



INECC

INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

2016

Estudios ambientales de las emisiones vehiculares, producción de ladrillo, exposición personal a contaminantes, monitoreo de la calidad del aire, hidrocarburos y partículas, en la ciudad Victoria de Durango, Durango



Coordinación General de Contaminación
y
Salud Ambiental

Directorio

Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Dr. J. Víctor Hugo Paramo Figueroa

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC

Mtra. Ileana Villalobos Estrada

Coordinadora de Asesores del INECC

Dr. Arturo Gavilán García

Director de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas Productos y Residuos

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor

Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta

M. en C. José Abraham Ortíz Álvarez

Subdirector Economía Industrial

M. en C. José Andrés Aguilar Gómez

Subdirector de Modelos e Inventarios

M. en C. Roberto Basaldud Cruz

Subdirector de Análisis Integral de la Contaminación Atmosférica

Biol. Salvador Blanco Jiménez

Subdirector de Investigación en Contaminación Atmosférica

Ing. Oscar Alfredo Fentanes Arriaga

Subdirección de Evaluación de Emisiones y Monitoreo Atmosférico

Dr. Gerardo Ruiz Suarez

CCA-UNAM

Revisor

D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Periférico Sur 5000. Col Insurgentes Cuicuilco

C. P. 04530. Delegación Coyoacán, México D. F.

<http://www.inecc.gob.mx>

Resumen Ejecutivo

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático "INECC" y la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango firmaron un convenio de colaboración con el objetivo principal de generar información que apoye la gestión de la calidad del Aire en la Ciudad Victoria de Durango. En seguimiento a los compromisos del convenio, durante el mes de octubre del 2015 se realizaron una serie de actividades cuyos objetivos fueron:

- Identificar las áreas de oportunidad para mejorar la operación de la infraestructura de monitoreo de calidad del aire,
- Evaluar y conocer las concentraciones de contaminantes criterio en el aire,
- Determinar la concentración y caracterizar la composición de las partículas y de los compuestos orgánicos volátiles presentes en el aire, para generar indicadores sobre sus posibles fuentes de emisión,
- Caracterizar las emisiones del parque vehicular en circulación, y
- Determinar el desempeño ambiental de los hornos ladrilleros ecológicos que operan en Durango para cuantificar su impacto en el medio ambiente y en los trabajadores de la industria artesanal de producción de ladrillos.

La primera actividad se realizó en la primera semana de octubre y consistió en visitar las estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en la ciudad, para realizar un diagnóstico general de operación, mantenimiento y ubicación de cada estación incluida la unidad móvil de Estado. Durante las visitas, personal del INECC realizó ajustes en la operación de algunos equipos por lo cual se pudo mejorar la operación. Los resultados de este trabajo fueron comunicados con oportunidad a la autoridad responsable, para que se realicen las correcciones necesarias, priorizando el mantenimiento de la estación móvil de monitoreo. A continuación, se presentan las recomendaciones generadas en esta actividad del estudio:

- 1) Reubicar la estación SRNyMA hacia el Sureste, a una distancia aproximada de tres kilómetros para mejorar su cobertura y representatividad.
- 2) Establecer un programa que incluya actividades de operación, calibración, mantenimiento y pruebas de desempeño de la infraestructura de medición, en donde se defina:
 - ✓ Un plan de verificación / calibración de los controladores de flujo y del generador de ozono de un sistema de calibración. Este calibrador dinámico funcionaría como patrón de referencia para el resto de los calibradores del sistema de monitoreo.
 - ✓ Un plan de verificación / calibración para los monitores de partículas, para lo cual es necesario contar con un medidor volumétrico con sensores de presión y temperatura, así como laminillas de cristal de cuarzo para los detectores de masa de los monitores marca Thermo Scientific.
 - ✓ Establecer la periodicidad de las visitas a las estaciones y de las acciones a realizar en cada visita, definiendo las responsabilidades del personal respecto a cada actividad definida en el programa.
- 3) Asignar por lo menos a un técnico de tiempo completo, al seguimiento institucional del monitoreo de calidad del aire, garantizando su adecuada capacitación, tanto en la operación de la estación, como en el manejo y análisis de los datos.

Posterior a la revisión de la infraestructura de monitoreo de calidad del aire de la Ciudad, se iniciaron mediciones de contaminantes del aire, con una estación móvil propiedad del INECC, misma que se colocó en las instalaciones de la escuela Primaria Justo Sierra, sitio que presenta la particularidad de encontrarse en zona urbana y dentro de la zona ladrillera de la Ciudad. El equipo se puso en operación a partir del día nueve de octubre y continuó midiendo, por 18 días, las concentraciones de contaminantes criterio y cuatro variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa dirección y velocidad del viento). Los análisis de los registros continuos de calidad del aire mostraron los siguientes resultados;

- I. Todos los contaminantes gaseosos presentaron bajas concentraciones, mismas que se ubican por debajo del valor normado en el país. En el caso del ozono, la concentración máxima registrada representa el 64% del valor promedio horario establecido en la norma NOM -020-SSA1-2014. Para los casos de los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, y el dióxido de azufre, los valores de concentración máximos registrados, alcanzaron el 16%, 11% y 3% respectivamente, respecto a los valores regulados en las normas NOM-023-SSA1-1993, NOM -021-SSA1-2006 y NOM -022-SSA1-2006.
- II. En el caso de las partículas, las menores a 2.5 micras presentaron concentraciones cercanas al límite permisible en la NOM-025-SSA1-2014, al alcanzar concentraciones de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ cuando su valor establecido por la NOM correspondiente es de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en promedio de 24 horas. Las partículas PM_{10} se constituyeron como el contaminante con mayor incidencia en cuanto a problemas de contaminación en la ciudad, ya que siete de los ocho días con datos válidos, se presentaron excedencias al estándar nacional establecido en la NOM -025-SSA1-2014, que es de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, registrándose un valor máximo de $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio de 24 horas. Considerando que la estación móvil de monitoreo de calidad del aire sólo operó por un pequeño periodo de tiempo, se analizaron los datos generados en el año 2014 de dos estaciones, encontrándose similitud en cuanto a que sólo las partículas menores a 10 micras son las que presentan excedencias normativas.
- III. El análisis de los promedios horarios de concentración de PM_{10} muestran que las concentraciones de partículas en el aire se mantienen en niveles bajos, entre las 0:00 y las 7:00 horas, a partir de las 8:00 horas se presenta un acelerado crecimiento hasta alcanzar el valor máximo del día a las 10.00 horas. Posteriormente, se presenta una disminución constante de las concentraciones del contaminante hasta que, a partir de las 15 horas, nuevamente comienzan a elevarse las concentraciones hasta alcanzar valores intermedios que se mantienen por cerca de siete horas, para comenzar a descender nuevamente.

El comportamiento horario de las concentraciones de PM_{10} determinado en el monitoreo realizado, muestra una clara relación con el perfil tradicional de la movilidad en las zonas urbanas (perfil que no se generó para la Ciudad de Durango), lo cual permite suponer que la mala calidad del aire registrado en la zona, se debió a la resuspensión de polvo que se genera por la circulación de los automotores en vialidad.

Para apoyar con mayores elementos al análisis del monitoreo continuo se realizó la caracterización química de las partículas, mostrando que las fuentes puntuales y de área

aportan el 58% de las $PM_{2.5}$, correspondiendo al suelo, un porcentaje de contribución del 17%. La información anterior sugiere que, aunque son las fuentes puntuales y de área, las que mayor participación en la generación de partículas tienen (lo cual es consistente con el inventario de emisiones del municipio), es la resuspensión del polvo acumulado en las vialidades lo que puede estar elevando consistentemente la concentración de partículas en el aire. Dado lo anterior, las recomendaciones para reducir la concentración de contaminantes en el aire, son realizar actividades de pavimentación o recubrimiento de las vialidades sin pavimentar y realizar actividades de limpieza de polvos en vialidades con carpeta asfáltica.

El monitoreo de la calidad del aire se complementó con la caracterización de las partículas y de los compuestos orgánicos volátiles presentes en la atmósfera, para lo cual se desarrolló una campaña de toma de muestras entre los días 15 y 22 de octubre, en las tres estaciones de monitoreo de calidad del aire de la Ciudad y, además, se tomaron muestras de una zona ladrillera para distinguir marcadores químicos de la quema de biomasa utilizada en los hornos ladrilleros. Los resultados obtenidos indican lo siguiente:

- I. Los niveles de concentración promedio de $PM_{2.5}$ en la zona urbana son del 33% del valor normado de protección de la salud para periodos de exposición de 24 horas. Este porcentaje es distinto a lo detectado en el monitoreo con la estación móvil (75%), siendo los métodos de medición utilizados (continuo vs manual) así como el sitio de muestreo, las causas de esta diferencia.
- II. En las partículas $PM_{2.5}$ muestreadas en la zona urbana, se detectaron indicadores químicos de emisiones vehiculares, industriales, de resuspensión del suelo y de quema de biomasa, siendo la industria y las fuentes de área, las que tienen una mayor contribución (62%), seguido del 17% correspondiente a erosión y resuspensión del suelo, finalmente se tiene una participación del 10% correspondiente a los automotores.
- III. Los niveles de concentración de los COVs tóxicos estudiados son bajos; de hecho, varios compuestos mostraron concentraciones menores al Límite de Cuantificación del Método y, para el caso de los BTEX, se observaron concentraciones menores a los encontrados en otras entidades federativas del país.
- IV. La medición de metales pesados tóxicos, tales como plomo, níquel y vanadio, se encontraron en niveles muy bajos, para el caso del plomo la norma de exposición promedio trimestral para partículas es de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en contraste con este estudio que se encontraron concentraciones por debajo de $0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- V. Se identificaron tres sustancias: propileno, acroleína y 1,4-diclorobenceno, en las emisiones de la quema de leña en las zonas ladrilleras, que se utilizaron como marcadores de la quema de biomasa, los cuales presentaron en las ladrilleras, concentraciones mayores a los registrados en las áreas urbanas.

Estos indicadores de quema de biomasa se localizan en la zona ladrillera y en la zona urbana, por lo que hay evidencia que existe quema de biomasa en la ciudad, aunque no es posible diferenciar entre la quema de biomasa en los hornos ladrilleros que están dentro de la Ciudad o en algún otro proceso (quema de carbón para asados o de leña para cocción de alimentos y calentamiento de agua). En el caso de las acciones tendientes a conocer las condiciones ambientales de dos de las fuentes de

emisión que destacan en el inventario de emisiones de la Ciudad, se trabajó en la caracterización del parque vehicular y de los hornos ladrilleros.

La evaluación de las fuentes móviles se realizó en la segunda semana de octubre 2015, obteniéndose datos de 24,326 automotores, aunque el análisis de la información se realizó con las unidades de las cuales fue posible conocer sus datos técnicos (marca, modelo, combustible, uso, etc.), y cuyos datos fueron válidos de acuerdo a criterios de velocidad y aceleración, lo cual redujo la muestra a 13,134 vehículos. La revisión de las emisiones de los automotores se realizó con una tecnología de evaluación a distancia, por lo que no existió necesidad de detener la circulación de las unidades y, además, se midieron sus emisiones en las condiciones reales de circulación.

Los resultados más importantes fueron:

- I. El 36% de la flota registrada por el sistema de medición correspondió a automóviles particulares, el 41% a las camionetas ligeras (pick up, SUV y VAN), un 15% fueron taxis y el resto corresponde a otro tipo o uso vehicular (autobuses, camiones de carga y motocicletas). Resalta de manera significativa el porcentaje de taxis, ya que el número el padrón vehicular Estatal de este tipo de unidades alcanza el 1.6% del número total de unidades, por lo que nuestro análisis en realidad muestra la proporción de las unidades en circulación, lo cual es un indicador de un intenso uso de taxis en la ciudad, situación que provocó la medición, en varias ocasiones, de este tipo de vehículos.
- II. Se identificó que el 86% del parque vehicular analizado, presentó matrícula de registro del Estado de Durango, 7% son unidades importadas usadas, 6% tienen matrícula de otra entidad del país y el 1% restante son unidades que portan matrícula de algún Estado de los Estados Unidos de Norteamérica. En cuanto a la edad del parque vehicular, el 45% de las unidades que circulan en la Ciudad son modelos de 10 o más años de antigüedad, lo que se ve reflejado en las tasas de emisión, ya que los vehículos que están dentro de este estrato de antigüedad, contribuyen con la emisión del 78% de hidrocarburos, 72% de monóxido de carbono y 69% de óxido nítrico.
- III. En lo que respecta al cumplimiento de las normas oficiales mexicanas en materia de emisiones por parte de la flota en circulación, se realizó una comparación de los resultados del sensor remoto con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-047-SEMARNAT-2015, observándose los siguientes resultados:
 - Al menos el 40% de la flota en circulación no cumple con los límites para HC.
 - El 25% de pick up y taxis; así como el 20% de autos particulares no cumplen con los límites para CO.
 - El 20% de la flota, con excepción de los taxis que asciende a 30%, no cumple con los límites para NO.
 - En general, el 48% de la flota en circulación presentaría incumplimiento con la NOM-041-SEMARNAT-2015, al presentar emisiones superiores a, por lo menos, uno de los tres límites máximos permisibles regulados.

Los datos muestran la existencia de una flota vehicular con problemas de mantenimiento y el probable deterioro o retiro del convertidor catalítico, lo cual provoca alta emisión de contaminantes en vehículos a gasolina. Sin embargo y a pesar de esta condición, la información de calidad de aire del 2014, muestra que los contaminantes criterio relacionados con las emisiones del parque vehicular, se encuentran dentro de la regulación aplicable a excepción del PM₁₀. En el caso de este

contaminante, son las unidades a diésel, las que presentan una alta tasa de emisión, pero en la campaña de revisión de emisiones vehiculares, fue notoria la escasez de autobuses o camiones pesados que usen diésel en su operación diaria, razón por la cual, no se presenta un resultado respecto al desempeño ambiental de estas unidades.

En consecuencia, las acciones encaminadas a prevenir y controlar la emisión de contaminantes provenientes del parque vehicular de la Ciudad de Victoria de Durango son las siguientes:

- ✓ Iniciar con un programa de verificación de emisiones vehiculares, focalizando la atención en las unidades de mayor edad y de uso intensivo. Esta medida es necesaria tanto para prevenir el deterioro de la calidad del aire como para cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas asociadas a este tipo de programas y que son de aplicación obligatoria.
- ✓ Establecer un programa de vigilancia en vialidad de las emisiones vehiculares de las unidades a diésel y de los automotores a gasolina que presenten emisiones con coloración azul o negra (altos emisores de contaminantes), mismos que deben ser sancionados y obligar a sus propietarios a darles mantenimiento.

Finalmente, se reporta la realización de pruebas para cuantificar la tasa de emisión de los hornos tradicionales de producción de ladrillo artesanal, así como su comparación con las emisiones que generan los hornos ecológicos apoyados impulsados por el gobierno de Durango. Las pruebas fueron realizadas los días la segunda semana de octubre y consistieron en obtener el perfil temporal de emisión de partículas, carbono negro y carbono orgánico, durante las 18 horas que, aproximadamente, dura un proceso de producción de ladrillo. De manera simultánea, se desarrolló una prueba de exposición de los trabajadores de esta industria, a las emisiones generadas en cada tipo de horno.

Los resultados de ambas actividades fueron:

- I. El horno ecológico registró una reducción estimada del 48% y 42% de las emisiones de $PM_{2.5}$ y carbono negro, respectivamente y 51% menor consumo energético con respecto al horno tradicional.
- II. Para los gases de combustión y de efecto invernadero CO_2 y CH_4 , la liberación en masa es mayor, entre el 27% y 62%, para el horno fijo tradicional, con respecto al horno ecológico.
- III. Se estima factible incrementar hasta en un 75% la diferencia de consumo energético y emisiones entre ambos tipos de hornos, lo cual ocurriría si se opera adecuadamente el horno ecológico. Esto presentaría los siguientes beneficios: mayor productividad, menor consumo de biocombustibles, mayor resistencia, vista y terminado del ladrillo.
- IV. Se observó que el material utilizado como combustible en el horno fijo tradicional, mismo que es utilizado en la zona urbana de Durango, mantiene una diversidad de materiales entre las que se encuentran; el triplay y aserrín, los cuales provienen de los residuos madereros y materiales de embalaje. Se ha demostrado en otros estudios realizados por el INECC, que dichos materiales pueden contener penta-clorofenol utilizado como conservador de madera. Dicha sustancia es un contaminante orgánico persistente (COP) y al ser quemado puede transformarse en dioxinas o furanos, siendo sustancias altamente contaminantes y cancerígenas. En contraste el horno ecológico, utilizó mayoritariamente biomasa de pino y aserrín para el mezclado de arcillas.
- V. En el caso de la exposición personal, los trabajadores que operaron el horno ecológico fueron comparados con trabajadores que operan el horno tradicional, indicando que los

trabajadores del Horno Ecológico-DGO fueron expuestos a mayores concentraciones de monóxido de carbono y partículas. las concentraciones de monóxido de carbono determinadas fueron de 9.2 ppm en el horno ecológico contra 7.4 ppm generadas por el horno tradicional. En el caso de las $PM_{2.5}$, los trabajadores responsables de alimentar el combustible, estuvieron expuesto a concentraciones de $908 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1,863 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los hornos tradicionales y los ecológicos de Durango, respectivamente. La mayor exposición de las personas que operan el horno ecológico, se debe a las adecuaciones en su diseño (respecto al Horno Ecológico-DGO), toda vez que se incorporaron una serie de “ventanas” en el horno que propician la salida de las emisiones a baja altura; así como a las prácticas de operación en donde no se utilizan los túneles de conducción de salida de gases de los hornos.

- VI. Dado lo anterior, se recomienda revisar e implementar un protocolo de operación del horno ecológico, con la finalidad de asegurar un manejo adecuado de los procesos de fabricación y transferencia de emisiones entre la sección de cocción y pre-secado, reduciendo la liberación de partículas y gases.
- VII. Sellar las ventanillas de observación para mayor efectividad y residencia de gases calientes en los hornos, evitando la existencia de emisiones fugitivas.
- VIII. Establecer un programa de capacitación en el parque ladrillero, para garantizar la adecuada operación de los hornos, aumentar la eficiencia energética, la producción y el beneficio económico de los trabajadores.
- IX. Continuar con el programa de vigilancia y uso de combustibles limpios, asegurando que los materiales utilizados sobre todo aquellos como el aserrín, no contengan sustancias conservadoras, las cuales no son detectables en su forma pulverizada.

CONTENIDO

1. RESUMEN EJECUTIVO	Pag
2. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.....	10
3. ESTUDIO DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.....	20
4. CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS Y COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA CIUDAD VICTORIA DE DURANGO, DGO.....	42
5. ESTUDIO DE EMISIONES VEHICULARES CON SENSOR REMOTO EN LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.....	63
6. CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES EN UN HORNO FIJO TRADICIONAL Y UN HORNO ECOLÓGICO-DGO.....	78
7. DETERMINACIÓN DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL AL MONÓXIDO DE CARBONO Y MATERIAL PARTICULADO (PM _{2.5}), DURANTE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE LADRILLO EN EL PARQUE INDUSTRIAL LADRILLERO DE DURANGO.....	96
8. DIAGNÓSTICO GENERAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO. EN 2014.....	109
9. MODELACIÓN DE LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN EL ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO.....	116
ANEXOS.....	120

DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.

Ing. Oscar Alfredo Fentanes Arriaga
Subdirección de Evaluación de Emisiones y Monitoreo Atmosférico

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

RESUMEN

En 2015, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), a través de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (CGCSA) y en coordinación con la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango, SRNyMA, llevaron a cabo una visita técnica a las tres estaciones y la unidad móvil que conforman el sistema local de monitoreo de la calidad del aire de la Ciudad de Durango, cuyo objetivo fue conocer el estado físico y operativo de los componentes de dichas estaciones, así como observar el entorno y ubicación del sitio donde se encuentran, para determinar, de forma cualitativa, la confiabilidad de los datos que generan. De la ubicación de las estaciones se observó que el arreglo de dos de las tres estaciones de monitoreo Instituto Tecnológico de Durango (ITD) y Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango (CIIDIR) es adecuado, en términos de cobertura y representatividad, una de ellas está ubicada en la zona central y la segunda en el noreste de la Ciudad; sin embargo, la estación localizada dentro de las instalaciones de la SRNyMA, presenta una limitada cobertura y baja representatividad, por lo que se sugiere reubicarla hacia el Sureste, a una distancia aproximada de tres kilómetros. Del entorno de las estaciones, las de ITD y CIIDIR cuentan con un entorno libre de obstáculos y fuentes de emisión, además son característicos de la zona en que se encuentran. Por el contrario, la estación de la Secretaría presenta árboles en la cercanía que influyen en la representatividad de las mediciones. Finalmente se revisó el equipamiento de las tres estaciones fijas y de la unidad móvil de monitoreo de calidad del aire, dicha revisión se llevó a cabo de forma completa. Sin embargo, la verificación cero / span se realizó únicamente a los equipos de la unidad móvil, ya que los analizadores de las estaciones fijas presentaron diferentes fallas que fueron documentadas para el reporte y posterior arreglo.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 200 años, pero principalmente en los últimos 50, la historia humana señala la más extraordinaria revolución técnica que ha traído como consecuencia un daño ambiental, debido al uso indiscriminado de recursos y a la introducción de agentes externos en nuestro medio ambiente. Esto se refiere, entre otras causas, a la combinación del crecimiento de las ciudades, con su correspondiente incremento en el uso de vehículos y a la rápida industrialización, así como a las deficiencias en la planeación y las regulaciones ambientales, las cuales en conjunto han originado el grave deterioro de la salud y del medio ambiente. (Martínez, 2001).

La contaminación del aire es uno de los principales problemas, tanto ambientales, como de salud pública en México. Es un fenómeno inherente al estado económico y tecnológico de nuestro país que tiene sus expresiones más graves en las grandes ciudades y las zonas fronterizas e industriales del territorio nacional. A la vez, la contaminación atmosférica es uno de los problemas más difíciles de comprender y controlar por la gran cantidad y variedad de las fuentes emisoras, la transformación de los contaminantes en la atmósfera y los efectos que éstos tienen sobre la salud y los ecosistemas. Para evaluar el impacto de la contaminación del aire en la población y los recursos naturales es indispensable contar con sistemas, redes y programas adecuados de monitoreo atmosférico bajo esquemas uniformes de operación y aseguramiento de calidad (Martínez, 2001).

Actualmente, México cuenta con una cantidad significativa pero insuficiente de sistemas, estaciones y equipos destinados a las tareas de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire. Esta infraestructura opera bajo una gran diversidad y variabilidad de condiciones y bajo la responsabilidad de organismos de diferente naturaleza, entre los que destacan gobiernos estatales, gobiernos municipales, patronatos y compañías privadas y paraestatales. Por lo anterior radica la importancia de que el INECC continúe fortaleciendo el monitoreo de la calidad del aire, mediante visitas técnicas que promuevan las buenas prácticas que apoyen el diagnóstico y la vigilancia del estado de la calidad del aire, que genere información real, válida y comparable entre las diferentes estaciones y redes, como instrumento fundamental en el establecimiento de políticas ambientales de protección a la salud de la población y de los ecosistemas.

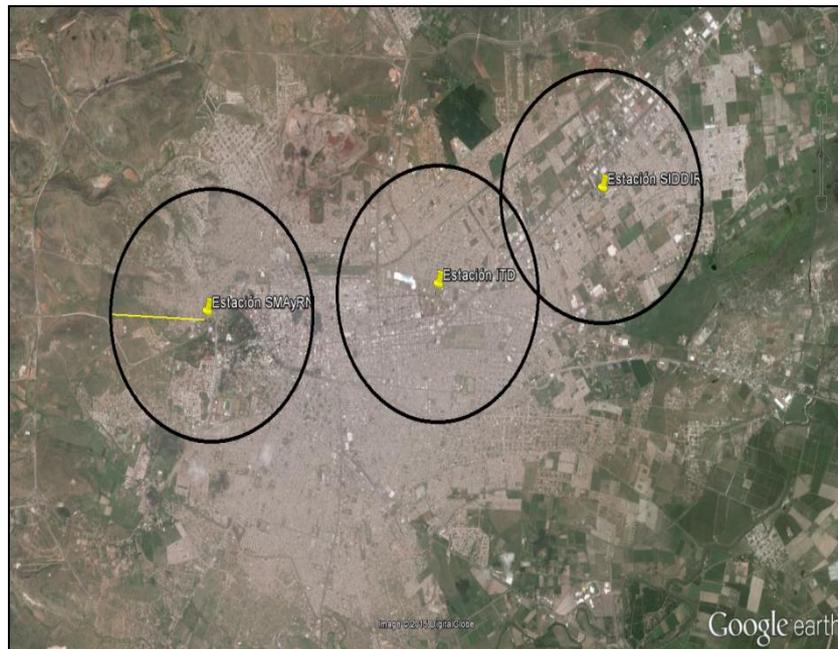
La presente visita técnica al sistema de monitoreo de la ciudad de Victoria de Durango tuvo el objetivo de conocer el estado físico y operativo de los componentes de dichas estaciones, así como observar el entorno y ubicación del sitio donde se encuentran, con el fin de identificar las áreas de oportunidad en la generación de datos de calidad del aire y determinar la confiabilidad de los datos que se generan.

2. ACTIVIDADES

Se realizó una visita técnica a cada una de las estaciones automáticas que componen el Sistema de Monitoreo local para determinar el estado físico y operativo de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire; así como de observar el entorno y ubicación donde se encuentran y, con ello, determinar la confiabilidad de los datos que se generan. A continuación, se presentan los elementos observados respecto a ubicación, entorno y operación de las estaciones visitadas.

2.1 Ubicación.

En la (figura 1.) se muestra la ubicación y cobertura aproximada de cada estación de monitoreo de calidad del aire. Al respecto, las estaciones localizadas al centro y al noreste de la ciudad presentan una adecuada ubicación debido a que cubren áreas representativas de la zona urbana. Sin embargo, la estación que se localiza al oeste, tiene una ubicación cercana a la periferia de la mancha urbana, limitando significativamente los objetivos del sistema de monitoreo. Por lo anterior, se sugiere ubicarla en una zona de mayor densidad poblacional, preferentemente hacia el sureste de la posición actual, lo anterior permitirá tener una mayor cobertura de la superficie del área urbana.



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia con imágenes de Google Earth.

Figura 1. Ubicación y cobertura aproximada de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Victoria de Durango.

2.2 Entorno.

El entorno inmediato de una estación de monitoreo de calidad del aire es muy importante ya que define en gran medida la cobertura y representatividad. En esta sección se muestra una serie de imágenes del entorno de cada estación y los comentarios de la situación en que se encuentran cada una de ellas.

Estación “SRN”

La estación se encuentra ubicada dentro de las instalaciones de la SRNyMA del Estado de Durango, a un lado de la zona de los viveros. Como se puede observar, dicha estación está a nivel de piso y se encuentra rodeada de árboles, lo anterior representa una barrera para que el viento mantenga sus trayectorias sin afectaciones en dirección, intensidad e incluso en la concentración de algunos contaminantes. En conclusión, la estación tiene una cobertura limitada y una representatividad local, por lo que se sugiere reubicarla.



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 2. Entorno de la estación “Secretaría SRN”

Estación “ITD”

La estación se ubica en el Instituto Tecnológico de Durango, localizada a su vez, en la zona central de la ciudad, la estación está colocada a nivel de piso y no presenta problemas respecto a obstáculos o fuentes cercanas que pudieran afectar las mediciones. Por lo anterior, la estación tiene una representatividad de “vecindario” y debido a la topografía de la ciudad, la cobertura puede ser de hasta aproximadamente 2 km a la redonda. La figura 3 muestra dicha estación.



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 3. Entorno de la estación "ITD"

Estación "CIIDIR"

La estación se localiza al este del centro de la ciudad, en una zona de baja densidad de población que se encuentra aún en proceso de urbanización. Al igual que las estaciones anteriores, ésta se encuentra a nivel de piso (Figura 4), no presenta obstáculos al paso del aire y es representativa de la zona en que se encuentra; su cobertura también puede considerarse de aproximadamente 2km de radiales.



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 4. Entorno de la estación "IPN"

2.3 Operación.

Como se mencionó anteriormente, se realizó una revisión a las tres estaciones de monitoreo y la unidad móvil para conocer la situación operativa de los equipos de medición que las conforman. A continuación, se presenta lo observado, los principales hallazgos, así como algunas actividades de fortalecimiento que permitirán su mejora.

Estación “Secretaría de Medio Ambiente”

Durante la visita de verificación la estación se encontró fuera de operación por falla en el aire acondicionado; solo se encontraban en operación los monitores para partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), de estos, se revisaron los parámetros de operación, encontrando que la temperatura nominal (calentador del tubo de muestra) estaba configurado a $40^{\circ}C$, se ajustó a $29^{\circ}C$, temperatura equivalente a $8^{\circ}C$ por arriba de la temperatura promedio ambiente. Con lo anterior se asegura evitar condensación en el tubo de muestra y pérdida de masa en el filtro. El resto de las variables de operación (flujo, presión, relación de intensidades, alto voltaje, entre otros) se encontraron en los intervalos de operación sugeridos.

Se observó suciedad en el separador de $PM_{2.5}$, lo anterior está provocando datos en días anteriores con concentraciones de $PM_{2.5}$ mayores a PM_{10} . Además, no se encontraron evidencias de que éstos monitores hayan sido calibrados. En tanto no se lleve a cabo una verificación/calibración de la operación, la información que generan deberá de tomarse con las debidas reservas.

Respecto a las mediciones de variables meteorológicas, las correspondientes a velocidad y dirección de viento, no están disponibles en el sistema de adquisición de datos por incompatibilidad de las señales con éste.

Estación “ITD”

La estación consta de analizadores para Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O_3) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x), un monitor para PM_{10} y sensores meteorológicos de velocidad y dirección de viento, presión, humedad relativa, temperatura, radiación solar y precipitación pluvial. Respecto a los analizadores de gases, de acuerdo a lo comentado por el personal técnico, requieren de la calibración correspondiente de acuerdo al programa de mantenimiento y operación, por lo anterior el programa de verificación cero/span también fue suspendido, debido al mal funcionamiento del calibrador dinámico. Se sugiere recibir asesoría por parte de la empresa que instaló y configuró dicho calibrador para que se puedan retomar las calibraciones.

El monitor de partículas se encuentra en operación. Sin embargo, el cabezal presenta suciedad, por lo que deberá ser limpiado a la brevedad. Respecto a las variables meteorológicas, se observaron problemas en los canales de temperatura (valor que se mantiene constante) y de radiación solar que se mantiene en valores cercanos a cero, aun cuando se mantiene los días soleados. El balancín del

sensor de precipitación pluvial se encontraba fuera de eje, el cual fue ajustado y quedó operando adecuadamente.

Los operadores de la estación deberán traer un calibrador de otra estación o de la unidad móvil para que los analizadores sean verificados o calibrados lo antes posible, mientras que se pone en operación el calibrador de la estación.

Estación "CIIDIR"

Cuenta con analizadores para gases criterio, monitores de PM_{10} y $PM_{2.5}$, y variables meteorológicas (velocidad y dirección de viento, presión, humedad relativa, temperatura y radiación solar).

Los analizadores de ozono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógenos, se encontraron operando normalmente. Sin embargo, personal técnico informó que el analizador de óxidos de nitrógeno no responde a concentraciones altas. Respecto al analizador de bióxido de azufre, éste no pudo ser manipulado o ajustado porque solicita una clave de acceso, con la cual no se cuenta, aunque el instrumento fue reemplazado por otro.

Respecto a la fuente de aire cero del sistema de calibración, en días anteriores ésta fue sometida a una sobrepresión interna, propiciando el estallamiento del cartucho de Purafill, este equipo también fue sustituido durante la visita. Con los elementos anteriores, se requiere trasladar un cilindro de gases y llevar a cabo la calibración de los analizadores para dejarlos en condiciones operativas adecuadas lo antes posible.

Con relación a los parámetros de operación de los monitores para PM_{10} y $PM_{2.5}$, se observó que la temperatura nominal (calentador del tubo de muestra) estaba configurado a $40^{\circ}C$, por lo que ajustó a $29^{\circ}C$, temperatura equivalente a 8 grados por arriba de la temperatura promedio ambiente, con lo anterior se asegura evitar condensación en el tubo de muestra y pérdida de masa en el filtro. El resto de las variables de operación (flujo, presión, relación de intensidades, alto voltaje, entre otros) se encontraron en los intervalos normales de operación. También se observó suciedad en el separador de 2.5 y cabezales de PM_{10} , por lo que se requiere su pronta y periódica limpieza.

De acuerdo a lo comentado por el personal, desde la puesta en marcha de la estación, en 2010, no ha habido calibración de estos monitores. En tanto no se lleve a cabo una verificación/calibración de la operación, la información que generan deberá tomarse con las debidas reservas. Los sensores de las variables meteorológicas se encuentran en operación y no se observan registros atípicos.

Unidad Móvil de monitoreo de calidad del aire

La unidad móvil cuenta con analizadores para CO, O₃, NO₂, SO₂ y PM₁₀, así como sensores meteorológicos para velocidad de viento, dirección de viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar.

Los equipos se encontraron en operación y sin alarmas, tampoco presentaron valores de las variables de operación fuera de los intervalos recomendados por el fabricante, excepto el analizador para NO_x que presentaba una alarma de temperatura del catalizador de molibdeno, esta alarma aparece solamente por momentos. Sin embargo, al introducirle una concentración alta de NO, la respuesta del equipo alcanza un 26% de dicha concentración. Con el fin de diagnosticar el origen del mal funcionamiento del equipo, se llevó a cabo una prueba eléctrica y óptica del PMT, cuyos resultados fueron favorables. También se revisó el sistema neumático, encontrando fuga significativa en la conexión entre el Permapure y el ozonador, se corrigió dicha conexión, sin embargo la concentración de respuesta continuó baja. Por lo anterior, se presume que existe daño en el ozonador, el cual deberá reemplazarse. Como ya se mencionó, el resto de los instrumentos de la unidad móvil no presentan indicios para sospechar alguna falla en su operación. Finalmente, se llevó a cabo una verificación cero/span con el fin de asegurar la respuesta de los analizadores a la introducción de concentraciones conocidas, en el Cuadro 1 se presentan los resultados.

PARÁMETRO	RESPUESTA AL CERO (ppm)	SPAN (ppm)	RESPUESTA AL SPAN (ppm)	DIFERENCIA (%)
SO ₂	0.0007	0.441	0.483	9.8
CO	- 0.12	22.3	21.8	4.6
NO	0.002	450		
NO ₂	- 0.007		117.4	- 73.9
NO _x	- 0.005	450		

Cuadro 1. Resultados de la verificación Cero / Span

3. CONCLUSIONES

De la visita técnica al sistema de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad de Victoria Durango, se concluye lo siguiente:

Ubicación, el arreglo de dos de las tres estaciones de monitoreo es adecuado en términos de cobertura y representatividad, una en la zona central y la segunda colocada hacia el noreste. Sin embargo, la estación localizada dentro de la Secretaría, presenta una limitada cobertura y baja

representatividad, por lo que se sugiere reubicarla hacia el Sureste, a una distancia aproximada de tres km.

Entorno, las estaciones de ITD y CIIDIR cuentan están libres de obstáculos y fuentes de emisión, además son característicos de la zona en que se encuentran. Por el contrario, la estación de la Secretaría presenta árboles en la cercanía que influyen en la representatividad de las mediciones.

Condiciones operativas de la infraestructura de cada estación, se revisó cada equipo de medición y se realizó una verificación cero / span a los analizadores de gases, esta última se aplicó únicamente a los equipos de la unidad móvil ya que los analizadores de la estación de la Secretaría se encontraban fuera de operación por falla en el aire acondicionado, en la estación ITD, el calibrador dinámico de gases no funcionaba por alguna falla de configuración en el software y, finalmente, la estación CIIDIR no contaba con un cilindro de gases para calibración. Es importante señalar que todos los monitores de partículas que conforma el sistema de monitoreo, no han sido calibrados desde su instalación. Asimismo, se detectaron algunas áreas de oportunidad relacionadas con la operación rutinaria, el mantenimiento, la calibración, la infraestructura, la capacitación y la logística con que son manejadas las estaciones.

Estación	O ₃	NO ₂	SO ₂	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VV	DV	T	HR	P	RS	PP
SRN	Red	Red	Red	Red	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Grey
ITD	Yellow	Yellow	Grey	Yellow	Yellow	Grey	Green	Green	Red	Green	Green	Red	Green
IPN	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey
UM	Green	Red	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Grey
Green	Equipo en operación												
Grey	Equipo no disponible												
Red	Equipo fuera de operación o en malfuncionamiento												
Yellow	Equipo en operación pero requiere calibración en el caso de analizadores de gases y al menos limpieza de cabezales de entrada de muestra en el caso de monitores de partículas.												

Cuadro resumen del estado de las estaciones de monitoreo de la Ciudad de Durango

4. RECOMENDACIONES

- Reubicar la estación “Secretaría de Medio Ambiente” hacia el Sureste, a una distancia aproximada de tres km.
- Desarrollar un programa de visitas en el que se especifiquen claramente las tareas que deben ser ejecutadas tanto por el técnico responsable como por su jefe inmediato; también se deberá establecer su periodicidad, éstas actividades deberán ser registradas sistemáticamente en bitácoras y formatos adecuados.
- Mantener un sistema de calibración de los analizadores de gases bajo un programa de verificación/calibración de los controladores de flujo y del generador de ozono, este calibrador dinámico funcionará como patrón de referencia para el resto de los calibradores del sistema de monitoreo.
- Establecer y ejecutar un programa de calibración y verificación para los monitores de partículas, para lo anterior, es necesario contar con un medidor volumétrico con sensores de presión y temperatura, así como laminillas de cristal de cuarzo para los detectores de masa de los monitores marca Thermo Scientific.
- Finalmente, se sugiere que un técnico dedique tiempo completo a la operación, calibración, mantenimiento y pruebas de desempeño de la infraestructura de medición, tareas que deberán ser supervisadas bajo un esquema de mejora continua. Capacitar al personal en los temas: operación rutinaria, mantenimiento, calibración, infraestructura, capacitación, logística, manejo y análisis de datos.

ESTUDIO DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor

Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta

Ing. Oscar A. Fentanes Arriaga, Ing. José Miguel Noyola Poblete, Ing. Daniel Ordóñez Carmona, Ing. Jorge
David Santacruz Morhy

Subdirección de Evaluación de Emisiones y Monitoreo Atmosférico

San Rafael Atlixco, No. 186, Col. Vicentina, Del. Iztapalapa, México, D.F. C.P. 09340.

Tel. +52 (55) 56133821. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

RESUMEN

Con la finalidad de evaluar la calidad del aire y conocer los niveles de las concentraciones de los contaminantes criterio en la zona de producción ladrillera de la ciudad de Victoria de Durango, Durango., se realizó un estudio de monitoreo de calidad del aire dentro de dicha zona urbana, durante un periodo de del 9 de al 30 de octubre. El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Escuela Primaria Justo Sierra, ubicada en la calle de Puebla, esquina con calle Mazatlán, en la colonia jardines de Cancún. De las mediciones obtenidas en el presente estudio y del análisis de la información correspondiente, se puede mencionar que los contaminantes gaseosos (O₃, NO₂, SO₂ y CO) y partículas PM_{2,5}, en referencia con sus respectivos valores normados, no se excedieron durante el periodo de estudio, sin embargo, en el caso de las partículas PM_{2,5}, se presentaron valores elevados. En el caso de las partículas PM₁₀, se rebasó el valor establecido por la norma el 88% de los días de mediciones válidas del periodo de estudio. Es importante resaltar que en general, las altas concentraciones de PM₁₀ registradas fueron por re-suspensión debido a la falta de pavimentación de las calles donde se instaló la unidad móvil

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de contaminantes en el aire ambiente se debe principalmente a la actividad humana, al transporte y a la gran cantidad y variedad de fuentes emisoras que existen. Actualmente la contaminación atmosférica es una realidad de las grandes ciudades y recientemente también de ciudades medianas y en crecimiento.

Para medir la contaminación del aire es indispensable contar con sistemas de medición y programas adecuados de monitoreo atmosférico bajo esquemas uniformes de operación que cuenten con un sistema de aseguramiento y control de calidad, de tal forma que se pueda contar con información oportuna y confiable de la calidad del aire en las ciudades mexicanas.

Para obtener información de la calidad del aire y las concentraciones de los contaminantes criterio en un tiempo y en una zona determinados, es necesario realizar estudios de la calidad del aire por cortos periodos de tiempo con ayuda de una unidad móvil de monitoreo (Figura 1), para así, poder conocer las concentraciones de gases y partículas contaminantes, lo que en algunas ocasiones permite indagar sobre cuáles son las principales fuentes que la generan. Asimismo, los resultados de estos estudios permiten comparar las concentraciones obtenidas con las Normas Oficiales Mexicanas en materia de calidad del aire y por otro lado, representan información útil para la toma de decisiones y para generar políticas en materia de calidad del aire.

En la ciudad de Victoria de Durango, existen algunas zonas donde se llevan a cabo actividades de fabricación de ladrillos de manera artesanal. Estas zonas han sido ya incorporadas dentro de la mancha urbana debido al crecimiento poblacional de la región, por lo que las emisiones de contaminantes que en estas se generan podrían afectar a la población de la zona urbana de Durango.

En este sentido, el gobierno del estado de Durango solicitó el apoyo del INECC para realizar mediciones de calidad del aire mediante la unidad móvil de monitoreo (Figura 1), para así, poder conocer las concentraciones de gases y partículas contaminantes de la zona ladrillera ubicada en la colonia Jardines de Cancún.

2. METODOLOGÍA

Para efectuar el estudio de monitoreo de la calidad del aire, se definió previamente un sitio de medición, en la Escuela Primaria: Justo Sierra, ubicada en la calle de Puebla y esquina con Mazatlán, en donde se instaló la unidad móvil de monitoreo del INECC. Este sitio tiene la característica de que en su periferia existen fuentes de contaminación debido al proceso de manufactura artesanal de ladrillos. El sitio se puede observar en la Figura 1.



Figura 1. Entorno del sitio de medición "Escuela Primaria: Justo Sierra".

En la Figura 2, se muestra una imagen satelital del sitio de monitoreo en donde se instaló la unidad móvil. Asimismo, se puede observar la mancha urbana de la ciudad y la ubicación de la zona ladrillera en relación a la zona urbana.



Figura 2. Imagen satelital de la ciudad de Durango, Durango.

Se realizaron mediciones en el sitio seleccionado del día 9 al 26 de octubre de los siguientes parámetros: O₃, NO₂, SO₂, CO, y partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Además, se midieron variables meteorológicas de dirección y velocidad de viento, temperatura y humedad relativa.

3. RESULTADOS

Con la base de datos cruda resultante de las mediciones, es necesario realizar un análisis previo mediante el uso de medios gráficos de exploración que auxilien la observación de tendencias y características inusuales en los datos, mismas que resultan importantes pues en muchas ocasiones son resultados de errores en las mediciones en sí o en la transcripción de datos si es el caso. En ocasiones, los datos atípicos suelen ser válidos, y pueden ser la parte más interesante e informativa del conjunto de datos. En las secciones subsecuentes, se presenta una serie de análisis de las mediciones en las cuales se detallan los hallazgos en cuanto al conjunto de datos de las mediciones realizadas.

3.1. ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS

Se realizó un análisis preliminar de los datos mediante el uso de gráficas de serie de tiempo para verificar tendencias, datos atípicos, hacer limpieza y validación de los datos. En estas se apreció tendencias anómalas en los datos de O₃ (Figura 3), CO (Figura 4), PM₁₀ y PM_{2.5} (Figura 5).

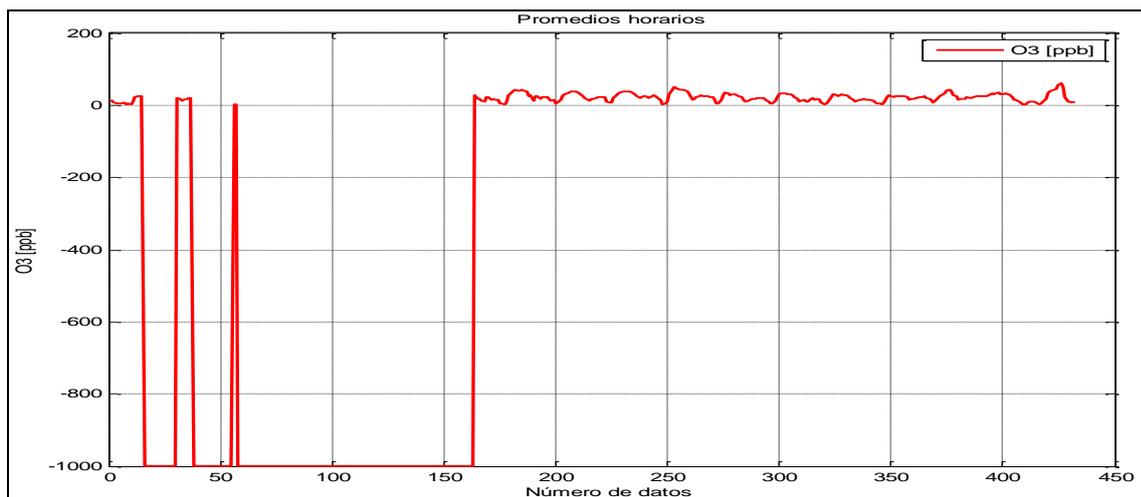


Figura 3. Serie de tiempo de datos crudos de Ozono.

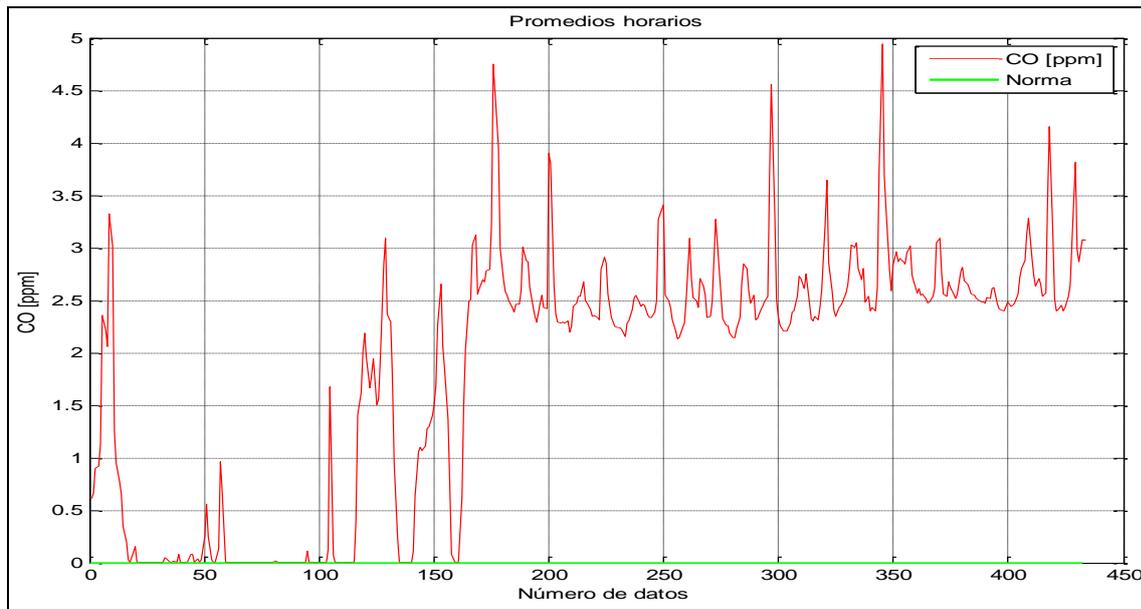


Figura 4. Serie de tiempo de datos crudos de monóxido de carbono.

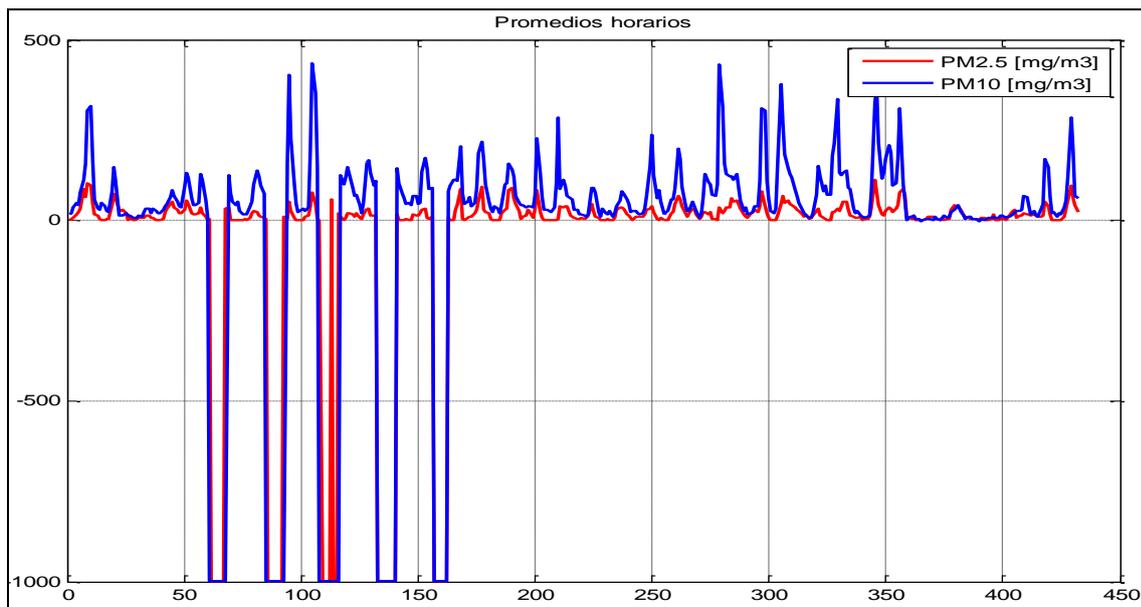


Figura 5. Serie de tiempo de datos crudos de partículas PM10 y PM2.5.

Estos datos de mediciones erróneas en los instrumentos de O_3 , CO, PM_{10} y $PM_{2.5}$, fueron causados por problemas de temperatura en el interior de la unidad móvil del INECC debido a la falta de supervisión durante el periodo de monitoreo. Por esta razón, los datos que comprenden el periodo del 9 al 15 de octubre fueron invalidados, conformando una base de datos validada para llevar a cabo el análisis de exploración de datos y estadístico.

Adicionalmente se realizó un ajuste a los datos de CO, debido a que este parámetro presentó un corrimiento de la línea base de 2.08 ppm una vez que la temperatura interna de la unidad móvil se

estabilizó. Este corrimiento se verificó durante la prueba de cero – span que se realizó al final de la campaña. Para el caso de las mediciones de SO₂ y NO_x, no se invalidó información, debido a que éstas no presentaron comportamiento anómalo con respecto a las variaciones en la temperatura interna de la unidad móvil, debido a que la temperatura de operación de estos instrumentos es mayor y el método de medición es menos sensible a los cambios en la temperatura, sin embargo, se realizaron ajustes en la línea base de todos los datos de estos dos contaminantes que también experimentaron un corrimiento en la línea base haciendo uso de los datos de calibración inicial y de la verificación cero – span al final del periodo de mediciones.

3.2. ANÁLISIS DE EXPLORACIÓN DE DATOS

El cálculo de los estadísticos correspondientes a los parámetros se muestra en la Cuadro 1, donde se incluye el porcentaje de suficiencia de datos en la columna final, que como resultado de la validación de los datos en el análisis preliminar, se refleja la deficiencia en la recuperación de datos de O₃, CO, PM₁₀ y PM_{2.5} por los motivos antes señalados.

Parámetro	Mín.	Máx.	Prom.	Mediana	Desv. Estánd.	Q25	Q50	Q75	Q90	IQR	% datos
O ₃ (ppb)	2.0	60.8	22.4	22.4	11.1	14.9	22.4	29.3	37.3	14.4	61.1
NO (ppb)	0.0	132.6	5.9	0.5	15.2	0.0	0.5	3.5	15.8	3.5	99.8
NO ₂ (ppb)	1.0	34.2	9.6	7.7	7.1	3.7	7.7	13.8	20.4	10.1	99.8
NO _x (ppb)	0.3	148.9	15.0	8.2	19.8	3.5	8.2	16.7	34.4	13.2	99.8
SO ₂ (ppb)	0.0	10.3	1.3	0.9	1.7	0.2	0.9	1.8	3.2	1.6	99.8
CO (ppm)	0.0	2.8	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.6	0.9	0.4	61.1
PM ₁₀ (µg/m ³)	14.0	601.5	116.3	83.3	101.3	44.0	83.3	155.5	243.5	111.5	44
PM _{2.5} (µg/m ³)	0.2	113.7	23.4	19.3	21.9	6.6	19.3	34.1	52.5	27.5	44

Cuadro 1. Estadísticos de los parámetros en promedios horarios, calculados a partir de los datos validados de las mediciones efectuadas del 9 al 26 de octubre en el sitio “Escuela Primaria Justo Sierra”.

A partir de estos resultados podemos determinar que las mediciones obtenidas durante el periodo de medición son generalmente bajas, excepto en los casos de partículas de PM₁₀ y PM_{2.5}, que destacan por la existencia de concentraciones elevadas, por lo que requieren de mayor atención durante el

análisis de los resultados. En el caso de PM_{10} , se alcanzó un valor máximo de $601.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y considerando el valor correspondiente al percentil 90 para este parámetro que es de $243.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, podemos decir que el valor máximo corresponde a un caso extremo o atípico.

El mismo caso se observa para las partículas $PM_{2.5}$, para las cuales el valor máximo es de $113.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y al menos el 75% de los datos se encuentran por debajo de $34.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para verificar el índice de dispersión de la parte central de la serie de datos de los contaminantes, se calculó el Rango Inter-Cuartílico (IQR por sus siglas en inglés). Este valor ignora el 25% de los datos altos y bajos, de manera que no toma en cuenta datos atípicos.

Con base a esta medida de dispersión, se observa que el 50% de los datos centrales de PM_{10} se encuentran dentro de un intervalo de $111.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que se concluye que en general se tienen mediciones altas de este parámetro durante el periodo de medición. Con base a los estadísticos anteriores, se construyeron diagramas de caja para los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$, para identificar mejor las mediciones atípicas o datos considerados *outliers*. En los diagramas de caja de la Figura 6 se muestran la distribución fundamental de los datos de PM_{10} Y $PM_{2.5}$, en la cual se muestran claramente los valores atípicos.

El límite superior corresponde a 1.5 veces el rango intercuartílico más el cuartil 75, que indica que estos valores pueden ser considerados "válidos" o normales dentro de la distribución de los datos. Por otro lado, el extremo superior corresponde a tres veces el rango intercuartílico más el cuartil 75.

Los datos que se encuentran entre el límite superior y el extremo superior corresponden a valores atípicos menores, es decir, pueden ser considerados válidos dentro de la serie de datos, pero requieren de un trato o análisis especial. Por otro lado, los datos por encima del extremo superior son considerados en definitiva como datos atípicos, por lo que se requiere de indagar más a fondo sobre su validez. Para ambos casos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se tienen valores que corresponden a datos atípicos menores, sin embargo, en el caso de PM_{10} se tienen un valor completamente atípico que corresponde a $601.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

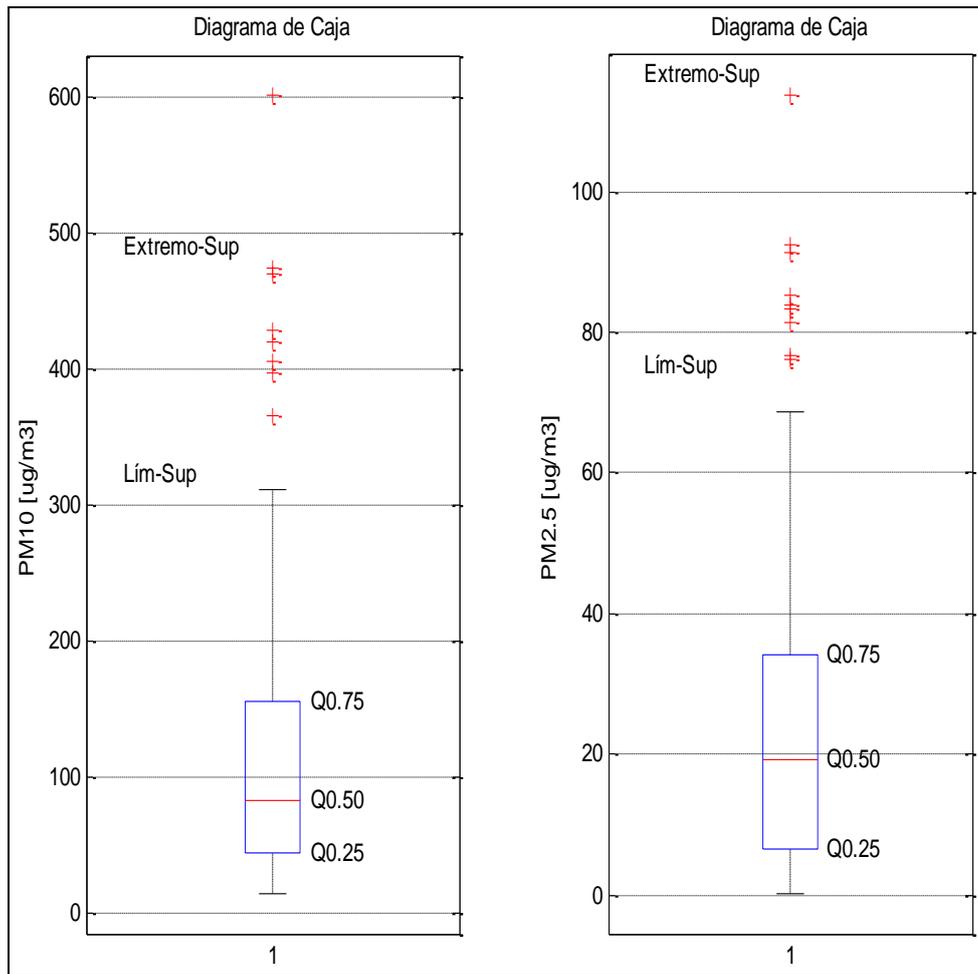


Figura 6. Diagramas de caja de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}

3.3. NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE

Se realizó un análisis adicional de los datos, considerando los métodos de evaluación de las normas de calidad del aire y sus valores establecidos correspondientes. En la Cuadro 2 se listan las normas vigentes y sus valores normados, así como los valores máximos obtenidos de cada contaminante en relación a su norma. En la tabla se observa que el único parámetro que sobrepasa el valor de la norma es el de PM₁₀, con un valor máximo en promedio de 24 horas de 162 µg/m³.

CONTAMINANTE	VALOR NORMADO	VALOR MÁX. REGISTRADO
OZONO (O ₃) NOM -020-SSA1-2014	95 ppb en promedio horario	60.8 [ppb]
	70 ppb en promedio móvil de 8 horas máximo en un año	45.9 [ppb]
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂) NOM-023-SSA1-1993	210 ppb en una hora, una vez al año.	34.2 [ppb]
DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂) NOM -022-SSA1-2006	110 ppb en promedio de 24 horas una vez al año.	3.6 [ppb]
MONÓXIDO DE CARBONO NOM -021-SSA1-2006	11 ppm en promedio móvil de 8 horas una vez al año.	1.2 [ppm]
PM ₁₀ NOM -025-SSA1-2014	75 µg/m ³ en promedio de 24 horas una vez al año y 40 µg/m ³ , como promedio anual	162 [µg/m ³]
PM _{2.5} NOM -025-SSA1-2014	45 µg/m ³ en promedio de 24 horas una vez al año. 12 µg/m ³ , como promedio anual	34 [µg/m ³]

Cuadro 2. Comparación de valores máximos registrados de acuerdo al método y valor establecido por la norma de calidad del aire correspondiente

3.4. ROSAS DE VIENTO

La rosa de vientos es un histograma de frecuencias angulares que muestra la distribución de las direcciones del viento agrupados de acuerdo a un intervalo numérico. En la Figura 7 se muestran las rosas de vientos de los datos que comprenden el periodo de medición. La Figura 7a, describe la rosa de vientos obtenida durante el periodo completo de monitoreo, donde se observan vientos predominantes provenientes de las direcciones noreste y suroeste; 7b) rosa de viento correspondiente al periodo diurno, que presenta vientos predominantes similares a la figura a).

La rosa de vientos correspondiente al periodo nocturno, se muestra en la figura 7c), en la cual se distinguen vientos predominantes de tres direcciones: noreste, nor-noroeste y suroeste. La velocidad máxima alcanzada es de 8.0m/s en pequeños periodos de la dirección este sureste.

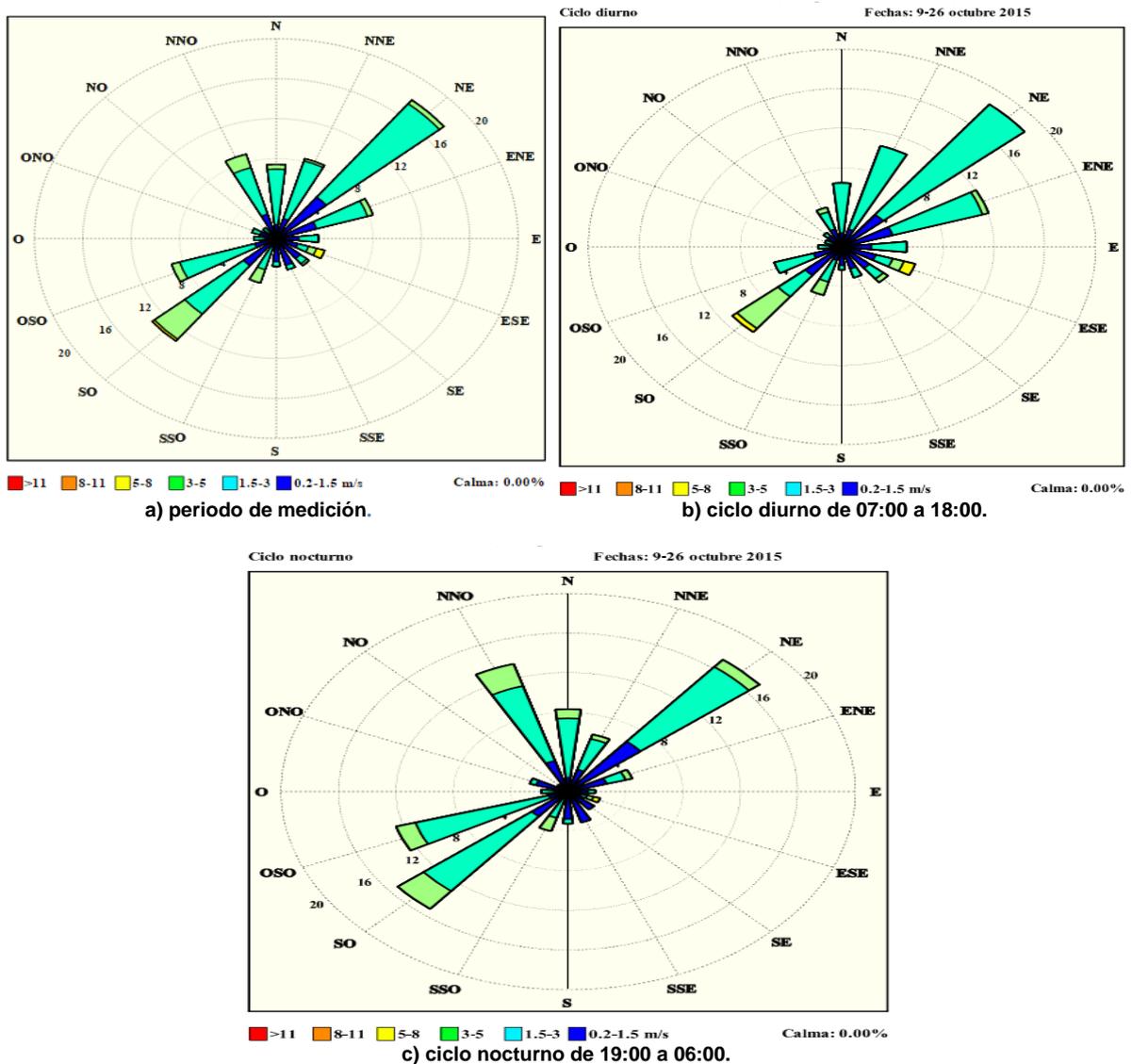


Figura 7. Rosas de vientos

3.5. ANÁLISIS DE CONTAMINANTES GASEOSOS

En zonas urbanas e industrializadas, las emisiones antropogénicas pueden llegar a ser tan grandes que las concentraciones de varias especies químicas indeseables o contaminantes, causan un deterioro significativo en la calidad del aire y la visibilidad, lo que puede ocasionar riesgos a la salud humana. Varios episodios asociados con la contaminación del aire y la reducción de la visibilidad ocurren cuando las tasas de emisiones o formación de contaminantes exceden por mucho las tasas a las cuales los contaminantes son dispersados por los vientos y el transporte vertical o son removidos de la atmósfera por reacciones químicas o deposición. Asimismo, muchos episodios de contaminación del aire tienden a ocurrir en asociación con periodos prolongados de vientos ligeros y una fuerte estabilidad estática. En las siguientes secciones se analizarán las tendencias de los contaminantes criterios medidos durante el periodo de estudio, mediante el uso de gráficas de series de tiempo y perfiles diarios.

3.5.1. OZONO (O₃)

El ozono es un contaminante secundario resultado de un proceso fotoquímico que involucra reacciones entre los NO_x, compuestos orgánicos volátiles y el O₂ en presencia de radiación solar. El incremento de la radiación solar favorece el aumento de la temperatura, en consecuencia, predispone el incremento en las concentraciones de O₃, lo cual se puede observar en la Figura 8 donde se grafican el ciclo diario de las concentraciones de ozono y la temperatura.

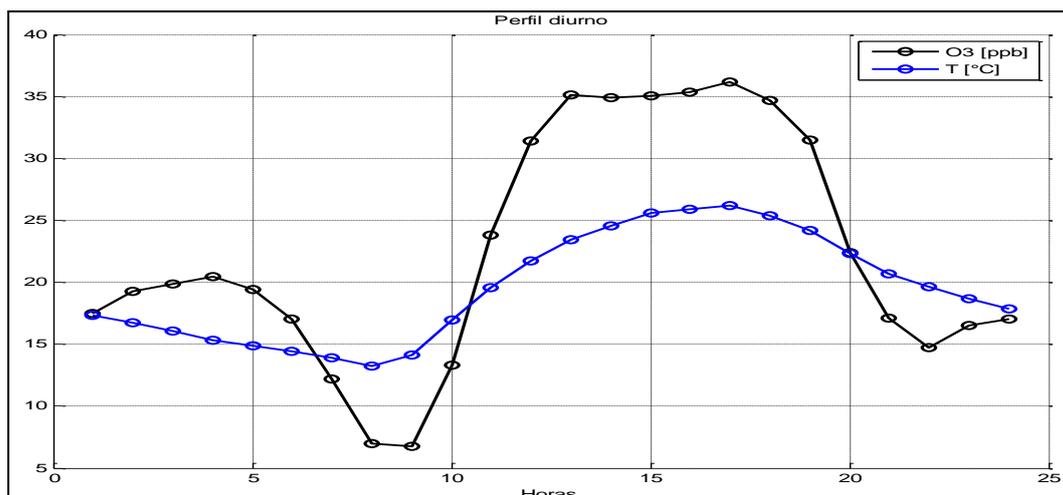


Figura 8. Ciclo diario de las concentraciones de ozono y temperatura en promedios horarios

La norma de calidad del aire para ozono establece un valor de 95 ppb en promedio horario. En la Figura 9, se muestran la serie de tiempo en promedios horarios de este contaminante, en donde se observa que el valor de la norma no se excede en ningún momento durante el periodo de estudio, pues el valor máximo alcanzado en promedio horario fue de 60.8 ppb.

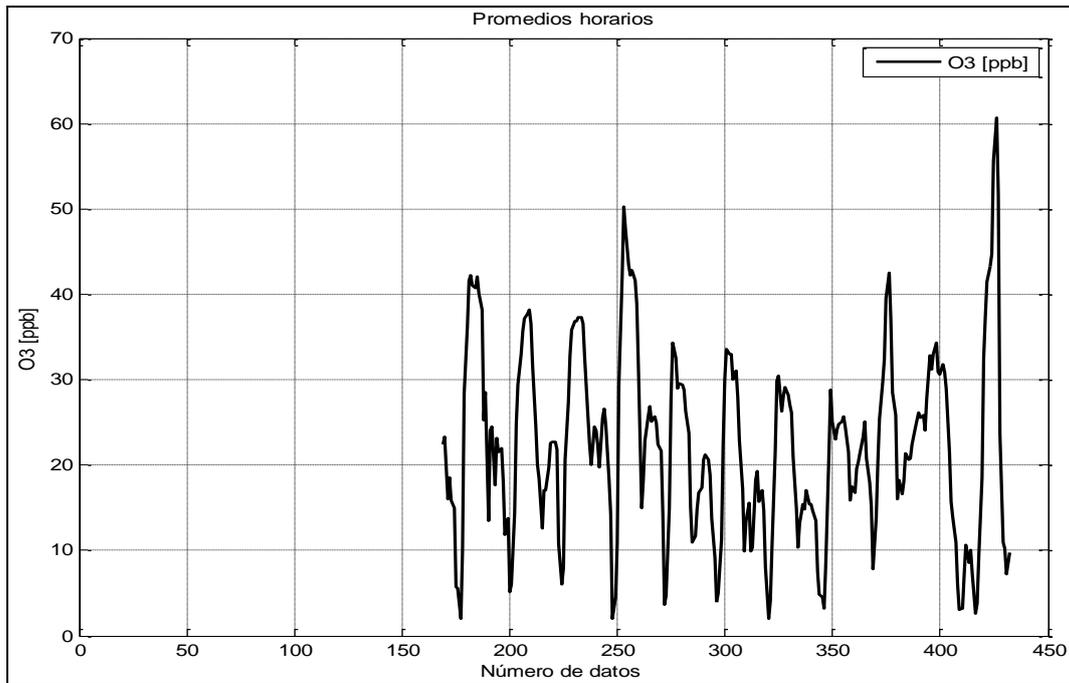


Figura 9. Promedios horarios de ozono.

Un segundo criterio para la norma de ozono establece que el promedio móvil de 8 horas no debe excederse de 70 ppb (línea en color rojo) en un año. En este sentido, en la Figura 10 se muestran los máximos diarios de los promedios móviles de 8 horas durante el periodo de estudio. En referencia a este criterio, las mediciones realizadas tampoco rebasan el valor mencionado durante el periodo de estudio.

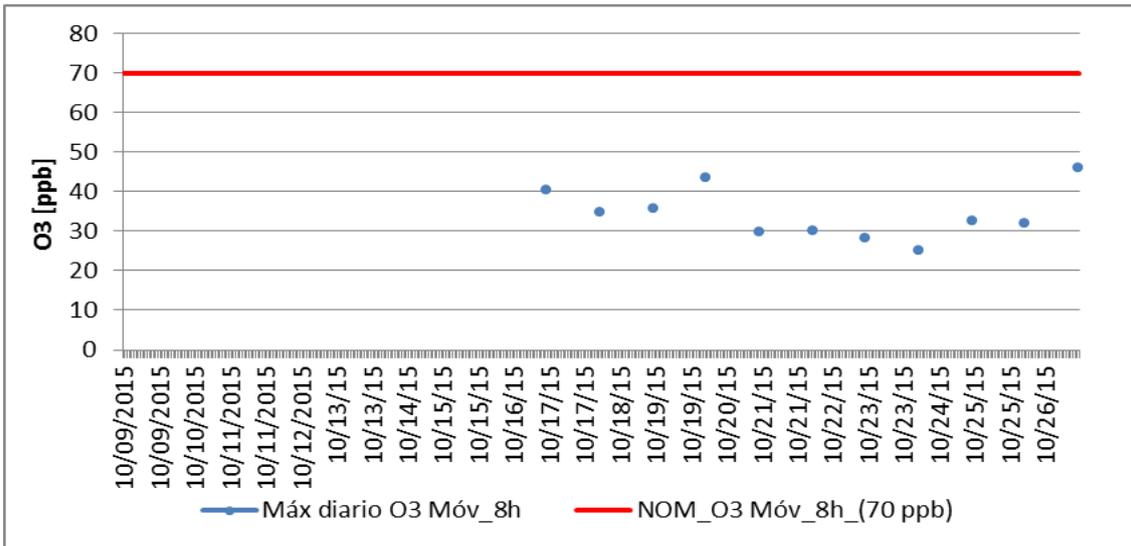


Figura 10. Valores máximos diarios en promedio móvil de 8 horas de las concentraciones de ozono.

3.5.2. ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno se refiere básicamente a la suma del bióxido de nitrógeno y óxido nítrico, que son producidos principalmente por la combustión de gasolinas, quema de biomasa y emisiones de aviones, entre otros. La Figura 11 muestra la serie de tiempo de los óxidos de nitrógeno, en la cual se observa la presencia de concentraciones elevadas, en particular de NO y NO_x, que alcanzan valores de hasta 150 ppb para éste último.

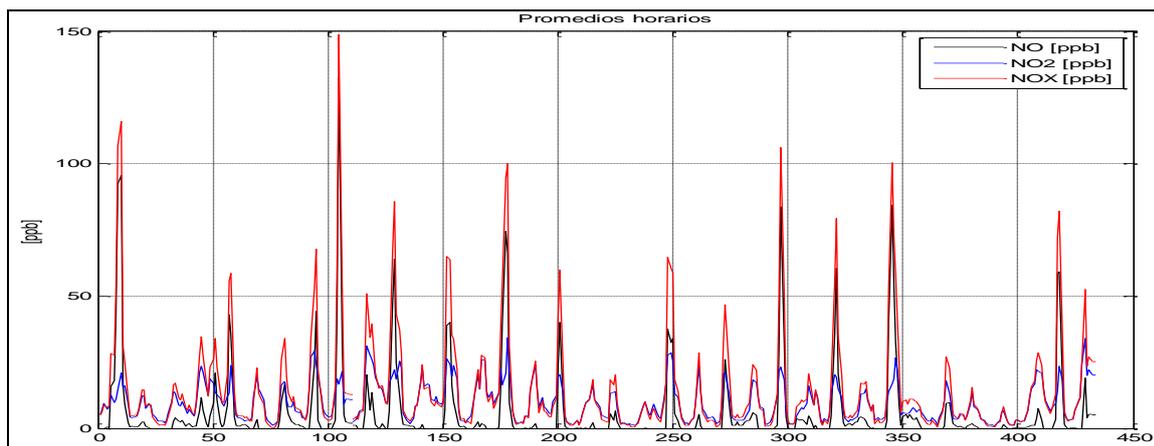


Figura 11. Serie de tiempo de óxidos de nitrógeno.

En el caso del bióxido de nitrógeno, la norma establece como valor de calidad del aire, 210 ppb en promedio horario una vez al año. Durante el periodo del estudio, se obtuvo un valor máximo en promedio horario de 34.2 ppb de este contaminante, por lo cual este contaminante se encontró dentro de los valores establecidos por la norma durante el periodo de estudio. La serie de tiempo de las mediciones obtenidas de este parámetro se muestra en la Figura 12.

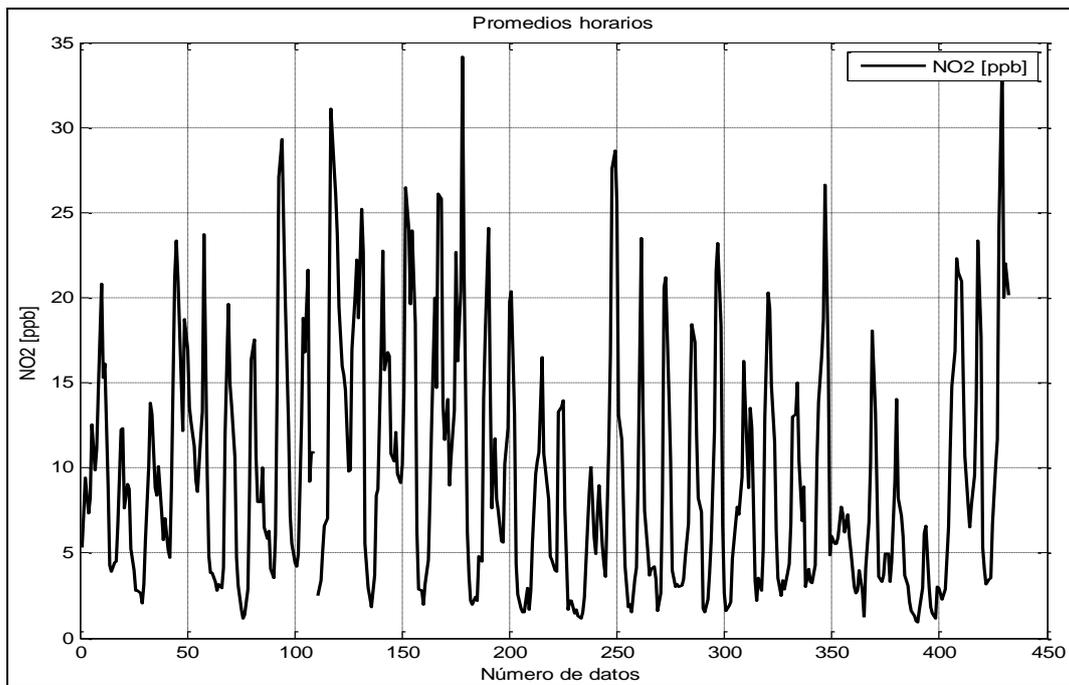


Figura 12. Serie de tiempo del contaminante normado bióxido de nitrógeno.

De acuerdo con el perfil diurno mostrado en la Figura 13, se observa que entre las 13:00 y las 19:00 horas de la tarde no se tienen concentraciones altas de NO_2 . Por el contrario, la existencia de las altas concentraciones de este contaminante se tiene entre las 21:00 y 24:00 horas de la noche, y se repite entre las 9:00 y las 11:00 de la mañana.

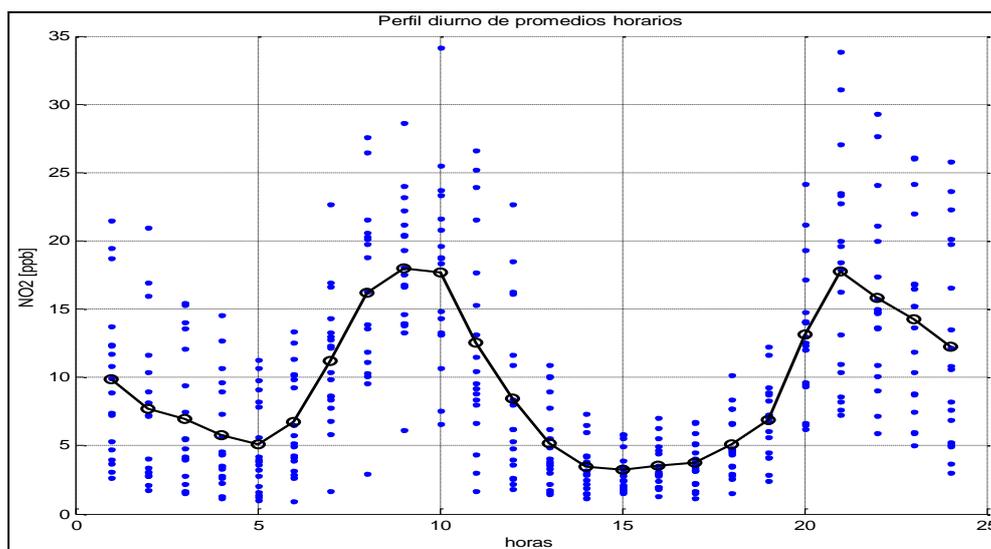


Figura 13. Perfil diario de la distribución de las concentraciones de NO₂ y el promedio del perfil diario.

3.5.3. BIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

Dentro de las principales fuentes que generan este contaminante se encuentran la quema de biomasa y la actividad volcánica, pero sobretodo la combustión de combustibles fósiles, razón por la que en zonas industrializadas la presencia de este contaminante puede llegar a ser significativo.

En la Figura 14, se muestra la serie de tiempo de este contaminante, donde se puede apreciar la existencia de picos, que indican un incremento de este parámetro. A pesar de estos incrementos, las concentraciones son bajas y no se consideran significativas en relación a la norma de calidad del aire correspondiente.

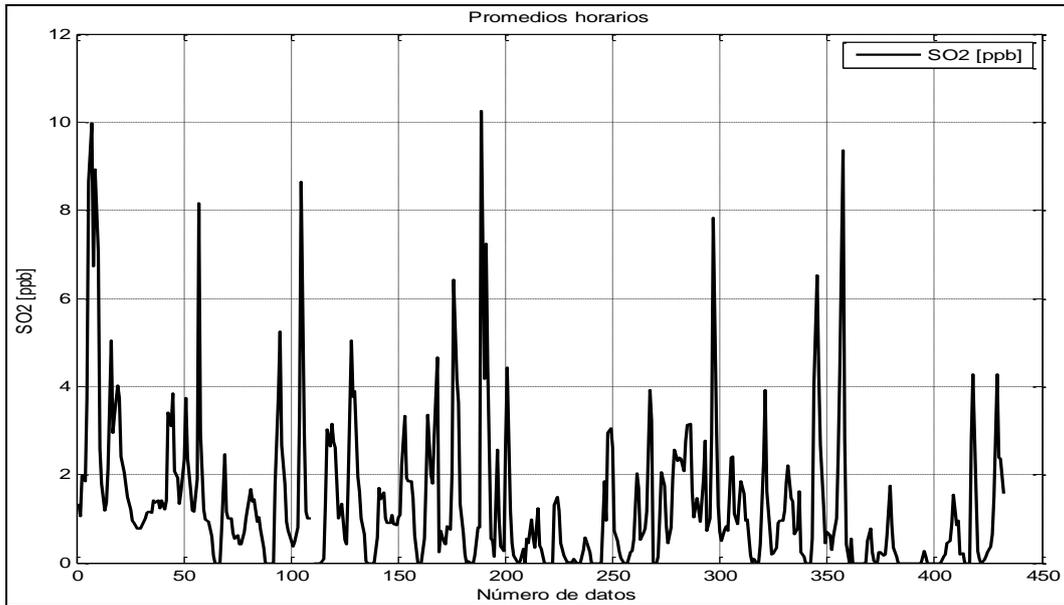


Figura 14. Serie de tiempo en promedios horarios de las concentraciones de bióxido de azufre.

Para comparar las mediciones de este contaminante en relación a la norma de calidad del aire, que establece un valor de 110 ppb en promedio de 24 horas una vez al año, se muestra la Figura 15, donde se observa que el valor máximo observado en relación a este criterio es de 3.6 ppb.

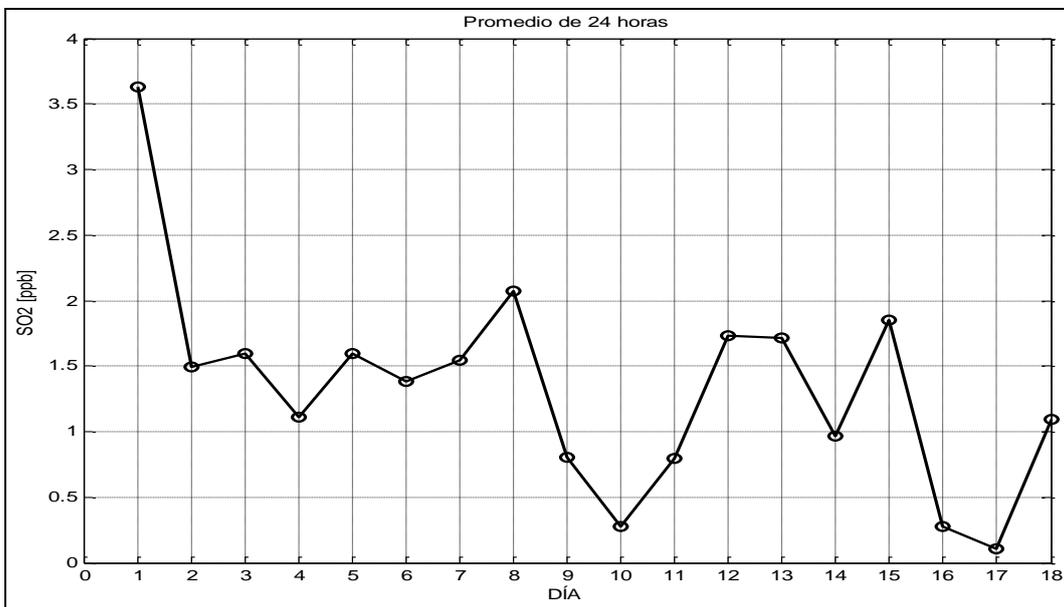


Figura 15. Promedios de 24 horas de SO₂, en donde el día 1 en la gráfica corresponde al primer día de medición que fue el día 9 de octubre y el día 18 es el último día de medición que corresponde al 26 de octubre

3.5.4. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Una fuente importante de este contaminante es la quema de biomasa y la combustión de combustibles fósiles, principalmente de gasolinas debido a la actividad vehicular. La siguiente figura muestra la tendencia de las concentraciones de CO durante el periodo de medición figura 16. La concentración más alta registrada en promedio horario fue de 2.8 ppm. Concentraciones similares son registradas durante el estudio.

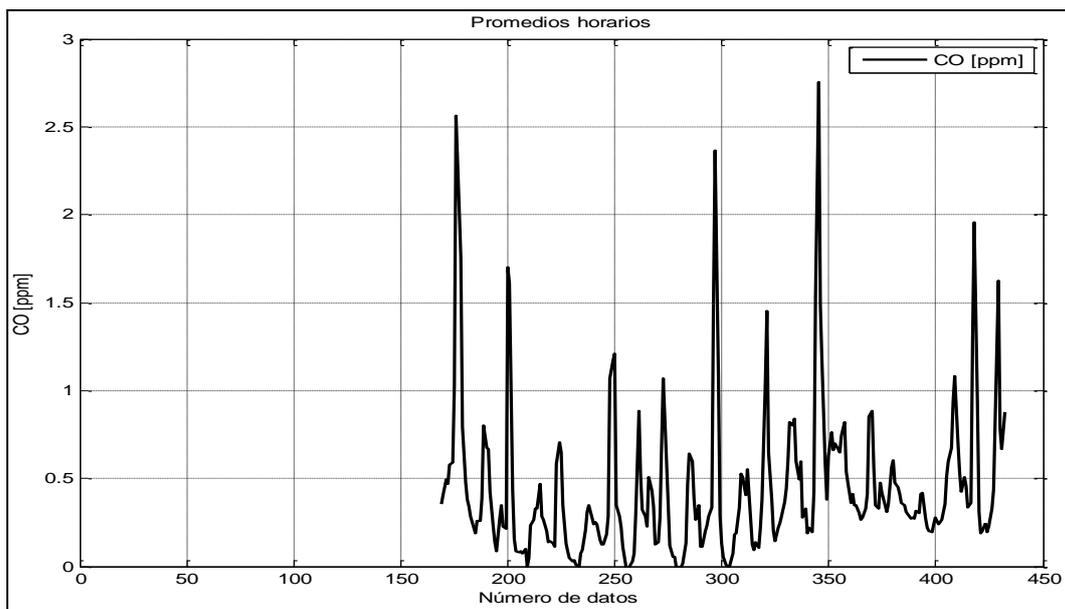


Figura 16. Serie de tiempo de promedios horarios de las concentraciones de monóxido de carbono

En relación a la norma de calidad del aire para el CO, que establece un valor de 11 ppm en promedio móvil de 8 horas, se realizó el análisis respectivo siguiendo el criterio establecido por la norma, como se muestra en la Figura 17, los valores medidos de este contaminante se encuentran muy por debajo del valor normado.

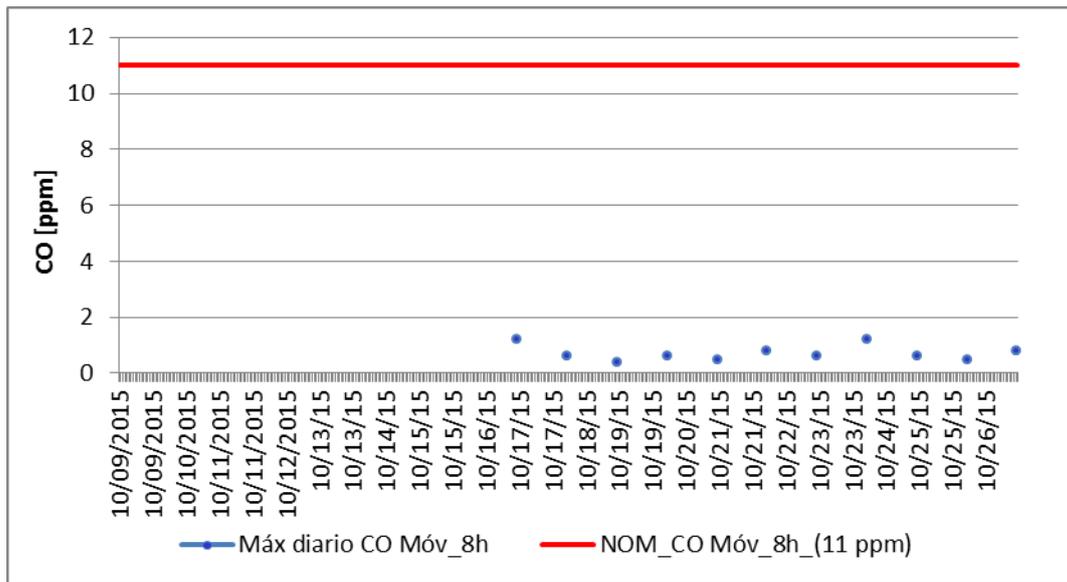


Figura 17. Valores máximos diarios en promedio móvil de 8 horas de las concentraciones de monóxido de carbono.

3.6. ANÁLISIS DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS (PM₁₀ Y PM_{2.5})

Las partículas suspendidas es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido y sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo. Por su origen, las partículas pueden definirse como primarias, que son aquellas producidas directamente por alguna fuente contaminante; o secundarias, que se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre gases y las partículas primarias. Así mismo, pueden tener un origen natural y también antropogénico.

Las PM₁₀ contienen principalmente materiales de la corteza terrestre y se originan en su mayoría por procesos de desintegración de partículas más grandes. También pueden provenir de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Las PM_{2.5} están formadas primordialmente por gases y por materiales provenientes de la combustión. Respecto a las concentraciones de partículas suspendidas PM₁₀, se registraron concentraciones elevadas durante el periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo en promedio horario de 601.5 µg/m³. La serie de tiempo de las concentraciones en promedios horarios de PM₁₀ se pueden observar en la Figura 18. Considerando que el área en la cual se instaló la unidad móvil no cuenta con pavimentación y en general, la zona de estudio es de tipo semirural, se infiere que las elevadas concentraciones de PM₁₀ son debidas a las condiciones locales.

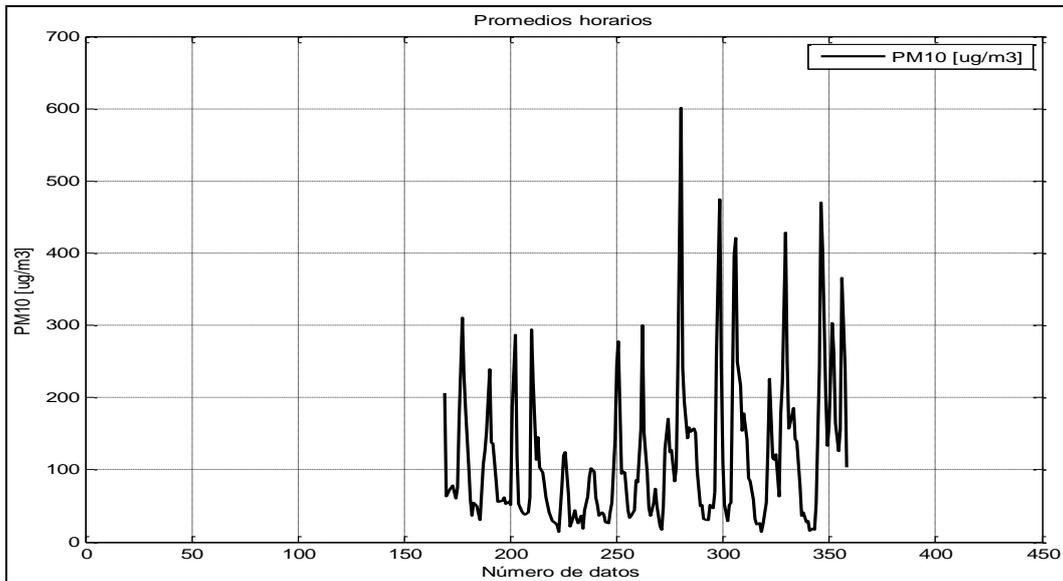


Figura 18. Serie de tiempo de promedios horarios de PM₁₀.

En la figura 19, se muestra el perfil diario de promedios horarios de PM₁₀, que presenta la distribución de las concentraciones obtenidas a lo largo del periodo de estudio por hora. En la gráfica se observa que las concentraciones más altas se obtuvieron durante el día entre las 9:00 y las 11:00 h, y en algunas horas por la tarde entre las 16:00 y 18:00.

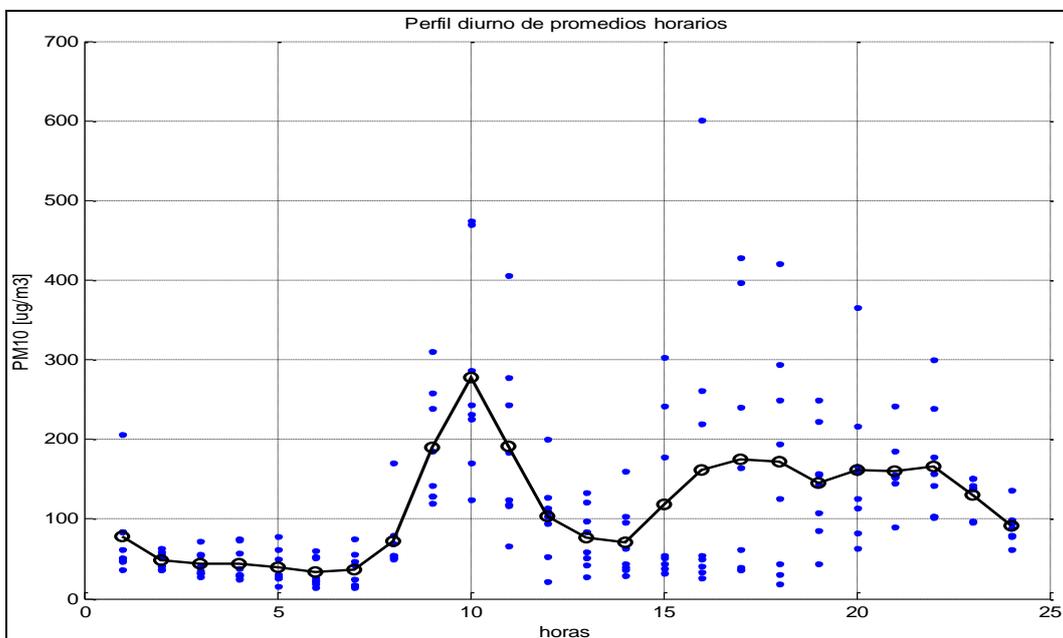


Figura 19. Perfil diario de promedios horarios de PM₁₀.

Las partículas $PM_{2.5}$ también presentaron episodios de concentraciones elevadas, como se muestra en la serie de tiempo de la Figura 20. El valor máximo alcanzando en promedio horario fue de $113.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

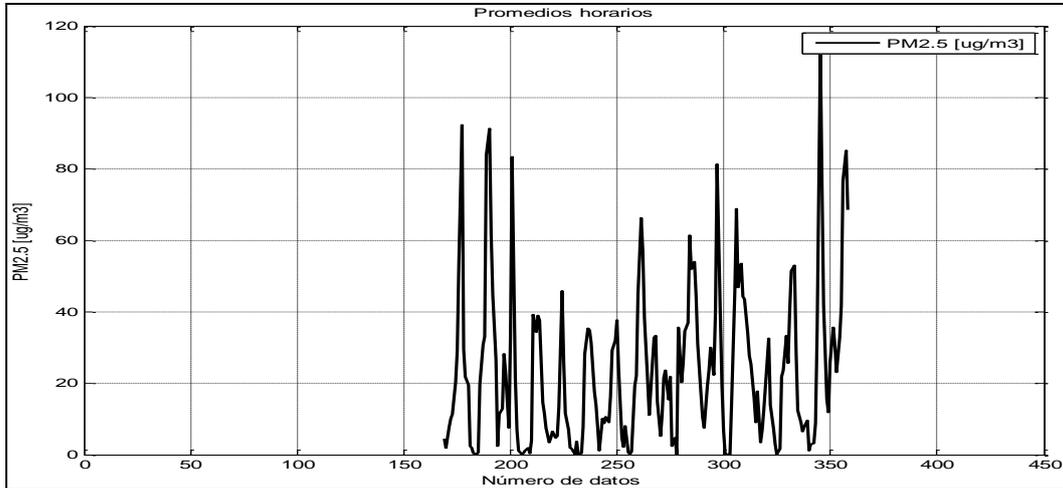


Figura 20. Serie de tiempo de promedios horarios de $PM_{2.5}$.

En la Figura 21 se muestran las tendencias que guardan las concentraciones de PM_{10} en relación a $PM_{2.5}$ a lo largo del periodo de medición, la cual vemos es similar.

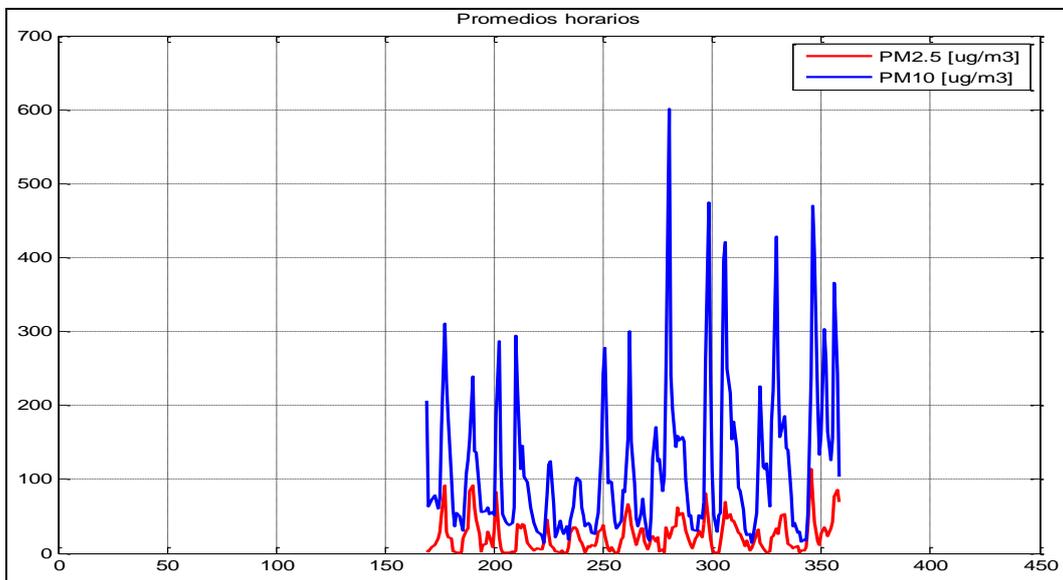


Figura 21. Serie de tiempo de promedios horarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$.

La norma de calidad de aire para partículas suspendidas establece un valor de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y para PM_{10} , un valor de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$; ambos en promedio de 24 horas.

En correspondencia con la Figura 22, se observa que se rebasó el valor de la norma para PM_{10} , en 7 de los 8 días de datos válidos para este parámetro, lo que corresponde al 87.5% de los días de datos válidos de medición. Los valores en promedios de 24 horas pueden observarse en la misma figura.

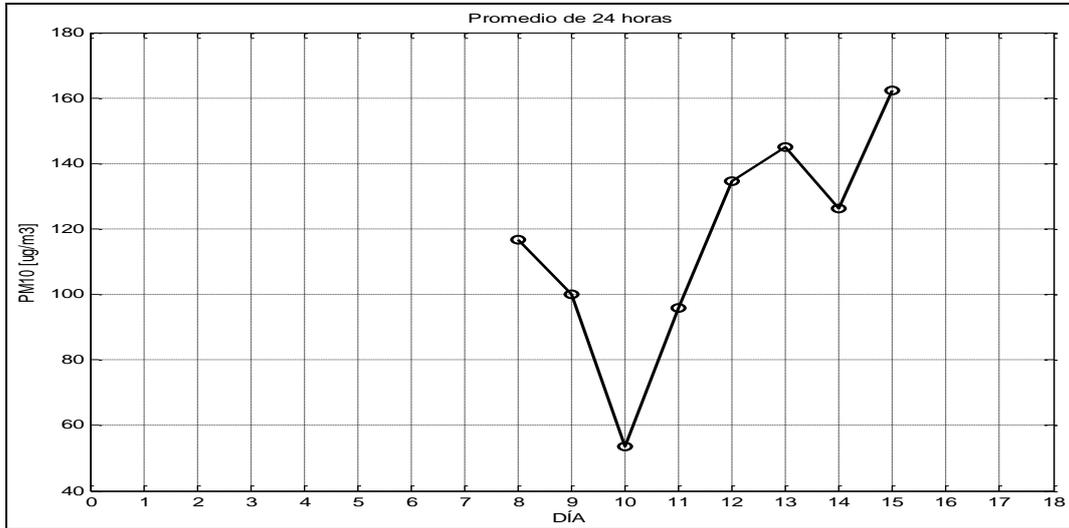


Figura 22. Promedio de 24 hora de PM_{10} .

En el caso de $PM_{2.5}$, el valor de la norma no se rebasó durante el periodo de estudio. El valor más elevado alcanzado para $PM_{2.5}$ en promedio de 24 horas fue de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos resultados pueden observarse en la Figura 23.

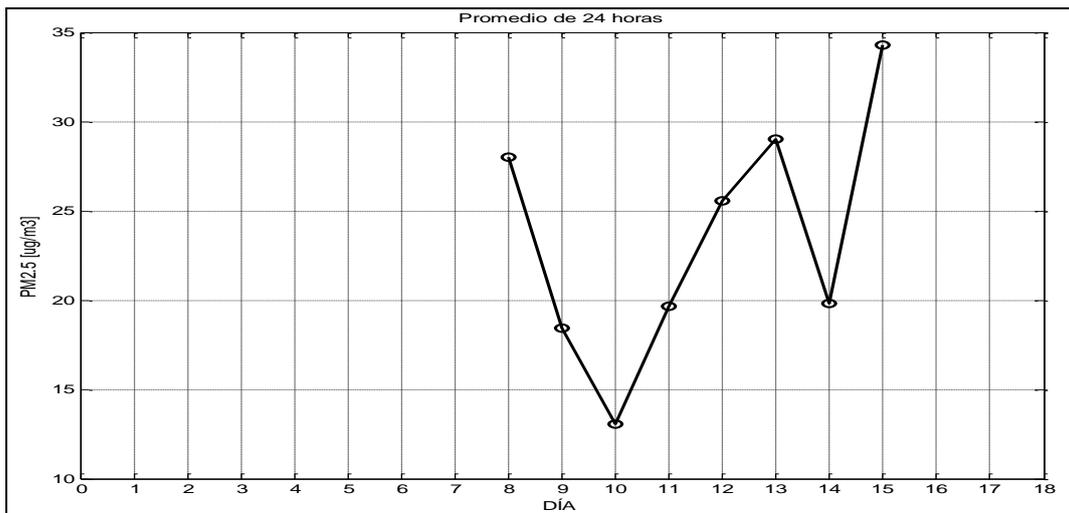


Figura 23. Promedios de 24 hora de $PM_{2.5}$.

4. CONCLUSIONES

Durante periodo de monitoreo realizado en el sitio de la Escuela Primaria Justo sierra de la ciudad de Victoria de Durango, Durango, que inició el día 9 de octubre y finalizó el 30 de mismo mes, no se encontraron concentraciones que excedan los valores de las normas de calidad del aire respectivas para los contaminantes gaseosos criterio (O₃, NO₂, SO₂ y CO).

Por otro lado, aunque se registraron concentraciones significativas de PM_{2.5} durante el periodo de medición, no se rebasó el valor de la norma correspondiente aplicando el criterio establecido por la norma, que es de 45 µg/m³ en promedio de 24 horas. El máximo valor obtenido en promedio de 24 horas para PM_{2.5} fue de 34 µg/m³.

De igual manera, se evaluaron las mediciones de PM₁₀ de acuerdo con la norma correspondiente, cuyo valor es de 75 µg/m³ en promedio de 24 horas. Las concentraciones de PM₁₀ fueron las únicas mediciones que excedieron la norma de calidad del aire correspondiente el 87.5% de los días de datos validos de medición. Las concentraciones más altas de PM₁₀ se obtuvieron durante el día entre las 9:00 y las 11:00 h, y en algunas horas por la tarde entre las 16:00 y 18:00 y considerando que el área en la cual se instaló la unidad móvil no cuenta con pavimentación y en general, la zona de estudio presenta características periurbana, se infiere que las elevadas concentraciones de PM₁₀ son debidas a las condiciones locales.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Daniel S. Wilks, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, second edition, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University. Elsevier, 2006.

2. Diagnóstico Nacional del sector ladrillero, Servicio profesionales para el desarrollo económico, S.C. Noviembre 2012.

3. Diario Oficial de la Federación, 2014/08/20, Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental, Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en aire ambiente y criterios para su evaluación.

4. Wallace and Hobbs, Atmospheric Science m, an introductory survey, second edition, 2006, University of Washington.

CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS Y COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.

Biól. Salvador Blanco Jiménez, Dr. Miguel Magaña Reyes, Dra. María de los Ángeles Benítez Macías
Subdirección de Investigación sobre Contaminación Atmosférica

I.Q. Luis Felipe Abreú García, I.Q. Laura Andreína Nevares Domínguez, Q.F.B. Marisela Pablo Santiago
Subdirección de Impactos y Manejo Sustentable de las Sustancias Químicas en el Ambiente

Dr. Arturo Gavilán García
Dirección de Investigación para el Manejo Sustentable de las Sustancias Químicas, Productos y Residuos

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx, salvador.blanco@inecc.gob.mx

RESUMEN

En la Ciudad de Durango, del 15 al 22 de octubre de 2015, se llevaron a cabo muestreos ambientales de gases y partículas $PM_{2.5}$ en las tres estaciones de monitoreo continuo de la Red de Monitoreo Atmosférico de la localidad que se localizan al norte, centro y sureste. Así mismo se tomaron muestras en una zona ladrillera con el fin de distinguir marcadores químicos de la quema de biomasa que se utiliza para la elaboración de ladrillo de forma artesanal. Este estudio tuvo como objetivo el de identificar en el área urbana la contribución a la contaminación del aire de las principales fuentes de emisión, a través del análisis de la composición química de partículas y gases. En los laboratorios del INECC se analizaron la concentración y composición de 35 especies químicas en las partículas suspendidas de la fracción $PM_{2.5}$ y de 65 sustancias de compuestos orgánicos volátiles en la fase gaseosa. Los niveles de concentración de las partículas respirables finas $PM_{2.5}$, no rebasaron el límite establecido de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en la Norma Oficial Mexicana de protección de la exposición de la población por periodos de 24 h, con un promedio de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En las $PM_{2.5}$, de la zona urbana, se encontraron indicadores químicos de emisiones vehiculares, industriales, de resuspensión del suelo y de quema de biomasa. La contribución de emisiones de la industria y de fuentes de área, incluida la quema de biomasa son las de mayor aporte, sumadas en alrededor del 62%, seguido del 17 % por erosión y resuspensión del suelo y 10% por emisiones vehiculares. En cuanto a los Compuestos Orgánicos Volátiles, de la fase gaseosa, los niveles de concentración también fueron muy bajos, sin embargo se distinguieron cuatro grupos de compuestos: (1) Compuestos derivados de las emisiones de quema de biomasa como el propeno (propileno), 1,3-butadieno y 2-propenal (acroleína). (2) Compuestos de emisiones vehiculares y de evaporación de combustibles como el n-hexano, ciclohexano, n-heptano, mesitileno, 1,2,4-trimetilbenceno, naftaleno, benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos. (3) Cetonas de uso industrial, como 2-butanona, metil isobutil cetona, 2-hexanona y acetona. Así como (4) Alcoholes de diversos usos, etanol e isopropanol.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, cuenta con una línea de investigación de caracterización analítica de contaminantes atmosféricos, enfocada principalmente al estudio de la composición de las partículas suspendidas respirables y de la especiación química de los compuestos orgánicos volátiles, con el propósito distinguir asociaciones de las concentraciones ambientales con las principales fuentes de emisión que les dieron origen, su transformación y su impacto al medio ecológico y al clima.

Los efectos al ambiente de las partículas cuando se depositan en la superficie terrestre, pueden provocar una serie de daños debido a todos los compuestos asociados a las partículas. Por ejemplo, se ha observado una reducción en la fotosíntesis, cambios en la salinidad del suelo, reducción del crecimiento, disminución de los procesos reproductivos, reducción de la presencia de microorganismos, entre otros. Durante su permanencia en la atmósfera, las partículas provocan la disminución de la visibilidad, además de impactar en el cambio climático, mediante la dispersión y absorción de radiación infrarroja y térmica o por la modificación de las propiedades de la nubosidad. Los efectos radiativos de las partículas se producen de dos formas: el efecto directo, por el que las partículas dispersan y absorben radiación infrarroja solar y térmica, y el efecto indirecto, en el que las partículas modifican las propiedades de la nubosidad.

Se ha reportado que las concentraciones de este contaminante en un intervalo de 11 a 29.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, están relacionadas con morbilidad y mortalidad en ambientes urbanos.

Se considera que las $\text{PM}_{2.5}$, de tamaño igual o menor a 2.5 micras, son las más nocivas para la salud humana, ya que pueden penetrar directamente a los alvéolos. Afecta principalmente al sistema respiratorio y cardiovascular, incrementando el riesgo de una embolia o un infarto, o bien provocando la aceleración de la aterosclerosis (endurecimiento de las arterias) cuando hay una exposición crónica a este contaminante. De hecho, las $\text{PM}_{2.5}$ ocupan el noveno lugar en la lista de los factores de riesgo asociados con los índices de mortalidad a nivel mundial, principalmente por enfermedades cardiovasculares. Así mismo, se ha identificado que los compuestos orgánicos presentes en las partículas tienen posibles efectos mutagénicos y carcinogénicos.

La relación entre los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), y cómo su composición afecta la formación de ozono, no es una relación lineal, de tal forma que la respuesta del ozono a cambios en las concentraciones de sus precursores es compleja y variable.

Debido a la importancia de contar con información referente a la concentración y especiación de los compuestos orgánicos volátiles presentes en la atmósfera para la formulación de programas ya sea normativos o de control de emisiones contaminantes, es necesario obtener información que permita conocer las concentraciones, así como determinar el tipo de especies de compuestos orgánicos volátiles, tanto reactivas como tóxicas en el aire, a fin de caracterizar las diferencias potenciales en diferentes sitios del Área Metropolitana de la Ciudad de Durango que tienen fuentes de emisión comunes y distintas entre sí. La presencia de los COVs en la atmósfera de los grandes centros urbanos también es relevante ante los efectos en la salud humana que se le asocian, como es el caso del riesgo tóxico, mutagénico y cancerígeno que representan especies como el benceno. Por su incidencia en la salud humana algunos de los COVs se denominan tóxicos y sus efectos pueden ocurrir en el corto plazo (agudos) o en el largo plazo (crónicos).

2. Objetivo

Mediante una campaña de colecta de muestras de aire ambiente, en la Ciudad de Durango, evaluar la concentración y composición química de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ y de especies químicas de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), para identificar indicadores químicos de diversas fuentes de emisión en la localidad.

3. Muestreo y Análisis químicos

3.1. Sitios de Muestreo

Se seleccionaron por su seguridad y facilidad de acceso las tres estaciones de monitoreo continuo de la Red de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de Durango que se localizan al Norte, Centro y Sureste, SIDIR-Unidad de Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (**IPN**), (**ITD**)-Instituto Tecnológico de Durango y **SRN**-Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente, respectivamente (Figura 1), en donde se llevó a cabo muestreo de partículas y gases del 15 al 22 de octubre de 2015. Así mismo se tomaron muestras en una zona ladrillera con el fin de distinguir marcadores químicos de la quema de biomasa que se utiliza para la elaboración de ladrillo de forma artesanal.

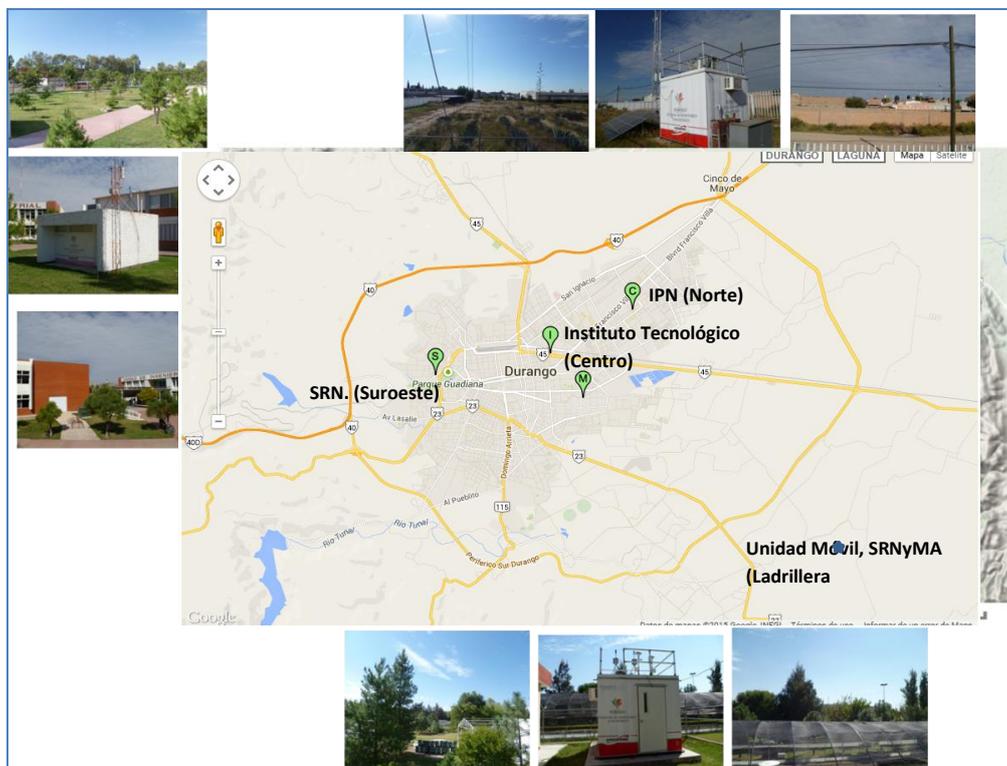


Figura 1. Localización de los sitios de Muestreo de Partículas y Compuestos Orgánicos Volátiles, al Norte, Centro y Suroeste de la Ciudad de Durango.

3.2. Muestreo y Análisis de Partículas Suspensas PM_{2.5}

En cada sitio fijo, el muestreo se realizó con muestreadores de bajo volumen Minivol, marca Airmetrics, a un flujo de 5 litros por minuto, por periodos de 48 horas continuas en las tres estaciones de monitoreo continuo de la Ciudad de Durango obteniéndose tres muestras en el periodo comprendido del 15 al 22 de octubre de 2015. En la Zona Ladrillera se colocó un equipo Minivol que operó durante 24 horas durante 4 días consecutivos.

Determinación Gravimétrica

Para la cuantificación de la masa, las muestras colectadas en los filtros de teflón de ambos equipos, se analizaron mediante gravimetría para determinar la concentración de las partículas suspendidas en aire ambiente. El pesaje de los filtros se realizó en el Laboratorio de Acondicionamiento y Pesaje de Filtros del INECC, empleando una ultra microbalanza analítica (CAHN C-35, con una resolución mínima de 1.0 µg, incertidumbre de ± 0.005 mg, precisión de 1.0 µg y exactitud de 0.0012%) según procedimiento interno para bajo volumen (PT-APF-01). El método y procedimiento en laboratorio incluyó lo siguiente: (1) acondicionamiento durante 24 horas antes y después del muestreo a condiciones controladas de temperatura de 22°C (±3°C) y humedad relativa de 40% (±5%); (2) uso de ionizador de aire y tapete específicos para eliminar las cargas electrostáticas en el manejo de los filtros; (3) calibración del equipo (efectuado por un laboratorio acreditado), verificación con pesas calibradas trazables E1 y verificación con pesas calibradas de trabajo en cada sesión de pesaje. Se utilizó el 5% de los filtros como blancos de laboratorio. Una vez que se calculó la masa neta se relacionó con el volumen de muestreo para obtener la concentración de partículas (Figura 2).



Figura 2. Acondicionamiento y pesaje de filtros pre y post-muestreo

Determinación de carbono negro y carbón orgánico por atenuación de luz

La determinación semicuantitativa de carbono se realizó en filtros de teflón que fueron analizados con el equipo transmisómetro Soot Scan™ Modelo OT21 (Magee Inc.) que determina los valores de atenuación de luz transmitida a través del filtro con muestra, que fue expuesto a luz transmitida a dos longitudes de onda: en la región ultravioleta (370nm, para la determinación de Carbono Orgánico) y la región infrarroja (880nm, con la cual conocemos la atenuación del Carbono Negro), mediante el procedimiento interno de análisis establecido en los Laboratorios de INECC PT-CQP-002 (Figura 3).

Las medidas que registra son: atenuación UV e IR, que se calcula como:

$$\text{Atenuación} = 100 * \ln\left(\frac{\text{Transmisión de luz del filtro blanco}}{\text{Transmisión de luz filtro muestra}}\right)$$

Este principio de atenuación está determinado por medio de la ley de Beer-Lambert que explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa.

El correcto funcionamiento fue verificado con lentes de densidad neutra (DN) que se utilizan periódicamente para comprobar la respuesta del equipo. Estos discos filtro DN están hechos de materiales fotométricos estándar y se suministran en una caja protectora. Exhiben absorbancia reproducible en las dos longitudes de onda de análisis, y están certificados bajo una norma fotométrica-NIST.

Los valores de atenuación para cada muestra fueron referidos a su equivalencia de concentración expresada en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, calculada con respecto al método de referencia por reflectancia térmico-óptica (Blanco y col., 2015).



Figura 3. Análisis de carbono negro en las partículas suspendidas mediante transmisómetro por atenuación de luz infrarroja

Determinación de elementos ligeros y pesados por Fluorescencia de Energía Dispersiva de Rayos X

Para la determinación de 17 elementos: Aluminio, Silicio, Fósforo, Azufre, Cloro, Potasio, Calcio, Titanio, Vanadio, Cromo, Manganeso, Hierro, Níquel, Cobre, Zinc, Bromo y Plomo, se utilizó un equipo de fluorescencia de rayos-X (XRF por energía dispersiva) marca Thermo Scientific modelo ERD QUANT'X, para muestras obtenidas en la matriz teflón. Los análisis se realizaron conforme al Procedimiento Estándar de Operación de RTI International (2009), que se utiliza para la especiación química de 280 estaciones de monitoreo la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

El principio de medición de este instrumento consiste en la emisión de rayos X a partir de un filamento de rodio, que incide en la muestra, excitando los átomos presentes en la misma, que a su vez emiten radiación característica denominada fluorescencia de rayos X, cuya intensidad es

transmitida a un detector de rayos X de estado sólido de silicio litio (Si [Li]) que opera con enfriamiento por vía electrónica por debajo de 190 K, la electrónica de procesamiento de pulso es conducida a un PC, que muestra y procesa la información espectral y salidas de datos de concentración elementales (Figura 4).

Este equipo fue calibrado con estándares de concentraciones conocidas de sustancias depositadas de manera uniforme en membranas de teflón y mylar, marca Micromatter.

La verificación y ajuste fino, se realizó cada semana mediante el acondicionamiento del instrumento con una placa de cobre para 8041 eV y la evaluación periódica de un material de referencia certificado de partículas suspendidas (NIST No. 2783) de composición elemental conocida.

Las muestras colectadas de partículas suspendidas se analizaron de 200 a 300 segundos, en cinco diferentes condiciones de tipos de filtración de rayos X, voltaje y corriente eléctrica. Los resultados obtenidos fueron expresados en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.



Figura 4. Análisis de composición elemental por Fluorescencia de Rayos X por energía dispersiva

Determinación de compuestos inorgánicos secundarios, aniones y cationes

Se cuantificaron los aniones: fluoruro, cloruro, nitrito, sulfato, bromuro, nitrato y fosfato y seis cationes: litio, sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio.

Las especies químicas de aniones y cationes fueron extraídas de los filtros de cuarzo muestreados, con agua desionizada mediante sonicación por 60 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente las muestras se agitaron en un cuarto frío a 4°C por 12 horas; a 100 revoluciones por minuto.

Las muestras, los blancos de método y blancos adicionados fueron filtrados por medio de acrodiscos de 0.2 μm de tamaño de poro.

Se realizó una segunda extracción bajo el mismo procedimiento, con el objetivo de recuperar un porcentaje adicional (5-8%) al 90% del analito recuperado en la primera extracción, que sumados se obtiene una recuperación aproximada del 95% de la muestra.

El material extraído fue analizado mediante cromatografía líquida de intercambio iónico con el equipo marca Dionex DX-500 con Columna IonPac AS14 para aniones y para cationes con el equipo Dionex ICS 1600, basado en los métodos analíticos para aniones EPA 9056A y para cationes ASTM 6919, bajo el procedimiento interno de análisis establecido en los Laboratorios de PT-CLAR-003 e INECC PT-CLAR-004, respectivamente.

Para el análisis de aniones se utilizó una fase móvil de bicarbonato de sodio y de carbonato de sodio a 3 miliMolar y para el análisis de cationes la fase móvil de ácido Metansulfónico de 20 miliMolar.

Los resultados fueron obtenidos a partir de curvas de calibración expresados en $\mu\text{g/mL}$ y referenciados a $\mu\text{g/cm}^2$ del filtro de cuarzo muestreado.

3.3. Muestreo y Análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)

Se realizó una campaña corta de colecta de muestras de aire ambiente del 16 al 22 de octubre de 2015 para la caracterización posterior de Compuestos Orgánicos Volátiles tóxicos por medio del método TO15 de la EPA.

Las muestras se tomaron todos los días de la siguiente manera:

1 muestra integrada de 24 horas (de 12:00 h de un día a las 12:00 h del día siguiente) en cada sitio por cada día de muestreo.

Adicionalmente se colectaron muestras en los alrededores de dos hornos ladrilleros durante el periodo de operación de cada horno: 4 cánisters en el perímetro de un horno tradicional el 10 de octubre y 4 cánisters más alrededor de un horno llamado MK2 el 13 de octubre.

Los cánisters utilizados en este estudio fueron cánisters SUMMA de acero inoxidable de 6 litros de capacidad, electropulidos en sus superficies internas y recubiertas con óxido de cromo para evitar la adhesión de los COVs a las paredes del recipiente. El Laboratorio de COVs del INECC cuenta con cánisters SUMMA marca Rasmussen-Sibata con una válvula Nupro de Swagelok.

Antes de su utilización, es necesario limpiar cada cánister mediante un proceso en el que se realizan tres ciclos de vacío (60 minutos) y purga (10 minutos) con nitrógeno (grado cromatográfico), a la vez que de caliente mediante una mantilla alrededor de 90°C . Al final del proceso se obtiene el cánister limpio y vacío a -60 cm de Hg (Figura 5).



Figura 5. Cánisters SUMMA de acero inoxidable de COVs. Sistema de limpieza de los cánisters mediante ciclos de vacío y purga con nitrógeno y calentamiento con mantillas.

La limpieza de los cánisters se realiza con un equipo marca DKK, modelo GAS-2BR que cuenta con una bomba de vacío y una entrada para gas de purga. El aparato está conectado a una tubería de acero inoxidable que permite conectar hasta cuatro cánisters a la vez. El sistema cuenta con un humidificador lleno con agua desionizada, de modo que el vapor de agua que entra junto con el nitrógeno de purga, contribuye a arrastrar los COVs adheridos a las paredes del cánister y a lograr una mejor limpieza del mismo. Una vez que los cánisters están limpios y han sido evacuados a -60 cm de Hg, pueden utilizarse para la colecta de muestras de aire ambiente.

Para el presente estudio, se realizaron muestreos integrados en el tiempo, en los que la muestra se tomó a lo largo de un intervalo de tiempo determinado. Para este fin se adapta al cánister un controlador de flujo de orificio crítico, el cual tiene un conector con un orificio muy pequeño. El tamaño de orificio depende del flujo de entrada deseado. Se realizaron muestreos integrados: de 24 para lo cual se utilizan orificios críticos de 1.2 milésimas de pulgadas respectivamente.

Para lograr la apertura y cierre del cánister de manera automática, se conectó entre el cánister y el controlador de orificio crítico, un temporizador programable que cuenta con una válvula solenoide normalmente cerrada, que actúa eléctricamente y es alimentada por una batería recargable. El uso del temporizador permite programar la apertura de la válvula solenoide (y en consecuencia el llenado del cánister) el día y la hora deseada (Figura 6).



Figura 6. Adaptación de controlador de flujo de orificio crítico y temporizador para realizar muestreos integrados y programados.

Determinación de Compuestos Tóxicos por el método TO15

El análisis de las muestras se realiza mediante el método de la EPA TO15, para analizar compuestos orgánicos volátiles tóxicos en aire ambiente por medio de Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. El análisis se realiza en un cromatógrafo Agilent 6890N, acoplado a un espectrómetro de masas Agilent 5975B. El equipo cuenta con un sistema de preconcentración criogénica ENTECH 7100A que opera con nitrógeno líquido para el enriquecimiento de las muestras mediante un método de micropurga y trampa. Mediante este sistema se pueden analizar 65 especies de Compuestos Orgánicos Volátiles que incluyen hidrocarburos aromáticos, compuestos oxigenados y halogenados.

El método TO15 de la EPA, comprende los procedimientos analíticos para la medición de subconjuntos de 65 compuestos orgánicos volátiles tóxicos que se incluyen en los 189 contaminantes de aire peligrosos (HAPs) que figuran en el Título III de las Enmiendas a la Ley de Aire Limpio de 1990.

Las muestras ingresan al sistema analítico mediante un rack de cánisters (marca Entech, modelo Autosampler 7016CA). El Rack tiene capacidad para 16 conexiones y es controlado por un equipo de preconcentración.

Preconcentrador

El Laboratorio EACOV cuenta con un preconcentrador marca Entech, modelo 7100A. Es un equipo que tiene por objetivo el enriquecimiento de los analitos en muestras ambientales, que normalmente se encuentran en concentraciones muy bajas, en partes por billón en volumen (ppbV). La concentración de las muestras se realiza mediante un proceso de micropurga y trampa que incluye el enfriamiento con nitrógeno líquido a temperaturas del orden de los 150°C bajo cero. Posteriormente la muestra es purgada con helio para eliminar la humedad y el bióxido de carbono y capturada en trampas con materiales adsorbentes. Posteriormente se inyecta al cromatógrafo de gases para su análisis posterior.

Cromatógrafo de Gases

El análisis de COVs tóxico se realiza en un cromatógrafo Agilent 6890N acoplado a un espectrómetro de masas 5975B (Detector selectivo de masas o MSD).

Las condiciones analíticas del instrumento son:

Gas Acarreador: Helio grado 5.0.

Columna: DB-5ms (marca J&W) de 60 m x 0.32 mm x 1 µm

Rampa: 35°C por 5 min, 6°C/min hasta 140°C por 0 min, 15°C/min hasta 220°C por 5 min. (Tiempo de corrida: 32.83 min.)

Presión de salida: 3.8 psi.

Temperatura: 200°C

Presión: 14.7 psig

Espectrómetro de Masas (MSD):

Flujo de helio: 1.0 mL/min

Temperatura de la fuente: 230°C

Temperatura del cuadrupolo: 150°C

Temperatura del auxiliar: 230°C

Modo: Scan

Sintonía: BFB (1-bromo-4-fluorobenceno)

El sistema analítico está enlazado a una computadora con el software ChemStation de Agilent que controla al cromatógrafo. El preconcentrador y el rack se controlan mediante su propio software. Ambos programas trabajan juntos para controlar el sistema analítico completo. El programa ChemStation proporciona los cromatogramas y en el caso del MSD el espectro iónico. El sistema cuenta con una librería para realizar la comparación de espectros de los compuestos analizados con referencias para establecer la identidad.

Las equivalencias de áreas bajo la curva y las concentraciones de cada analito, se determinan mediante curvas de calibración, que se elaboran inyectando varias concentraciones conocidas de los analitos TO15 y determinando la relación lineal entre las variables. Se considera correcta la curva de calibración cuando se obtiene un coeficiente de determinación (R²) mínimo de 0.99. Para realizar la calibración, se utiliza un gas estándar TO15 de 65 compuestos marca Spectra (Linde Gas North America LLC).

Una vez que se cuenta con los datos de integración de los cromatogramas, es posible, mediante las curvas de calibración, obtener los niveles de concentración de los COVs tóxicos, previa aplicación, si es el caso, de los factores de dilución pertinentes. Los datos de calibración de los COVs tóxicos fueron los siguientes:

Compuesto	LCM (ppbV)	Pendiente (x 10⁻⁵)	Coeficiente de determinación (r²)
1.- acetona	0.30	5.41	0.999
2.- acroleína	0.30	1.54	0.997
3.- benceno	0.30	10.5	0.997
4.- cloruro de bencilo	0.30	17.0	0.998
5.- bromoformo	0.30	9.17	0.996
6.- bromometano	0.30	3.38	0.999
7.- bromodichlorometano	0.30	7.61	0.995
8.- 1,3-butadieno	0.30	3.10	0.999
9.- 2-butanona (MEK)	0.30	8.07	0.999
10.- disulfuro de carbono	0.30	10.1	0.999
11.- tetracloruro de carbono	0.30	8.00	0.998
12.- clorobenceno	0.30	11.2	0.998
13.- cloroetano	0.30	1.98	0.999
14.- cloroformo	0.30	6.50	0.998
15.- ciclohexano	0.30	7.84	0.999
16.- clorometano	0.30	4.29	0.999
17.- dibromoclorometano	0.30	7.56	0.997
18.- 1,2-diclorobenceno	0.30	11.9	0.997
19.- 1,3-diclorobenceno	0.30	12.6	0.998
20.- 1,4-diclorobenceno	0.30	12.6	0.998
21.- 1,1-dicloroetano	0.30	6.51	0.997
22.- 1,2-dicloroetano	0.30	4.61	0.996
23.- 1,1-dicloroetano	0.30	5.92	0.999
24.- <i>cis</i> -1,2-dicloroetano	0.30	4.95	0.999

25.- <i>trans</i> -1,2-dicloroetano	0.30	3.11	0.998
26.- 1,2-dicloropropano	0.30	4.38	0.997
27.- <i>cis</i> -1,3-dicloropropeno	0.30	6.22	0.996
28.- <i>trans</i> -1,3-dicloropropeno	0.30	5.86	0.997
29.- 1,4-dioxano	0.30	2.07	0.999
30.- etanol	0.30	1.54	0.994
31.- acetato de etilo	0.30	9.46	0.999
32.- etilbenceno	0.30	17.9	0.998
33.- dibromuro de etilo	0.30	7.11	0.997
34.- 4-etiltolueno	0.30	20.5	0.997
35.- Freón 11 (triclorofluorometano)	0.30	9.24	0.998
36.- Freón 12 (diclorodifluorometano)	0.30	9.76	0.999
37.- Freón 113 (1,1,2-triclorotrifluoroetano)	0.30	7.04	0.999
38.- Freón 114 (1,2-diclorotetrafluoroetano)	0.30	8.47	0.999
39.- <i>n</i> -heptano	0.30	7.84	0.999
40.- hexacloro-1,3-butadieno	0.30	5.70	0.975
41.- <i>n</i> -hexano	0.30	6.15	0.998
42.- 2-hexanona (MBK)	0.30	11.0	0.998
43.- metil metacrilato	0.30	6.20	0.998
44.- 4-metil-2-pentanona (MIBK)	0.30	11.8	0.999
45.- cloruro de metileno	0.30	4.55	0.999
46.- metil- <i>tert</i> -butil éter	0.30	9.57	0.999
47.- naftaleno	0.30	13.9	0.999
48.- 2-propanol	0.30	4.82	0.998
49.- propileno	0.30	3.11	0.999
50.- estireno	0.30	12.5	0.998
51.- 1,1,2,2-tetracloroetano	0.30	10.6	0.999
52.- tetracloroetano	0.30	7.14	0.997
53.- tetrahidrofurano	0.30	4.66	0.999
54.- tolueno	0.30	13.7	0.997
55.- 1,1,1-tricloroetano	0.30	7.70	0.998
56.- 1,1,2-tricloroetano	0.30	4.62	0.997
57.- tricloroetano	0.30	4.75	0.997
58.- 1,2,4-triclorobenceno	0.30	6.58	0.992
59.- 1,2,4-trimetilbenceno	0.30	17.3	0.997
60.- 1,3,5-trimetilbenceno	0.30	17.3	0.997
61.- acetato de vinilo	0.30	10.3	0.998
62.- cloruro de Vinilo	0.30	3.99	0.999
63.- <i>m</i> -xileno	0.30	14.8	0.997
64.- <i>o</i> -xileno	0.30	14.8	0.997
65.- <i>p</i> -xileno	0.30	14.0	0.997

4. Resultados y discusión

4.1. Partículas Suspensas PM_{2.5}

El muestreo manual de partículas PM_{2.5} en la zona urbana de Durango, presentó en esta campaña de medición, un promedio de 15 µg/m³, teniendo las zonas Suroeste y Centro, niveles menores a 10 µm/m³ en dos de tres ocasiones. El muestreo realizado en la zona de ladrilleras registró niveles mayores de partículas finas suspendidas, en ocasiones hasta del doble con respecto a la zona urbana central (Figura 7). Es importante señalar que todas las concentraciones registradas se encontraron por debajo de los límites de riesgo para los habitantes (< 45 µg/m³, en periodos de exposición de 24 horas).

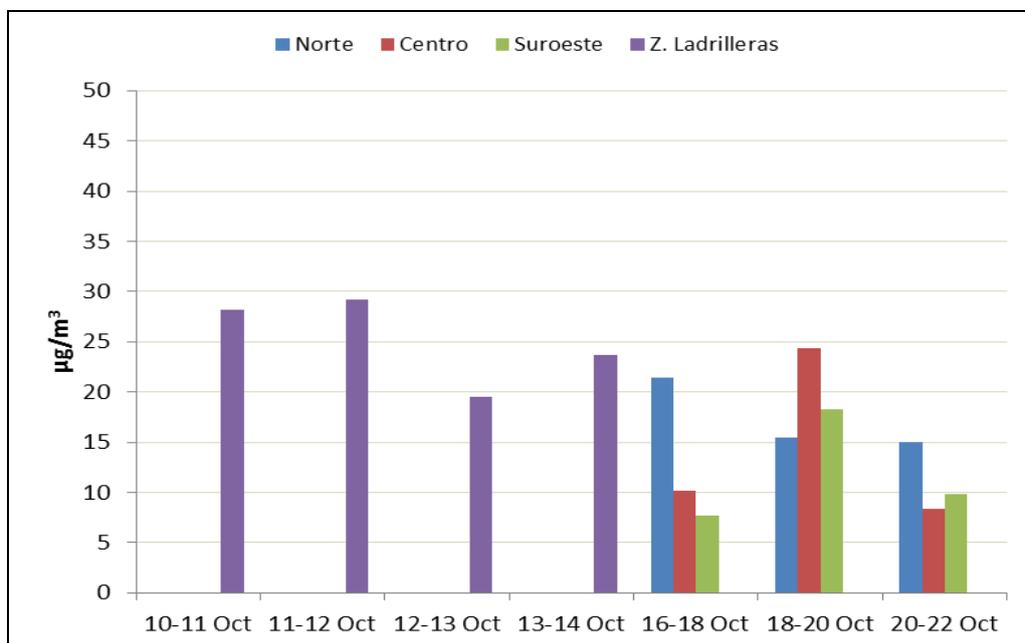


Figura 7. Concentración de muestras integradas de partículas suspendidas PM_{2.5} en la Ciudad de Durango en la Zona urbana (de periodos de 48 h) y en la Zona de Ladrilleras (de periodos de 24 h).

Con el fin de conocer el origen de las partículas se analizaron las muestras obtenidas en laboratorio, cuyos componentes se observan enseguida.

De los elementos que son constituyentes del suelo, tales como el Aluminio (Al), Silicio (Si), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Titanio (Ti), el elemento de mayor concentración fue el Si, hasta poco más de tres veces que los demás elementos del suelo. Los resultados muestran que todos los sitios del área urbana están influenciados por la resuspensión de la tierra de las calles no pavimentadas y de la erosión de la región, especialmente de las zonas Norte y Suroeste (Figura 8).

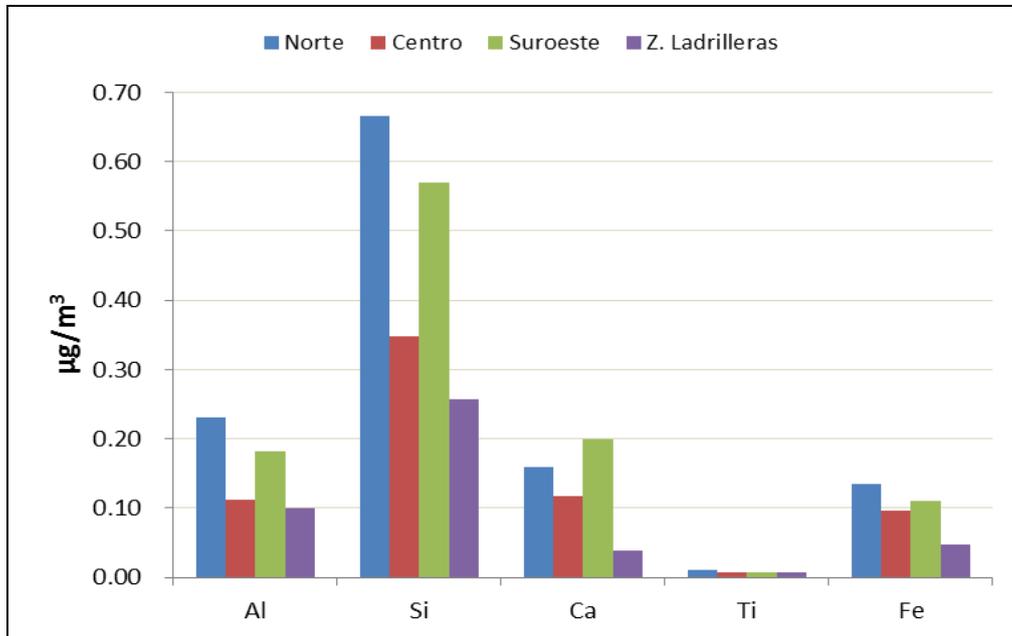


Figura 8. Elementos indicadores de resuspensión de minerales de la composición del suelo, de la zona urbana de la Ciudad de Durango y de la zona ladrillera periurbana.

Los metales pesados Níquel (Ni) y Vanadio (V) se asocian con la combustión de combustibles fósiles pesados como el diésel y combustóleo, metales como el Cromo (Cr), Manganeseo (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Plomo (Pb), se relacionan con procesos industriales, adicionalmente Cu y Zn son constituyentes de las llantas y de los frenos de los vehículos por lo que también son considerados como indicadores de la resuspensión de partículas derivadas de la fricción de rodamiento vehicular con el pavimento. Todos estos elementos se encuentran en niveles poco significativos, en el área urbana y en la zona ladrillera (Figura 9).

La Figura 9, muestra que no hay evidencia en las muestras colectadas de que se lleven a cabo prácticas en la zona ladrillera de la quema de llantas, debido a que los niveles de Cu y Zn, por debajo de 8 y 2 ng/m³, respectivamente, corresponden tan solo a la resuspensión de partículas derivadas de la fricción de llantas y por la actividad de frenado de los vehículos.

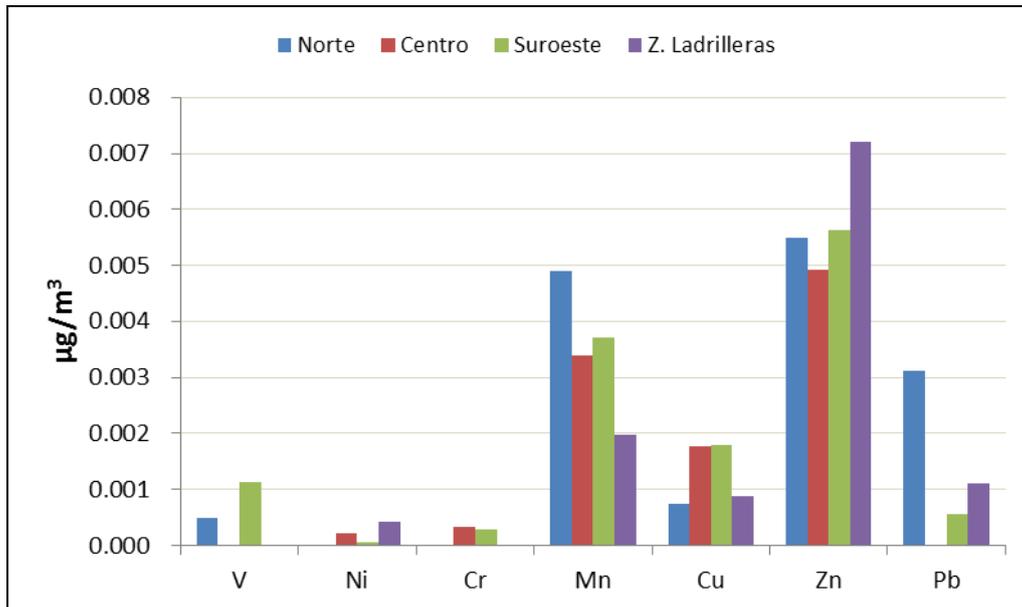


Figura 9. Metales pesados analizados en PM2.5, de la zona urbana de la Ciudad de Durango y de la zona ladrillera periurbana.

El elemento Potasio (K), es considerado como marcador de la quema de biomasa, ya sea de incendios forestales, ya sea por la actividad de quemar leña en hogares rurales para la cocción de alimentos o bien para la elaboración de ladrillos en hornos tradicionales o mejorados. Este elemento se encontró representado tanto en la zona urbana, así como en la zona ladrillera (Figura 10), así mismo se encontró la presencia de Azufre (S) como constituyente también en este estudio de la quema de biomasa (Figura 11), este elemento en particular también proviene del contenido de azufre de los combustibles y de la conversión de gas a partícula de dióxido de azufre a sulfato emitido por fuentes industriales en áreas urbanas e industriales, sin embargo en la Ciudad de Durango también proviene de la quema de leña.

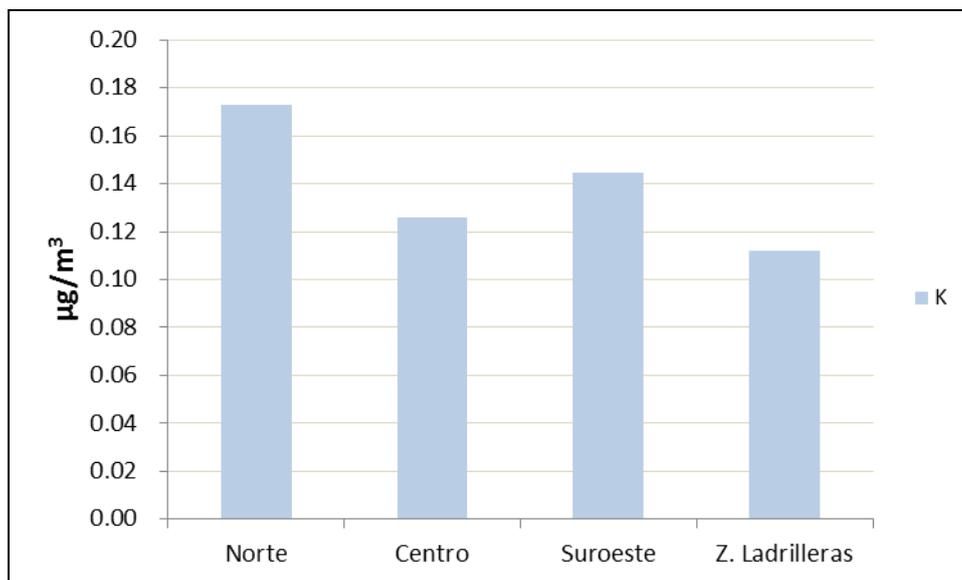


Figura 10. Niveles de concentración de Potasio (K) en $PM_{2.5}$, de la zona urbana de la Ciudad de Durango y de la zona ladrillera periurbana.

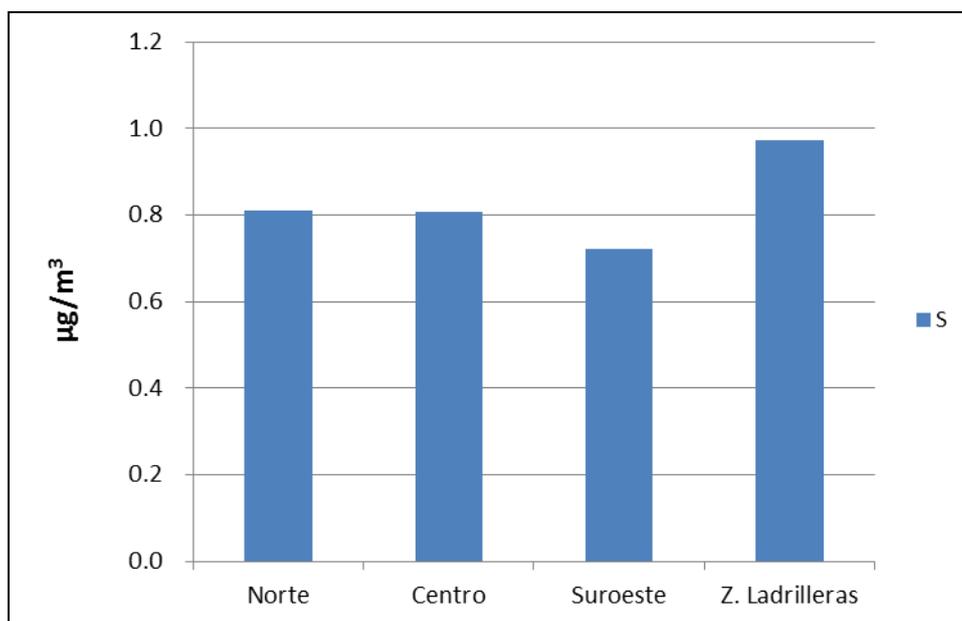


Figura 11. Niveles de concentración de Azufre (S) en $PM_{2.5}$, de la zona urbana de la Ciudad de Durango y de la zona ladrillera periurbana.

De la integración de todos los análisis de laboratorio realizados a las muestras obtenidas en el área urbana, se cuantificó un balance de masa, que se describe a continuación.

La concentración promedio de la zona urbana fue de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tres veces por debajo de la concentración de riesgo por exposición a $\text{PM}_{2.5}$ en 24 hora, cuyo balance de composición química promedio se muestra en la Figura 12.

Existen aportes de carbono y sulfato de amonio de diversas fuentes, industrial y de área, que sumados aportan el 58% de la composición de las $\text{PM}_{2.5}$.

La resuspensión del suelo es un componente mayor, que contribuye con poco más del 17% del $\text{PM}_{2.5}$.

Las fuentes móviles tienen poca representación en $\text{PM}_{2.5}$, en cerca de 10 % por carbono y nitrato.

El indicador potasio se sugiere que debe entenderse como indicador de la quema de biomasa, sin embargo se suma a carbono y azufre de la misma fuente.

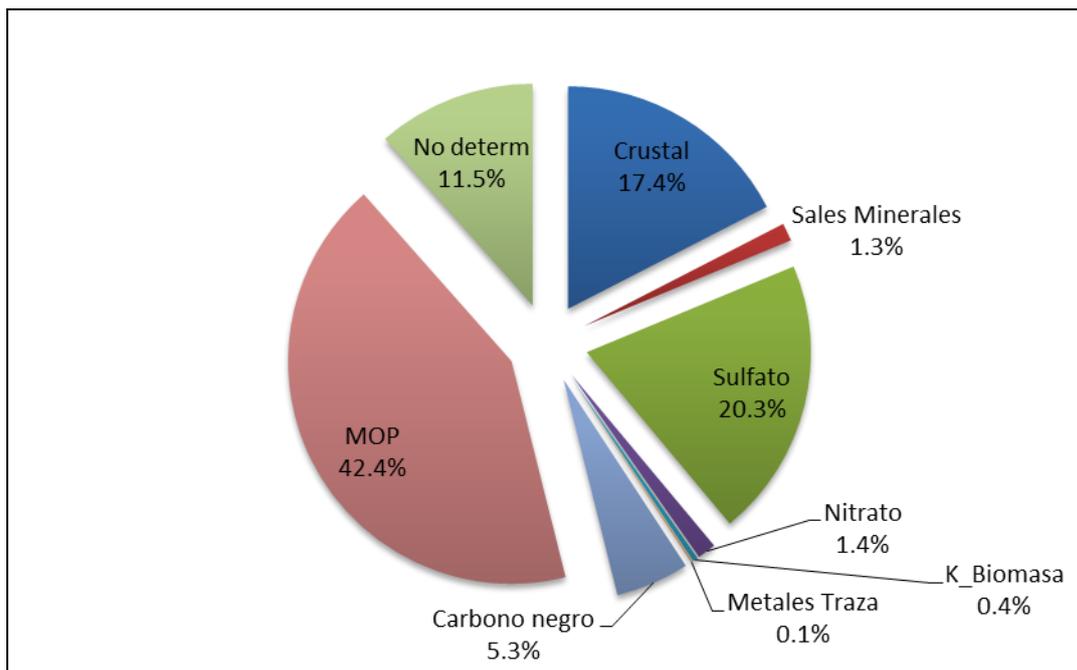


Figura 12. Balance de masa de la composición de la fracción fina respirable de partículas suspendidas $\text{PM}_{2.5}$ del área urbana de la Ciudad de Durango.

4.2. Compuestos Orgánicos Volátiles

Los COVs estudiados en la zona urbana de Durango, mostraron en esta campaña, concentraciones pequeñas: el límite de cuantificación del método (LCM) fue de 0.3 ppbV. Cuando un analito tuvo una concentración menor al LCM, ésta se reporta como $\frac{1}{2}$ del LCM, por lo que las concentraciones promedio se observaron en el rango de 0.15 a 1.5 ppbV para cada compuesto. Para poder sumar las concentraciones de distintos compuestos y reportar una concentración total de COVs tóxicos analizados, se convirtió cada concentración de ppb a partes por billón de carbono (ppbC). De esta forma se puede observar que la zona Suroeste (SRNyMA) es la que mostró las concentraciones máximas: 47 ppbC, mientras que el Centro (ITD), presentó niveles menores: 39.5 ppbC. El muestreo realizado en la zona de ladrilleras registró niveles intermedios, similares a los encontrados en la zona Norte (CIIDIR): 41.5 ppbC (Figura 13).

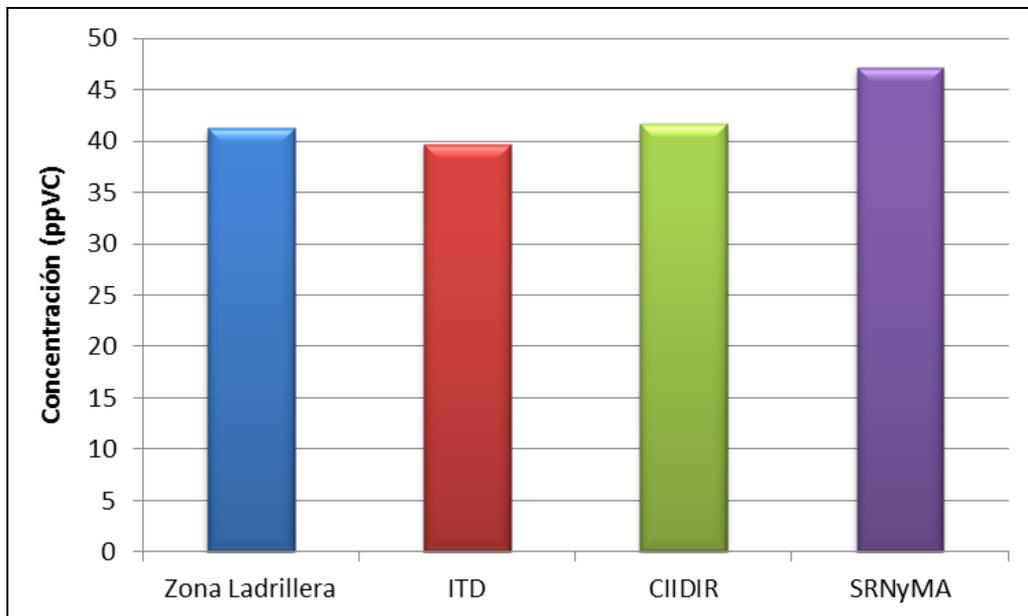


Figura 13. Concentración promedio de muestras de COVs totales analizados en tres sitios del Área Urbana de la Ciudad de Durango (integradas de 24 h) y en una zona Ladrillera (integradas de 8 h).

Como resultado de la especiación de COVs, se pudieron observar cuatro grupos de compuestos con las siguientes características:

- 1) Compuestos que se han reportado como parte de las emisiones de quema de biomasa y que en principio, podrían utilizarse como un indicador de la quema de leña en los hornos ladrilleros: propeno (propileno), 1,4-diclorobenceno y 2-propenal (acroleína).
- 2) Compuestos que se encuentran predominantemente en emisiones vehiculares y de evaporación de combustibles: n-hexano, ciclohexano, n-heptano, mesitileno, 1,2,4-trimetilbenceno, naftaleno, benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos.
- 3) Cetonas de uso industrial: 2-butanona, metil isobutil cetona, 2-hexanona y acetona.
- 4) Alcoholes: etanol e isopropanol.

La figura 14 muestra las concentraciones (ppb) de cada uno de los compuestos encontrados en los tres sitios urbanos y contrastados con la zona ladrillera estudiada.

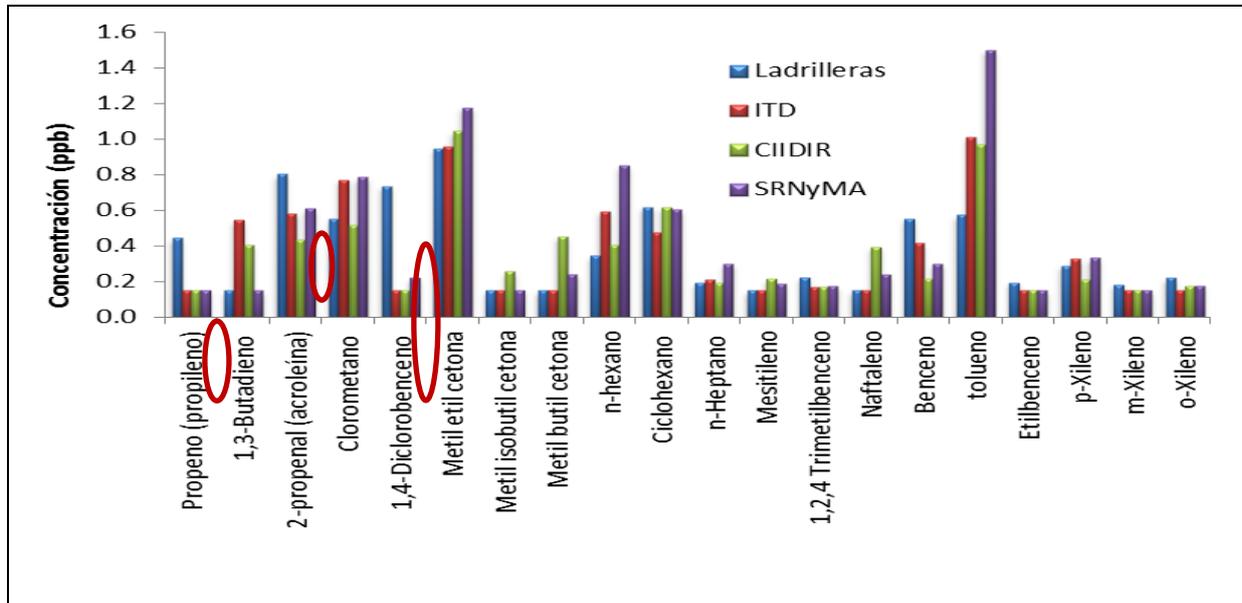


Figura 14. Contraste de las concentraciones de especies individuales de COVs tóxicos analizados áreas urbanas vs una zona Ladrillera.

Resaltan a la vista tres compuestos cuyas concentraciones promedio en la zona ladrillera son más elevadas que las concentraciones promedio de los sitios urbanos. Estas sustancias están encerradas en círculos rojos en la figura 14 y son: propileno, acroleína y 1,4-diclorobenceno. Se ha reportado (Wang et al. 2014) que estos compuestos provienen, entre otras fuentes, de la quema de biomasa por lo que en el presente estudio se consideran como marcadores de la quema de leña en los hornos ladrilleros. Se observa que la influencia de las emisiones de estos tres indicadores provenientes de las zonas ladrilleras es pequeña en las zonas urbanas. De hecho, las concentraciones de propileno y de 1,4-diclorobenceno en sitios urbanos estuvieron alrededor o por debajo del LCM.

En la figura 15 se observan las concentraciones de COVs agrupados de acuerdo a su fuente principal de emisión: los indicadores de quema de biomasa, las cetonas detectadas de uso industrial y las emisiones vehiculares.

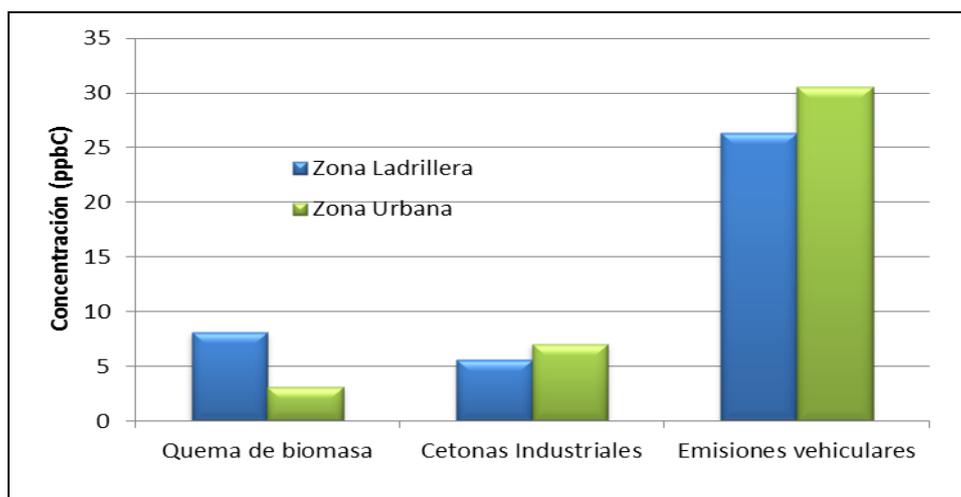


Figura 15. Concentraciones agrupadas por fuentes probables de emisión. Comparación de zona urbana y zona ladrillera.

Se puede apreciar que en su conjunto los indicadores de quema de biomasa muestran una concentración promedio (8 ppbC) mayor en la zona ladrillera que en el área urbana (3 ppbC). Esta última concentración podría deberse a la influencia de las emisiones de las ladrilleras a la zona urbana. Por otra parte, se ve que las cetonas de uso industrial analizadas en este estudio tienen una concentración promedio ligeramente mayor (7 ppbC) en la zona urbana en comparación con la zona ladrillera (5.6 ppbC), lo mismo que las emisiones vehiculares: 30.5 ppbC en zona urbana vs 26.4 ppbC en ladrilleras, lo que da indicios de que la contaminación de la zona urbana también tiene impacto en la zona ladrillera. Las concentraciones encontradas para los COVs tóxicos analizados en este estudio fueron pequeñas en comparación con las de otras áreas metropolitanas. La tabla 1 muestra un comparativo de las concentraciones de BTEX en varias zonas metropolitanas del país, obtenidas en estudios anteriores que ha realizado el INECC.

Sitio	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	m-Xileno	p-Xileno	o-Xileno
ZMVM ⁸ (2006)	1.64	7.65	1.22	1.35	1.86	1.3
Salamanca ¹⁰ (2007)	0.73	3.42	1.08	0.92	1.8	1.5
Tula ¹¹ (2008)	0.12	1.03	0.3	0.51	0.64	0.21
Guadalajara ² (2009)	2.09	33.3	21.9	11.34	12.23	10.03
Tijuana ⁶ (2010)	0.18	0.97	0.07	0.06	0.06	0.05
ZMVM ⁴ (2012)	1.32	6.91	0.82	0.52	0.52	1.38
Guadalajara ³ (2014)	2.88	15.98	2.61	2.33	4.01	3.01
Monterrey ⁵ (2014)	3.72	11.29	2.96	2.98	4.67	3.62
Durango (2015)	0.31	1.16	0.15	0.15	0.29	0.17

Cuadro1.- Comparativo de concentraciones de BTEX en varias zonas metropolitanas del país.

5. Conclusiones

Los niveles de concentración promedio de PM_{2.5} en la zona urbana, obtenidos en esta campaña de medición fueron en promedio tres veces menores a la norma de protección de la salud para periodos de exposición de 24 horas, de 45 µg/m³.

En las partículas PM_{2.5}, se encontraron presentes en la zona urbana, indicadores químicos de emisiones vehiculares, industriales, de resuspensión del suelo y de quema de biomasa. En particular de la quema de biomasa, el elemento potasio atribuible a esta emisión se encontró en el área urbana y en la zona ladrillera.

La contribución de emisiones de la industria y de fuentes de área son las de mayor aporte, en alrededor del 62%, seguido del 17 % por erosión y resuspensión del suelo y 10% por emisiones vehiculares.

En esta campaña de medición los metales pesados tóxicos como el plomo, níquel y vanadio, se encontraron en niveles de concentración muy bajos, comparados con otras áreas urbanas como Monterrey.

Los niveles de concentración de los COVs tóxicos estudiados fueron en general bajos; algunos compuestos mostraron concentraciones por debajo del límite de cuantificación mínimo y para el caso de los BTEX se observaron concentraciones menores a los encontrados en otras áreas metropolitanas del país.

Se identificaron tres sustancias: propileno, acroleína y 1,4-diclorobenceno, en las emisiones de la quema de leña en las zonas ladrilleras que se utilizaron como marcadores de la quema de biomasa, los cuales mostraron en las ladrilleras, niveles de concentraciones mayores a los observados en las áreas urbanas.

Se observa, basados en las concentraciones de la acroleína, que hay una pequeña influencia de las emisiones de quema de leña en los hornos ladrilleros hacia las zonas urbanas estudiadas.

6. Bibliografía

- 1) Blanco-Jiménez S., Altúzar F., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M. y Benítez M.A. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 34 pp.
- 2) Campos A, Magaña M, Blanco S, Saldarriaga H, Hernández L, Murillo MA, Limón MAT, Ángeles F, Cárdenas B, Parra D. (2009). Estudio preliminar de compuestos tóxicos en aire ambiente en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Informe Final del Convenio de Colaboración No. INE/A1- 030/2009. Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco y Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado de Jalisco. México D.F. 92pp.
- 3) Magaña Reyes M, Hernández Flores AL, Blanco Jiménez S. (2015). Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 71 pp.
- 4) Magaña Reyes M, Hernández Flores AL, González Vargas S, Cárdenas González B. (2015). Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Zona Metropolitana del Valle de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 77 pp.

- 5) Magaña Reyes M, Hernández Flores AL, Blanco Jiménez S. (2015). Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 71 pp.
- 6) Molina L, Magaña M, Campos A, Ángeles F, Blanco S, Basaldud R, Ortíz A, Zavala M, Barrera H, Ruiz G, Castro T, Rosas I, Martínez AP, Fentanes O, Salcedo D, Cárdenas B. (2010). Diagnóstico sobre compuestos tóxicos en aire ambiente y caracterización espacial de fuentes de emisión y meteorología en la Región Fronteriza de Baja California. Informe final del Convenio de Colaboración No. INE/ADE 038/2010. Instituto Nacional de Ecología (DGCENICA), Molina Center for Energy and Environment (MCE2), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM), Centro de Investigaciones Químicas (CIQ-UAEM). México D.F. 147 pp.
- 7) Querol X., Pey J., Minguillón J.C., Pérez N., Alastuey A., Viana M., Moreno T., Bernabé R.M., Blanco S., Cárdenas B., Vega E., Sosa G., Escalona S., Ruiz H. y Artíñano B. 2008. PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 campaign. Atmospheric Chemistry and Physics. 8:111-128.
- 8) SMA/INE/UAMI (2008). Informe técnico de monitoreo y Evaluación de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. México, D.F. 28 pp.
- 9) Wang H, Lou S, Huang C, Qiao L, Tang X, Chen C, Zeng L, Wang Q, Zhou M, Lu S, Yu X. (2014). Source profiles of volatile Organic Compounds from biomass burning in Yangtze River Delta, China. Aerosol and Quality Research. 14:818-828.
- 10) Wöhrnschimmel H, Blanco S, Márquez C, Magaña M, Bernabé R, Ángeles F, Cárdenas B, Hernández S, Revah S, Bárcenas C. (2008). Diagnóstico de tendencias espaciales y estacionales de partículas suspendidas PM_{2.5}, Compuestos Orgánicos Volátiles y H₂S en la Ciudad de Salamanca. Informe final del convenio de colaboración entre el Instituto Nacional de Ecología, el Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, y la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. 40pp.
- 11) Wöhrnschimmel H, Márquez C, Blanco S, Magaña M, Campos A, Ángeles F, Cárdenas B, Hernández S, Revah S. (2008). Diagnóstico de tendencias espaciales y estacionales de partículas suspendidas PM_{2.5}, PM₁₀, Compuestos Orgánicos Volátiles y H₂S en aire ambiente en la zona de Tula- Vito-Apaxco. Segundo Informe del Convenio Específico de Colaboración. No. Convenio: INE/A1-030/2008. Instituto Nacional de Ecología y Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Abril de 2009. México D.F. 43pp

ESTUDIO DE EMISIONES VEHICULARES CON SENSOR REMOTO EN LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO.

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor

Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta

M. en C. J. Andrés Aguilar Gómez, M. en C. Laura E. Ramos Casillas, Tec. Francisco F. Guardado López
Subdirección de Modelos e Inventarios de Emisiones

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.

Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

RESUMEN

En 2015, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), a través de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (CGCSA) y en coordinación con la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango (SRNyMA), llevaron a cabo un estudio ambiental de emisiones vehiculares, producción de ladrillo, exposición personal y monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de Victoria de Durango. El componente relacionado con emisiones vehiculares tuvo el objetivo de obtener un diagnóstico del desempeño ambiental del parque vehicular que circula en esa ciudad, para lo cual se realizó una campaña de medición con equipo de detección remota del 12 al 17 de octubre del 2015, misma que permitió obtener la concentración de contaminantes emitidos por 13 mil automotores. El análisis de emisiones mostró que alrededor del 48% de estos automotores presentan concentraciones de contaminantes tan elevadas, que existe una alta probabilidad de que no estén en condiciones de cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015¹ y aplicable en los procesos de verificación de emisiones vehiculares, lo cual sugiere la necesidad de establecer programas que aseguren la realización de un adecuado mantenimiento físico-mecánico en los automotores. Un análisis de emisiones por procedencia del vehículo, muestra que, en promedio, la concentración de los contaminantes proveniente de los vehículos importados usados es mayor que la emitida por la flota de vehículos nacionales. Por otra parte, se identificó que el uso o intensidad de viajes por tipo de vehículo es la siguiente: 36% por autos compactos y subcompactos de uso particular, 41% de camionetas ligeras, 15% de taxis y el resto por otros tipos de unidades. El 25% de esta flota en circulación tiene más de 15 años de edad y su contribución a la emisión de contaminantes corresponde prácticamente al 50% para CO, HC y NO, respectivamente.

¹ NOM-041-SEMARNAT-2015.- Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de junio de 2015.

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de calidad del aire en las zonas metropolitanas de México están relacionados principalmente con el ozono (O₃) y las partículas (PM₁₀) (INECC, 2014), contaminantes que afectan las funciones respiratorias (Linares et al., 2010; Andersen et al., 2010), incrementan la propensión a las enfermedades cardiovasculares (Nigenda et al., 2002) e incluso, aumentan el riesgo de muerte (Kumar et al., 2010; Jerrett et al., 2010).

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de México, 2008 (SEMARNAT, 2012), los vehículos en circulación generan el 41% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y el 16% de compuestos orgánicos volátiles (COV), ambos gases son responsables de la formación de ozono, así como del 2% de partículas menores de 10 micras.

Los avances tecnológicos en los motores de los vehículos han hecho más eficiente la combustión, y los relacionados con el control de emisiones han permitido alcanzar importantes reducciones en las emisiones del CO, NOx e HC. Desafortunadamente, estas emisiones no sólo dependen de la tecnología, ya que factores como un elevado uso y un inadecuado o inexistente mantenimiento conlleva a una pérdida de desempeño ambiental en los automotores. Es así que los vehículos en circulación de más antigüedad, sin tecnologías de punta para el control de gases contaminantes y con un mantenimiento deficiente son los que presentan tasas de emisión más altas y, evidentemente, entre mayor recorrido tenga, mayor será el volumen de contaminantes producidos.

Para caracterizar y cuantificar las emisiones de los vehículos existen diversas metodologías, una de ellas es la medición de emisiones a través de equipos de detección remota. Este método de evaluación presenta dos grandes ventajas sobre sus similares, la primera de ellas es que permite obtener información de emisiones provenientes de miles de vehículos en poco tiempo y, la segunda, es que el registro de las emisiones se realiza sin detener a los automotores y bajo condiciones reales de operación, con lo cual se puede determinar con precisión el desempeño ambiental del parque vehicular que circula en una localidad de interés.

Por los elementos expuestos, y con el objetivo de caracterizar el estado ambiental en que se encuentra el parque vehicular que circula en la Ciudad de Victoria de Durango, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), a través de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (CGCSA) y en coordinación con la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango (SRNyMA), realizó una campaña de medición de emisiones vehiculares mediante la técnica de detección remota en dicha ciudad. El INEGI² reporta para 2013 una flota vehicular de 500 mil unidades en el Estado de Durango, mientras que para el municipio de Durango corresponden 216 mil vehículos, es decir, el 43% del parque vehicular registrado, lo que representa un índice de motorización de 300 automotores por cada mil habitantes a nivel estatal y de 370 en la ciudad capital.

Este informe describe las actividades realizadas para obtener la información de campo, la captura, depuración, tratamiento y análisis de los datos; así como el reporte de resultados y de los principales hallazgos, mismos que otorgarán una base de conocimiento fundamental para el diseño, evaluación e implementación de políticas públicas orientadas a prevenir y controlar la emisión de contaminantes atmosféricos provenientes del escape de los vehículos automotores.

² INEGI, 2015. Vehículos de motor registrados en circulación. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est&c=13158&proy=vmrc_vehiculos

2. METODOLOGÍA

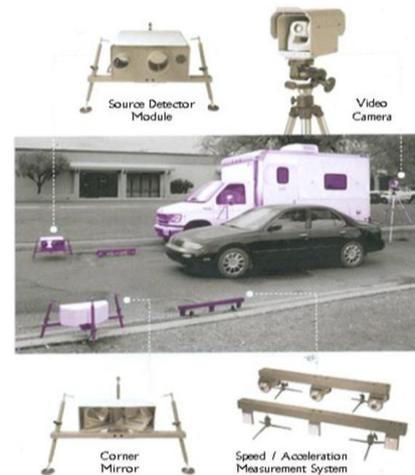
2.1. Método de medición

Para realizar el estudio de emisiones vehiculares se utilizó un equipo de detección remota modelo RSD4600, el cual mide la relación CO/CO_2 , HC/CO_2 , NO/CO_2 y factor de humo del gas expulsado por el escape de los vehículos en circulación, con lo cual se genera información sobre la emisión de monóxido de carbono "CO", dióxido de carbono " CO_2 ", hidrocarburos "HC", óxido nítrico "NO", y opacidad.

El procedimiento de medición consiste de las siguientes etapas:

- A. El equipo de detección remota lanza un haz de luz infrarrojo a lo largo de una trayectoria a través de la vialidad, a la altura del tubo de escape de gases de los vehículos, hacia una serie de detectores en donde se mide la relación HC y CO respecto al CO_2 ; mientras que la relación de NO se lleva a cabo utilizando una fuente de luz ultravioleta. Mediante la ecuación de combustión se obtienen las concentraciones en partes por millón (ppm) para HC y el NO, en tanto que para el CO y el CO_2 se expresa en porcentaje de volumen (% vol.). (ESP, 2004)
- B. El sistema cuenta con sensores para cuantificar la velocidad y la aceleración de cada vehículo monitoreado, información que permite validar los datos obtenidos y estimar el esfuerzo que realiza el vehículo al momento de la prueba de emisión.
- C. Los sensores de velocidad y aceleración están sincronizados con un equipo que registra las emisiones vehiculares, así como con una cámara fotográfica, con la cual se toma una imagen de la parte trasera de cada unidad, con la intención de registrar la placa o matrícula, para posteriormente obtener información sobre los datos técnicos de cada automotor evaluado, por ejemplo: el año modelo, el tipo de vehículo, el combustible que utiliza, el número de cilindros, etc.

La imagen superior de la Figura 1 muestra los elementos del equipo de medición remota: el analizador de emisiones, las barras de detección de velocidad / aceleración y el sistema de video. Las imágenes inferiores de la misma figura muestran el trabajo de campo con sensor remoto en la Ciudad de Victoria de Durango.



Fuente: Environmental Systems Products Holdings Inc



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 1. Elementos del equipo de detección remota.

2.2. Periodo de medición

La recopilación de información de emisiones vehiculares en campo se realizó durante seis días, en el periodo comprendido del 12 al 17 de octubre de 2015, considerando mediciones en cinco días hábiles y un inhábil, toda vez que es común que sea distinta la conformación del parque vehicular los días sábados y domingos respecto al resto de la semana. El horario de trabajo fue establecido de las 7:00 am a 16:00 pm, aunque el mismo dependió de las condiciones climáticas, ya que con lluvia no es recomendable utilizar el equipo de medición.

2.3. Selección de los sitios de medición

La selección de los puntos de muestreo se realizó por parte de personal del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en coordinación con personal de Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango (SRNyMA), bajo los siguientes criterios técnicos:

- Sitios con diferentes usos de suelo (habitacional, comercial, industrial y servicios) para asegurar la representatividad de la muestra por tipo y antigüedad de los vehículos.
- Vialidades con un flujo vehicular promedio entre los 500 a 1,000 automotores por hora, para asegurar la captura de un alto número de unidades medidas, que otorgue suficiencia de información para el análisis estadístico (internacionalmente se recomienda evaluar 20,000 unidades o el 0.05% de la flota existente, lo que resulte menor).
- Vialidades de dos ó tres carriles, que permitieron ubicar con seguridad el equipo de medición remota y restringir el paso de los vehículos a un sólo carril, sin que se generara una afectación importante al tránsito vehicular.
- Vialidades que tengan una pendiente positiva, para asegurar que el vehículo transite bajo aceleración y con una velocidad que se encuentre en el rango de 30 a 50 kilómetros por hora al momento de pasar frente al equipo analizador de gases.

3. RESULTADOS

3.1. Sitios de muestreo

Se identificaron y seleccionaron seis sitios de muestreo dentro de la Ciudad de Victoria de Durango para la realización de la campaña de monitoreo para vehículos con escape bajo (ligeros) y alto (pesados); sin embargo, no se logró la identificación de vialidades con una significativa circulación de vehículos pesados con escape alto, a pesar que durante la campaña se contaba con el instrumental para medir las emisiones de este tipo de unidades. Las características y localización de los sitios de muestreo seleccionados se muestran en el Cuadro 1 y Figura 2.

Cuadro 1. Sitios de muestreo de emisiones vehiculares con sensor remoto en la Ciudad de Victoria de Durango.

Sitio	Fecha	Ubicación del sitio	Tipo de zona	Registros
(1)	12 octubre	Bldv. Durango # 182 esquina Río Santiago (frente al Jardín de Niños)	Habitacional	4,424
(2)	13 octubre	Carretera Durango – México (frente al Centro de Salud No. 1.)	Comercial, servicios e industrial	4,419
(3)	14 octubre	Circuito Interior esquina Irma Dorantes	Habitacional	4,420
(4)	15 octubre	Carretera Mezquital (Frente a auto lavado Car Wash)	Servicios (escuelas y oficinas)	4,006
(5)	16 octubre	Francisco Primo de Verdad esquina Doroteo Arango	Habitacional	3,445
(6)	17 octubre	Francisco Villa (Frente a la agencia de Toyota)	Comercial	3,612
Total				24,326

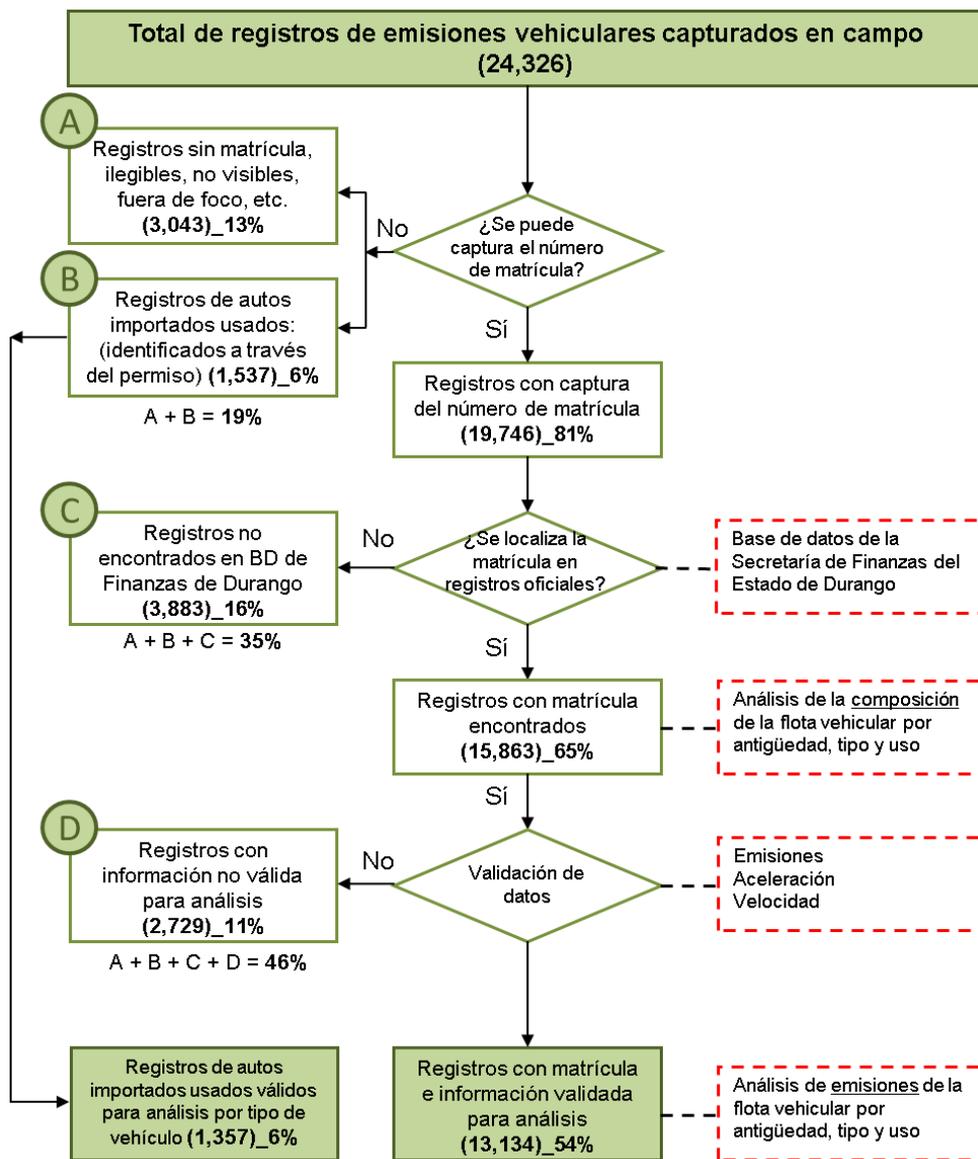


Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia con información cartográfica de Google Maps.

Figura 2. Puntos de muestreo de emisiones vehiculares con sensor remoto en la Ciudad de Victoria de Durango.

El Cuadro 1 y la Figura 3, contiene la localización de los puntos de muestreo dentro de la mancha urbana de la Ciudad Victoria de Durango, además del número de registros de emisiones vehiculares captados con el equipo de detección remota por sitio de muestreo, con un total de 24,326 mediciones.

3.2. Tratamiento de datos



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia con información del sensor remoto y la Secretaría de Finanzas del Estado de Durango.

Figura 3. Proceso de depuración de los registros de emisiones vehiculares captados con sensor remoto en la Ciudad de Victoria de Durango.

Como se observa en la Figura 3, el procedimiento para la depuración de los datos de emisiones vehiculares conllevó diversas etapas y en cada una de ellas el tamaño de la muestra se redujo en función de la calidad y cantidad de la información disponible para el tratamiento de los datos. Del total de los registros de emisiones captados en campo, el 19% no pudo ser capturado su número de matrícula, ya que no tenía placa, era ilegible o estaba fuera de foco; sin embargo, se pudieron identificar los vehículos importados usados (1,537 registros) a través del permiso que portan en el medallón, aunque no fue posible conocer las características técnicas particulares de cada unidad dado que los números y/o letras de dicho permiso no fueron totalmente legibles.

De los registros que sí fue posible capturar el número de matrícula (19,746), el 16% no fue encontrado en el padrón vehicular de la Secretaría de Finanzas del Estado de Durango, por lo que no se pudieron obtener los datos técnicos de estos vehículos. Los registros de los vehículos no encontrados corresponden a placas de vehículos pesados con placa federal, así como vehículos con placa de otras entidades federativas como el Distrito Federal, Chihuahua, Nuevo León, Coahuila, Estado de México y Jalisco, principalmente.

Al realizar la depuración de la base de datos de acuerdo a los criterios técnicos de velocidad y aceleración, se eliminó el 11% del total de registros. Al final del proceso de depuración, la muestra útil para el análisis de emisiones vehiculares por tipo de vehículo, antigüedad y uso fue de 13,134, lo que representa el 54% con respecto al total de registros de emisiones captados durante la campaña de muestreo en campo.

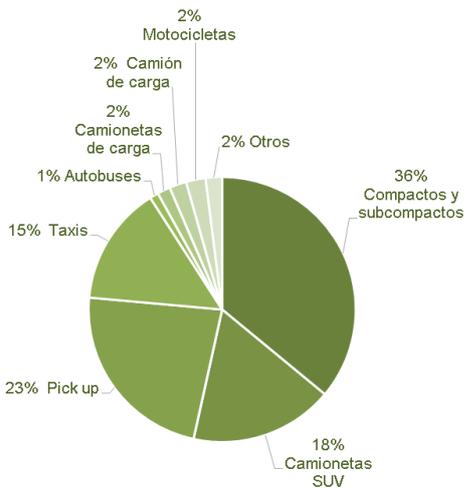
Con relación a los autos importados usados, de un total de 1,537 registros identificados, una vez realizada la depuración y validación, se obtuvo una muestra de 1,357 registros para el análisis. Cabe mencionar que para este tipo de vehículos únicamente se realizó el análisis general, ya que no se obtuvieron sus características técnicas como edad, uso y tipo de combustible.

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, siglas en inglés) recomienda que un tamaño de muestra representativo en estudios con equipo de detección remota debe ser al menos del 0.5% o 20 mil unidades de la flota objetivo o de interés³, por lo que la muestra de más de 13,000 unidades con datos útiles, da robustez al análisis estadístico y certidumbre a los resultados finales del estudio, toda vez que en la ciudad hay 216,000 unidades registradas lo que requeriría la revisión de 1,080 unidades.

3.3. Composición de la flota vehicular por uso

3.3.1. *Flota vehicular general*

³ USEPA. 40 CFR Ch. I (7-1-04 Edition) 51.371 on road testing.



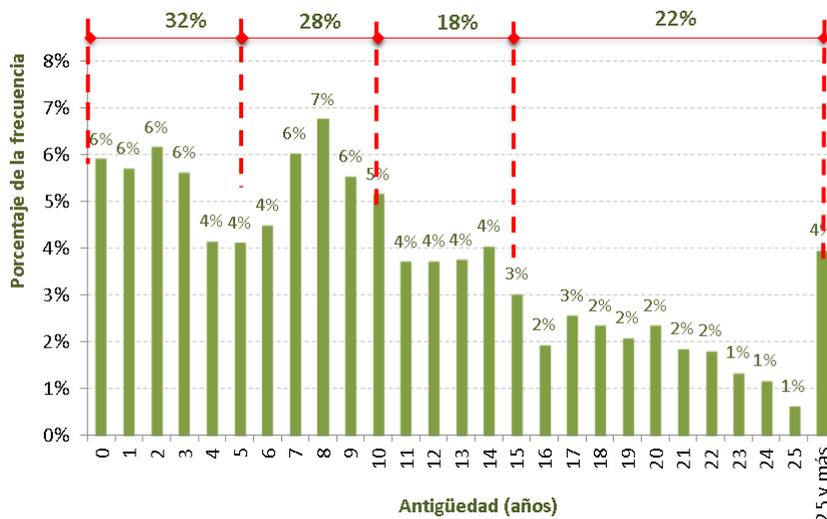
Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 4. Composición de la flota vehicular por uso en la Ciudad de Victoria de Durango.

La composición de la flota vehicular permite inferir información respecto de los vehículos que circulan en una región, tales como el peso, sus sistema de control de emisiones, el número de cilindros, cilindrada o tipo de combustible que utilizan, elementos que influyen directamente en la cantidad y el tipo de contaminantes que emiten a la atmósfera.

Para el análisis de composición de la flota por tipo de vehículo, se consideró una muestra de 24,326 registros, es decir, el total de muestra obtenida en campo. La identificación del tipo de vehículo se realizó a través del archivo fotográfico obtenido a través del equipo de detección remota.

Los resultados de la Figura 4 representan el uso o intensidad de viajes por tipo de vehículo y muestran que el 41% de la flota que circula en la Ciudad de Victoria Durango corresponde a camionetas ligeras (pick up, SUV y VAN), el 36% se atribuye a los autos compactos y subcompactos, el 15% taxis y el 8% otro tipo de vehículos como los camiones de pasajeros y de carga, así como las motocicletas. Por origen de la matrícula, los resultados muestran que el 86% de los vehículos están registrados en el Estado de Durango, 7% son importados usados, 6% tiene matrícula de otra entidad del país y 1% porta matrícula de algún estado de los Estados Unidos de Norteamérica.



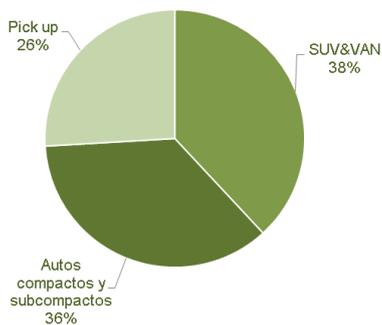
Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 5. Edad del parque vehicular que circulan en la Ciudad de Victoria de Durango.

El 60% de la flota que circula en la Ciudad de Victoria de Durango tiene 10 o menos años de edad, el cual es bajo, comparado con Villahermosa, Tabasco (ciudad con similitud en el número de habitantes y parque vehicular), en donde este porcentaje es del 80%, mientras que el promedio a nivel nacional es del 50%⁴.

Tanto el tipo de vehículo como su antigüedad son factores que influyen en los resultados de emisión de gases contaminantes.

3.3.2. Flota vehicular de autos importados usados



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 6. Composición del parque vehicular que circulan en la Ciudad de Victoria de Durango.

Para determinar la composición de la flota de vehículos importados usados que circulan en la Ciudad de Victoria de Durango, principalmente constituida por unidades ligeras y medianas, se consideró una muestra de 1,357 registros, obtenidos a partir del archivo fotográfico generado a través del sensor remoto durante el trabajo de campo.

Los resultados muestran que el 36% de la flota de este tipo de vehículos está integrada por automotores compactos y subcompactos, mientras que el 64% restante la componen unidades tipo SUV, VAN y pick up, que por lo general tienen un mayor peso, cilindrada y consumo de combustible con respecto a los vehículos compactos y subcompactos.

3.4. Resultados de emisión

El análisis y reporte de las emisiones vehiculares se realizó bajo diferentes criterios. Primeramente se reportan los resultados por tipo de vehículos y estrato de edad, posteriormente se realiza una comparación de los resultados de emisión con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad ambiental en la materia, y finalmente se analizan las emisiones provenientes de los vehículos importados usados que circulan en la ciudad.

3.4.1. Emisión por tipo de vehículo

El análisis de emisiones por tipo de vehículo permite identificar al segmento de la flota que, en promedio, emite las mayores concentraciones de contaminantes. Para este análisis se consideran las emisiones de los vehículos tipo compactos, subcompactos y las SUV, principalmente de uso particular, así como a los taxis, las pick up y los camiones de carga ligera, en su mayoría de uso intensivo.

⁴ INECC, 2014. Inventario Nacional de Emisiones de Fuentes Móviles para México, año base 2013. El promedio de edad que se presenta considera únicamente a los vehículos ligeros menores a 4 toneladas.

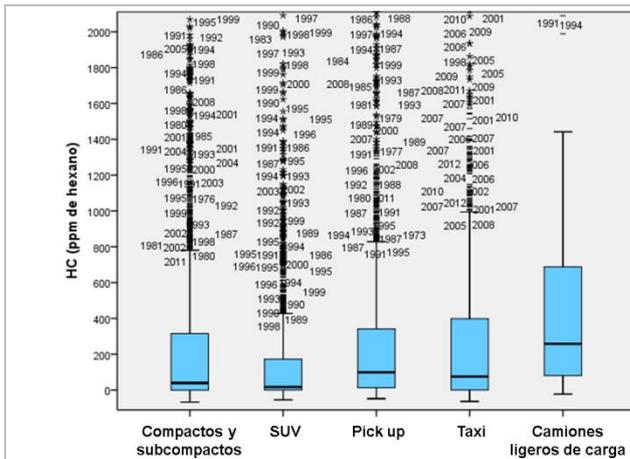


Figura 7a. Emisión de HC por tipo de vehículo

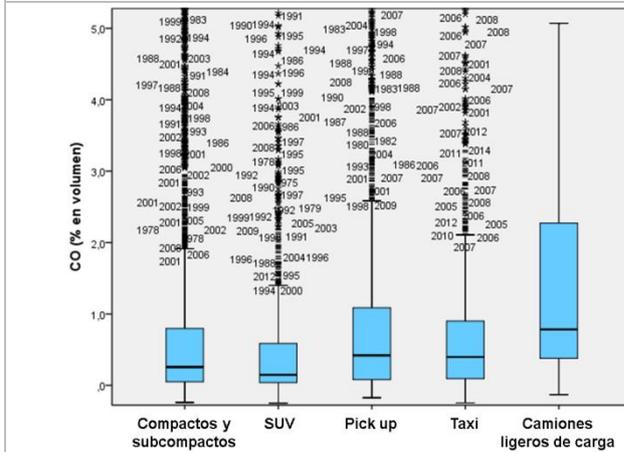


Figura 7b. Emisión de CO por tipo de vehículo

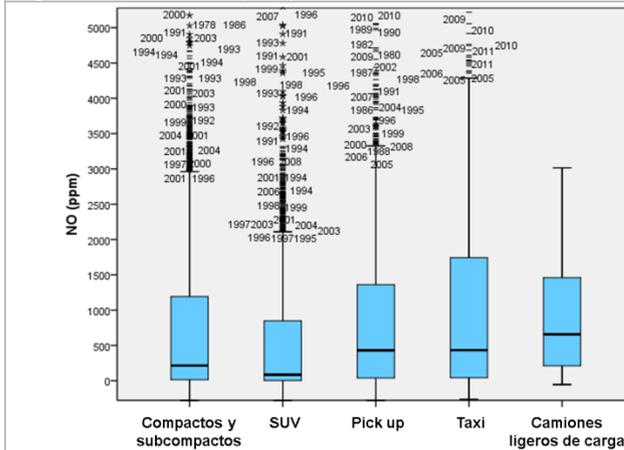


Figura 7c. Emisión de NO por tipo de vehículo

- Los resultados de emisión muestran que, en promedio, los vehículos de uso intensivo, como son los camiones ligeros de carga, los taxis y las pick up, presentan mayores concentraciones de emisión de contaminantes con respecto a sus similares de uso particular, tales como los autos compactos, subcompactos y las SUV. Este comportamiento puede explicarse por un desgaste más rápido de los componentes mecánicos y de control de emisiones de los vehículos de uso intensivo.

- Los vehículos tipo SUV presentan, en promedio, las menores concentraciones de emisión, situación que se estima ocurre debido a que estas unidades por lo general tienen sistemas de control de emisiones de mayor eficiencia y durabilidad, respecto a vehículos de menor costo como la mayoría de los autos compactos y subcompactos.

- El análisis por tipo de vehículo también muestra valores extremos, lo que significa que existen vehículos con altas concentraciones de emisión, debido, probablemente, a una falta de mantenimiento o deterioro, caducidad o retiro de sus sistemas de control de emisiones, específicamente los convertidores catalíticos.

Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 7. Emisión de contaminantes por tipo de vehículo en la Ciudad de Victoria de Durango.

3.4.2. Comparación de las emisiones de autos importados usados Vs. nacionales

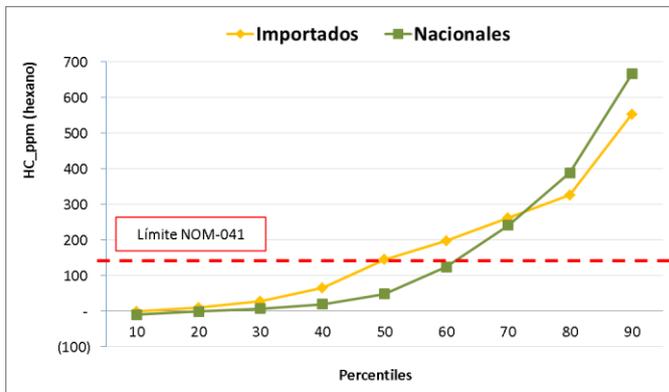


Figura 8a. Emisiones de HC de autos importados usados Vs. nacionales

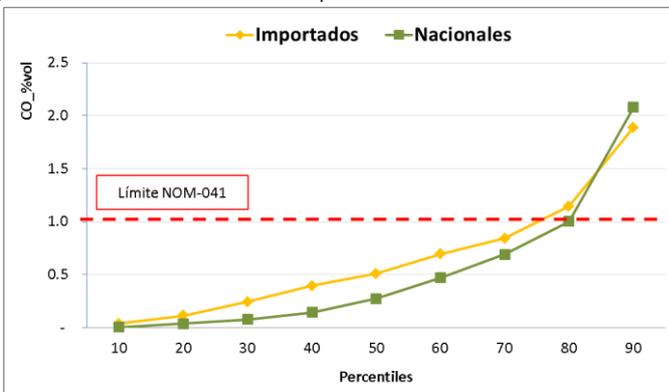


Figura 8b. Emisiones de CO de autos importados usados Vs. nacionales

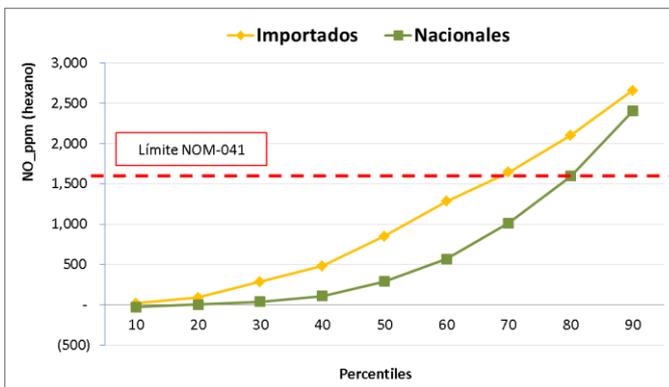


Figura 8c. Emisiones de NO de autos importados usados Vs. nacionales

Figura 8. Comparación de emisiones de vehículos importados usados Vs. nacionales.

La literatura internacional⁵ refiere que una prueba de aceleración simulada (ASM 5015 y 2525) es comparable, en cuanto al esfuerzo realizado por el vehículo, a un VSP (Vehicle Specific Power)⁶ de entre 5 y 6 kW/tonelada métrica.

Siguiendo estos criterios, se realizó un análisis de las emisiones provenientes de los vehículos importados usados, comparándolas con las emisiones de automotores de origen nacional, es decir, que fueron comprados como nuevos en México.

La comparación se realizó en función del porcentaje de cada flota que no pasaría una prueba de aceleración simulada bajo los límites de emisión establecidos en la NOM-041-SEMARNAT-2015.

Los resultados muestran que, en general, los vehículos importados usados emiten una mayor cantidad de hidrocarburos en comparación a los nacionales y, por lo tanto, al menos el 50% de los vehículos importados usados no cumple actualmente con la normatividad ambiental en la materia.

⁵ USEPA, 2014. United States Environmental Protection Agency. Guidance on use of remote sensing for evaluation of I/M program performance. Office of Transportation and Air Quality.

⁶ La potencia específica del vehículo (VSP, vehicle specific power, dada en kW/tonelada métrica) permite estimar el esfuerzo o carga que un vehículo tiene al momento de realizar una prueba de emisiones

3.4.3. Comparación de las emisiones con una prueba de aceleración simulada (ASM)

Para conocer a mayor detalle las características de los vehículos que circulan en la Ciudad de Victoria de Durango y que no cumplen con la normatividad mexicana en materia de emisiones, se realizó un análisis por tipo de vehículo para los automotores año modelo 1991 y posteriores. No se realizó este análisis para los vehículos año modelo 1990 y anteriores, debido a que la muestra no fue suficiente.

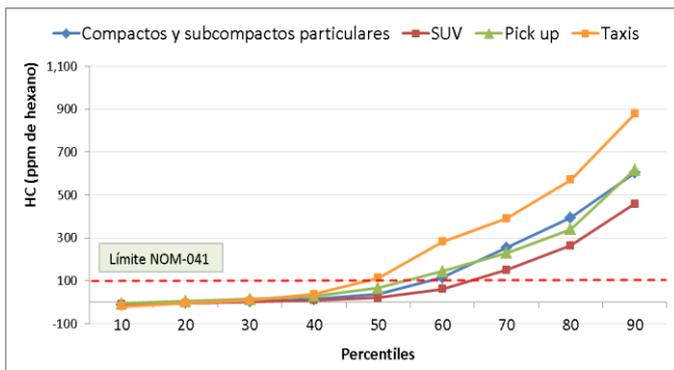


Figura 9a. Vehículos fuera de norma por HC

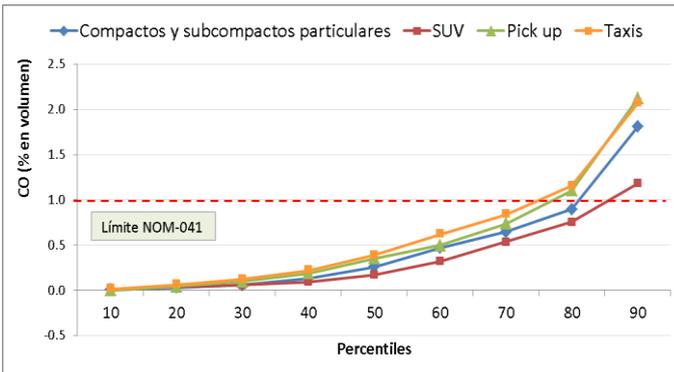


Figura 9b. Vehículos fuera de norma por CO

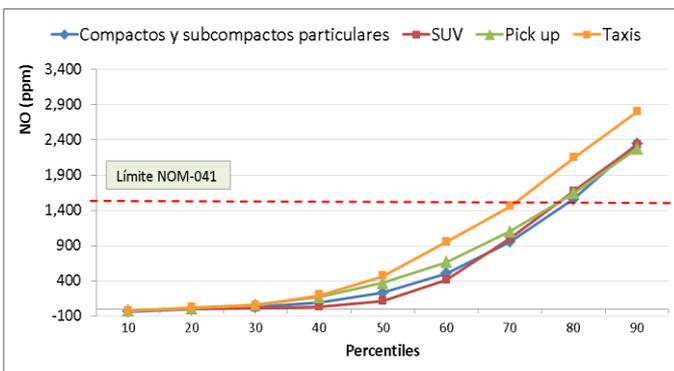


Figura 9c. Vehículos fuera de norma por NO

Figura 9. Percentiles de emisión de contaminantes por tipo de vehículo.

Este análisis consideró únicamente a los vehículos de origen nacional, debido a que no se obtuvieron datos de antigüedad para los vehículos importados usados.

De los datos de emisión obtenidos durante la campaña de medición con sensor remoto, se seleccionó la información con un VSP entre 5 y 6 kW/tonelada métrica, con la finalidad de que fuera comparable con una prueba de aceleración simulada, la cual se establece en la NOM-041-SEMARNAT-2015 para la medición de emisiones de vehículos en circulación.

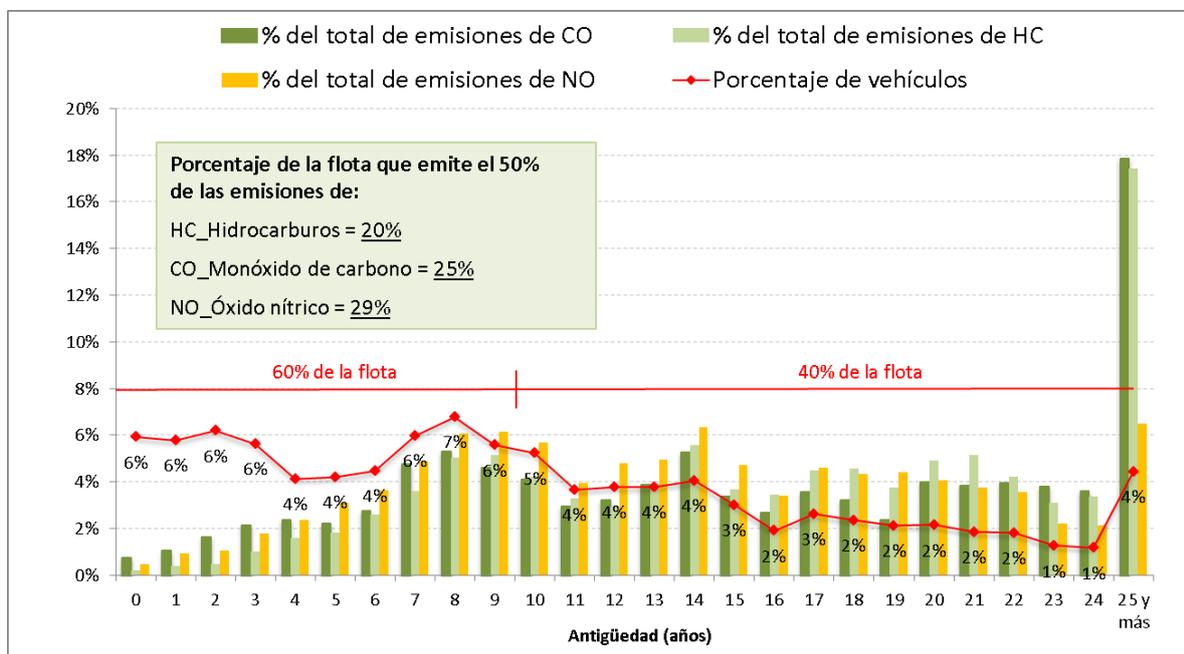
Los resultados indican lo siguiente:

- Al menos el 40% de la flota en circulación no cumple con los límites para HC.
- El 25% de las pick up y los taxis; así como el 20% de los autos compactos no cumplen con los límites para CO.
- El 20% de la flota, con excepción de los taxis (30%), no cumple con los límites para NO.
- En general, el 48% de la flota en circulación no cumple con alguno de los límites de emisión establecidos en la NOM-041-SEMARNAT-2015.

3.4.4. Contribución a la emisión de contaminantes por edad de la flota

De acuerdo a la literatura internacional, a la proporción de vehículos responsable de la emisión de la mitad o más de los contaminantes en una zona de interés, se les conoce como “gross polluters” o “altos emisores”. El estudio permitió identificar al parque vehicular que cumple con el criterio internacional de “altos emisores”.

Los resultados de emisión de acuerdo a la antigüedad de los automotores, muestra que los vehículos de 15 o más años de edad “25% de la flota en circulación”, contribuyen con la emisión del 58% de HC, 53% de CO y 44% de los NO. Mientras que para la flota vehicular de 10 o más años de antigüedad “45% de la flota en circulación”, esta contribución representa el 78% de HC, 72% de CO y el 69% del NO (este cálculo asume que todos los automotores presentan el mismo recorrido anual).



Fuente: INECC, 2015. Elaboración propia.

Figura 10. Emisión de contaminantes por edad vehicular en la Ciudad de Victoria de Durango.

En la Figura 10 se observa que dentro del sector de vehículos identificados como “altos emisores”, de acuerdo a su antigüedad, sobresalen los automotores de 25 o más años de edad. Estos vehículos representan el 4% de la flota vehicular en circulación, pero contribuyen con la emisión de prácticamente el 18% de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO), respectivamente, así como el 6% del óxido nítrico.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de uso o intensidad de viajes por tipo de vehículo muestran que el 41% de la flota que circula en la Ciudad de Victoria Durango corresponde a camionetas ligeras (pick up, SUV y VAN), el 36% se atribuye a los autos compactos y subcompactos, el 15% taxis y el 8% otro tipo de vehículos como los camiones de pasajeros y de carga, así como las motocicletas. Destaca la importancia del amplio uso de las camionetas ligeras, ya que consumen, en promedio, una mayor cantidad de combustible con respecto a los autos compactos y subcompactos. El porcentaje de viajes en taxi también es muy representativo (15%), cuando este tipo de vehículos constituye el 1.6% de la flota vehicular registrada en el padrón vehicular de la Secretaría de Finanzas del Estado de Durango⁷. Los vehículos de uso intensivo, como los taxis, presentan un desgaste prematuro de sus partes mecánicas y de sus sistemas de control de emisiones, por lo que sus emisiones tiende a ser mayores con respecto a las emisiones de los vehículos de uso particular.

El 45% de los vehículos que circula en la Ciudad de Victoria de Durango tienen 10 o más años de edad, lo que se ve reflejado en las tasas de emisión, ya que los vehículos que están dentro de este estrato de antigüedad contribuyen con la emisión del 78% de hidrocarburos, 72% de monóxido de carbono y 69% de óxido nítrico.

En lo que respecta a las emisiones de la flota de vehículos importados usados, en promedio, se observan mayores emisiones en comparación con la flota de vehículos nacionales. Este comportamiento se puede explicar por una mayor antigüedad de los vehículos importados usados⁸.

El análisis de emisiones mostró que alrededor del 48% de estos automotores presentan concentraciones de contaminantes tan elevadas, que existe una alta probabilidad de que no estén en condiciones de cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar y, en su caso, establecer un programa de verificación vehicular, con la finalidad de que sea obligatoria la revisión de sus emisiones, principalmente para los automotores de mayor antigüedad y de uso intensivo, como los taxis y las unidades de carga, etc.
- Se recomienda establecer un programa de vigilancia en vialidad de las emisiones vehiculares de las unidades a diésel y de los automotores a gasolina que presenten emisiones con coloración azul o negra (altos emisores de contaminantes), mismos que deben ser sancionados y obligar a sus propietarios a darles mantenimiento.

⁷ A nivel nacional el porcentaje de taxis corresponde al 1.5% del total de la flota, de acuerdo a información del Inventario Nacional de Emisiones para México, año base 2013, elaborado por el INECC.

⁸ Aunque en el estudio para la Ciudad de Victoria de Durango no se pudo identificar la edad de los vehículos importados usados que ahí circulan, en estudios similares realizado por el INECC en ciudades mexicanas de la frontera norte, se ha observado que este tipo de vehículos tienen, en promedio, más de 10 años de antigüedad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andersen Z.J, Hvidberg M, Jensen S.S, Ketzel M, Loft S, Sørensen M, Tjønneland A, Overvad K, Raaschou-Nielsen O., 2010. Chronic obstructive pulmonary disease and long-term exposure to traffic-related air pollution: a cohort study. Sep 24.
- Bishop, G. A and Stedman D. H. 2006. On-Road Remote Sensing of Automobile Emissions in west Los Angeles: Year 4, Department of Chemistry and Biochemistry, University of Denver.
- ESP, 2004. Remote Sensing Milestones, "US Experience". Niranjana Vescio, ESPH, Environmental Systems Products, 2002 N. Forbes Tucson, Arizona. 85745-1446 USA.
- INECC, 2014. Informe Nacional de Calidad del Aire 2013, México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, DF. Pp. 151.
- INEGI, 2015a. Cuéntame, información por entidad. Disponible en:
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/dur/default.aspx?tema=me&e=10>
- INEGI, 2015b. Vehículos de motor registrados en circulación. Disponible en:
http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est&c=13158&proy=vmrc_vehiculos
- Jerrett M., Richard T. Burnett, C. Arden Pope III, Kazuhiko Ito, George Thurston, Daniel Krewski, Yuanli Shi, Eugenia Calle and Michael Thun. 2009. Long-Term ozone exposure and mortality. The New England Journal of Medicine. 360:1085-95.
- Kumar R, Sharma SK, Thakur JS, Lakshmi PV, Sharma MK, Singh T. 2010. Association of air pollution and mortality in the Ludhiana city of India: A time-series study. Indian J. Public Health. 54(2):98-103.
- Linares B, Guizar J.M, Amador N, García A, Miranda V, Pérez J.R, Chapela R. 2010. Impact of air pollution on pulmonary function and respiratory symptoms in children. Longitudinal repeated-measures study. BMC Pulm Med. Nov 24;10:62.
- Nigenda, G. Cifuentes, E. y Duperval, P., 2002. Estimación del valor económico de reducciones en el riesgo de morbilidad y mortalidad por exposiciones ambientales. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT.
- RSD, 2005, Correlation and remote sensing device application results. A summary of the Milestones reached. RSD-ER0001, Rev. D., ESP-Environmental Systems Products 2002 N. Forbes Tucson, Arizona 85745-1446 USA.
- SEMARNAT, 2015. NOM-041-SEMARNAT-2015.- Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de junio de 2015.
- SEMARNAT, 2012. Inventario Nacional de Emisiones de México, 2008.
- Sigrist, M.W. 1994. Air Monitoring by Spectroscopy Techniques, Wiley Interscience.

CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES EN UN HORNO FIJO TRADICIONAL Y Y UN HORNO ECOLÓGICO-DGO

M. en C. Abraham Ortínez Álvarez
Subdirector de Economía Industrial

Dr. Arturo Gavilán García,
Director de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas Productos y Residuos

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

RESUMEN

La implementación de medidas por parte del Gobierno del Estado y Municipal de Durango, a través con el apoyo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), para reducir el impacto de las emisiones por hornos tradicionales en la zona urbana de la Ciudad de Victoria de Durango, permitió el desarrollo de un programa para construir hornos-Ecológicos-DGO, en el parque ladrillero Durango. Con el objetivo de garantizar el beneficio ambiental y de salud, la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente (**SRyMA**) del Estado de Durango, en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (**INECC**), desarrollaron una campaña de mediciones para evaluar la operación y desempeño real de un **Horno fijo Tradicional** y el **Horno-Ecológico-DGO**. La evaluación de los hornos fue realizada por un laboratorio certificado, acreditado y aprobado ante la autoridad competente, con la finalidad de garantizar la calidad de las mediciones. Los resultados obtenidos, muestran el desempeño de los hornos durante tiempos de operación similares, en términos de emisiones y diversos parámetros. Los resultados indican que el **Horno Fijo Tradicional**, mantiene altos niveles de emisión por etapas y una baja eficiencia energética con respecto al **Horno-Ecológico-DGO**. De igual manera se observaron en las mediciones y en campo algunas fallas en la operación del **Horno-Ecológico-DGO**, las cuales de ser modificadas y mejoradas incrementarán aún más la eficiencia y desempeño del mismo. Finalmente fueron sugeridos algunos cambios que pueden mejorar la operación, del **Horno-Ecológico-DGO**, los cuales se reflejarán en beneficios ambientales directos en la calidad del aire en la ciudad de Durango, la salud de los obradores y mayores beneficios económicos al sector artesanal de Durango .

Palabras clave:

Horno-Ecológico-DGO, Horno Fijo Tradicional, Carbono Negro, Partículas PM 2.5, Eficiencia Energética

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación artesanal de ladrillos es una actividad no industrial con un alto impacto ambiental, principalmente por no ser una actividad regulada en México, en este sentido el proceso productivo del ladrillo se realiza en sitios que, en su gran mayoría se encuentran en zonas urbanizadas, impactando de manera directa en la salud de la población, con repercusiones negativas en la calidad del aire de las zonas aledañas y de manera directa en salud de los obradores. Existen externalidades adicionales en los procesos productivos del ladrillo artesanal, entre las que destacan degradación del suelo, por el uso de tierras fértiles para su moldeado, con repercusiones adicionales que pueden originar derrumbes, deslizamientos y movimiento de masas de tierra durante la extracción de las arcillas [1-2]. Adicionalmente existe un problema de recursos hídricos como el uso de agua para el consumo humano y la contaminación de ríos o lagunas por desechos originados del proceso de producción.

Con respecto a los procesos de combustión realizada durante la cocción de ladrillos, se considera ineficiente en términos de combustión, baja eficiencia energética por el alto consumo de materiales y el uso de materiales o residuos peligrosos como son; leña, madera industrializada, aceites usados, combustóleo, residuos domésticos e industriales, llantas, gas LP, etc., generando un gran número de emisiones de contaminantes como material particulado, óxidos de azufre (SO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y precursores de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, CO, N₂O, NO_x y NO) [1-4].

Las emisiones de estos contaminantes se identifican fácilmente por las plumas negras y gruesas que emanan de los hornos de manera intermitente, las cuales son transportadas de manera local por vientos de baja velocidad, generando concentraciones elevadas de contaminantes por tiempos prolongados, impactando en la salud de la población. Los efectos de estas emisiones se manifiestan como: dolores de cabeza, fatiga, mareos, problemas respiratorios, irritación de los ojos, enfermedades cardiovasculares y pulmonares, bronquitis, mortalidad prematura, etc. [3].

Por otra parte, se ha detectado que la producción de ladrillos artesanal, representa un problema social muy importante, debido a que es una actividad en la que participan familias completas, incluyendo a niñas y niños. Sin embargo, desde la perspectiva económica, tienen una gran importancia en las comunidades donde se desarrolla pues constituyen generalmente la única o la principal actividad productiva generadora de trabajo y de ingresos. En términos del ordenamiento territorial, es frecuente que los ladrilleros establezcan sus viviendas adyacentes a los hornos en zonas carentes de servicios básicos como agua, drenaje, luz, etc., siendo un problema desde la perspectiva de seguridad, educación, salud y vivienda.

2. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS

Los procesos de generación de ladrillos en hornos tradicionales en México se componen de las siguientes etapas;

- ❖ **Preparación de la mezcla.** Esta etapa consiste en mezclar en diferentes proporciones arcilla, arena, material orgánico (estiércol y/o aserrín entre otros) y agua, hasta obtener una pasta la cual es amasada hasta alcanzar su homogeneización. Posteriormente, se continúa agregando agua hasta que la mezcla adquiera la textura requerida para su moldeado. Actividad que generalmente se realiza con los pies.
- ❖ **Moldeado.** Una vez que la pasta tiene la consistencia deseada, es colocada en moldes de madera o metal que cuentan con 2 a 10 compartimentos. Después se retira el molde dejando en el suelo los ladrillos formados.
- ❖ **Pre-secado.** Los ladrillos recién moldeados se dejan expuestos al ambiente en el mismo lugar donde fueron fabricados para que, por acción natural del sol y el viento sean secados. Este paso tiene una duración aproximada de 5 a 7 días, dependiendo del tiempo meteorológico.
- ❖ **Cocción.** Los ladrillos pre-secados son colocados dentro del horno ladrillero y la cocción comienza agregando el material de combustión. Este proceso puede durar de 10 a 30 horas, y necesita de una continua alimentación de combustible hasta lograr que el fuego vaya ascendiendo en forma homogénea a través de las sucesivas capas horizontales de ladrillos hasta que el fuego alcance la última capa con lo que se completa la cocción de los ladrillos [6,9]

A partir de estudios termogravimétricos y termodiferenciales realizados a ladrillos crudos por el INECC, se ha encontrado que durante la cocción ocurren los siguientes fenómenos [7, 10]: cuando el horno alcanza una temperatura de 100 a 150°C sucede una pérdida de agua por evaporación. Alrededor de 200 a 350°C se da la combustión de la materia orgánica contenida en el ladrillo. En el intervalo de 450 – 650°C ocurre una pérdida de masa final por deshidroxilación de las arcillas. Y finalmente a temperaturas mayores a 750°C ya no existen cambios significativos, sin embargo, es necesario continuar con el calentamiento del horno para mantener y asegurar que se alcancen las temperaturas requeridas en las capas superiores de ladrillo. Cabe mencionar que estas temperaturas pueden variar de acuerdo al tipo de tierra y las proporciones usadas.

3. TIPOS DE HORNOS

En la etapa de cocción de los ladrillos se utilizan varios tipos de hornos que van desde los más rústicos hasta los más modernos y eficientes [8] y aunque existen diferentes diseños (horno Hoffman, horno Hoffman de Bock, horno Hoffman abierto, horno Bull's Trench Kiln, horno túnel, horno de rodillos, horno de cámaras múltiples, horno vertical VSBK, horno MK, etc. [5]), actualmente en México se utilizan principalmente hornos tradicionales de campaña, hornos tradicionales fijos y en menor medida hornos MK2 o mejorados como el DGO [10]. A continuación se presenta una breve descripción de los hornos tradicionales y los hornos MK2.



Figura 1. Hornos ladrilleros (a) tradicional de campana, (b) tradicional fijo, (c) MK2. Fuente: archivos del INECC.

❖ Los hornos tradicionales pueden ser;

- a) **horno de campana** los cuales son contruidos al momento de la quema, apilando los ladrillos para su cocción. En este tipo de horno, tanto las paredes como los arcos de alimentación están contruidos con los mismos ladrillos que serán cocidos.
- b) **horno fijo o de pared fija**, éstos cuentan con una cámara con paredes contruidas con ladrillo o adobe cocido, sin techo y tienen de dos a tres túneles de alimentación prefabricados. En la parte inferior se contruyen los arcos que soportan la carga y sirven como cámara de combustión (Figura 1 imágenes a y b) .

Se ha demostrado con estudios realizado por el INECC, que estos hornos mantienen en su procesos una alta ineficiencia , lo que se refleja en la obtención de productos de baja calidad, alto consumo energético y un gradiente alto de temperatura dentro del horno entre la base y el domo.

❖ Los hornos Ecológicos-MK2, poseen dos cámaras conectadas por un ducto inferior, que se abre y cierra de manera manual, poseen techos en forma de cúpulas, los cuales facilitan los flujos de calor de manera uniforme. Cada bóveda tiene una chimenea lateral y una capacidad similar. Los MK2 solo tienen una boquilla de alimentación de combustible, lo cual ayuda a evitar la pérdida de calor y hacer eficiente el uso de combustible.

El proceso comienza llenando las dos cámaras con la misma cantidad de ladrillos; los ductos y chimeneas se cierran de forma manual, y se comienza la quema de la cámara 1. Al llegar a cierta temperatura el ducto se abre para permitir el paso de la humedad, las partículas y los gases de combustión a la segunda cámara, donde serán absorbidos por los ladrillos ubicados en la cámara 2 logrando un pre-cocimiento de los ladrillos.

Una vez absorbidas las partículas y la humedad por los ladrillos de la cámara 2, se cierra el ducto y se abre la chimenea 2 para liberar las partículas que no pudieron ser absorbidos por los ladrillos. Así termina la primera quema de ladrillos, se retira los ladrillos cocidos de la cámara 1 y se introduce un nuevo lote de ladrillos crudos en la misma para continuar con el mismo procedimiento ahora teniendo la cámara 2 como la bóveda de quema principal. Debido al pre-cocimiento de los ladrillos de la cámara 2, el tiempo de quema y de combustible a emplear se reduce hasta en 50% (Figura 1c).

Situación actual de la industria ladrillera en Durango

En todo el Estado de Durango, se cuenta con un total de 710 ladrilleras según el Inventario realizado en 2010 por el Instituto Nacional de Ecología – ocupando el sexto lugar a nivel nacional (Figura 2). Se han identificado que los combustibles empleados a nivel estatal para esta actividad son principalmente leña y aserrín, como combustible principal y de manera clandestina el uso de otros combustibles (**Llantas, aceites quemados**), aunque se desconoce las proporciones en que cada uno de éstos es usado.

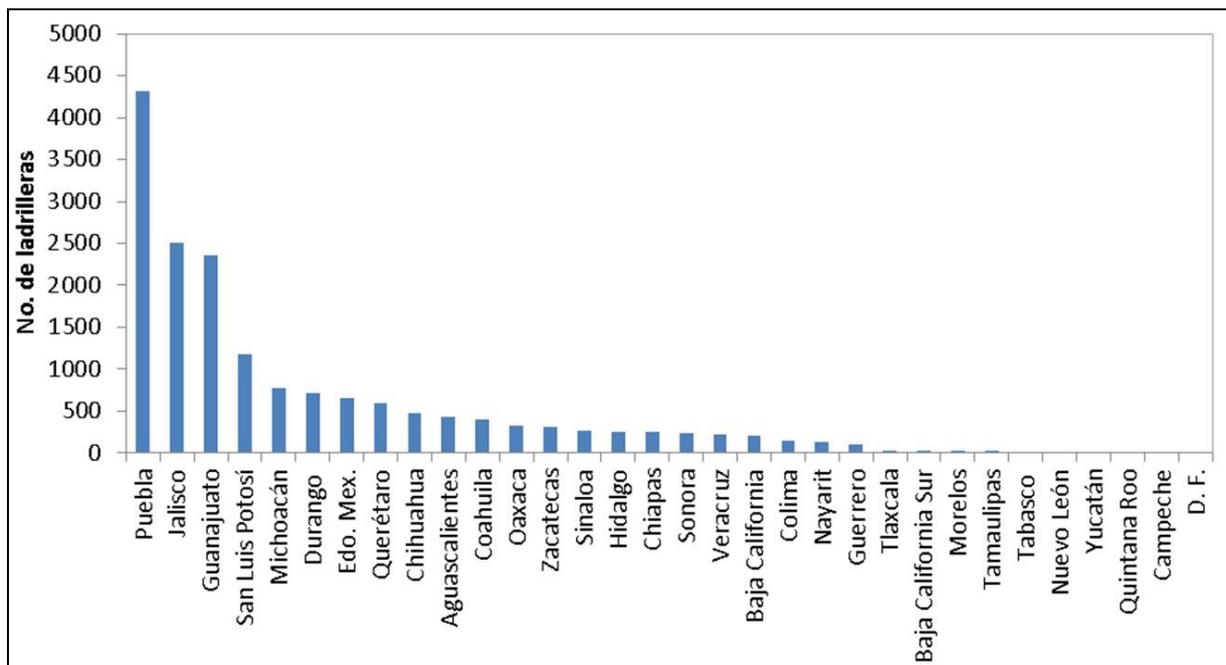


Figura 2. Número de ladrilleras por entidad federativa en 2010. [Fuente: elaboración propia a partir de Ref. 10].

De manera específica para la ciudad de Victoria de Durango, operaban 412 ladrilleras y hasta septiembre de 2014, en la zona urbana se encontraban 313 hornos, a los que se ha intentado reubicar en el parque ladrillero localizado a aproximadamente 25 Km al sureste de la ciudad.

Comprendiendo la situación crítica del problema, el gobierno del Estado de Durango, junto con autoridades municipales, han promovido en los últimos años, el cambio tecnológico por hornos eficientes y ecológicos en la industria ladrillera artesanal, acompañada por una política de reubicación de los hornos en la zona urbana al parque ladrillero. Entre las acciones implementadas además del fomento para el desarrollo del parque ladrillero destaca, el apoyo por parte de la SEMARNAT, para la construcción de hornos tipo MK2 y se adquirieron aireadores para reducir los tiempos de quema. Cabe mencionar que de acuerdo con las autoridades ambientales locales, estos hornos fueron construidos con algunas modificaciones del diseño original, los cuales que pueden observarse de manera directa en los hornos, entre las que destacan las ventanillas sobre las paredes laterales.

3. OBJETIVO

Evaluar el perfil de emisión de partículas y gases por la implementación del **Horno Ecológico- DGO**.

Objetivos específicos

- ❖ Determinación del perfil temporal de Carbono Elemental (Carbono Negro), Carbono Orgánico y Partículas para **el Horno Fijo Tradicional** y el **Horno-Ecológico-DGO**
- ❖ Determinación de los parámetros de operación y emisión de gases y partículas.
- ❖ Porcentaje de reducción de emisiones del **Horno-Ecológico-DGO**

3. METODOLOGÍA

La campaña de mediciones se diseñó para evaluar el desempeño de los hornos fijo tradicional y **Ecológico-DGO** en condiciones reales de operación, en este sentido el **INECC** y el **laboratorio de pruebas no intervinieron en los procesos de quema y operación**. La cuantificación de emisiones se realizó durante los días 10 y 13 de octubre de 2015, donde fue contratada la empresa ABC-ANALITIC-GAMATEK para realizar las mediciones correspondientes. La empresa fue seleccionada ya que mantiene los estándares de confiabilidad y acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), así como la experiencia demostrada para realizar la evaluación de las emisiones los hornos, con base en los estándares de medición de parámetros y criterios de calidad establecidos por los métodos de referencia normalizados nacionales e internacionales. La evaluación de los dos hornos se realizó con el apoyo de la **SRyMA** y del **INECC**, en el parque industrial ladrillero del municipio de Durango, Durango: (longitud: 104°28'32.72"O y latitud: 23°53'51.64"N)– ubicado a 23 km al sureste de la zona urbana.



Figura 3. Ubicación del parque industrial ladrillero con respecto al área urbana del municipio de Durango (izquierda) y traza del parque (derecha)

Descripción de los hornos Evaluados

Como parte del protocolo del proyecto, se evaluaron 2 tipos de Hornos, ambos ubicados en el Parque Industrial Ladrillero localizado en el poblado de Pino Suárez en el municipio de Durango, en el Estado de Durango.

- **Horno Fijo Tradicional**
- **Horno Ecológico DGO**

Al ser una prueba de evaluación de emisiones y no de investigación, solo se realizó un diagnóstico por horno, en ambos casos se siguieron los procedimientos para la elaboración de ladrillo de tamaño convencional. Los siguientes materiales fueron usados para preparar la mezcla con la cual se realizaron los ladrillos:

- **Horno Fijo Tradicional.** 3 tipos de tierra, que fueron utilizadas como sigue; la tierra negra y tierra blanca se mezclaron con aserrín y una cierta cantidad de agua para moldear los ladrillos del horno fijo, durante el moldeo se hizo uso de la tercera tierra conocida como polvillo, la cual se impregna superficialmente en la mezcla preparada, para impedir que los ladrillos a moldear se peguen en el molde.
- **Horno Ecológico -DGO,** se mezclaron (de lotes distintos a los ladrillos del horno fijo) tierra negra y tierra blanca junto con una mezcla de aserrín y estiércol (sin proporciones especificadas) y una cierta proporción de agua, para formar los ladrillos, adicionalmente también se utilizó la tercera tierra conocida como polvillo con el mismo objetivo antes mencionado.

Los siguientes materiales fueron utilizados como combustibles para realizar las quemas, a continuación se indica cómo fueron alimentados en el hogar de los hornos, es importante destacar que no se consideran los combustibles que ya están incluidos en los materiales usados en la mezcla con la cual se realizaron los ladrillos.

- **Horno Fijo Tradicional:** Se utilizaron en total 2 203.34 kilogramos de combustible identificados: Leña de Pino (76,40%), Triplay de Pino (19,45%), Troncos de Pino (4,36%) y Ocote (0,09%).
- **Horno Ecológico- DGO** se utilizó en total 1 198.70 kilogramos de un solo combustible: Leña de Pino (100%).

Horno Fijo Tradicional

Los **hornos fijos tradicionales**, tienen paredes y cámaras de combustión construidos para mejorar la eficiencia energética, sin embargo, no pueden ser trasladados de un lugar a otro o cambiar el tamaño de lote de acuerdo a la demanda. Estos hornos son capaces de forzar los gases de combustión hacia arriba a través de los ladrillos con menos pérdidas de calor en las paredes en comparación con los hornos de campaña. Durante las pruebas, se evaluó el ciclo completo del horno fijo. Un **aireador** (equipo utilizado para forzar la entrada de aire al hogar de combustión) fue utilizado de manera intermitente durante la etapa de Fuego (figura 4), el uso de este tipo de equipo es para ayudar en la combustión de los combustibles alimentados en el hogar del Horno.



Figura 4. Uso de aireador y pruebas efectuadas en este Horno Fijo.

Cortesía ABC-GAMATEK

Las actividades de preparación de las muestras (figura 5.) fueron verificadas y cuantificadas por el equipo de trabajo de ABC-GAMATEK, con el objetivo de llevar un control estricto del procedimiento de mezclado y cantidad de materiales empleados en el proceso (cuadro 1), los cuales son utilizados para el cálculo del balance de materiales.



Figura 5. Uso de materiales y pruebas efectuadas en este Horno Fijo.

Cortesía ABC-GAMATEK

Los sistemas de muestreo y equipo de medición (figura 6) fueron instalados en el parque ladrillero, previo a la quema y operaron durante todo el proceso de cocción del horno fijo tradicional, los equipos utilizados fueron calibrados, con base en los estándares aprobados por la normatividad vigente (EPA y ASTM) para efectos de medición de partículas y gases. Los protocolos de medición fueron los mismos utilizados en las mediciones realizadas previamente en otros hornos en México, con la finalidad de mantener la comparabilidad del muestreo y análisis.



Figura 6. Equipo y muestreo de partículas y gases efectuados en el Horno Fijo.

Cortesía ABC-GAMATEK

Horno Ecológico-DGO

Los **Hornos Ecológicos-DGO** construidos en el parque ladrillero Durango, tienen la característica principal del acoplamiento original de los hornos pares tipo “MK2” conectados en la parte inferior por túneles y compuertas (figura 7), esta configuración reduce las emisiones y aumenta la eficiencia energética del proceso de cocción de ladrillos. Al inicio del proceso el Horno 1 está en etapa de fuego y los gases de combustión son dirigidos al Horno 2 para comenzar a secar una carga previamente preparada, en esta etapa en el Horno 2 se realiza un proceso de pre-cocción en la segunda carga y sirve adicionalmente para filtrar gases y partículas emitidas durante todo el proceso de combustión. Esta particularidad, aunado a otras características de diseño, hace que el **Horno Ecológico-DGO** sea un Horno con menor consumo energético específico que otros Hornos Artesanales.

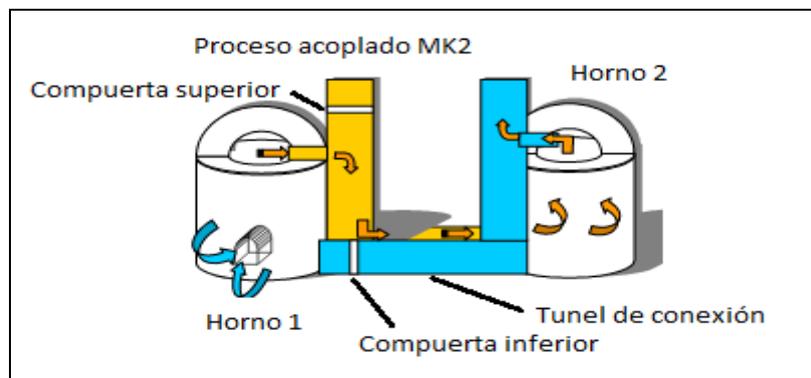


Fig 7. Diseño y operación del acoplamiento de horno tipo MK2. Robert Marquez, Fuente <http://redladrilleras.net>

Para la determinación de la composición de gases y partículas, se realizaron las siguientes pruebas; se evaluó el ciclo completo del horno 1, con la carga del horno 2, sin embargo las emisiones solamente fueron conducidas a través de la chimenea del horno 1, por manejo inadecuado de las compuertas los gases emitidos durante la etapa de Fuego del horno 1 no fueron desviados adecuadamente para secar los ladrillos cargados en el Horno 2. Otra componente adicional que no se tiene en el diseño original es la implementación de un aireador (equipo utilizado para forzar la entrada de aire al hogar de combustión) el cual fue utilizado de manera intermitente durante la etapa de Fuego (figura 8), el uso de este tipo de equipo es para mejorar la relación aire/combustible alimentados en el hogar del Horno.



Fig 8, Aireador y equipos de medición utilizados en la medición del Horno-Ecológico-DGO Cortesía ABC-GAMATEK

Producción de los hornos y propiedades de los ladrillos

Durante los procesos de evaluación de los hornos se determinaron los parámetros resumidos en la siguiente (cuadro 1).

Parámetro	Horno Fijo	Horno Ecológico DGO – Horno 1	Unidades
Cantidad de Piezas Procesada (por nivel del Horno)			
Ladrillos Totales ^t	10 579	7 674	Piezas
Ladrillo parte Inferior	3 526	2 558	Piezas
Ladrillo parte Media	3 526	2 558	Piezas
Ladrillo parte Superior	3 527	2 558	Piezas
Masa Específica de Ladrillos Crudos (por nivel del Horno)			
Ladrillo parte Inferior	2,534 ^f	2,358 ^g	kg/Pieza base húmeda
Ladrillo parte Media	2,452 ^h	2,379 ⁱ	kg/Pieza base húmeda
Ladrillo parte Superior	2,486 ^j	2,327 ^k	kg/Pieza base húmeda
Masa Específica de Ladrillo Cocido (por nivel del Horno)			
Ladrillo parte Inferior	2,221 ^l	2,112 ^m	kg/Pieza base húmeda
Ladrillo parte Media	2,128 ⁿ	2,166 ^o	kg/Pieza base húmeda
Ladrillo parte Superior	2,183 ^p	2,124 ^q	kg/Pieza base húmeda
Contenido de Humedad (no químicamente ligada) en Ladrillo Crudo			
Ladrillo	10,3	3,93	% masa
Masa Total de Materiales usados para fabricar los Ladrillos (Ladrillos Crudos)			
Tierra negra	9648,48	3509,38	kg base seca
Tierra blanca	7602,54	10146,39	kg base seca
Aserrín	2580,94	0	kg base seca
Polvillo	3787,17	2518,87	kg base seca
Aserrín + Estiércol	0	1182,89	kg base seca
Contenido de Carbono en Materiales usados para fabricar los Ladrillos (Ladrillos Crudos)			
Tierra negra	0,92	0,95	% masa base seca
Tierra blanca	1,02	0,45	% masa base seca
Aserrín	20,32	0	% masa base seca
Polvillo	0,98	1,32	% masa base seca
Aserrín + Estiércol	0	41,69	% masa base seca
Contenido de Carbono en Ladrillos Cocidos (por nivel del Horno)			
Ladrillos parte Inferior	0,4	0,49	% masa base seca
Ladrillos parte Media	0,8	0,62	% masa base seca
Ladrillos parte Superior	1,36	1,24	% masa base seca

Cuadro 1. De parámetros cuantificados en la producción de ladrillo en el Horno fijo tradicional y el Horno Ecológico-DGO

Fuente, ABC-ANALITIC-GAMETEK-2015

Consumo y propiedades del combustible

Para realizar los balances de materiales, se requiere conocer el consumo y las propiedades de cada combustible utilizado en los hornos, a continuación se muestra el resumen de los parámetros cuantificados en la cuadro 2.

Parámetro	Horno Fijo	Horno Ecológico DGO – Horno 1	Unidades
Cantidad de Combustibles Alimentados			
Ocote	2,00	0	kg base seca
Leña de Pino	1 676,8	1 198,70	kg base seca
Triplay de Pino	428,5	0	kg base seca
Troncos de Pino	96,0	0	kg base seca
Aserrín (para cubierta)	438,2	0	kg base seca
Contenido de Carbono en Combustibles Alimentados^R			
Ocote	44,43	-	% masa base seca
Leña de Pino	50,34	50,34	% masa base seca
Triplay de Pino	47,39	-	% masa base seca
Troncos de Pino	47,55	-	% masa base seca
Aserrín (para cubierta)	25,58	-	% masa base seca
Contenido de Humedad (no químicamente ligada) en Combustibles Alimentados^S			
Ocote	5,20	-	% masa
Leña de Pino	12,60	10,70	% masa
Triplay de Pino	8,70	-	% masa
Troncos de Pino	6,90	-	% masa
Aserrín (para cubierta)	48,8	-	% masa
Aserrín (usado para preparar la mezcla)	31,5	-	% masa
Aserrín + Estiércol (usado para preparar la mezcla)	-	22,1	% masa
Calores de Combustión de Combustibles Alimentados y Materiales para Mezcla			
Ocote	0,024 8		GJ/kg
Leña de Pino	0,020 6		GJ/kg
Triplay de Pino	0,019 2		GJ/kg
Troncos de Pino	0,019 1		GJ/kg
Aserrín (para cubierta)	0,014 9		GJ/kg
Aserrín (usado para preparar la mezcla)	0,012 5		GJ/kg

Cuadro 2. Datos obtenidos de los combustibles utilizados en el Horno Fijo y en el Horno Ecológico DGO

Fuente, ABC-ANALITIC-GAMETEK-2015

4. RESULTADOS

Con base en los parámetros cuantificados y de acuerdo a la metodología establecida se obtuvieron los siguientes resultados;

Perfil temporal de emisiones de Partículas, Carbono Negro y Carbono Orgánico

Para evaluar el desempeño de los hornos se compararon los perfiles de emisión a tiempos fijos establecidos. Para el caso de las Partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras en su fracción primaria, la cuales incluyen materiales sólidos, líquidos o gaseosos a la temperatura y presión del proceso, se espera que forme partículas a temperatura y presión ambiental. Las Partículas Primarias incluyen aquellos materiales que pueden revertir su estado a forma gaseosa en el medio ambiente pero no incluyen a las Partículas Secundarias, las cuales se forman en partículas en el medio ambiente ya sea por procesos o reacciones químicas atmosféricas. En el siguiente gráfico se muestra el perfil de partículas en masa de PM 2.5. Se puede apreciar en los números de medición los cuales están asociados a un tiempo, para un periodo comparativo total de 18 horas de proceso.

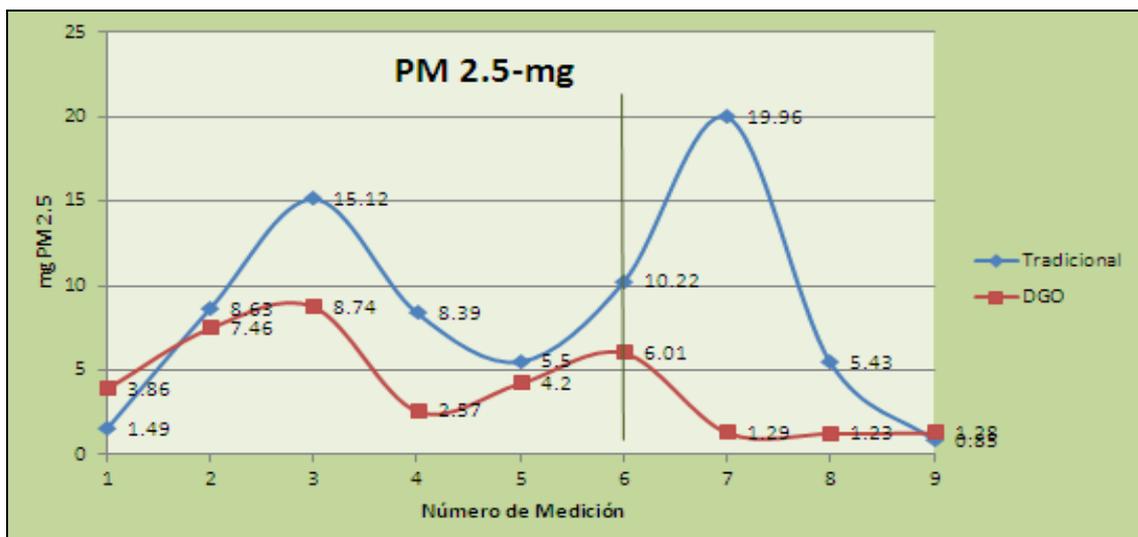


Fig 9, Perfil temporal de emisión de PM 2.5 en el Horno Fijo Tradicional y el Horno Ecológico-DGO

El gráfico (figura 9) muestra que durante las primeras horas de operación de ambos hornos el **Horno Ecológico-DGO**, emite mayor cantidad de partículas que el **horno fijo tradicional**, esta situación se presenta de manera continua en todos los hornos cerrados al mantener condiciones de tiro menores con respecto al horno tradicional, sin embargo a medida que aumenta el tiro por efecto del aumento de temperatura, el proceso se vuelve relativamente eficiente por la quema y la configuración del **Horno Ecológico-DGO**. Esta situación se puede mejorar si se mantiene el manejo correcto del sistema de compuertas inferior y superior del horno acoplado. En la etapa 6 donde se finaliza la alimentación del fuego, el **horno fijo tradicional** aumenta su emisión al ser cubierta la cama ó techo superior con biomasa que se quema por efecto del fuego alto, llamas de difusión y pos-quema que encuentran salidas por los espacios de las camas superiores.

Con respecto a las emisiones de **carbono negro** el cual es referido como **carbono elemental**, esta especie fue definida operacionalmente basada en la medición de la absorción de luz, su reactividad química y/o su estabilidad térmica. Consiste de hollín (polvo de carbono formado por combustión

incompleta), carbono vegetal y/o posiblemente material orgánico refractario que absorbe luz. En el siguiente gráfico (figura 10) se muestra el perfil de emisión en masa de carbono negro.

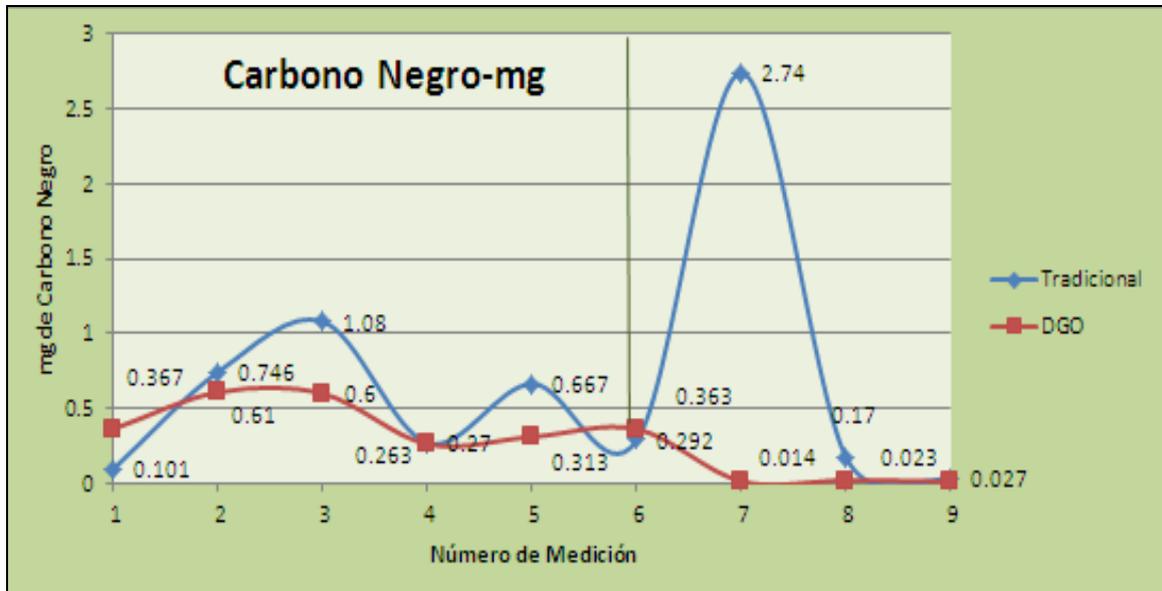


Fig 10, Perfil temporal del emisión de Carbono Negro en el Horno Fijo Tradicional y el Horno Ecológico-DGO

A diferencia de las partículas PM 2.5, la emisión del carbono negro dependen ampliamente de los procesos de combustión y en especial de la relación y composición del comburente y el combustible. Como se mencionó en el análisis de emisión de PM 2.5, la eficiencia del horno fijo tradicional suele ser mejor en las etapas de arranque con respecto al Horno Ecológico DGO, sin embargo a medida que se mejora el proceso de combustión, así como el manejo adecuado de las compuertas y las liberaciones de emisiones al horno secundario, el Horno Ecológico DGO llega a tener un mejor desempeño, reduciendo la emisión de carbono negro. Sin embargo en esta evaluación como se mencionó el manejo de compuertas no fue el adecuado, reduciendo el desempeño del **Horno Ecológico-DGO** como se observa en algunos puntos el grafico durante la etapa de fuego y por lo tanto alcanzado puntos relativamente similares en emisión al horno fijo tradicional.

Una vez pasada la etapa de fuego (6), se puede nuevamente observar un comportamiento de **emisiones de carbono negro muy elevadas**, en específico en la etapa (7), para el **horno fijo tradicional**, debido al cierre del horno con biomasa, la cual es húmeda y de composición variada estableciéndose un proceso similar al arranque en frio en el hogar del horno, sin embargo estas condiciones son muy similares en el domo del horno fijo tradicional, debido a un proceso muy ineficiente la relación aire/combustible, generando una emisión densa que se mantiene por varias horas. En contraste el **Horno Ecológico-DGO** simplemente deja de ser alimentado el horno 1 y se abre por completo la compuerta hacia el horno 2, para recibir gases en forma de calor y comenzar la etapa de fuego en el horno 2, reduciendo considerablemente las emisiones como se observa en la medición 7, 8 y 9.

El carbono orgánico es siempre co-emitado con el carbono negro y se emite mayoritariamente en combustibles sólidos como son aquellos provenientes de la biomasa, a diferencia del carbono negro, el orgánico se compone de especies que en algunos casos puede ser nociva para la salud. En el siguiente gráfico (Figura 11) se muestra el perfil del carbono orgánico en masa para los dos hornos evaluados.

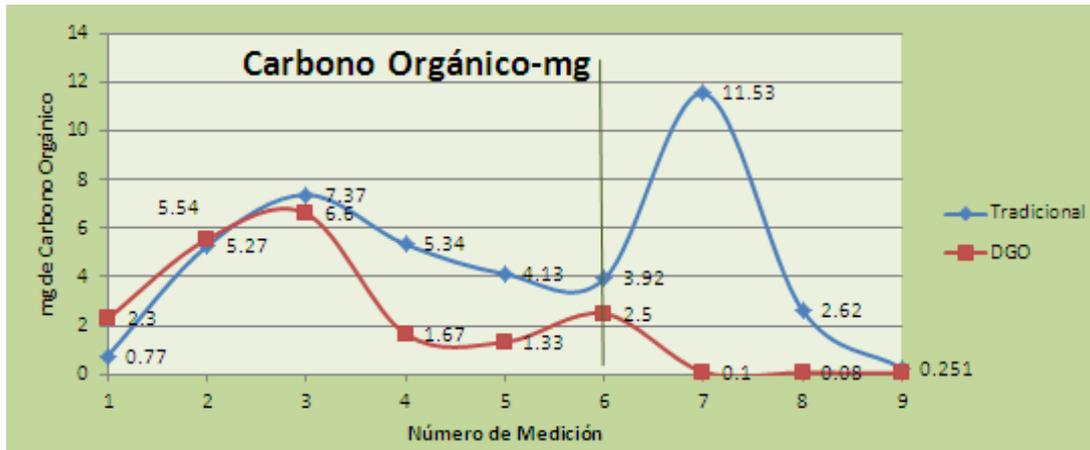


Fig 11, Perfil temporal del emisión de Carbono Negro en el Horno Fijo Tradicional y el Horno Ecológico-DGO

Las proporciones de carbono negro/orgánico se mantienen durante todo el proceso de cocción en los hornos, sin embargo se observa que el **Horno Ecológico DGO**, libera durante las primeras 6 horas (número de medición 1,2,3) los mismos niveles de carbono orgánico, que el horno fijo tradicional, nuevamente esta situación se debe principalmente al manejo inadecuado de los procesos de combustión y los procedimientos del control de compuertas de los hornos acoplados. Con respecto al horno fijo tradicional mantiene el perfil observado en otras mediciones y de igual forma se observa la liberación más elevada en la etapa pos-quema del cierre del horno.

Con los datos obtenidos en las mediciones y eliminando los valores atípicos en el punto 5 del tren de muestra durante la operación del **Horno Ecológico-DGO**, se muestra en la tabla 3 el resumen del porcentaje de reducción entre los hornos fijo tradicional y Ecológico-DGO en el que se observa, que el **Horno Ecológico-DGO**, reduce en promedio de todos los contaminantes un 50%, la emisión de contaminantes a la atmosfera, con respecto al Horno Fijo tradicional.

Contaminante	Horno Fijo tradicional	Horno Ecológico-DGO	Porcentaje <u>calculado</u> de reducción del Horno Ecológico-DGO
PM 2.5 mg	8.39	4.07	48.51%
PM 10 mg	7.21	3.5	48.54%
Carbono Negro mg	0.677	0.288	42.54%
Carbono Orgánico mg	4.57	2.24	49.01%

Cuadro 3, Porcentaje de reducción de contaminantes entre en el Horno Fijo Tradicional y el Horno Ecológico-DGO

Evaluación de los parámetros de medición en los hornos

De acuerdo a los métodos estandarizados utilizados por *ABC-ANALITICS-GAMATEK*, se obtuvieron los siguientes parámetros (cuadro 4.) para los hornos evaluados, donde se puede observar que el horno fijo se encuentra por arriba de todos los parámetros medidos, a excepción del factor de emisión de partículas el cual es mayor en el **Horno-Ecológico-DGO**, el cual como se mencionó, se debe a que los procedimientos de liberación y transferencia de emisiones entre los hornos acoplados no fue el óptimo en un punto de la medición.

Parámetros	Horno Fijo Tradicional	Horno-Ecológico-DGO (considerando el valor no controlado)	% Reducción efectiva en la medición del Horno- Ecológico-DGO
Tiempo efectivo de muestreo (h)	17,27	18,15	
Masa de PM 2.5 Capturada (µg)	75,590	73,930	3%
Masa de Carbono Total en filtros PM 2.5 (µg)	47,335	37,785	20%
Contenido de Carbono elemental en filtro de PM 2.5 (µg)	6102	3627	60%
Contenido de Carbono Orgánico en filtro de PM 2.5 (µg)	41,233	34,158	17%
Masa de CO ₂ (g)	30,3	21,9	27%
Masa de CH ₄ (g)	0,08	0,03	62%
Entradas de Carbono Total al Horno (kgC) Biomasa	1933,69	1208,82	37%
Carbono Total Emitido a la Atmósfera (kgC)	1736,77	1079,93	40%
Energía Total Consumida(GJ)	83,384	42,519	51%
Consumo Energético(Gg/Mg)	3,620	2,596	28%
Carbono Total Emitido (kg C/Mg)	75,40	65,94	12%

Cuadro 4. Parámetros estimados para el horno fijo tradicional y el Horno Ecológico-DGO.

Fuente, ABC-ANALITIC-GAMATEK-2015

5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en las mediciones para el **Horno Ecológico-DGO**, muestran una variabilidad entre los resultados cuantificados en campo y el análisis por etapas del proceso, esto se debe a que al haberse realizado una sola evaluación y no contar una mayor cantidad de parámetros comparables que permitan ponderar los valores atípicos en cada etapa y demostrar la eficiencia del **Horno Ecológico DGO**, sin embargo los resultados muestran que mantiene niveles aceptables en la reducción de partículas y gases.
- Por lo que respecta al horno fijo tradicional, se obtuvieron altos niveles de emisión de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero, así como un **51% de consumo total energético** más con respecto al **Horno Ecológico-DGO**.
- **Es muy factible incrementar hasta en un 75%** el desempeño del **Horno Ecológico-DGO** por consumo energético y emisión de contaminantes, cuando el proceso dual se trabaje de manera continua en el Horno Ecológico-DGO, generando **mayor productividad para los trabajadores**, en términos de **tiempo efectivo de la elaboración de ladrillos**, **menor consumo de biocombustibles**, mayor resistencia, vista y terminado del ladrillo.
- Con respecto a los factores de emisión, los resultados obtenidos por el laboratorio, indican que el Horno-Ecológico-DGO, emite un **3% menos de partículas PM 2.5** con respecto al Horno Tradicional Fijo. Este resultado es consecuencia de un incremento sustancial de emisiones por acumulación de gases y partículas de combustión, los cuales **fueron liberados en una sola emisión de manera no controlada del Horno Ecológico-DGO**. Sin embargo esta etapa del proceso fue omitido en la evaluación del proceso completo al representar una emisión extraordinaria la cual no es habitual en este tipo de hornos.
- Para los gases de combustión y de efecto invernadero **CO₂ y CH₄**, la liberación en masa es mayor entre **27% y 62%** con respecto al Horno Fijo Tradicional, con respecto al Horno-Ecológico-DGO, el cual como se ha mencionado puede ser menor para el Horno-Ecológico-DGO, si maneja el proceso completo y adecuado del Horno-Ecológico-DGO.
- De acuerdo a las condiciones de operación del **Horno Ecológico-DGO**, en el momento de la evaluación, se puede establecer que el Horno-Ecológico-DGO, **mantiene una reducción estimada del 49% de emisiones y un 51 % efectivo de menor consumo energético con respecto al Horno Fijo Tradicional**.
- Se observó que el material combustible utilizado en el horno fijo tradicional, el mismo que es utilizado en la zona urbana de Durango, mantiene una diversidad de materiales entre las que se encuentran; el triplay y aserrín, los cual provienen de los residuos madereros y materiales de embalaje. Se ha demostrado en otros estudios realizados por el INECC, que **pueden contener sustancias conservadoras de maderas (Penta-clorofenol)**, siendo altamente contaminantes y emisores de sustancias tóxicas como las Dioxinas y Furanos, las cuales pueden ser un riesgo primeramente para los obradores y un riesgo para la población cercana a las zonas urbanas. En contraste el Horno-Ecológico-DGO, **utilizó mayoritariamente biomasa de pino** y aserrín para el mezclado de arcillas.

Recomendaciones.

- Se sugiere **revisar e implementar los protocolos de operación del horno MK2**, establecidos por Robert Márquez (http://redladrilleras.net/documentos_galeria) con la finalidad de asegurar un manejo adecuado de los procesos de fabricación y transferencia de emisiones entre los hornos acoplados, reduciendo aún más la liberación de partículas y gases.
- **Sellar las ventanillas** de observación para mayor efectividad y residencia de gases calientes en los hornos.
- **Establecer un programa de capacitación en el parque ladrillero**, para garantizar la adecuada operación de los hornos, aumentar la eficiencia energética, producción y el beneficio económico de los obradores.
- Continuar con el programa de **fortalecimiento de vigilancia y uso de combustibles limpios**, asegurando que los materiales utilizados sobre todo aquellos como el aserrín, no contengan sustancias conservadoras, las cuales no son detectables en su forma pulverizada.
- Presentar un **programa de trabajo anual a la SMYRN** con indicadores, donde se establezcan los avances en la implementación de hornos Ecológicos-DGO, el fortalecimiento a las buenas prácticas y finalmente el cumplimiento del programa de capacitación para los administradores, operadores y obradores del parque.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Cárdenas B., Aréchiga, U., Munguía J.L., Márquez C., Campos, A. 2012. Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: cambio climático, eficiencia energética y calidad del aire. Informe Final del Convenio de Colaboración INE/ADA-013/2009. Versión Actualizada Junio 2012. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y el Instituto Nacional de Ecología. México D.F. 44 pp.
- Cárdenas B., Aréchiga, U., Munguía J.L., Márquez C., Campos, A. 2012. Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: cambio climático, eficiencia energética y calidad del aire: segunda etapa. Informe Final del Convenio de Colaboración INE/ADA-110071. Versión Actualizada Junio 2012. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y el Instituto Nacional de Ecología. México D.F. 54 pp.
- González Galván, Paula Caryan. 2010. La introducción de hornos ecológicos en una comunidad ladrillera: factores de adopción y resistencia al cambio tecnológico. Tesis de maestría. El Colegio de la Frontera Norte. Baja California, México. 120 pp.
- Programa para mejorar la calidad del aire en Durango 2009-2013. Informe de Evaluación. 2012. Reporte de prueba; Determinación de factores de emisión al Aire en Hornos Artesanales de ladrillo, ABC-ANALITIC-GAMATEK,

DETERMINACIÓN DE LA EXPOSICIÓN PERSONAL A MONÓXIDO DE CARBONO Y MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5}) DURANTE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE LADRILLO EN EL PARQUE INDUSTRIAL LADRILLERO DE DURANGO

MC. Roberto Basaldud Cruz

Subdirector de Monitoreo y Caracterización Analítica de Contaminantes Atmosféricos

Tec. José Juan Felipe Ángeles García, MC. Faviola Altúzar Villatoro, IQI. Becki Jiménez Gatica & Beatriz Arely Gutiérrez Alvarado*

Subdirección de Monitoreo y Caracterización Analítica de Contaminantes Atmosféricos

Dr. Arturo Gavilán García,

Director de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas Productos y Residuos

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

RESUMEN

Se presentan las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM_{2.5}) a las que están expuestos los trabajadores involucrados en el proceso de cocción de ladrillos, durante la operación de dos tipos de hornos: un horno fijo tradicional y un horno ecológico DGO, ubicados dentro del parque industrial ladrillero del municipio de Durango, Durango. Durante los días 10 y 13 de octubre se realizaron la medición y colección de muestras con equipos personales –los cuales fueron portados por trabajadores e instalados en puntos fijos– para la determinación de las concentraciones de CO y PM_{2.5}. En el caso del CO las concentraciones determinadas indican que los trabajadores que operaron el horno Ecológico DGO estuvieron expuestos a mayores concentraciones (9.2 ppm) respecto a las determinadas durante la operación del horno fijo tradicional (7.4 ppm), respecto a PM_{2.5}, en el caso del trabajador responsable de alimentar el combustible se determinaron concentraciones de 908 µg/m³ y 1863 µg/m³ para los trabajadores involucrados en la operación de los hornos fijo tradicional y horno Ecológico DGO, respectivamente.

1 INTRODUCCIÓN

A partir de 2008, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) –antes Instituto Nacional de Ecología (INE)– en colaboración con diversas instituciones, ha desarrollado estudios en distintas zonas ladrilleras del país, principalmente en el Estado de Guanajuato. Dichos estudios han consistido en la medición de las emisiones de contaminantes atmosféricos, la caracterización del proceso de combustión en hornos artesanales y MK2, incluyendo el perfil de temperaturas y el balance de materiales usados como materias primas y productos, además del cálculo de emisiones y sus factores de emisión para gases de efecto de invernadero (GEI) provenientes de esta actividad [Cárdenas, 2012].

Los primeros estudios únicamente incluyeron mediciones perimetrales y ambientales de las emisiones. Sin embargo, a partir de 2011 se incluyó en los estudios la componente de exposición personal a contaminantes atmosféricos, de las personas responsables de la alimentación de combustible al horno durante el proceso de cocción. En febrero de 2011, se realizó un muestreo en un horno MK2 ubicado en el municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato. Dos muestras de exposición personal fueron tomadas con el equipo colocado en un punto fijo a una altura de 1.5 m, a 40 cm de la pared del horno y a 1 m de la entrada del horno. Una de ellas fue obtenida durante las primeras seis horas del proceso de cocción, mientras que la segunda se obtuvo en el tiempo restante de la quema por aproximadamente 10 h. Se observó una concentración de $396 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la muestra tomada al inicio de la quema y de $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la segunda.

Posteriormente, en agosto de 2011 se realizó un estudio en la comunidad de El Refugio en León, Guanajuato, sobre exposición personal de los individuos que participan en la cocción de ladrillos usando un horno tradicional, cuyo entrada de alimentación se encuentra a aproximadamente 3 m bajo relieve del suelo. Se colocaron dos bombas SKC para el muestreo de material particulado menor a 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$) en puntos fijos dentro del área de alimentación durante aproximadamente 10 horas –tiempo correspondiente a la alimentación del horno hasta alcanzar la temperatura adecuada– (Figura 1-1). Un tercer equipo fue portado durante aproximadamente 10 horas por una persona que realizaba actividades alrededor del horno durante la quema.



Figura 1. Ubicación de los equipos de exposición personal durante el muestreo realizado en El Refugio, León, Gto.

Las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ más altas se observaron en los equipos colocados en la zona de alimentación –449 y $351 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – mientras que el que fue portado por el trabajador fue de $334 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a las concentraciones encontradas alrededor del horno, los valores más altos fueron registrados viento abajo. Por último, en 2012 se realizó en Aguascalientes un muestreo de exposición personal y perimetral para comparar las emisiones de CO y $\text{PM}_{2.5}$ provenientes de hornos MK2

modificados y un horno artesanal de campaña. Los hornos MK2 están colocados de manera contigua como se muestra en la Figura 1-2(a) y cada uno de ellos cuenta con dos áreas de alimentación bajo relieve, una ubicada hacia el norte y otra hacia el sur. Durante el estudio, el material combustible fue suministrado al horno por medio de las dos entradas de alimentación, por lo que el equipo de exposición personal fue portado por las dos personas responsables de esta actividad (Figura 1-2 b).



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 (a) Hornos MK2 modificados (b) Portadores de los equipos de exposición personal.

Además, se colocó un equipo de exposición personal en un punto fijo en el área de alimentación que se encuentra ubicada hacia el sur, a una distancia de 2 metros de la entrada del horno y a 1.5 m de altura respecto al nivel del piso del área de alimentación (Figura 1-3)



Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2 Punto fijo de muestreo dentro del área de alimentación del horno MK2.

Con respecto al horno artesanal estudiado, éste fue un horno de campaña con seis puertas de alimentación de combustible, por lo que en algunos momentos durante la quema, hubieron más de un alimentador, sin embargo el equipo de exposición personal fue colocado a la persona que permaneció durante todo el proceso de la quema.

1. OBJETIVO

Determinar los niveles de concentración de monóxido de carbono (CO) y material particulado menor a 2.5 micras (PM_{2.5}) a los que están expuestos los trabajadores involucrados en el proceso de producción artesanal de ladrillos en el Municipio de Durango, Durango.

Objetivos específicos

- ❖ Determinar los niveles de concentración de CO y PM_{2.5} a los que están expuestos los trabajadores involucrados en el proceso de producción artesanal de ladrillos –empleando un horno fijo tradicional– en el Municipio de Durango, Durango.
- ❖ Determinar los niveles de concentración de CO y PM_{2.5} a los que están expuestos los trabajadores involucrados en el proceso de producción artesanal de ladrillos –empleando un horno Ecológico DGO– en el Municipio de Durango, Durango.
- ❖ Determinar los niveles de concentración perimetrales –de CO y PM_{2.5}– a hornos ladrilleros durante el proceso de cocción.

3. METODOLOGÍA

Durante los días 10 y 13 de octubre de 2015 personal del INECC acudió al parque industrial ladrillero del municipio de Durango, Durango –en las coordenadas: longitud: 104°28'32.72"O y latitud: 23°53'51.64"N– ubicado a 23 km al sureste de la zona urbana, donde se solicitó el apoyo de trabajadores involucrados en la producción artesanal de ladrillos, para la portación –en una posición próxima al área de respiración– de un medidor y un muestreador personal de CO y PM_{2.5}, respectivamente, durante el periodo que tarda la cocción de ladrillos.



Figura 3-3 Ubicación del parque industrial ladrillero con respecto al área urbana del municipio de Durango (izquierda) y traza del parque (derecha)

Las mediciones, para determinar la exposición personal a CO y PM_{2.5}, se realizaron durante la quema de dos hornos ladrilleros: primero un horno fijo tradicional, el 10 de octubre, y posteriormente un horno Ecológico DGO, el 13 de octubre. Durante las quemas dos sets de equipos fueron portados por trabajadores: el responsable de alimentar de combustible al horno (T-01) y otro que realiza actividades en las inmediaciones del horno (T-02), tales como el mezclado de arcillas, moldeado de

ladrillos para una próxima quema, y un tercer set fue colocado en la pared del horno a aproximadamente 3 metros de distancia de la boca de alimentación del horno (P.F.).

Es importante mencionar que para la realización de las mediciones antes descritas, no se modificó ninguna de las prácticas comúnmente empleadas por los trabajadores.



Figura 3-4 Identificación de los portadores (T-01 responsable de alimentar el horno y T-02 realiza actividades en las inmediaciones del horno) y sitio fijo (P.F.) donde se instalaron los equipos.

Aunado a lo anterior se realizó la medición y muestreo de los contaminantes antes mencionados en hasta cinco puntos, perimetrales a los hornos durante las quemas. El principal criterio para la selección de los puntos fue su ubicación respecto al horno –viento arriba y viento abajo– con el objetivo de identificar el impacto de las emisiones de la quema.

Equipos empleados durante las mediciones

A continuación se presenta una breve descripción de los equipos empleados para realizar la medición de CO y PM_{2.5}.



Para determinar las concentraciones de **CO** a nivel personal y perimetral se emplearon monitores marca Langan modelo T15, los cuales funcionan con una celda electroquímica. La determinación de la concentración se hace en tiempo real y los datos son guardados en un datalogger interno. Los equipos fueron calibrados, previo al inicio de la campaña de mediciones.



Para el muestreo de $PM_{2.5}$, se emplearon bombas de succión marca SKC, modelo 224-PCXR8, a un flujo de 4 L/min, con muestreadores personales marca MSP-Corp, modelo 200. La bomba succiona aire a través de un filtro de teflón de 37 mm de diámetro, sobre el cual se acumulan las partículas suspendidas. La determinación gravimétrica de la concentración de $PM_{2.5}$ se efectúa acondicionando y pesando los filtros antes y después de la colección de la muestra en los laboratorios del INECC con una ultra microbalanza analítica



Para los muestreos perimetrales de material particulado se emplearon equipos Minivol de la marca AIRMETRICS, los cuales aspiran aire y por un sistema de impactadores las partículas son direccionadas, y a partir de ello se da la separación del material particulado, para ser recolectadas sobre un filtro de 47 mm de diámetro. Con este equipo se pueden muestrear partículas PM_{10} como $PM_{2.5}$.

Hornos medidos

Horno fijo tradicional (HFT)

El HFT que se midió, tenía paredes y cámara de combustión construidos y la parte inferior del horno se encuentra enterrada, aproximadamente 1.8 metros. La boca de alimentación del horno se encuentra dentro de una fosa a 1.8 metros por debajo de la superficie, en este espacio es donde el trabajador responsable de la alimentación de combustible pasa la mayor parte del tiempo durante el proceso de cocción de los ladrillos.

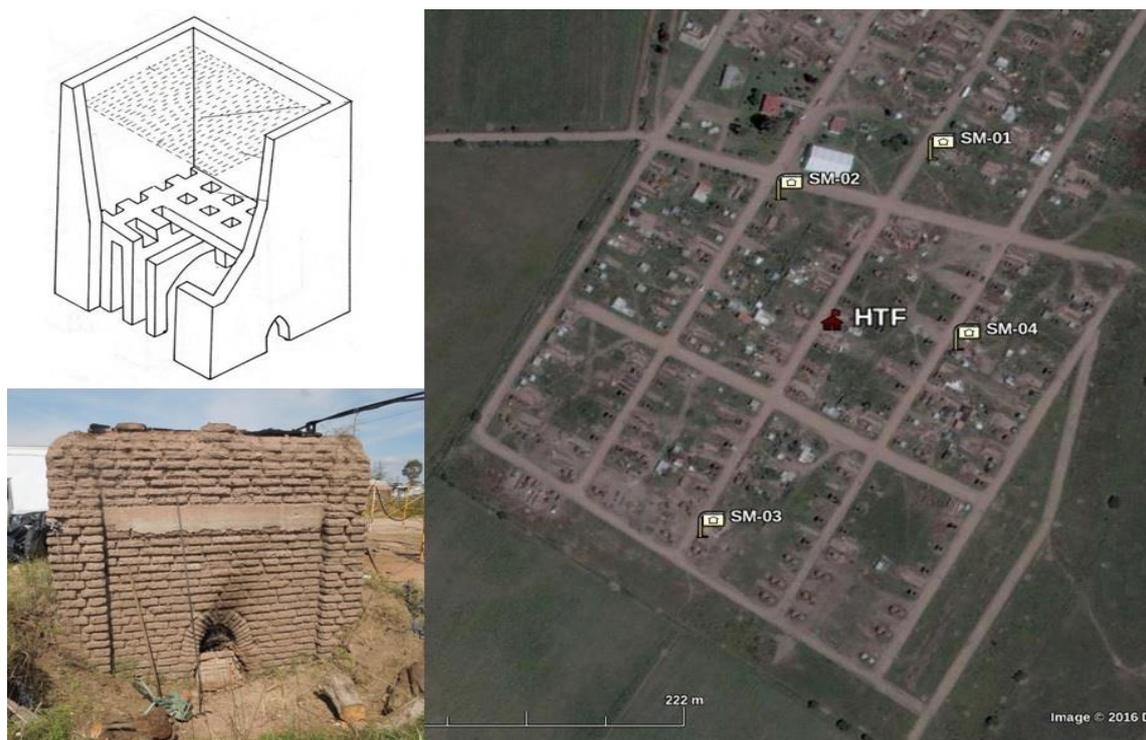


Figura 3-29 Esquema y foto del horno fijo tradicional (izquierda) y diagrama de distribución donde se realizaron las mediciones perimetrales (derecha.)

Durante el proceso de cocción de los ladrillos se empleó de manera intermitente un aireador –para forzar la entrada de aire a la cámara de combustión– con el objeto de mejorar la eficiencia de la combustión de la madera, combustible empleado en este proceso de cocción de los ladrillos. En la figura 3-3 se muestran los puntos en los cuales se realizaron las mediciones perimetrales de CO y PM_{2.5}, durante el periodo que duro la cocción de los ladrillos.

Horno Ecológico DGO (HED)

El HED que se midió tiene el diseño de los hornos MK2 –posee dos cámaras conectadas por un ducto inferior, que se abre y cierra de manera manual y posee techos en forma de cúpulas y la boca de alimentación del horno se encuentra dentro de una fosa, 2 metros por debajo de la superficie – con la variante de que cuenta con múltiples orificios comúnmente empleados como puertos para vigilar el proceso de cocción, y los cuales no fueron sellados durante el periodo que duro la cocción de los ladrillos. Es importante mencionar que en este horno el área de alimentación se encuentra debajo un pequeño techo de lámina.



Figura 3-5 Horno Ecológico DGO que se opero durante la realización de las mediciones de las concentraciones para determinar la exposición personal y las concentraciones perimetrales.

Al igual que durante la operación del HFT se empleó de manera intermitente un aireador –para forzar la entrada de aire a la cámara de combustión– con el objeto de mejorar la eficiencia de la combustión de la madera, combustible empleado en este proceso de cocción de los ladrillos.

En la parte de la derecha de la figura 3-4 se muestran los puntos en los cuales se realizaron las mediciones perimetral de CO y PM_{2.5}, durante el periodo que duro la cocción de los ladrillos.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan las concentraciones de CO y PM_{2.5} para determinar la exposición personal y las concentraciones perimetrales durante la cocción de ladrillos en dos hornos: HFT y HED.

Exposición Personal

Monóxido de carbono

Las concentraciones de CO a las que se encuentran expuestos los trabajadores encargados de alimentar el horno (T-01), fig. 4-1, en promedio son más altas durante la operación del HED (9.2 ppm) respecto a las determinadas durante la operación del HFT (7.4 ppm). Lo anterior pudiera explicarse debido a que como se mencionó en la descripción de los hornos el HED contaba con múltiples puertos de vigilancia que al no ser sellados permiten la salida de las emisiones a una menor altura que las observadas en el HFT. Además de que la zona de alimentación del HED contaba con un techo de lámina –en la zona de alimentación– lo que restringe la dispersión de las emisiones del horno y con ello el trabajador está expuesto a mayores concentraciones.

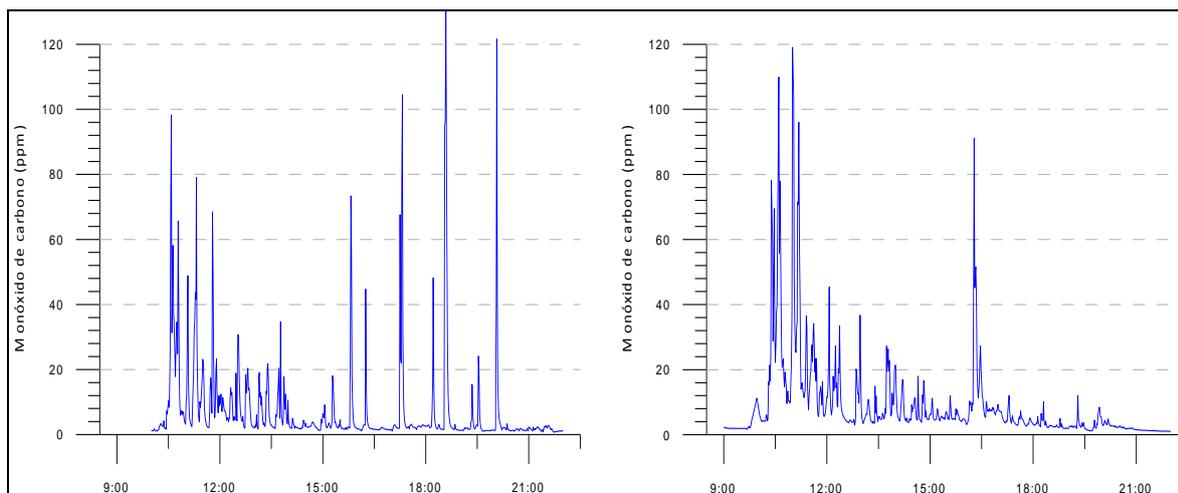


Figura 4-6 Perfiles de concentración de monóxido de carbono determinados por el equipo portado por el trabajador responsable de alimentar los hornos: HFT (izq) y HED (der)

En el caso de las mediciones de los participante denominados (T-02), durante la operación del HFT, debido a una falla en el equipo no fue posible determinar las concentraciones, sin embargo en el caso del HED podemos ver que las concentraciones para el T-02 (4.5 ppm) son menores a las registradas para el T-01 (9.2 ppm), lo cual se puede explicar debido a que el T-02 generalmente está a una mayor distancia de la emisión del horno.

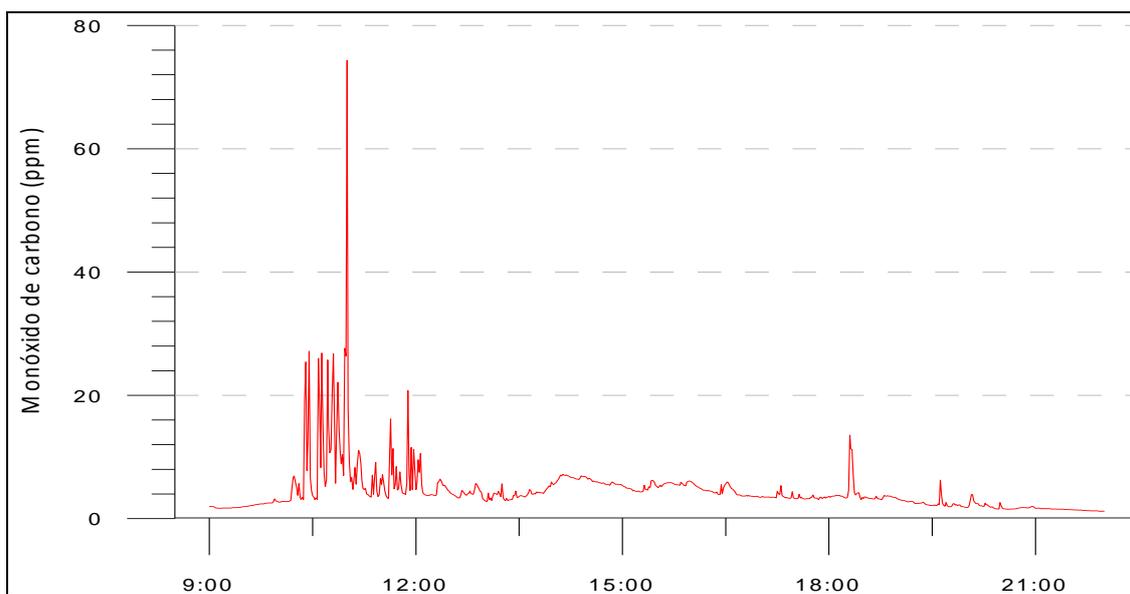


Figura 4-7 Perfiles de concentración de monóxido de carbono –en función del tiempo– determinado por el equipo portado por el trabajador que realiza múltiples tareas en las inmediaciones del HED

Por último en el caso de las concentraciones medidas en el punto fijo, próximo a la boca de alimentación de los hornos, en la figura 4.3 podemos observar que los niveles de concentración son similares, sin embargo para el HFT el periodo, aproximadamente de las 10:30 a las 14:00, durante el cual se mantiene un registro de altas concentraciones es mayor al del HED, 10:20 a las 12:00.

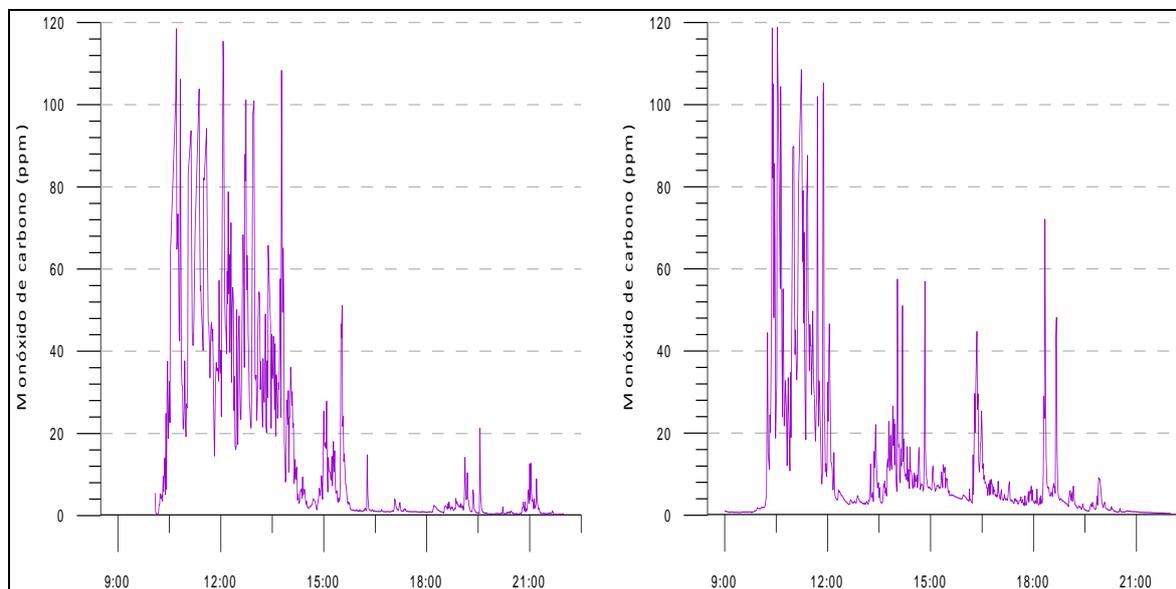


Figura 4-8 Perfiles de CO –en función del tiempo– medidos durante el proceso de cocción de ladrillos en: a) HFT y b) HED

Material Particulado (PM_{2.5})

Las concentraciones determinadas de PM_{2.5} –para el T-01, T-02 y P.F.– a partir de las muestras colectadas en los filtros fueron mayores las determinadas en el HED con respecto a las determinadas en el HFT, los periodos de medición fueron de 4 y 3 horas para HFT y HED, respectivamente.

Al sumar las concentraciones determinadas en los distintos periodos se tiene una exposición total, en el caso del HFT (T-01: 908 µg/m³, T-02: 158 µg/m³ y P.F.:1983 µg/m³), mientras que para el HED (T-01: 1863 µg/m³, T-02: 395 µg/m³ y P.F.:2850 µg/m³),

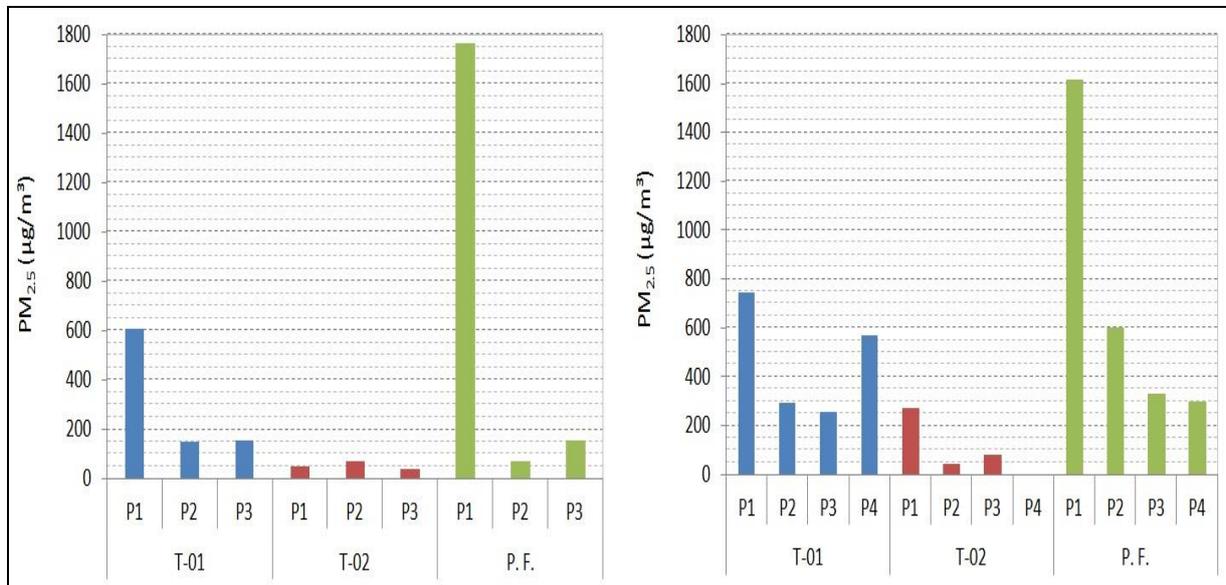


Figura 4-9 Concentraciones de PM_{2.5} a las que están expuestos los trabajadores encargados de realizar la alimentación de combustible durante la cocción de ladrillos en: a) HFT (izq.) y b) HED (der).

La explicación de estos resultados podría ser la misma que para el monóxido de carbono, el HED contaba con múltiples puertos de vigilancia que no fueron sellados durante el proceso de cocción de los ladrillos, lo que permitió la salida de los gases y partículas de combustión en aéreas próximas a donde se encuentran los trabajadores.

Mediciones perimetrales

En caso de las concentraciones de CO y PM_{2.5} determinadas en los sitios perimetrales, respecto a la ubicación de los hornos en los cuales se realizó la medición de la exposición personal a CO y PM_{2.5}, se determinaron mayores concentraciones el día de la quema del HED, fig. 4-5.

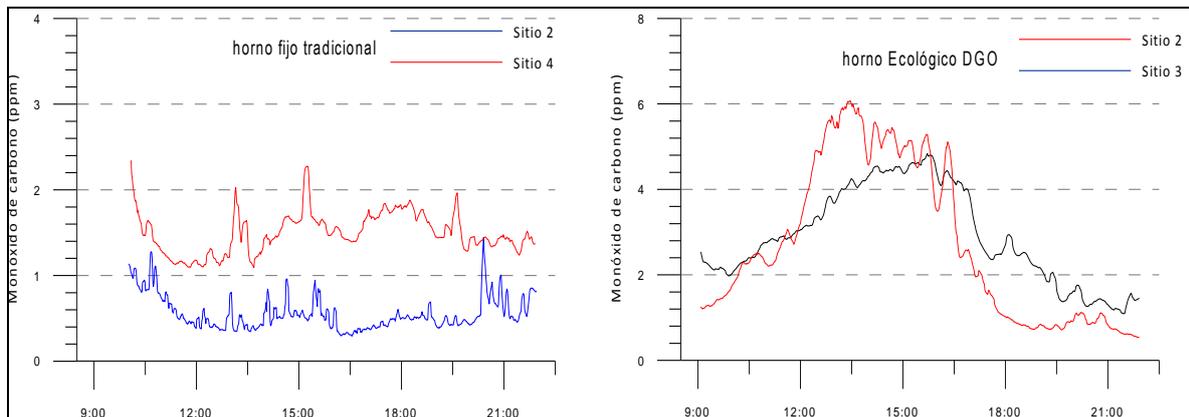


Figura 4-10 Perfiles de monóxido de carbono y PM_{2.5}, medidos en sitios perimetrales a los hornos en los que se midió la exposición personal durante el proceso de cocción de ladrillos.

En el caso de las concentraciones de material particulado PM_{2.5}, en promedio las mayores concentraciones se midieron el día de la quema del HFT, con dos eventos en los cuales se determinaron concentraciones superiores a 400 µg/m³, mientras que el día que se realizaron las mediciones en el HED la mayoría de las concentraciones se encuentran por debajo de los 100 µg/m³

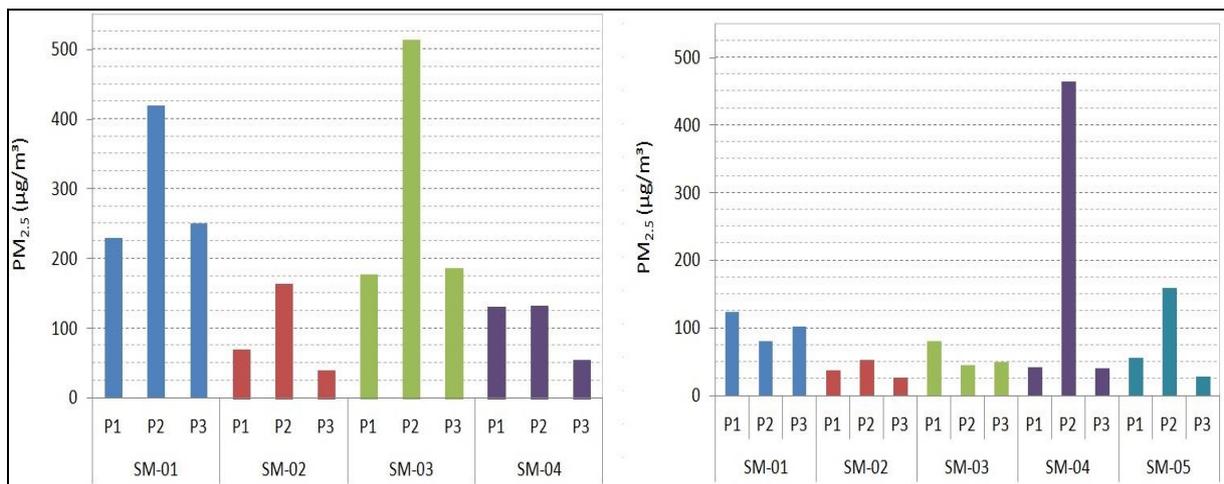


Figura 4-11 Concentraciones de PM_{2.5} determinadas en los sitios perimetrales a los hornos: HFT (izq) y HED (der)

5. CONCLUSIONES

Al determinar las concentraciones de monóxido de carbono y material particulado $PM_{2.5}$ a las que están expuestos los trabajadores involucrados en el proceso de cocción de ladrillos empleando dos tipos diferentes de hornos: HFT y HED –considerados en el presente estudio– se concluye que los trabajadores que estuvieron expuestos a mayores concentraciones fueron aquellos que operaron el HED. Para monóxido de carbono las concentraciones determinadas fueron de 9.2 ppm, en el HED, mientras que en el HFT fueron de 7.4 ppm y concentraciones de $PM_{2.5}$, en el caso del trabajador responsable de alimentar el combustible se obtuvieron las concentraciones de $908 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1863 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los HFT y HED, respectivamente. Lo anterior nos permite identificar que la exposición personal a contaminantes atmosféricos de los trabajadores involucrados en el proceso de cocción de ladrillos estará determinada por el diseño del horno, así como, las actividades en las cuales participa dentro del proceso.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda revisar el diseño y protocolo de operación del HED, ya que el presente estudio permitió identificar la contribución –a la exposición personal a contaminantes atmosféricos de los trabajadores involucrados en el proceso de cocción de ladrillos– de las emisiones que se fugan por los puertos de vigilancia.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Barranzuela Lescano, Joyce. 2014. Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región Piura. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Piura, Perú. 95 pp.
2. Bradley Álvarez, Francisco José. 2007. Efecto Genotóxico y a la Salud en Personal Expuesto a Contaminantes emitidos por Ladrilleras en Durango, México. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Durango, México. 90 pp.
3. Cárdenas B., Aréchiga, U., Munguía J.L., Márquez C., Campos, A. 2012. Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: cambio climático, eficiencia energética y calidad del aire. Informe Final del Convenio de Colaboración INE/ADA-013/2009. Versión Actualizada Junio 2012. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y el Instituto Nacional de Ecología. México D.F.
4. González Galván, Paula Caryan. 2010. La introducción de hornos ecológicos en una comunidad ladrillera: factores de adopción y resistencia al cambio tecnológico. Tesis de maestría. El Colegio de la Frontera Norte. Baja California, México. 120 pp.
5. Ministerio de la producción del gobierno de Perú. Guía buenas prácticas para ladrilleras artesanales. 2010. 69 pp.
6. Ortiz Herrera, L.A., 2012, Servicios Profesionales para el Desarrollo económico, S.C. Diagnóstico Nacional del sector ladrillero artesanal de México. 36 pp.
7. Programa de Eficiencia energética en ladrilleras artesanales. 2011. Caracterización de los hornos ladrilleros usados en la industria ladrillera. Proyecto Colombia. 14 pp.
8. Programa para mejorar la calidad del aire en Durango 2009-2013. Informe de Evaluación. 2012.

DIAGNÓSTICO GENERAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO, DGO. EN 2014

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos de Vida Corta

Biól. Rodolfo Iniestra Gómez y Act. Ma Guadalupe Tzintzun Cervantes
Subdirección de Estudios Estratégicos de Calidad del Aire

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx

Se presenta el diagnóstico de la calidad del aire del municipio de Durango para 2014 tomando como base la información generada por la Red de Monitoreo a cargo de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado, la cual está integrada por dos estaciones de monitoreo automático (IPN y SRN), tres estaciones de monitoreo manual (ZAR, CBTIS y PFP) y una más que tiene ambos tipos de medición (ITD). El Cuadro 1 muestra las estaciones de monitoreo que conforman esta red, así como los contaminantes que se midieron en las mismas, en tanto que la Figura 1 muestra la ubicación aproximada de cada estación.

Red de monitoreo	Estación	Clave	Tipo de equipo y año de inicio de operación	Contaminantes medidos					
				PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	SO ₂	NO ₂	CO
Durango	ITD	ITD	Aut. 2006	✓	☐	✓	✓	✓	✓
			Man. 2006	✓	☐	☐	☐	☐	☐
	IPN	IPN	Aut. 2010	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	SRNyMA	SRN	Aut. 2010	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Zaragoza	ZAR	Man. 2006	✓	☐	☐	☐	☐	☐
	CBTIS	CBTIS	Man. 2006	✓	☐	☐	☐	☐	☐
	PROFEPA	PFP	Man. 2006	✓	☐	☐	☐	☐	☐

Aut. = Equipo automático

Man. = Equipo manual

☐ = No se cuenta con equipo de monitoreo de este contaminante.

✓ = Se cuenta con equipo de monitoreo de este contaminante.

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango.

Cuadro 1. Estaciones de monitoreo que conformaron el SMCA de Durango en 2014 y parámetros registrados.

Dicho diagnóstico se realiza partir de la estimación de indicadores sobre el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas (NOM) en la materia, el comportamiento temporal de los contaminantes y el número de días con calidad del aire buena, regular y mala, por estación de monitoreo.

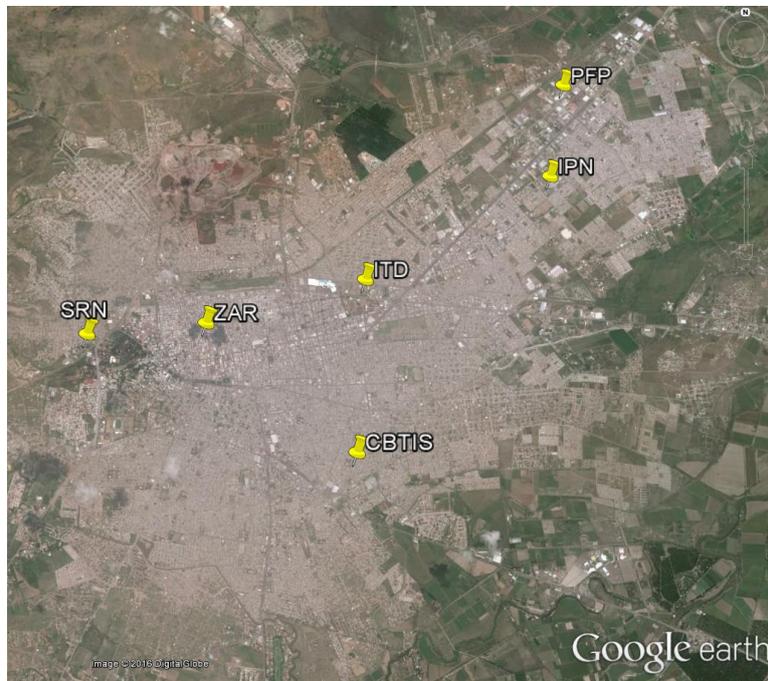


Figura 1. Ubicación aproximada de las estaciones de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Ciudad de Victoria de Durango,

I. Evaluación del cumplimiento de normas de calidad del aire

Los resultados se presentan para aquellas estaciones de monitoreo donde se produjo información suficiente para hacer tal evaluación de acuerdo con el manejo de datos establecido en la normatividad mexicana, especialmente para los casos de partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y ozono. Para el resto de los contaminantes, por consistencia, se maneja el mismo criterio de suficiencia de información (75%), para desarrollar los indicadores de evaluación de cumplimiento de norma.

En general se encontró lo siguiente:

- El cumplimiento de norma no fue posible evaluarlo para ningún contaminante en la estación ITD por encontrarse fuera de operación durante todo 2014 por problemas con los equipos de medición.
- En la estación de monitoreo IPN sólo fue posible evaluar cumplimiento de norma para monóxido de carbono y el resultado fue satisfactorio. Esto es, la concentración del segundo máximo de 8 horas fue inferior al límite normado. Para el resto de los contaminantes no se generó información suficiente para generar el indicador (Figura 2).

- Las concentraciones registradas en la estación SRN para PM_{10} (como promedio de 24 horas y promedio anual), ozono (máximo horario y quinto máximo como promedio de ocho horas) y monóxido de carbono (segundo máximo de ocho horas) fueron inferiores a los límites normados (Figura 2).
- En ninguna de las estaciones de monitoreo manual de PM_{10} se generó información suficiente para evaluar el cumplimiento de norma.

Es importante señalar para los casos particulares de partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y ozono, que la evaluación de cumplimiento de norma presentado en este documento se tomaron como referencia las normas vigentes para cada contaminante en 2014, las cuales corresponden a las publicadas en los 2002 y 2005 (ozono y partículas, respectivamente), Ello a pesar de que en agosto del mismo año tales normas fueron actualizadas y establecieron límites más estrictos. Esta decisión se tomó por el hecho de que en las normas de estos contaminantes se especifica que la evaluación de los límites se realizará por año calendario, es decir del 1 de enero al 31 de diciembre y en la mayor parte del año 2014 las normas vigentes corresponden antes referidas.

Partículas - PM_{10}

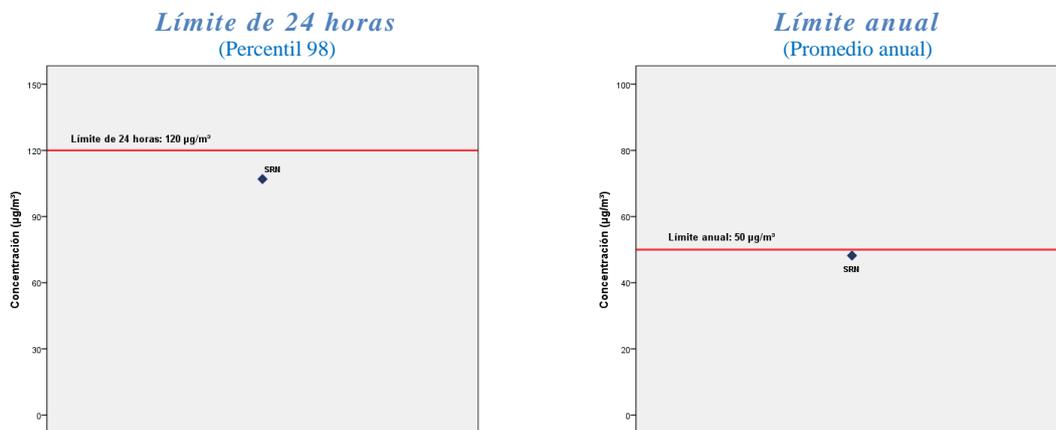
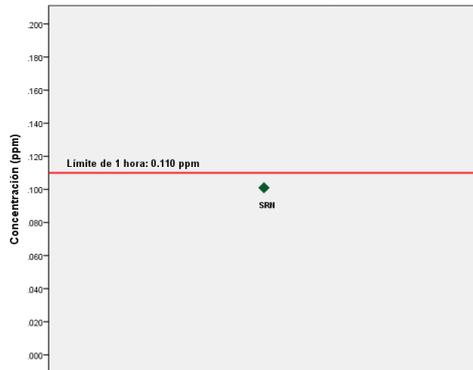


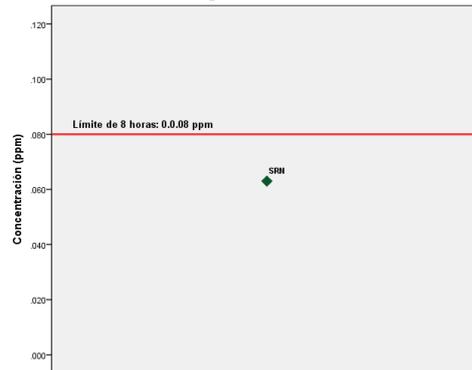
Figura 2. Evaluación del cumplimiento de norma en la ciudad de Durango en 2014, por estación de monitoreo

Ozono - O₃

Límite de 1 hora (Máximo horario)



Límite de 8 horas (Quinto máximo del promedio móvil de 8 horas)



Monóxido de carbono – CO

Límite de 8 horas (Segundo máximo)

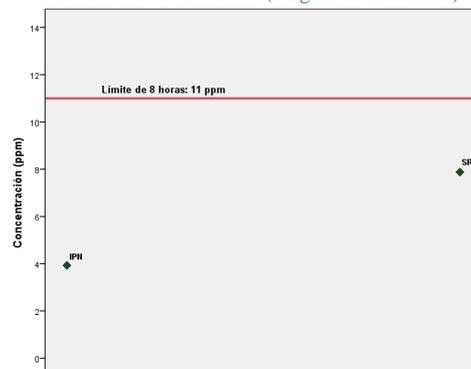


Figura 3. Evaluación del cumplimiento de norma en la ciudad de Durango en 2014, por estación de monitoreo

II. Comportamiento temporal

La Figura 4 muestra el comportamiento de los promedios de 24 horas de PM₁₀ por estación de monitoreo a lo largo del año en la ciudad de Durango durante el 2014. En ella se puede observar que con cierta frecuencia se presentan valores de concentración superiores al límite normado, especialmente en la estación IPN. Esto, sin embargo, no se ve reflejado en la evaluación de

cumplimiento de norma debido a que por el manejo de datos que establece la norma de este contaminante se tuvieron que invalidar, por insuficiencia de información, los datos de dos trimestres y con ello ya no fue posible llevar a cabo tal evaluación. En la estación SRN también se observan varios días con concentraciones superiores al nivel de la norma, pero se cumple con ésta debido a que el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas fue inferior al límite normado.

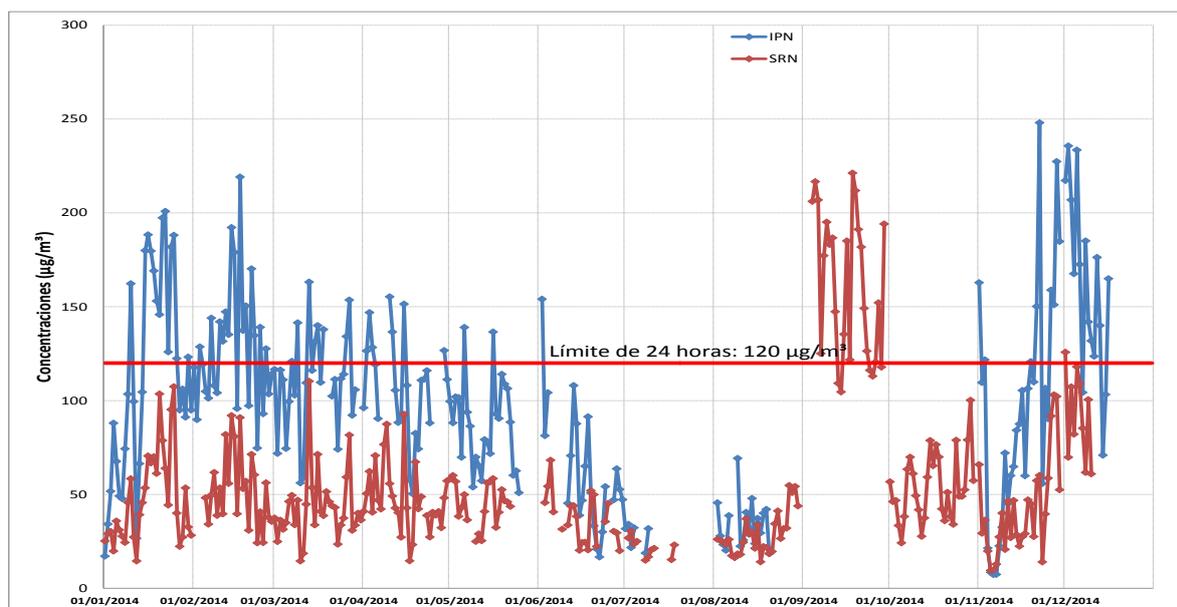


Figura 4. Comportamiento temporal de los promedios de 24 horas de PM_{10} en 2014 en Durango, por estación de monitoreo automáticas

No se muestran los gráficos para el resto de los contaminantes ($PM_{2.5}$, O_3 , SO_2 , NO_2 y CO), debido a que en ningún caso se observó, en la información disponible, una sola concentración que fuera superior al límite normado correspondiente.

III. Distribución de días con calidad del aire buena, regular y mala

Este indicador ilustra la severidad de los problemas de la calidad del aire en cada estación de monitoreo en términos del número de días con concentraciones superiores a los límites normados, así como la tendencia que presentan las concentraciones inferiores, pero cercanas, a estos valores. Los colores indican el número de días en los que las concentraciones registradas durante el año cumplen con alguna de las siguientes condiciones:

- ✓ No excedieron el valor diario normado (verde).
- ✓ No excedieron el valor diario normado, pero se encuentran cercanas a este valor (amarillo).
- ✓ Excedieron el valor diario normado (rojo).

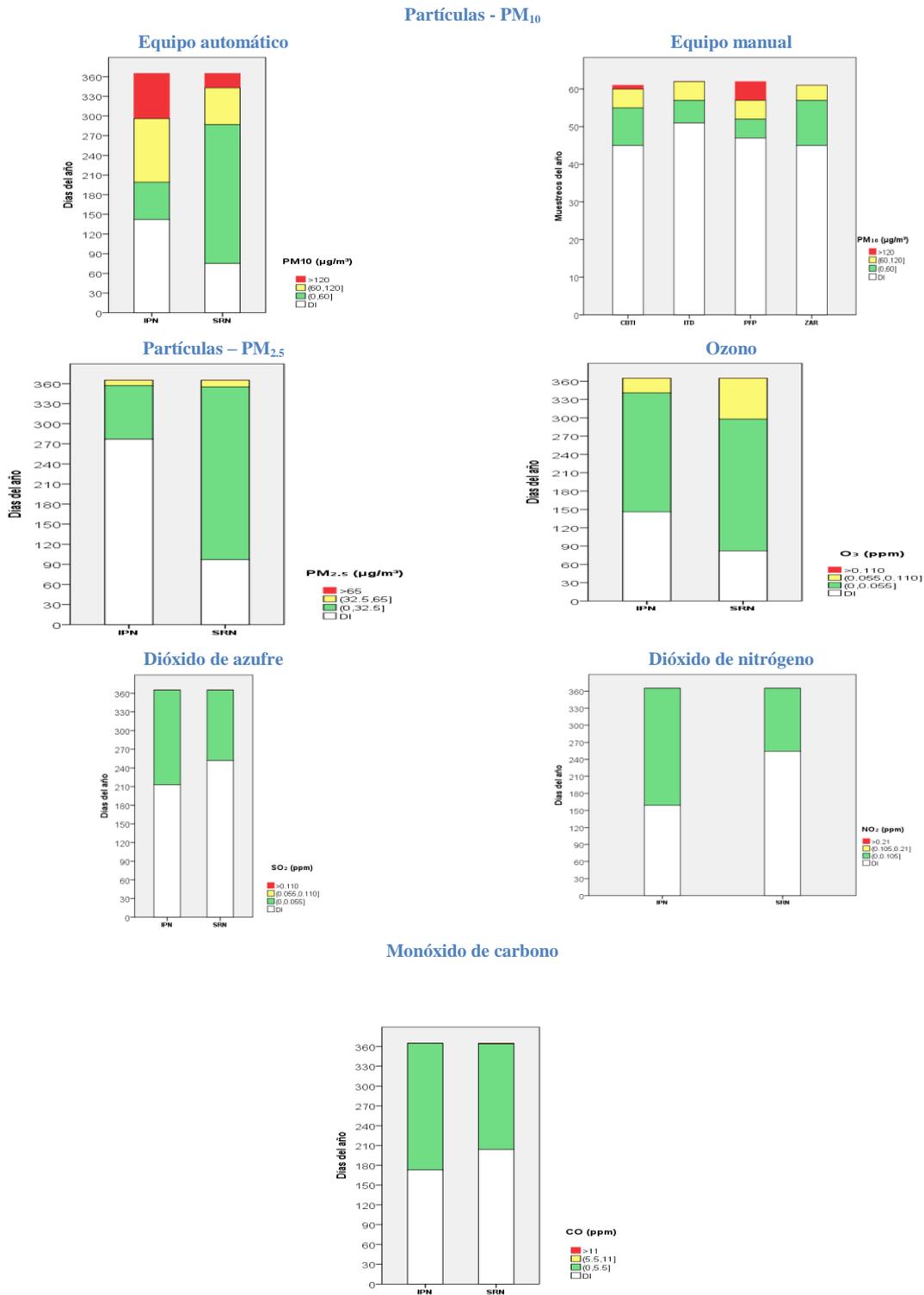
- ✓ No se contó con información suficiente para evaluar el cumplimiento de alguna de las condiciones anteriores (blanco).

El dato base para construir este indicador es la concentración máxima del día (por ejemplo, promedio de una hora, ocho horas o 24 horas, dependiendo del contaminante que se trate), en cada estación de monitoreo.

En general, la Figura 5 muestra que:

- Tanto el monitoreo automático como manual indican que en Durango es probable que haya problemas de calidad del aire por PM_{10} , pues es clara la ocurrencia de días con concentraciones superiores al límite normado (rojo) en cuatro de las seis estaciones de monitoreo que miden este contaminante (IPN, SRN, CBTIS y PFP). El caso más llamativo es el de la estación IPN donde se registraron 69 días con mala calidad del aire (rojo) por PM_{10} . Sin embargo, esta situación no se ve reflejada en la evaluación de cumplimiento de norma debido a que la mayoría de estos días ocurrieron en los dos trimestres que fueron invalidados por insuficiencia de datos en el proceso de evaluación de cumplimiento. En cualquier caso, esta figura nos ilustra no sólo la necesidad de mejorar el desempeño de las estaciones de monitoreo para asegurar suficiencia de información sino también los problemas de calidad del aire por PM_{10} en la ciudad. Este escenario de problemas de calidad del aire por PM_{10} , seguramente sería más severo si la evaluación se hiciera con los límites de la norma oficial mexicana vigente o con los valores guía de la Organización Mundial de la Salud, ya que éstos son 37% y 58% más estrictos, respectivamente que los usados en esta evaluación de cumplimiento.
- Para el resto de los contaminantes se observa que predominaron los días con calidad del aire buena (verde) y regular (amarillo). En ningún caso se presentan días con concentraciones superiores a la norma respectiva (rojo) y en todos los casos hay una gran ventana de oportunidad para mejorar el desempeño de las estaciones de monitoreo para incrementar de manera notable la generación de información útil que permita cumplir con los criterios de suficiencia.

Figura 5. Número de días o muestreos con calidad del aire buena, regular o mala por contaminante y estación de monitoreo en Durango durante 2014.



MODELACIÓN DE LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN EL ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE VICTORIA DE DURANGO.

M. en C. Abraham Ortíz Álvarez
Subdirector de Economía Industrial

Dr. Arturo Gavilán García,
Director de Investigación para el Manejo Sustentable de Sustancias Químicas Productos y Residuos

Periférico Sur, No. 5000, Col. Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán, México, D.F. C.P. 04530.
Tel. +52 (55) 54246400. Fax. +52 (55) 54245404. www.inecc.gob.mx, jose.ortinez@inecc.gob.mx

De acuerdo con datos del último censo de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente (**SRyMA**), en la zona urbana de la ciudad de Victoria de Durango, se tiene registrados alrededor de 313 hornos tradicionales, distribuidos mayoritariamente en la zona sur-este con aproximadamente 200 hornos, seguido por la zona sur-oeste con 91 hornos figura 1.

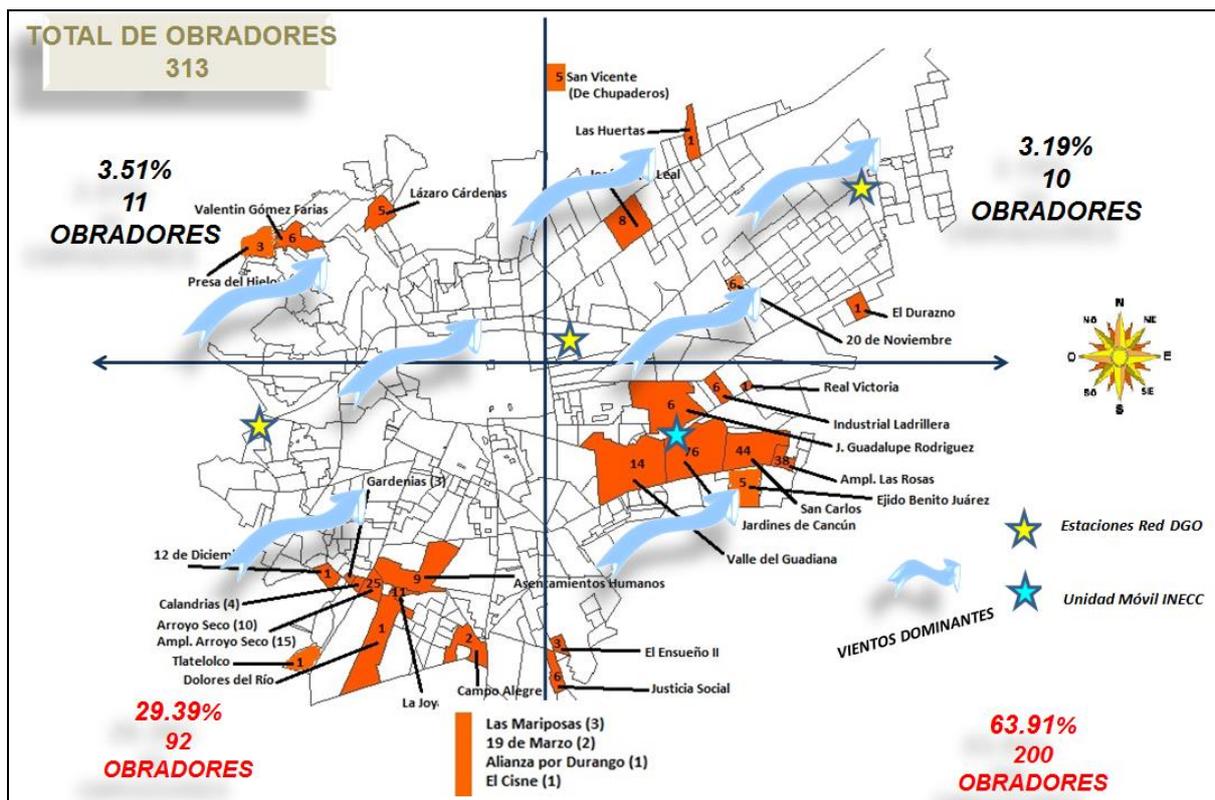


Figura 1. Distribución por cuadrantes de los hornos y vientos predominantes en la ciudad de Victoria de Durango, fuente SRyMA Dgo.

Información generada por la Red de Monitoreo de SRyMA, así como el análisis realizado en este reporte “*Diagnostico General de la Calidad del Aire en la ciudad de Victoria de Durango*” (Zirath, Iniestra, Tzintzun), se muestra que para el 2014 la estación IPN, fue donde se registraron 69 días con mala calidad del aire por PM_{10} , adicionalmente se menciona que durante el periodo anual del 2014, se observaron altas concentraciones de PM_{10} durante los meses de enero a marzo y diciembre en la estación IPN, en contraste la esta SRN, se mantiene en concentraciones menores para los mismo periodos, observándose solo un incremento para los meses de septiembre-octubre.

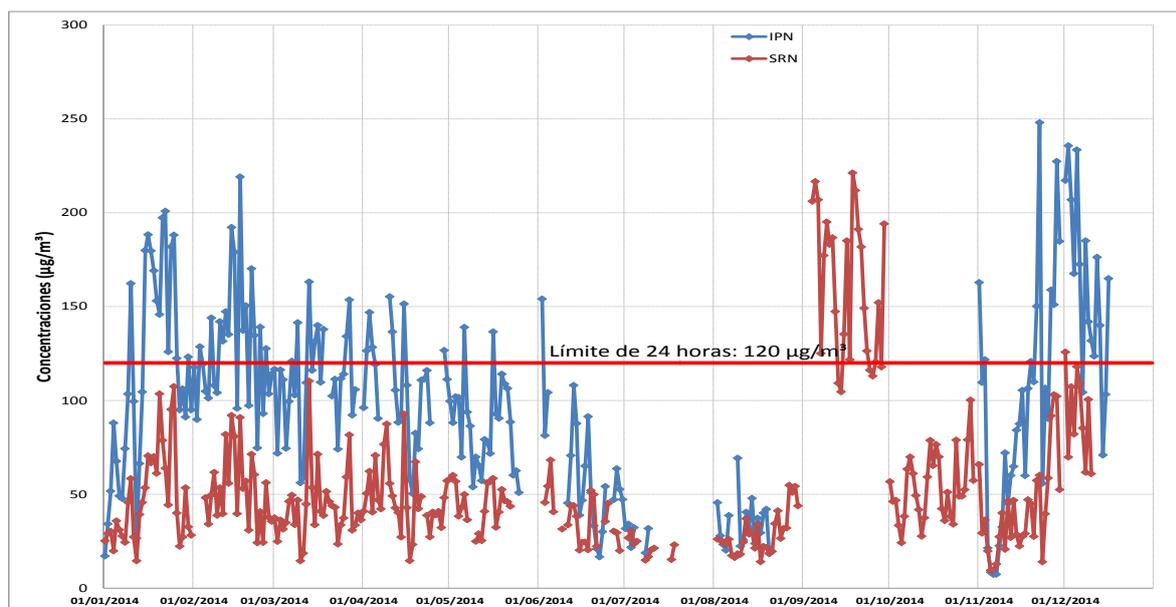


Figura 2. Comportamiento temporal de los promedios de 24 horas de PM_{10} en 2014 en Durango, por estación de monitoreo automáticas

Análisis de liberación de partículas y parcelas de aire en la Ciudad de Victoria de Durango

Con la información obtenida de la red de monitoreo, se realizaron diferentes simulaciones numéricas de primer aproximación, mediante el uso del modelo Hyplit-NOAA (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, National Oceanic and Atmospheric Administration*) de primera aproximación el cual fue utilizado para evaluar la emisión-depósito de partículas, para los periodos observados con mayores niveles de material particulado. El análisis del modelo se fundamenta en las tendencias en la dirección de los vientos que se pueden observar en la figura 1, los cuales son predominantemente vientos del suroeste al noreste. Es importante observar la ubicación de las estaciones IPN y SRN en el grafico 1, donde se observa que el IPN se encuentra viento abajo del patrón de vientos, por lo cual se puede considerar una estación receptora de emisiones provenientes de la zona urbana.

En la figura 3, se simularon las emisiones de los hornos ladrilleros que se encuentran ubicados en la colonia **Jardines de Cancún**, el periodo de simulación se realizó para una liberación de partículas y gases a las 7 am hora local del 1° de Marzo del 2014. Los resultados indican que las áreas de mayor concentración se encuentran dentro la zona de la estación IPN, por lo tanto se puede observar en la

figura 2 que efectivamente la estación recibe impactos de la zona ladrillera, considerando que muy probablemente se elevaron las concentraciones de PM_{10} , durante ese día.

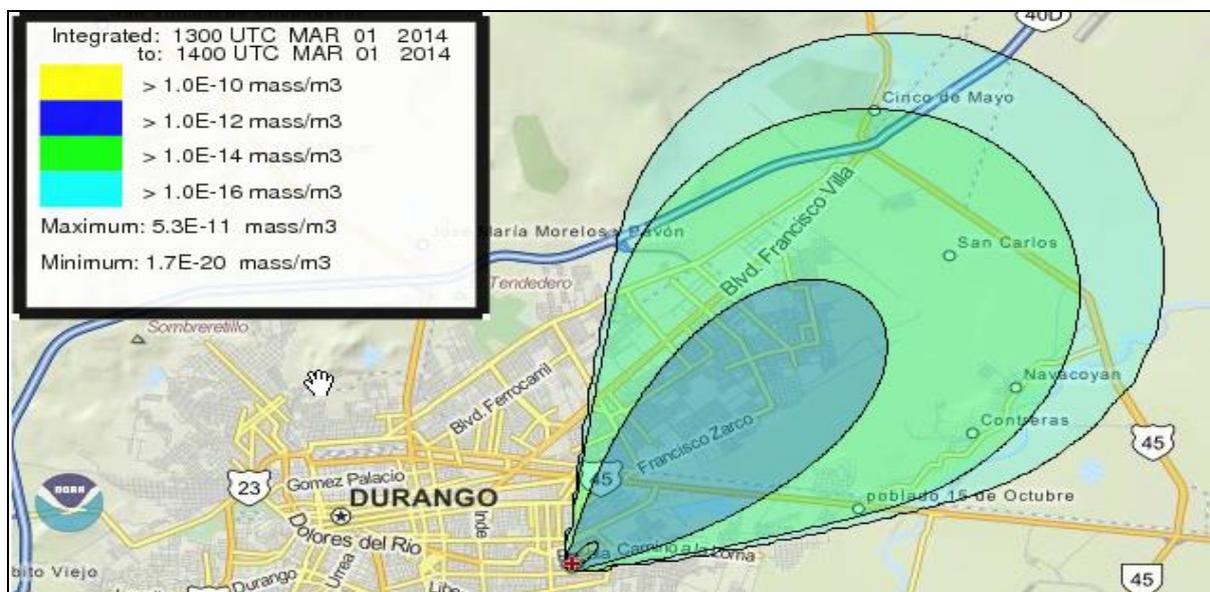


Figura 3. Concentración ambiental probable de partículas en la estación IPN, por emisiones de la zona ladrillera en la colonia Jardines de Cancún

Con respecto a la estación SRN, los resultados mostrados para el periodo de simulación del 24 de septiembre del 2014, donde muestran elevadas concentraciones de PM_{10} figura 2, se puede observar que la liberación de emisiones de la colonia **Jardines de Cancún**, se transportan en la dirección sureste, indicando probable impacto en la zona donde se ubica la estación SRN figura 4.

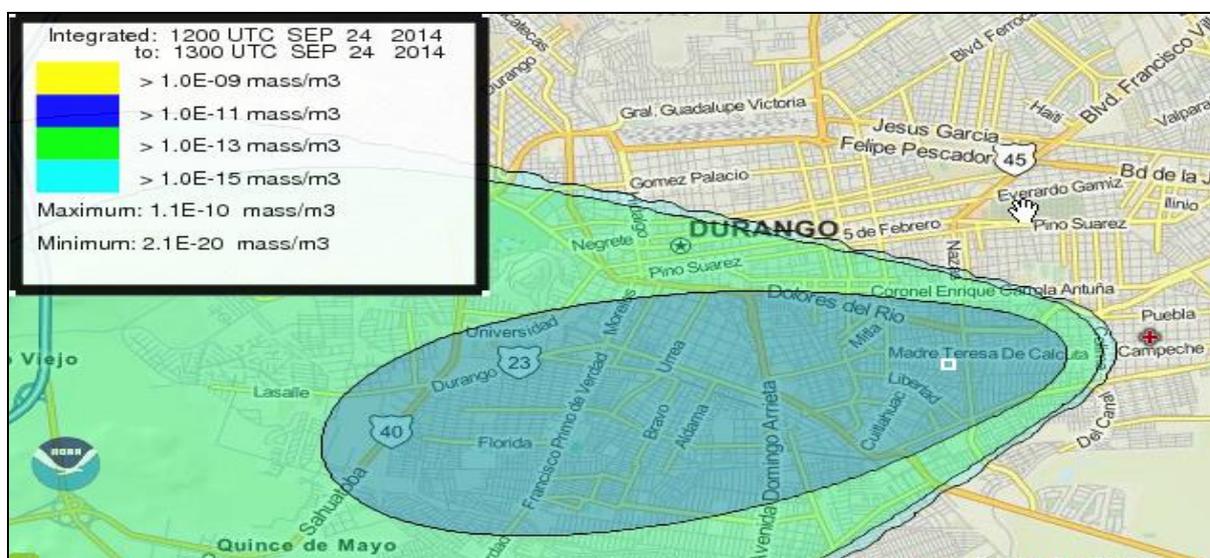


Figura 4. Concentración ambiental probable de partículas en la estación SRN por emisiones de la zona ladrillera en la colonia Jardines de Cancún

CONCLUSIONES

- Los periodos evaluados por simulación de la liberación de parcelas de aire y partículas de la colonia **Jardines de Cancún**, muestran que existe la probabilidad de elevar las concentraciones de PM₁₀, en las estaciones IPN y SRN de la red de monitoreo atmosférico.
- Las simulaciones no reflejan la contribución de otras fuentes cercanas a las estaciones IPN y SRN, por lo cual el modelo solo muestra las concentraciones de las emisiones liberadas en la zona de **Jardines de Cancún**.
- Se puede confirmar por los resultados, que las ladrilleras ubicadas en **Ampliación Arroyo Seco, Jardines de Cancún y demás colonias** (figura 2), operan de manera continua en la zona urbana, estarán incrementando los niveles de partículas y gases de combustión, afectando como muestran las modelaciones a las diferentes colonias receptoras, cercanas a las estaciones IPN y SRN.

RECOMENDACIONES

- Para mejorar los resultados del modelo, se requiere de una caracterización de partículas en las estaciones de la red de monitoreo atmosférico de Durango, con la finalidad de establecer con más precisión la aportación de la ladrilleras.
- Los resultados del modelo muestran que se debe continuar con el programa de reubicación de hornos ladrilleros al parque industrial, para reducir los efectos en la salud de la población por la exposición de los contaminantes atmosféricos, provenientes de las emisiones de los hornos ladrilleros de la zona urbana.

REFERENCIAS

http://www.arl.noaa.gov/airtoxics_training.php

ANEXOS

GLOSARIO

Aire Cero. El aire sometido a un proceso de depuración por métodos artificiales.

Año modelo. Periodo comprendido entre el inicio de la producción de determinado tipo de vehículo automotor y el 31 de diciembre del año calendario con que dicho fabricante designe al modelo en cuestión.

Calibración. Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de las magnitudes indicadas por un instrumento de medición o un sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada o un material de referencia, y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones.

Calibración CERO. Consiste en verificar el cero del equipo (línea base), es decir, la respuesta ante una muestra de aire limpio (aire cero).

Calibración Span. Respuesta ante una concentración conocida, la cual normalmente es del orden del 80% del rango de medición del equipo.

Cilindrada. Denominación que se le da a la suma del volumen útil de todos los cilindros de un motor, es decir, es el volumen geométrico ocupado por el conjunto de pistones desde el punto muerto inferior hasta el superior.

Convertidor catalítico. Reactor instalado en un vehículo automotor luego del múltiple de escape. Tiene una cubierta de acero inoxidable que contiene en su interior un catalizador, que es una sustancia químicamente activa, soportada por un panal de material cerámico o metálico.

Emisiones vehiculares. Gases contaminantes producto del proceso de combustión que provienen del tubo de escape de los vehículos automotores

Estándar de transferencia: Material, instrumento y/o equipo usado para establecer la trazabilidad y determinar la incertidumbre de una medición.

Compuestos orgánicos volátiles. Son los compuestos orgánicos, de C₂ a C₁₂, producidos por actividades de uso industrial, en el comercio y en el hogar, derivados de la combustión incompleta y por emisiones evaporativas, distintos al metano, que son capaces de producir oxidantes fotoquímicos por reacción con óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar. Estos compuestos tienen una presión de vapor mayor a 0.00007 atm y punto de ebullición menor a 260 °C. Algunos de estos además de ser reactivos son tóxicos con impactos al medio ambiente, a la población y en la alteración del clima.

GLOSARIO

Familia de los BTEX. Es un acrónimo que significa benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, estos compuestos aromáticos forman parte de los compuestos orgánicos volátiles (COV), que se encuentran en los derivados del petróleo, tales como la gasolina. El tolueno, el etilbenceno y el xileno producen efectos nocivos sobre el sistema nervioso central. El benceno por su parte es considerado como cancerígeno de elevada potencia

Partículas primarias. Son aquellas que se emiten directamente a la atmósfera por diversas fuentes (por ejemplo, el humo oscuro que se observa en los escapes de automóviles y camiones, el polvo de las calles).

Partículas secundarias. Son aquellas que se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de la presencia de materiales gaseosos, llamados precursores. Los principales gases precursores de las partículas son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles y el amoníaco (NH₃), los cuales forman partículas de sulfatos y nitratos principalmente, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos.

Partículas suspendidas respirables. Por su tamaño las partículas que pueden ser inhaladas por el sistema respiratorio, de diámetro aerodinámico menor a 10 µm (PM₁₀). La fracción gruesa la componen las partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10 µm (PM_{2.5-10}), la fracción fina comprende las partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 µm (PM_{2.5}), y las ultrafinas se refieren a las partículas menores a 1 µm (PM₁). En la fracción fina se alojan el carbono y metales traza de impacto al ambiente y a la salud de la población.

Potencia específica del vehículo (VSP, siglas en inglés). Potencia instantánea por unidad de masa del vehículo, expresada en kilowatts por tonelada (kW/tonelada).

Prueba de aceleración simulada (ASM, siglas en inglés). Prueba de emisiones vehiculares que se realizan con un dinamómetro y un analizador de gases, a velocidades típicas de 24 a 40 kilómetros por hora. Durante la inspección, el dinamómetro simula una prueba en la vía, aplicando electrónicamente carga a los vehículos.

Quema de biomasa. Utilización de biomasa forestal y de residuos agrícolas para proveer de energía calorífica al combustionar madera, troncos, hojarasca o paja, así como de carbón vegetal, como producto de uso para la cocción de alimentos y en la industria de manufactura de ladrillo por métodos artesanales.

GLOSARIO

Sensor remoto. Conjunto de instrumentos que miden, mediante un haz de luz infrarrojo y uno ultravioleta, la razón CO/CO_2 , HC/CO_2 y NO/CO_2 en la pluma de escape de los vehículos circulando por una vialidad

Trazabilidad. Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón o estándar, por la cual pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales; por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

Vehículo automotor en circulación. Vehículo de transporte terrestre de carga o de pasajeros, propulsado por su propia fuente automotriz, enajenado por lo menos en una ocasión y que cuenta con permiso para circular por vialidades públicas.