support/.../WorldQualityADM3...
- 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", *Environmental Impact Assessments*, 97-112.
- TURTÓS, L. 2012. Implementación de modelos refinados de dispersión local de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes estacionarias. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en Ciencias Meteorológicas, CITMA, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía CUBAENERGIA, La Habana.

- USEPA. 1995. Compilation of air pollutant emission factors. AP-42, 5th. ed. (and supplements A and B, 1996). US Environment Protection Agency, Research Triangle Park, N. C. Recuperado el 1ro. de abril de 2013, de: <http://www.epa.gov/ttn/chief/>
- USEPA. 1998. Compilation of air pollutant emission factors, volume 1: Stationary point and area sources, fifth edition, AP-42. US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, N. C. Recuperado el 1ro. de abril de 2013, de: nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=20005IRB.TXT
- USEPA. 2000. Air Quality Index. A Guide to Air Quality and your Health. EPA 454/R-00-005, June, 2000. Recuperado el 1ro. de abril del 2013, de: nepis.epa.gov/Adobe/PDF/000032QD.PDF

Agradecimientos

Este trabajo, fruto del compañerismo y la solidaridad, fue posible gracias a la colaboración y la ayuda de varias personas a las que no puedo dejar de mencionar: Los compañeros del Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera, el colectivo de trabajo de la Estación Meteorológica de Güira de Melena, los trabajadores de la Fábrica de conservas, Hidráulica, Grupos electrógeno y Servicios Comunes del municipio, quienes aportaron la información y los datos valiosos en las encuestas realizadas.