



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

---

**IMPORTANCIA Y EVALUACIÓN DE LA INFORMACIÓN  
EXISTENTE Y ACTUAL SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE  
TOLUENO Y BENCENO, ASÍ COMO SU RELACIÓN (T/B), EN LA  
ATMÓSFERA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**DIANA ARELY CASTELLANOS ZACATE**

**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: Profesor: Francisco Rojo Callejas.

VOCAL: Profesor: Elba Rojas Escudero.

SECRETARIO: Profesor: Rodolfo Sosa Echeverría.

1er. SUPLENTE: Profesor: Héctor Ariel Rico Morales.

2° SUPLENTE: Profesor: Silvia Citlalli Gama Silva.

**Sitio donde se desarrolló el tema:**

Sección de Contaminación Ambiental. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

**Asesor del tema:**

Doctor Rodolfo Sosa Echeverría

---

**Supervisor técnico:**

Doctor Humberto Bravo Álvarez

---

**Sustentante:**

Diana Arely Castellanos Zacate

---

# CONTENIDO

|  |     |
|--|-----|
| <b>ÍNDICE DE TABLAS.</b>   | I   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b>  | II  |
| <b>TÉRMINOS Y DEFINICIONES.</b>  | III |
| <b>RESUMEN.</b>  | VI  |
| <b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.</b>   | 2   |
| Meta.  | 4   |
| Objetivos.   | 4   |
| <b>Capítulo 2. ANTECEDENTES.</b>   | 6   |
| 2.1 La contaminación atmosférica y sus consecuencias en el ambiente.   | 6   |
| 2.2 Contaminación por ozono y Compuestos Orgánicos Volátiles en ambientes urbanos.   | 7   |
| 2.2.1 El ozono y su relación con los Compuestos Orgánicos Volátiles.   | 7   |
| 2.3 Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).  | 8   |
| 2.3.1 Características principales.   | 8   |
| 2.3.2 COV's aromáticos.  | 9   |
| 2.3.3 Benceno.   | 10  |
| 2.3.4 Tolueno.   | 14  |
| 2.4 La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).   | 16  |
| 2.4.1 Características generales de la ZMCM.  | 16  |
| 2.4.2 Factores que influyen en la acumulación de contaminantes en la ZMCM.   | 19  |
| 2.4.3 Historia de la contaminación y legislación ambiental en la ZMCM.   | 20  |
| <b>Capítulo 3. METODOLOGÍA.</b>  | 32  |
| 3.1 Importancia de la relación tolueno/benceno (T/B) y su relación con las estaciones PAMS.  | 32  |
| 3.2 Información obtenida sobre los niveles de benceno y tolueno en la atmósfera de la zona suroeste de la CM.  | 37  |
| 3.3 Medición de benceno y tolueno en dos sitios de la zona suroeste de la CM.  | 43  |
| 3.3.1 Métodos Toxic Organic (TO).  | 43  |
| 3.3.2 Método de muestreo y análisis.   | 45  |
| 3.3.3 Sitios y programa de muestreo.   | 46  |
| <b>Capítulo 4. RESULTADOS.</b>   | 57  |
| 4.1 Concentración de benceno y tolueno durante las Campañas I, II y III.   | 52  |
| 4.1.1 Concentración de benceno y tolueno durante la Campaña I.   | 52  |
| 4.1.2 Concentración de benceno y tolueno durante la Campaña II.  | 55  |
| 4.1.3 Concentración de benceno y tolueno durante la Campaña III.   | 56  |
| 4.1.4 Relación tolueno/benceno (T/B) durante las Campañas I, II y III.   | 57  |
| 4.2 Estación Pedregal (PED).   | 59  |
| <b>Capítulo 5. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.</b>   | 63  |
| 5.1 Concentración de benceno y tolueno durante las Campañas I, II y III, realizadas en la SCA del CCA, UNAM.   | 63  |
| 5.2 Relación tolueno/benceno /T/B) durante las Campañas I, II y III.   | 69  |
| 5.3 Estación de monitoreo Pedregal (PED).  | 71  |
| <b>Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>   | 75  |
| <b>Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA.</b>   | 79  |
| <b>ANEXOS.</b>   | 89  |
| A1. Acciones realizadas en la instrumentación de los diferentes PROAIRE enfocadas al control y reducción de emisiones de COV's en la Ciudad de México. | 89  |
| A2. Cromatogramas y Curvas de calibración.   | 94  |

# ÍNDICE DE TABLAS

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>2.3.2a.</b> Emisiones de benceno y tolueno por sector en la ZMCM para los años 2004, 2006, 2008 y 2010.   | 10            |
| <b>2.3.3a.</b> Características y propiedades fisicoquímicas del benceno.   | 11            |
| <b>2.3.4a.</b> Características y propiedades fisicoquímicas del tolueno.   | 14            |
| <b>2.4.3a.</b> Cronología sobre la contaminación ambiental en la ZMCM.   | 22            |
| <b>2.4.3b.</b> Normatividad ambiental vigente referente a COV's.   | 27            |
| <b>2.4.3c.</b> Normas referentes a COV's canceladas.   | 28            |
| <b>2.4.3d.</b> Normas Ambientales para el Distrito Federal vigentes.   | 28            |
| <b>2.4.3e.</b> Límites máximos permisibles de exposición a benceno y tolueno del medio ambiente laboral y sus connotaciones.   | 30            |
| <b>3.1a.</b> Especies (concentración y porcentaje en peso de HCNM) y relaciones usadas como posibles indicadores de la implementación de la RFG.                         | 34            |
| <b>3.1b.</b> Características de los sitios PAMS por tipo y propuesta de la configuración de la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono en la ZMCM. | 36            |
| <b>3.2a.</b> Niveles ambientales de benceno y tolueno en estaciones de monitoreo de la ZMCM.   | 39            |
| <b>3.2b.</b> Exposición a benceno y tolueno en la ZMCM.  | 41            |
| <b>3.2c.</b> Niveles ambientales de benceno y tolueno en la ZMCM.  | 42            |
| <b>3.3.1a.</b> Métodos Toxic Organic (TO) para la determinación de compuestos orgánicos tóxicos en el ambiente.  | 44            |
| <b>3.3.1b.</b> Calendario de muestreo.   | 48            |
| <b>3.3.1c.</b> Composición del gas estándar.   | 48            |
| <b>3.3.1d.</b> Promedio y desviación estándar de la respuesta de gas estándar para benceno y tolueno.  | 49            |
| <b>4.1a.</b> Características de las campañas de muestreo realizadas por el CCA en colaboración con el CENICA.  | 52            |
| <b>4.1.1a.</b> Concentraciones promedio (ppb) de benceno y tolueno por sitio de muestreo para los diferentes días de la semana durante la Campaña I.                     | 53            |
| <b>4.1.3a.</b> Concentración promedio diaria (ppb) de benceno en el CCA y gasolinera durante las Campañas I, II y III.   | 56            |
| <b>4.1.3b.</b> Concentración promedio diaria (ppb) de tolueno en el CCA y gasolinera durante las Campañas I, II y III.   | 57            |
| <b>4.1.4a.</b> Relación T/B diaria para CCA y gasolinera durante las Campañas I, II y III  | 59            |
| <b>5.1a.</b> Comparación de los resultados obtenidos en el CCA durante la Campaña I con otros estudios realizados en fechas similares.                                   | 64            |
| <b>5.1b.</b> Comparación de los resultados obtenidos en la gasolinera durante la Campaña I con otros estudios.   | 65            |
| <b>5.1c.</b> Registros de algunas actividades económicas y de vehículos en circulación en las delegaciones Coyoacán e Iztapalapa para los años 1998, 2003 y 2008.        | 67            |
| <b>A1.a</b> Acciones realizadas en la instrumentación del PROAIRE 1995-2000.   | 89            |
| <b>A1.b.</b> Acciones realizadas en el PROAIRE 2002-2010.  | 90            |
| <b>A1.c.</b> Estrategias, medidas y acciones propuestas en el PROAIRE 2010-2020 (Estrategias 1-3).   | 91            |
| <b>A1.d.</b> Estrategias, medidas y acciones propuestas en el PROAIRE 2010-2020.   | 92            |
| <b>A1.e.</b> Estrategias, medidas y acciones propuestas en el PROAIRE 2010-2020.   | 93            |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>2.2.1a</b> Ciclo fotoquímico de la formación de ozono troposférico.  | 8             |
| <b>2.4.1a</b> Altitud de la ZMCM.   | 17            |
| <b>2.4.1b.</b> Datos generales, medios de transporte y consumo energético en la ZMCM en el 2010.  | 18            |
| <b>2.4.1c.</b> Emisiones de contaminantes tóxicos debidas al transporte particular en la ZMCM durante el año 2010.  | 19            |
| <b>3.3.1a.</b> Diagrama del muestreo y análisis descritos por el método TO-14a.   | 45            |
| <b>3.3.3a.</b> Ubicación de los sitios de muestreo experimental y de la estación de monitoreo PED.  | 47            |
| <b>4.1.1a.</b> Variación de la concentración de benceno por sitio de muestreo: CCA (integrado y grab) y gasolinera (GAS) durante la Campaña I.                    | 54            |
| <b>4.1.1b.</b> Variación de la concentración de tolueno por sitio de muestreo: CCA (integrado y grab) y gasolinera (GAS) durante la Campaña I.                    | 54            |
| <b>4.1.2a.</b> Variación de benceno y tolueno por hora promedio en el CCA durante la Campaña II.  | 55            |
| <b>4.1.2b.</b> Variación de benceno y tolueno por época en el SE y SW durante la Campaña II. Concentración promedio (12 horas).                                   | 56            |
| <b>4.1.4a.</b> Relación T/B por lugar de muestreo: CCA y gasolinera durante la Campaña I.   | 57            |
| <b>4.1.4b.</b> Relación T/B por hora promedio en el CCA (SW) y en la UAM Iztapalapa (SE) durante la Campaña II.   | 58            |
| <b>4.1.4c.</b> Relación T/B por época en el CCA (SW, promedio 12 horas) y en la UAM Iztapalapa (SE, promedio 24 horas) durante la Campaña II.                     | 58            |
| <b>4.2a.</b> Variación de las concentraciones promedio mensuales de benceno y tolueno y relación T/B en la estación PED durante 2 años (junio 2011 a junio 2013). | 60            |
| <b>4.2b.</b> Concentración de benceno y tolueno en la estación de monitoreo PED y promedio en 5 estaciones centrales de la ZMCM.                                  | 61            |
| <b>5.3a.</b> Comparación mensual de las concentraciones de benceno y tolueno y su relación T/B en la estación de monitoreo PED.                                   | 72            |
| <b>5.3b.</b> Automóviles y camiones de pasajeros registrados en circulación para la delegación Coyoacán de 1994 a 2012.   | 77            |
| <b>A2a.</b> Cromatograma del blanco con nitrógeno grado cromatográfico.   | 94            |
| <b>A2b.</b> Cromatograma del nitrógeno contenido en un canister posterior a su limpieza.  | 94            |
| <b>A2c.</b> Cromatograma del aire cero usado como diluyente en la curva de calibración.   | 95            |
| <b>A2d.</b> Cromatograma del gas estándar, 1 ppm.   | 95            |
| <b>A2e.</b> Ejemplo de cromatograma para una muestra en el CCA.   | 96            |
| <b>A2f.</b> Ejemplo de cromatograma para una muestra en la gasolinera.  | 96            |
| <b>A2g.</b> Curva de calibración usada para la determinación de las concentraciones de benceno durante la Campaña III.  | 97            |
| <b>A2h.</b> Curva de calibración usada para la determinación de las concentraciones de tolueno durante la Campaña III.  | 97            |

## **TÉRMINOS Y DEFINICIONES.**

ACO: Estación de monitoreo Acolman.

AJS: Estación de monitoreo Ajusco.

BTEX: Benceno, tolueno, etilbenceno e isómeros del xileno.

BTX: Benceno, tolueno e isómeros del xileno.

CAAA: Clean Air Act Amendments (Enmiendas del Aire Limpio).

CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

CCAI: Centro de Ciencias de la Atmósfera, muestreo integrado.

CENICA: Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.

CG: Cromatografía de Gases.

COV's : Compuestos Orgánicos Volátiles.

FAC: Estación de monitoreo Facultad de Estudios Superiores (FES) Acatlán.

FID: Flame Ionization Detector (Detector de Ionización de Flama).

GAS: Gasolinera, estación de servicio.

HCNM: Hidrocarburos No Metano.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

LMPE-PPT: Límite máximo permisible de exposición. Promedio ponderado en tiempo.

LMPE-CT: Límite máximo permisible de exposición. De corto tiempo.

MER: Estación de monitoreo Merced.

msnm: Metros sobre el nivel del mar.

NO<sub>x</sub>: Óxidos de nitrógeno.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

PAMS: Photochemical Assesment Monitoring Stations.

PED: Estación de monitoreo Pedregal.

PICCA: Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

POE: Personal Ocupacionalmente Expuesto.

PROAIRE: Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México.

ppb: partes por billón

ppm: partes por millón, 1 ppm = mg/kg = mg/L = 1000 ppb.

RAMA: Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

RFG: Reformulated Gasoline (Gasolina Reformulada).

RVP: Reid Vapor Pressure (Presión de Vapor Reid).

RPD: Relative Percentage Difference (Diferencia Porcentual Relativa).

SAG: Estación de monitoreo San Agustín.

SCA: Sección de Contaminación Ambiental.

SE: Sureste.

Silcocan®: canisters de acero inoxidable, con superficie interna electropulida y con tratamiento Siltek®, que consiste en unir químicamente una capa inerte a la superficie interna del canister.

SIMAT: Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

SEDEMA-GDF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

SNC: Sistema Nervioso Central.

SRV: Sistemas de recuperación de vapores de gasolina.



SUMMA®: Método de tratamiento de la superficie interna de un canister con electropulido.

SW: Suroeste.

T/B: Relación tolueno/benceno.

TLA: Estación de monitoreo Tlalnepantla.

TO: Toxic Organic.

UH: Unidad Habitacional.

UIZ: Estación de monitoreo Universidad Autónoma Metropolitana campus Iztapalapa.

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.

USA EPA: United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América).

US NAS: National Academy of Sciences (Academia Nacional de las Ciencias de los Estados Unidos de América).

ZMCM: Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

## RESUMEN.

El benceno y el tolueno son dos Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), pertenecen a la familia de los compuestos aromáticos y su importancia radica en que son precursores de ozono y perjudiciales para la salud de los seres vivos.

Este trabajo tuvo como meta evaluar las concentraciones en la atmósfera de benceno y tolueno, así como la relación (T/B) en tres sitios de la zona suroeste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM): en la azotea del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA, UNAM), la gasolinera ubicada en la salida principal de Ciudad Universitaria (CU, UNAM) y la estación de monitoreo atmosférico Pedregal (PED, SIMAT). Para tal fin se realizó una búsqueda bibliográfica sobre concentraciones de benceno y tolueno en la ZMCM, y se tuvo acceso a las bases de datos de dos Campañas realizadas con anterioridad (2001 y 2004) por la Sección de Contaminación Ambiental (CCA, UNAM). Además, se descargaron los datos disponibles (2011 a 2013) para la concentración de benceno y tolueno en la estación PED. Como objetivo complementario, se realizó una campaña de muestreo preliminar en el CCA y en la gasolinera, para comparar los valores actuales con los reportados en los estudios anteriores. Esta campaña se realizó cada dos días en un periodo de dos semanas y media, de modo que se tuvieron mediciones para cada día de la semana. Las muestras se recolectaron en contenedores de acero inoxidable (canisters) de forma instantánea y se tomaron en la hora del día donde se han observado los picos de máxima concentración (8:30 de la mañana). El análisis se realizó por Cromatografía de gases con detector de ionización de flama usando un método de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, TO-14a).

Los resultados mostraron una mayor concentración de benceno y tolueno en la gasolinera, en comparación con el CCA y el PED. Usando la relación T/B se determinó que la concentración de tolueno es más dependiente de las actividades diarias por tener máximos y mínimos más pronunciados que el benceno. En el CCA, los valores de T/B se han mantenido de la misma magnitud, lo que indica que se siguen conservando las mismas actividades y fuentes de emisión. En la gasolinera el

valor de T/B aumentó, debido probablemente a las limitaciones implementadas para reducir el benceno en gasolinas mexicanas.

En general, se ha registrado un aumento de las concentraciones de benceno y tolueno en el ambiente del suroeste de la ZMCM, lo que es un reflejo de la falta de legislación en materia ambiental, así como del incremento de sus fuentes de emisión que ha habido a lo largo de los años, este es el caso del aumento del parque vehicular sin considerar la reducción del recorrido de los mismos por estrategias adecuadas, entre otros.

# 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es un problema global que es más grave en ambientes urbanos. Fuentes de emisión como los escapes vehiculares y el uso de solventes son propias de lugares urbanos.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV's) son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental. Entre las fuentes emisoras de COV's se pueden mencionar el almacenamiento y manejo de combustibles, los vehículos automotores y los procesos industriales, entre otros.

Las emisiones antropogénicas de COV's asociadas con la radiación solar y la topografía de la cuenca de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México pueden producir elevados niveles de ozono. Además, algunos de estos compuestos resultan ser perjudiciales para la salud de los seres vivos.

A la fecha no existen normas oficiales mexicanas que regulen la calidad del aire en referencia a COV's, por ejemplo para el benceno y el tolueno. Es necesario que el personal de toma de decisiones en relación a estos dos compuestos, conozcan los niveles en aire ambiental para contar con elementos que permitan evaluar el riesgo de la población humana por la exposición a estos compuestos, así como determinar el papel que juegan en la producción de ozono.

La ZMCM es considerada como una de las más grandes del mundo, tanto en extensión como en población. Este hecho, sumado a su morfología y a sus condiciones meteorológicas, la hace una de las metrópolis con mayores problemas de contaminación atmosférica del mundo. Entre sus principales contaminantes atmosféricos se encuentra el ozono, que es perjudicial para la salud humana cuando se encuentra en la parte baja de la tropósfera.

Gran parte del ozono que existe a nivel troposférico proviene de la reacción entre Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) y Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en presencia de luz solar. Por esta razón, es importante el conocimiento sobre la presencia y el comportamiento que puedan tener estos compuestos en la atmósfera. Parte de este conocimiento radica en conocer las concentraciones ambientales de ozono,  $\text{NO}_x$  y COV's (Hafner et al., 2004).

Además de ser precursores de ozono, COV's como el benceno y el tolueno son tóxicos para los seres vivos. El benceno está clasificado como cancerígeno A2 por la

Organización Mundial de la Salud (OMS) y, al igual que el tolueno, tiene efectos adversos sobre el sistema nervioso central.

Actualmente el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) realiza, en 5 de sus estaciones de monitoreo (FAC, MER, SAG, UIZ y PED), la medición de las concentraciones (promedio de 24 horas) de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno. Éstas se reportan como parte del programa de monitoreo permanente de la calidad del aire en la Ciudad de México. Sin embargo, este esfuerzo es reciente ya que se reportan datos, en algunos casos no continuos o incompletos, desde enero de 2011 y a la fecha.

En la ZMCM aún no se cuenta con una legislación que pueda regular las concentraciones de benceno y tolueno en el aire ambiental. Es importante que se hagan más estudios al respecto para fundamentar estrategias de solución más efectivas para su prevención, minimización y control.

En este trabajo se recopiló la información concerniente a benceno y tolueno en la atmósfera de la zona suroeste de la Ciudad de México. Además, se realizó una campaña de muestreo en la azotea del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA, UNAM) y en la gasolinera que se encuentra en la salida principal de Ciudad Universitaria, UNAM; ambos sitios ubicados en la zona suroeste de la Ciudad de México. La metodología usada para el muestreo y análisis estuvo basada en el método TO-14a de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA, por sus siglas en inglés). Con la información obtenida se determinó la relación tolueno/benceno (T/B), que es un indicador muy importante recomendado y usado por el programa PAMS (Photochemical Assessments Monitoring Stations). Para determinar las fuentes de emisión se realizó un análisis sobre las medidas implementadas para reducir las concentraciones de estos contaminantes en la atmósfera, así como los resultados de éstas, proponiendo, cuando sea necesario, posibles soluciones o alternativas para su prevención, minimización y control.

## **Meta.**

Evaluar las concentraciones en la atmósfera de benceno y tolueno y su relación (T/B) en la zona suroeste de la Ciudad de México, a partir de la información disponible y generada.

## **Objetivos.**

- Investigar y evaluar las concentraciones en la atmósfera de benceno y tolueno en dos sitios de la zona suroeste de la ZMCM para determinar la tendencia que ha tenido en los últimos años.
- Realizar una campaña de muestreo en una zona académica y en una estación de servicio (gasolinera) en la zona suroeste de la Ciudad de México, siguiendo el método TO-14a de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para comparar los datos con la información obtenida anteriormente.
- Determinar y usar la relación tolueno/benceno (T/B) como indicador de las posibles fuentes de emisión y de la efectividad que han tenido las medidas aplicadas para el control y reducción de sus concentraciones en la atmósfera.
- Proponer estrategias de prevención, minimización y control de emisiones de benceno y tolueno en la zona de estudio.

## **2. ANTECEDENTES**



## **2.1 La contaminación y sus consecuencias en el ambiente.**

A lo largo de toda su existencia, el ser humano ha buscado formas de simplificar sus labores cotidianas. Así, con el paso del tiempo y la llegada de la Revolución Industrial a principios del siglo XX, el trabajo manual fue reemplazado por la industria y la manufactura, dando lugar a un enorme cambio socioeconómico, tecnológico y cultural. Esto también tuvo consecuencias, ya que al crearse maquinaria basada en la combustión, se incrementó el uso de combustibles y, por ende, se comenzó a emitir una mayor cantidad de contaminantes al ambiente; esta situación ha seguido desde entonces debido a la creciente demanda de bienes y servicios.

Un contaminante es toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altera o modifica su composición natural (LGEEPA, 2008). De manera similar, La Ley Ambiental del Distrito Federal define la contaminación como la presencia en el ambiente de toda sustancia que en cualquiera de sus estados físicos y químicos al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural, causando desequilibrio ecológico.

Dentro de los peores episodios de contaminación atmosférica en el mundo destaca, por el gran número de muertes (cuatro mil personas), el ocurrido del viernes 5 al martes 9 de diciembre de 1952 en Londres, Reino Unido. Esto fue provocado por una intensa niebla que cubrió la ciudad y atrapó los contaminantes emitidos por las chimeneas y los automóviles de la ciudad. A partir de esta situación se promulgaron en el Reino Unido las Leyes del Aire Limpio (1956 y 1968) que prohibieron a los residentes de las áreas urbanas y a los operadores de fábricas el empleo de combustibles generadores de humos que pudieran poner de nuevo en riesgo la salud de la población (SEMARNAT, 2007).

## **2.2 Contaminación por Ozono y Compuestos Orgánicos Volátiles en ambientes urbanos.**

### **2.2.1 El ozono y su relación con los COV's.**

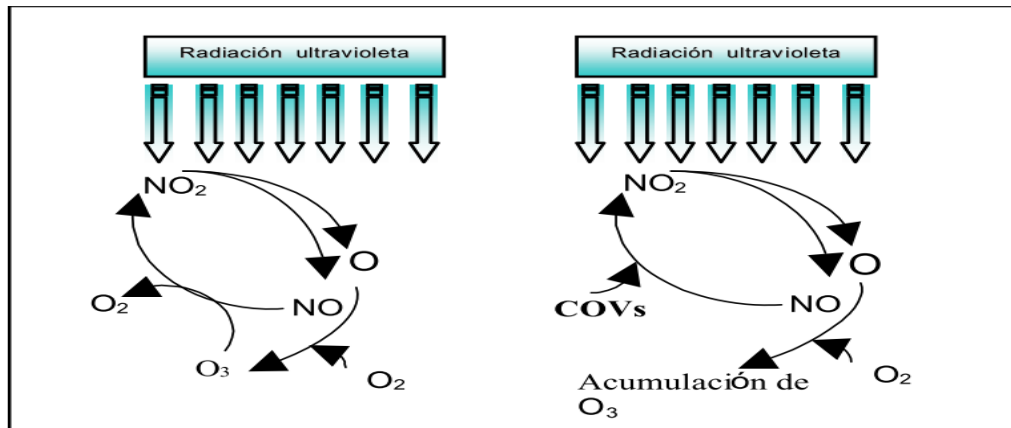
En la estratósfera, a altitudes entre 25 y 35 km, se encuentra la capa de ozono ( $O_3$ ), donde la concentración de ozono es mayor que en la superficie terrestre (tropósfera). El ozono, un alótropo del oxígeno, es un gas incoloro de olor penetrante, altamente oxidante e inestable a altas concentraciones. Mientras que es un gas muy importante para la vida en la Tierra al proteger de la radiación ultravioleta en la estratósfera, su acumulación en la tropósfera representa un riesgo para la salud de los seres vivos. A nivel superficie es considerado como el mayor componente del smog fotoquímico, por lo que se incluye como uno de los seis contaminantes criterio<sup>1</sup> del aire especificados en las Enmiendas del Aire Limpio (CAAA, por sus siglas en inglés) de 1990 (Gao et. al., 2002; Petrucci et al, 2003; SMA-GDF, 2012a).

El ciclo natural del ozono ( $O_3$ ) en la tropósfera (Figura 2.2.1a) se da cuando la luz solar descompone el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), en monóxido de nitrógeno (NO) y oxígeno atómico (O); este último se une con el oxígeno del aire ( $O_2$ ) para formar el ozono. Como último paso se tiene al ozono reaccionando con el monóxido de nitrógeno, formando nuevamente dióxido de nitrógeno y oxígeno. Este ciclo se ve alterado cuando contaminantes como los COV's y los  $NO_x$  compiten con el ozono por el monóxido de nitrógeno disponible, de modo que parte del ozono se puede quedar sin reaccionar y acumularse en la atmósfera. Por influir en la formación de ozono troposférico, a los COV's y a los  $NO_x$  se les conoce como precursores de ozono, mientras que el ozono es considerado un contaminante secundario (Jaimes et al., 2010; SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008).

---

<sup>1</sup> Contaminante criterio del aire: aquel que es abundante y, simultáneamente, tiene efectos nocivos en la salud. Se han emitido normas técnicas para regular su medición y normas de salud para protección de la salud de los seres vivos. Los contaminantes criterio del aire normados en México son: monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono, partículas en suspensión y plomo.

Además del ozono, los COV's y NO<sub>x</sub> son capaces de formar otros oxidantes fotoquímicos como Peroxiacetil Nitratos (PAN), radicales (hidroxil, hidroperoxi, organoperoxi), orgánicos oxigenados (aldehídos, cetonas, ácidos, nitratos, péroxidos) e inorgánicos (monóxido de carbono, peróxido de hidrógeno, ácido nítrico) (Cho-Ching et al., 2002).



**Figura 2.2.1a** Ciclo fotoquímico de la formación de ozono troposférico. SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008.

Es importante estudiar a fondo a los precursores de ozono, debido a que permitirá entender mejor el proceso de formación de ozono en ambientes urbanos como la Ciudad de México. Por otro lado, es de vital importancia vigilar sus concentraciones ya que varios de ellos son tóxicos, como el benceno y el tolueno, que constituyen el tema de interés de este trabajo.

## 2.3 Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).

### 2.3.1 Características principales.

Los COV's son especies químicas gaseosas que contienen de 2 a 20 átomos de carbono por molécula. Se clasifican en COV's ligeros (2 a 11 átomos de carbono) y pesados (12 a 20 átomos de carbono). Se denominan volátiles por poseer una presión de vapor entre 0.1 y 380 mm Hg a 25°C. De acuerdo con su estructura química pueden ser: alcanos, alquenos, alquinos, aromáticos, halogenados y carbonilos (Sánchez et al, 2004; SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008).

En la vida moderna los COV's son producidos en todas partes, por lo que la exposición a éstos resulta ser inevitable. Se encuentran en el ambiente externo, en los lugares de trabajo y en las viviendas. De manera general, los COV's son emitidos principalmente por fuentes de emisión móviles, más que por fuentes estacionarias<sup>2</sup> (Cho-Ching et al., 2002; Jo-Chun, 2001).

### **2.3.2 COV's aromáticos.**

Los COV's aromáticos son los hidrocarburos que tienen propiedades químicas tipificadas por el benceno (una estructura anular y cohesión interna mediante una nube de electrones). En la atmósfera presentan reactividad intermedia entre los alcanos y los alquenos durante la formación del ozono (SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008). Otras propiedades importantes son las siguientes (Galicía, 1998):

- Baja polaridad.
- Insolubles en agua pero muy solubles en disolventes no polares como el éter y el tetracloruro de carbono.
- Casi siempre son menos densos que el agua. Los puntos de ebullición aumentan con el incremento del peso molecular.
- Los puntos de fusión son dependientes del peso molecular y de la forma de la molécula. Por ejemplo, para los isómeros del xileno, generalmente el *para*-xileno funde a una temperatura mayor que los otros dos.

Dentro de los COV's aromáticos existe un grupo muy importante denominado BTX, refiriéndose al benceno, tolueno y xilenos (isómeros *orto*-, *meta*- y *para*-). Se consideran como un grupo, debido a que su comportamiento al liberarlos al ambiente es muy similar. Su importancia radica en que son contaminantes precursores de ozono y, además, son tóxicos para los seres vivos (Espinosa, 2008).

---

<sup>2</sup> De acuerdo a la LGEEPA, una fuente fija o estacionaria es toda instalación establecida en un sólo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Por otro lado, las fuentes móviles se refieren a equipos y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares como aviones, helicópteros, automóviles, ferrocarriles, etc., que con motivo de su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

A la fecha se cuenta con 4 inventarios de emisión de contaminantes tóxicos para la ZMCM (2004, 2006, 2008 y 2010) y, anterior a ellos, existe un inventario de emisiones de precursores de ozono para el año 1995. La información de cada inventario sobre benceno y tolueno se resume en la Tabla 2.3.2a. Para el inventario de precursores de ozono sólo se reportan emisiones totales de COV's: 374,423.87 ton/año por fuentes fijas de área y 1,148.38 por fuentes móviles no carreteras; no se reportó un valor para fuentes móviles (DGPCC, 1995).

**Tabla 2.3.2a.** Emisiones de benceno y tolueno por sector en la ZMCM para los años 2004, 2006, 2008 y 2010.

| EMISIONES POR SECTOR PARA EL AÑO 2004 [ton/año] |            |              |                     |                 |                         |       |        |
|---|------------|--------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-------|--------|
| CONTAMINANTE                                    | Fijas      |              | Áreas               |                 | Móviles                 | Total |        |
| Benceno   | 256        |              | 725                 |                 | 3510                    | 4491  |        |
| Tolueno   | 2672       |              | 11758               |                 | 9529                    | 23959 |        |
| EMISIONES POR SECTOR PARA EL AÑO 2006 [ton/año] |            |              |                     |                 |                         |       |        |
| Benceno   | 268        |              | 819                 |                 | 5482                    | 6569  |        |
| Tolueno   | 15626      |              | 18308               |                 | 14850                   | 48784 |        |
| EMISIONES POR SECTOR PARA EL AÑO 2008 [ton/año] |            |              |                     |                 |                         |       |        |
| Benceno   | 109        |              | 805                 |                 | 5649                    | 6562  |        |
| Tolueno   | 9628       |              | 19659               |                 | 16091                   | 45378 |        |
| EMISIONES POR SECTOR PARA EL AÑO 2010 [ton/año] |            |              |                     |                 |                         |       |        |
|   | Industrial | Habitacional | Servicio y Comercio | Fuentes móviles | Disposición de residuos | Otros | Total  |
| Tolueno   | 11,546     | 13,866       | 3,764               | 18,228          | 600                     | 36    | 48,041 |
| Benceno   | 330        | 631          | 163                 | 4,875           | 94                      | 41    | 6,134  |

*Fuente: SMA-GDF, 2004, 2008, 2010 y 2012b.*

### 2.3.3 Benceno.

El benceno es un compuesto que a temperatura ambiente es líquido pero se evapora con facilidad. La molécula de benceno consta de 6 átomos de carbono y 6 de hidrógeno. Todos sus enlaces carbono-carbono son iguales y de una longitud intermedia entre enlaces simples y dobles. El benceno tiene estructuras resonantes, es decir, tiene estructuras que sólo difieren en la disposición de los electrones. Esta

resonancia le confiere una alta estabilidad para ser un hidrocarburo no saturado. No obstante, reacciona con otros compuestos, principalmente por sustitución y en menor grado por adición, conservando su estructura anular. Algunas reacciones pueden romper la molécula o formar grupos insertados en la molécula (Galicia, 1998; Sosa, 2001). La Tabla 2.3.3a muestra algunas características y propiedades fisicoquímicas del benceno. Son precisamente propiedades como su liposolubilidad las que determinan su gran toxicidad.

**Tabla 2.3.3a.** Características y propiedades fisicoquímicas del benceno.

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| <b>Fórmula condensada</b>                       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>       |
| <b>Registro CAS (Chemical Abstract Service)</b> | 71-43-2                             |
| <b>Símbolos</b>                                 | F: fácilmente inflamable; T: tóxico |
| <b>Sinónimos</b>                                | Bencina, benzol, ciclohexatrión     |
| <b>Estado físico</b>                            | Líquido                             |
| <b>Color</b>                                    | Incoloro                            |
| <b>Olor</b>                                     | Dulce                               |
| <b>Sabor</b>                                    | Amargo                              |
| <b>Inflamabilidad</b>                           | Alta                                |
| <b>Explosividad</b>                             | Sí                                  |
| <b>Reactividad</b>                              | Sí                                  |
| <b>Liposolubilidad</b>                          | Sí                                  |
| <b>Solubilidad en agua</b>                      | 0.18 g/mL a 25°C                    |
| <b>Peso molecular</b>                           | 78.12 g/mol                         |
| <b>Presión de vapor (volatilidad)</b>           | 75 mm Hg a 20°C                     |
| <b>Punto de fusión</b>                          | 5.5°C                               |
| <b>Punto de ebullición</b>                      | 80.1°C                              |
| <b>Punto de inflamación</b>                     | -11°C                               |

*Fuentes: ATSDR, 2007; Galicia, 1998; García, 2007.*

El benceno se encuentra en el aire, agua y suelo. Proviene tanto de fuentes antropogénicas como naturales. Dentro de las fuentes naturales se encuentran las emisiones de gases de volcanes y de los incendios forestales. En cuanto a fuentes antropogénicas, existen varias industrias (como las imprentas y las gasolineras)

donde los trabajadores se encuentran expuestos al benceno. Otras industrias usan el benceno para sintetizar químicos como el estireno (para Styrofoam y otros plásticos), cumeno (para varias resinas) y ciclohexano (para nylon y fibras sintéticas). También es usado en la manufactura de algunos tipos de gomas, lubricantes, colorantes, detergentes, drogas y plaguicidas. El humo de tabaco es otra fuente del benceno en el aire, particularmente en interiores. Un fumador promedio que consume 32 cigarros al día ingiere cerca de 1.8 mg de benceno por día. Esta cantidad es aproximadamente 10 veces más de la ingesta de benceno por los no fumadores (ATSDR, 2007; Rodarte, 2009 SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008).

La toxicidad del benceno y, en general de cualquier sustancia química, depende de muchos factores. Estos factores incluyen la dosis (cantidad), la duración (tiempo), y el contacto con ella. También se debe considerar cualquier otro químico al que se esté expuesto, así como la edad, sexo, dieta, herencia familiar, estilo de vida y estado de salud (ATSDR, 2007; Garrido et al., 2008).

No obstante, se ha demostrado que el benceno causa cáncer tanto en animales como en humanos. Actualmente, se encuentra entre las 107 sustancias, mezclas y situaciones de exposición que son cancerígenas para el hombre. Esta clasificación fue hecha por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Se han reportado muchos tipos de cáncer asociados a la exposición al benceno en humanos (Melhman, 1994), siendo la leucemia y el cáncer pulmonar de los más importantes. Además, existen estudios sobre posibles aberraciones cromosómicas y hematológicas en humanos, causadas por la exposición al benceno en ambientes laborales. Entre otros, la exposición al benceno también puede dañar a los órganos reproductores. Los estudios con animales preñados muestran que inhalar benceno tiene efectos dañinos en el desarrollo del feto. Estos efectos incluyen bajo peso al nacer, formación de hueso tardía y daño en la médula ósea. También puede pasar de la sangre de la madre a su feto (Espinosa, 2008; Garrido et al., 2008; Rodarte, 2009; ATSDR, 2007).

El benceno puede entrar al organismo por inhalación, ingestión y por contacto con la piel y ojos. De entre todas estas vías de exposición, la más importante es por inhalación. Esto concuerda con el hecho de que el benceno es un COV que estando en estado líquido fácilmente puede volatilizarse, de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas, como la presión de vapor.

Se pueden tener intoxicaciones crónicas o agudas, dependiendo del tipo de exposición al benceno. La intoxicación aguda es debida a exposiciones de corta duración, con absorción rápida del tóxico. Obedece a una dosis única o a dosis múltiples absorbidas en un periodo de tiempo breve que normalmente se fija en un máximo de 24 horas. Una intoxicación crónica se debe a una exposición repetida al tóxico durante mucho tiempo, con absorción de dosis mínimas. Este tipo de intoxicación es propio de medios laborales en los que los trabajadores puedan estar expuestos al benceno (UG, 2013).

En la intoxicación aguda, éste suele acumularse en el cerebro, aunque también se acumula en los tejidos grasos. A bajos niveles de exposición, el benceno es rápidamente metabolizado y excretado predominantemente como metabolitos conjugados urinarios (fenol) en las 48 horas siguientes a la exposición. La exposición de larga duración al benceno se manifiesta en la sangre, debido a que causa alteraciones en la médula ósea y puede producir una disminución del número de glóbulos rojos, lo que a su vez puede llegar a producir leucemia. También se pueden presentar hemorragias y daños al sistema inmunológico, aumentando la probabilidad de contraer infecciones (ATSDR, 2007; Espinosa, 2008; Rodarte, 2009).

Existen regulaciones y recomendaciones que pueden ser expresadas como “no exceder” niveles, es decir, niveles de una sustancia tóxica en el aire, agua, suelo o alimento que no excedan un valor crítico y que usualmente están basados en niveles que afectan a los animales. Éstos son ajustados a niveles que ayudan a proteger a los humanos. La OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, por sus siglas en inglés) cuenta con recomendaciones para los niveles de benceno en el ámbito laboral. La cantidad máxima permitida de benceno en el aire de un área de trabajo durante un día laboral de 8 horas, en una semana de trabajo de 40 horas es 1



ppm. La Unión Europea, de acuerdo con la Directiva 2000/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 16 de noviembre del 2000 establece un valor límite de benceno en aire ambiente de 1.5 ppb, que se reduciría a partir del 2006 a 0.3 ppb cada año, hasta llegar a un valor límite de 0 ppb en 2010 (Espinosa, 2008).

### 2.3.4 Tolueno.

El tolueno es un compuesto que debe su nombre al bálsamo del árbol *Myroxylon balsamum* (Bálsamo Tolú o bálsamo de Colombia). Henri Etienne Sainte- Claire Deville lo obtuvo por primera vez en 1844 mediante destilación seca (García, 2007).

**Tabla 2.3.4a.** Características y propiedades fisicoquímicas del tolueno.

|   |  |
|---|--|
| <b>Fórmula condensada</b>                       | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub> |
| <b>Registro CAS (Chemical Abstract Service)</b> | 108-88-3   |
| <b>Símbolos</b>                                 | F: fácilmente inflamable; Xn: nocivo; Xi: irritante                            |
| <b>Sinónimos</b>                                | Metilbenceno, fenilmetano, toluol  |
| <b>Estado físico</b>                            | Líquido  |
| <b>Color</b>                                    | Incoloro   |
| <b>Olor</b>                                     | Azucarado  |
| <b>Inflamabilidad</b>                           | Sí   |
| <b>Explosividad</b>                             | Sí   |
| <b>Reactividad</b>                              | No   |
| <b>Liposolubilidad</b>                          | Si   |
| <b>Solubilidad en agua</b>                      | No   |
| <b>Peso molecular</b>                           | 92.13 g/mol  |
| <b>Presión de vapor (volatilidad)</b>           | 3.2 kPa (24 mm de Hg a 20°C)   |
| <b>Densidad relativa de vapor (aire=1)</b>      | 0.87   |
| <b>Punto de fusión</b>                          | -95°C  |
| <b>Punto de ebullición</b>                      | 110.6 °C   |
| <b>Punto de inflamación</b>                     | 4.4°C  |

Fuente: Espinosa, 2008; García, 2007.

Es el principal contaminante tóxico emitido por las fuentes de área con más de 19 mil toneladas anuales, asociado básicamente al uso de pintura en viviendas, limpieza con disolventes en la industria y pintado automotriz (SMA-GDF, 2012b).

El tolueno tiene muchas fuentes en común con el benceno, aunque sus concentraciones en el ambiente suelen ser mayores. Se produce durante la manufactura de la gasolina y de otros combustibles a partir del petróleo crudo y en la manufactura del coque a partir del carbón. Junto con el benceno y otros contaminantes, se puede atribuir la mayor parte de sus niveles en ciudades al uso de automóviles que usen combustibles derivados del petróleo (García, 2007).

De igual forma que el benceno, se puede estar expuesto al tolueno por diferentes fuentes, incluyendo el agua potable, la comida, el aire y los productos consumibles. Debido a que el tolueno es un disolvente común y se encuentra en muchos productos, se puede estar expuesto en casa y al aire libre durante el uso de la gasolina, de esmalte de uñas, cosméticos, cemento de caucho, pinturas, limpiadores de pinceles, quitamanchas, tintes para telas, tintas, adhesivos y diluyentes de laca. Como disolvente también se usa para pinturas, impermeabilizantes, gomas, aceites, barnices, adhesivos y resinas (ASTDR, 2007; Espinosa, 2008).

En la industria química el tolueno funciona como la materia prima a partir de la cual se obtienen derivados del benceno como el ácido benzoico, fenol, caprolactama, sacarina, medicamentos, colorantes, perfumes, TNT (trinitrotolueno) y detergentes. Otras actividades industriales en las que se emplea, es en la fabricación de productos metálicos y en la elaboración de productos de papel e impresión (García, 2007; SMA-GDF, 2012b).

La toxicidad de este producto es similar a la del benceno, sin embargo el tolueno no genera los trastornos crónicos a la sangre que se han presentado con el uso del primero. Por estudios en humanos y animales, no se ha encontrado evidencia de carcinogenicidad, por lo que la US EPA no lo clasifica como tal. No obstante, su exposición crónica se ha relacionado con mutagenicidad y se considera un agente

teratógeno<sup>3</sup> y embriotóxico, además de que puede llegar a afectar al Sistema Nervioso Central (Espinosa, 2008; García, 2007; SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008).

Las vías de absorción pueden ser: respiratoria, cutánea, ocular y digestiva; aunque tiene una fácil penetración por vía inhalatoria. El tolueno puede pasar al torrente circulatorio y, al igual que el benceno, es distribuido en tejidos grasos y en la médula ósea (García, 2007; Haro, 2008).

Una exposición leve al tolueno produce irritación en ojos, nariz, garganta y tracto respiratorio superior, así como tos y mareo. Una exposición moderada puede afectar al Sistema Nervioso Central dando como resultado dolor de cabeza, cansancio, vértigos, náusea, intoxicación, visión borrosa, palidez, confusión, debilidad y fatiga (García, 2007; SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008).

A exposiciones mayores, dependiendo de la concentración y/o de la duración de la exposición el tolueno actúa como narcótico, produciendo una visión borrosa y una acidosis metabólica que puede conducir a una pérdida del estado de alerta, convulsiones, arritmia cardíaca y coma. En dosis muy altas es capaz de causar la muerte por afección cardíaca (De Celis, 1998; Galicia, 1998; García, 2007).

## **2.4 La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).**

### **2.4.1 Características generales de la ZMCM.**

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) está localizada en la zona suroeste de la cuenca de México. Esta cuenca endorreica<sup>4</sup> presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en las regiones de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Tiene una superficie de 7781 km<sup>2</sup>, de la cual el Distrito Federal ocupa el 19% y el 81% restante los 59 municipios del Estado de México (SMA-GDF, 2008a; Bravo, et al., 2001).

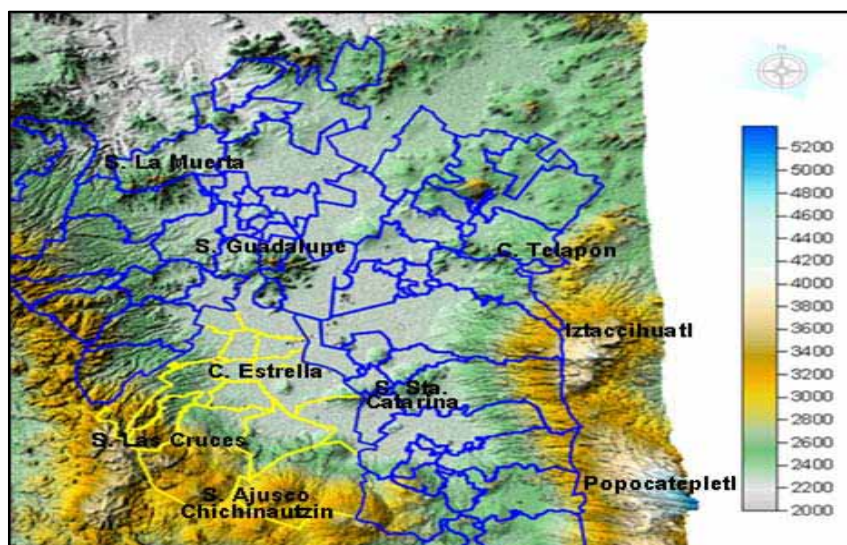
---

<sup>3</sup> Teratógeno (del griego teratos, “monstruo” y genos o génesis, “nacimiento u origen”) es todo agente capaz de desviar el desarrollo embrionario y fetal normal; al inducir alguna anomalía suelen ser causa de defectos congénitos (Rodríguez et al, 2013).

<sup>4</sup> Una cuenca endorreica es aquella cuyos escurrimientos se concentran en la parte baja sin salida natural.

A grandes rasgos, en la ZMCM el clima es templado semiseco en la región noreste, en el centro predomina el templado subhúmedo y en las regiones altas el tipo semifrío subhúmedo. Se puede reconocer una estación húmeda (lluvias) y una estación seca que presenta contenidos de humedad baja y que se puede dividir en dos estaciones: Seca-Caliente (de marzo a mayo) y Seca-Fría (de noviembre a febrero). La estación húmeda se presenta desde mediados de mayo, aunque es más evidente entre junio y octubre, ocasionando que desciendan los niveles de algunos contaminantes por el efecto de “lavado troposférico”. Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona nororiente principalmente (Jaimes et al., 2010; SMA-GDF, 2008b, SMA-GDF, 2012b).

En la ZMCM, la entrada principal del viento se ubica en la zona norte, región donde el terreno es más plano (Figura 2.4.1a). Dependiendo de la época del año, puede existir una segunda entrada del viento por la región noreste de la cuenca; incluso, puede darse que el flujo del viento sea de sur a norte, cuando el viento en capas medias de la tropósfera es suficientemente intenso como para que, a pesar de la barrera montañosa, se imponga esa dirección, sobre todo en los meses invernales. Estas dos últimas direcciones descritas normalmente se presentan en un porcentaje bajo, de tal forma que estos comportamientos no siempre se detectan (SMA-GDF, 2008a).

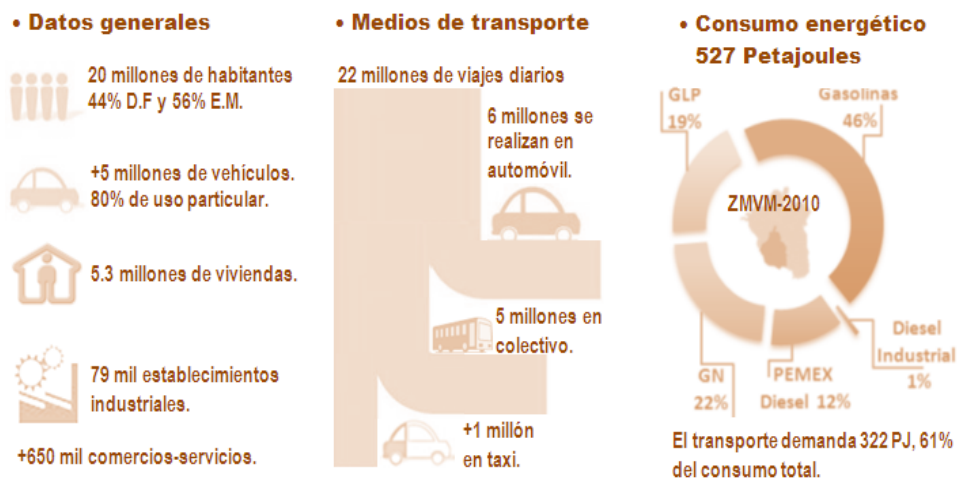


**Figura 2.4.1a** Altitud de la ZMCM. SMA-GDF, 2008a.

La ZMCM es una urbe altamente poblada, aloja a más de 20 millones de personas, de las cuales el 44% vive en las 16 delegaciones del D.F. y el 56% restante corresponde a habitantes de los 59 municipios del Estado de México. Esto corresponde aproximadamente al 20% de la población que habita en el país y que en el año 2010, consumió 527 Petajoules de energía, utilizados para cubrir la demanda de más de 5.3 millones de viviendas, 5 millones de vehículos (19% de los vehículos a nivel nacional), así como 78 mil industrias y más de 123 mil comercios y servicios. (SMA-GDF, 2012b).

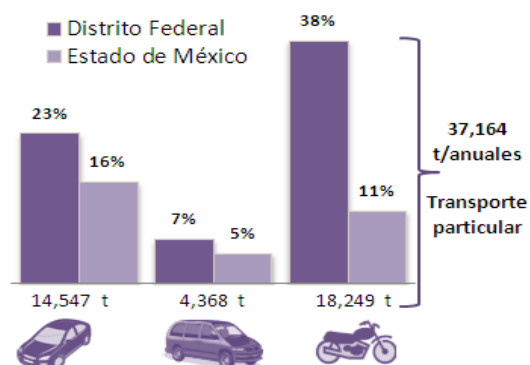
En la ZMCM están domiciliados más de 5 millones de vehículos, de los cuales 4.78 millones son a gasolina y poco más de 189 mil a diesel; en conjunto emiten anualmente 56,419 toneladas de contaminantes tóxicos (Figura 2.4.1b), representando casi el 30% de las emisiones totales generadas por todos los sectores (SMA-GDF, 2012b).

Como resultado de las actividades antropogénicas realizadas dentro de la ZMCM, en el año 2010 se generaron poco más de 190 mil toneladas de contaminantes tóxicos, donde se incluyen el benceno y tolueno. Casi la totalidad de estas emisiones provienen de los compuestos orgánicos totales (COT), estimándose que el consumo anual de los disolventes orgánicos es de 367,725 toneladas, los que generan cerca de 67 mil toneladas de COV's (SMA-GDF, 2012b).



**Figura 2.4.1b.** Datos generales, medios de transporte y consumo energético en la ZMCM en el 2010. SMA-GDF, 2012b.

Los vehículos a gasolina que están equipados con convertidor catalítico (modelo 1993 y posteriores) contribuyen con el 90% de los tóxicos, por lo que es el estrato más abundante. En cuanto a su uso, los particulares contribuyen con un 66% de las emisiones de contaminantes tóxicos, mientras que los de pasaje contribuyen con un 19% y los de carga con un 15%. La Figura 2.4.1c muestra las emisiones de contaminantes tóxicos debidas al transporte particular en la ZMCM (conformado por poco más de 4 millones de autos, camionetas SUV y motocicletas). A pesar de que hay una mayor cantidad de autos, las motocicletas emiten más contaminantes tóxicos, entre los que se encuentran el benceno y el tolueno (SMA-GDG, 2012b).



**Figura 2.4.1c.** Emisiones de contaminantes tóxicos debidas al transporte particular en la ZMCM durante el año 2010. SMA-GDF, 2012b.

#### 2.4.2 Factores que influyen en la acumulación de contaminantes en la ZMCM.

Por sus características geográficas y climáticas, la ZMCM tiende a acumular contaminantes atmosféricos. Los factores más importantes son los siguientes:

- **Altitud.** Al tener una altitud de 2240 msnm, la cantidad de oxígeno disponible disminuye (23% menos que al nivel del mar), ocasionando que los procesos de combustión operen deficientemente y emitan una mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera (SMA-GDF, 2006).
- **Topografía del área.** La ZMCM está rodeada por montañas al oeste, este y sur, lo que dificulta el paso de corrientes de aire que permitan “transportar” a los contaminantes a otros sitios y provoca que se “estancuen” en la cuenca (Jaimes et al, 2010; Velasco et al, 2007).

- **Posición geográfica.** Su baja posición latitudinal ocasiona que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos como el ozono. Además, por estar en el centro del país, a lo largo del año se presentan sistemas anticiclónicos que mantienen el cielo despejado y aumentan la capacidad fotoquímica de la atmósfera. Estos sistemas también provocan que la velocidad de los vientos disminuya cerca de la superficie del suelo, lo que inhibe el movimiento vertical y horizontal del aire, afectando la dispersión de los contaminantes (SMA-GDF, 2006).
- **Emisiones antropogénicas.** Es de esperarse que, al albergar a tal cantidad de habitantes, ésta sea proporcional a la cantidad de emisiones de contaminantes liberados a la atmósfera.
- **Condiciones climáticas.** En invierno se favorecen las condiciones para las inversiones térmicas, lo cual es más frecuente durante la temporada seca (especialmente de diciembre a abril), siendo más adversa para la ventilación en la cuenca. Durante el invierno predominan las inversiones de superficie, presentándose altos niveles de partículas suspendidas. En la primavera predominan las inversiones de subsidencia (descenso del aire desde capas superiores de la tropósfera), los días largos y la mayor radiación favorecen la formación del smog fotoquímico, provocando altas concentraciones de ozono y partículas finas, entre otros contaminantes (Jaimes et al., 2010).

#### **2.4.3 Historia de la contaminación y legislación ambiental en la ZMCM.**

La contaminación atmosférica en la ZMCM se hizo evidente desde los años sesenta y ha seguido hasta la fecha, alcanzando en algunos casos niveles críticos. En los años sesentas, setentas y la primera mitad de los ochentas, los principales contaminantes en la ZMCM fueron el dióxido de azufre, las partículas suspendidas totales y el plomo. Desde entonces, han sido varios los esfuerzos por disminuir los niveles de contaminación en la ZMCM. La Tabla 2.4.3a presenta un resumen de los esfuerzos hechos hasta la fecha en materia de contaminación del aire.

En la década de los 90's el problema de contaminación por ozono se agravó a raíz de la reducción del plomo en gasolinas. El contenido de plomo en la gasolina Nova disminuyó considerablemente entre 1986 y 1992, variando de 0.98 g/L a 0.07 g/L, lo que significó una reducción del 92%. En 1991 se hizo obligatorio la instalación de convertidores catalíticos en los vehículos, como resultado de un acuerdo entre las autoridades gubernamentales ambientales y las empresas de automóviles, a la par de la introducción de la gasolina sin plomo Magna Sin. Fue hasta noviembre de 1997 que se dejó de vender la gasolina Nova Plus.

El tetraetilo de plomo funcionaba como antidetonante en la gasolina, aumentando el octanaje de la misma<sup>5</sup>; al eliminar este compuesto de plomo, se tuvieron que agregar otros compuestos como los BTX, para así cumplir con el octanaje requerido. Su indiscutible ventaja fue la eliminación de esta importante fuente de plomo en el aire. Sin embargo, si bien el convertidor catalítico es capaz de oxidar los hidrocarburos no quemados que salen del escape de los vehículos, cuando el catalizador ya no sirve o cuando ni siquiera hay convertidor catalítico, las emisiones vehiculares contienen una alta proporción de estos compuestos que son tóxicos y precursores de ozono (Bueno, 2005; Espinosa, 2008 INE-SEMARNAT, 2012; Mugica et al., 2003).

Como se menciona en la Tabla 2.4.3a, el PROAIRE fue un programa creado por el Departamento del Distrito Federal, en conjunto con el Gobierno del Estado de México y con la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca y con la Secretaría de Salud en 1996. Este programa se ha aplicado desde entonces con el propósito general de proteger la salud de la población que habita la ZMCM. A continuación se presenta un resumen con la información más importante de cada programa.

---

<sup>5</sup> Octanaje o número de octano es una medida de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas para evitar las detonaciones y explosiones en las máquinas de combustión interna, de tal manera que se libere o se produzca la máxima cantidad de energía útil.



**Tabla 2.4.3a.** Cronología sobre la contaminación ambiental en la ZMCM.

| AÑO  | ASUNTO O MEDIDA  | OBSERVACIONES   |
|------|--|---|
| 1971 | Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental.<br>Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica Originada por la Emisión de Humos y Polvos. | Estas medidas se dieron a partir de la creación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en 1970, pues se tuvo la posibilidad de realizar estudios con tecnología más adecuada para el análisis de la contaminación.  |
| 1978 | Primera Reunión de Expertos  | El Departamento del Distrito Federal, en conjunto con la extinta Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, invitaron a especialistas de diversos países para evaluar los programas y acciones que debían llevarse a cabo para controlar el problema de contaminación atmosférica.   |
| 1979 | Programa Coordinado para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México (1979-1982)  | El entonces Presidente José López Portillo y Pacheco organizó una reunión de su gabinete en la que se firmó el acuerdo que estableció este programa.  |
| 1986 | Inicia formalmente la operación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)   | La red inició con 25 estaciones automáticas para la medición de O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y, para medir manualmente PST y contenido de Pb. Además, se instalaron equipos para medir temperatura ambiente, humedad relativa y dirección y velocidad del viento en 10 estaciones.<br>Se redujo el contenido de Tetraetilo de Plomo en gasolinas. Sumado a esto, PEMEX fue implementado el uso de gas natural como combustible alternativo en las termoeléctricas localizadas en la ZMCM. |
| 1987 | Veintiún medidas para Controlar la Contaminación en el Valle de México   | Propuestas por la Subsecretaría de Ecología. Posteriormente, el 13 de enero de 1987, estas medidas se convirtieron en "Cien Acciones Necesarias en Ecología" de alcance nacional.   |
| 1988 | Ley General de Equilibrio y Protección al Ambiente (LGEEPA)  | El Título Cuarto habla sobre la prevención y control de la contaminación atmosférica, así como las disposiciones generales. Entre otros, habla sobre la elaboración de un RETC, de la expedición de normas oficiales mexicanas, la integración de inventarios de emisiones, etc.  |
| 1989 | Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PICCA)  | Contó con la participación de académicos y expertos tanto mexicanos como extranjeros.   |
| 1996 | Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 (PROAIRE)   | Creado por la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la ZMCM. En ese mismo año, PEMEX sustituyó la gasolina Magna sin por la Magna reformulada y lanzaron a la venta la gasolina Premium. Este programa sigue vigente (PROAIRE 2011-2020).  |

*Fuentes: Sosa, 2001 y Bueno, 2005.*

## **PROAIRE 1995-2000.**

En el primer PROAIRE (1995-2000) se reconoció que no se contaba con los suficientes recursos ni la infraestructura para realizar estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, por lo que las normas se establecieron fundamentalmente tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo. Sin embargo, las características de la ZMCM son diferentes a las de otros lugares del mundo y esto puede influir enormemente en la reactividad y concentración de los contaminantes atmosféricos.

Además se mencionó que, aunque el país se encontraba en recesión económica, la actividad económica se reactivaría en el mediano plazo, trayendo consigo un mayor consumo de combustibles y, por ende, mayor contaminación. Como parte de las medidas propuestas por el PICCA se mencionó el suministro de gasolina sin plomo para los vehículos modelo 1991 con convertidor catalítico, la clausura definitiva de la refinería 18 de marzo, la ampliación del metro y el mejoramiento de vialidades, así como la errada<sup>6</sup> continuación del programa HOY NO CIRCULA. Otras medidas propuestas fueron la relación permanente con Universidades y Centros de Investigación y la Instrumentación del Sistema de Vigilancia Epidemiológica de la ZMCM con una inversión a diciembre de 1995 de apenas 2 millones de dólares para el primer caso y 1 millón de dólares para el segundo, de un total de 2,333.315 millones de dólares.

Como uno de los objetivos de este primer PROAIRE se propuso lograr gradualmente menores niveles de contaminación durante el día y tener menores contingencias al año, como resultado de un abatimiento del 50% de las emisiones de hidrocarburos, 40% de óxidos de nitrógeno y 45% de partículas suspendidas de origen antropogénico, para el año 2000, teniendo como metas una industria limpia (reducción de emisiones en la industria y servicios), vehículos limpios (disminución de las emisiones por kilómetro) y un transporte eficiente, así como un nuevo orden urbano (regulación total de kilómetros recorridos por vehículos automotores).

---

<sup>6</sup> El programa HOY NO CIRCULA fue presentado como un programa temporal buscando que la gente se desplazara en transporte público o compartiera el auto con vecinos o compañeros de trabajo. Sin embargo, como la población tiene una percepción muy baja sobre el transporte público, muchos habitantes decidieron adquirir autos de repuesto (que algunas veces eran más contaminantes) o recurrieron al traslado de sus recorridos a otros días de la semana.

## **PROAIRE 2002-2010.**

En esta edición, los principales aportadores de energía fueron las gasolinas con el 35%, el gas natural con el 35%, el gas LP con un 18% y el diesel vehicular con el 9%, siendo el transporte el principal consumidor de energía. En el periodo de 1990-2000 la demanda de gasolina se incrementó en casi un 19%. Como la gasolina Nova desapareció en 1998, la demanda de gasolina Magna fue aumentando y en 1996 se inició la distribución de la gasolina Premium.

Algunas de las recomendaciones concernientes a COV's incluyeron:

- La implementación de una fuerte estrategia de reducción de COV's, hidrocarburos y NO<sub>2</sub> para alcanzar los objetivos de reducción de ozono.
- Considerar la inclusión del monitoreo de algunas sustancias tóxicas tanto en forma gaseosa como contenidas en partículas suspendidas, principalmente aquellas con potencial cancerígeno.
- Realizar más estudios y difundir los resultados de aquellos ya terminados que vinculan el costo de las enfermedades producidas o agravadas por la contaminación ambiental con la pérdida de productividad y capital humano, para que tanto el sector privado como el público tomen conciencia y puedan estimar cuantitativamente el beneficio de realizar acciones e invertir en medidas de control para reducir las emisiones contaminantes.
- Seguir impulsando la renovación del parque vehicular, incluyendo la flota vehicular gubernamental.
- Seguir impulsando acciones relacionadas con la infraestructura vial y corredores de transporte, accesibles tanto a vehículos privados como al transporte público, así como el incremento de transporte público de alta capacidad, eficiente, seguro y poco contaminante.

## **PROAIRE 2011-2020.**

En esta última edición se mencionaron los resultados del Inventario de Emisiones de la ZMCM 2008, de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006, así como los avances logrados en los últimos 20 años en materia de política de calidad del aire en la ZMCM. A pesar de las medidas implementadas en el PROAIRE anterior (Anexo A1), se recalcó que desde que se inició el monitoreo sistemático de la contaminación del aire en 1986 no se había registrado un solo año que cumpliera con los límites definidos por la NOM para ozono y sólo se había logrado que su concentración dejara de aumentar.

Se introdujo un concepto nuevo: el enfoque ecosistémico. Dicho enfoque incluye la organización espacial de las actividades cotidianas de la ZMCM y se manifiesta básicamente a través de la distribución espacial de las densidades de los hogares, de los empleos y de los servicios públicos y privados. Para hacer uso de este enfoque ecosistémico se introducen otros conceptos nuevos como el de entropía urbana, que permite medir a través de un índice el grado de concentración o dispersión de las densidades de población y empleo con un gradiente de valores que van del cero al uno. Su interpretación mantiene una analogía con la que se tiene en termodinámica: a mayor entropía mayor desorden urbano, más desperdicio energético y menos energía útil disponible. Así, se tiene una ZMCM caracterizada por una alta entropía urbana y que funciona con muy bajas eficiencias económicas, ambientales y sociales. Además, tomando en cuenta el enorme tamaño del área urbanizada, se tiene que se generan un gran número de viajes para el movimiento de personas y mercancías, con grandes distancias promedio de recorrido. Una ciudad planeada para tener una estructura más eficiente, puede mantener un nivel dado de actividad, producción y empleo con menor consumo energético, con menores emisiones y mayor calidad de vida. De este modo, en este último PROAIRE se propuso establecer un enfoque ecosistémico en la gestión de la calidad del aire de la ZMCM, teniendo 8 estrategias con 81 medidas y 116 acciones. Las concernientes a este trabajo se resumen en el Anexo A1, esperando una reducción total de emisiones de COV's de 122,987 ton/año, siendo de mayor influencia sobre esta reducción las estrategias 3, 4 y 5.

Para tener más conocimiento sobre la situación de contaminación ambiental en la ZMCM el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), que pertenece a la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA-DF), cuenta con un catálogo de publicaciones que pueden consultarse y descargarse de manera gratuita en su página web (<http://www.calidadaire.df.gob.mx/>). Las publicaciones anuales cuentan con todos los informes de calidad del aire desde 1992 hasta el último, correspondiente al año 2011. Dentro de las publicaciones mensuales, se incluye un resumen mensual de la situación de los contaminantes criterio para evaluar la calidad del aire, así como una reseña sobre los episodios de contingencia en los últimos años. Estas publicaciones abarcan desde enero del 2010 hasta junio del 2013 [Fecha de consulta: 4 de agosto de 2013].

#### **Legislación ambiental.**

No existe en la actualidad una norma establecida para la concentración total permisible de hidrocarburos aromáticos en la atmósfera. A nivel federal existen varias normas que regulan la cantidad de COV's en la atmósfera, aunque sólo la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 contiene regulaciones específicas para benceno en gasolina (Tabla 2.4.3b).

La NOM-092-SEMARNAT-1995 y la NOM-093-SEMARNAT-1995 (Tabla 2.4.3c), referentes a los sistemas de recuperación de vapores de gasolina (SRV) en estaciones de servicio y autoservicio, fueron canceladas el 26 de enero de 2012 (DOF: Diario Oficial de la Federación). A raíz de las modificaciones realizadas a las normas vigentes y a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) se señaló, entre otros aspectos, que las estaciones de servicio ya no se consideraban fuentes fijas de jurisdicción federal.

Citando el aviso de cancelación de estas normas: "Derivado de las reformas efectuadas a la LGEEPA y a su Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera, la SEMARNAT, en materia de control de contaminación sólo puede requerir el cumplimiento de niveles máximos permisibles, no así la aplicación de tecnologías o procedimientos específicos de reducción de

emisiones; especificaciones que son establecidas en las citadas normas oficiales mexicanas NOM-092-SEMARNAT-1995 y NOM-093-SEMARNAT-1995”.

**Tabla 2.4.3b.** Normatividad ambiental vigente referente a COV's.

| TÍTULO  | ESPECIFICACIONES   |
|---|--|
| <b>NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005</b>   |  |
| Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.  | Máximo 25% vol de aromáticos y 1% vol de benceno en las gasolinas Premium y Magna para la ZMCM. Método de prueba para aromáticos: ASTM D 1319-03; para benceno y BTX: ASTM D 3606-04.                                    |
| <b>NOM-121-SEMARNAT-1997</b>  |  |
| Límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de COV's provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías nuevas en planta de automóviles, unidades de uso múltiple, de pasajeros y utilitarios; carga y camiones ligeros, así como el método para calcular sus emisiones. | Los límites máximos permisibles de COV's en g/m <sup>2</sup> son de 55 para automóviles, 60 para unidades de uso múltiple para pasajeros y utilitarios y 75 para unidades de uso múltiple para carga y camiones ligeros. |
| <b>NOM-123-SEMARNAT-1998</b>  |  |
| Contenido máximo permisible de COV's en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación del contenido de los mismos en pinturas y recubrimientos.  | El contenido máximo permisible de COV's para esmalte arquitectónico, esmalte doméstico, esmalte alquidálico y para pintura de aceite es de 450 g de disolvente/L de pintura fabricada y envasada.                        |

**Tabla 2.4.3c. Normas referentes a COV's canceladas.**

| <b>Normas canceladas</b>     | <b>Especificaciones</b>   |
|------------------------------|---|
| <b>NOM-092-SEMARNAT-1995</b> | Regulaba la contaminación atmosférica y establecía los requisitos, especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo ubicadas en el Valle de México. |
| <b>NOM-093-SEMARNAT-1995</b> | Método de prueba para determinar las eficiencias de laboratorio de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo.   |

No obstante, para el Distrito Federal aplican dos normas que complementan y, en el caso de las normas canceladas, sustituyen a las normas anteriores (Tabla 2.4.3d).

**Tabla 2.4.3d. Normas Ambientales para el Distrito Federal vigentes.**

| <b>TÍTULO</b>   | <b>ESPECIFICACIONES</b>  |
|---|--|
| <b>NADF-010-AMBT-2006</b>   |  |
| Establece el método de prueba para determinar la eficiencia de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina y su límite mínimo permisible, que deberán cumplir los propietarios o responsables de estaciones de servicio y autoconsumo ubicadas en el territorio del Distrito Federal. | Para considerar como válida la prueba de eficiencia, será necesario comprobar previamente la hermeticidad del SRV, la existencia de recuperación de vapores en todas y cada una de las líneas o pistolas de despacho y el correcto funcionamiento del sistema de la alarma, conforme a lo establecido en la presente norma. Límite mínimo permisible de eficiencia de 80%. |
| <b>NADF-011-AMBT-2007</b>   |  |
| Establece los límites máximos permisibles de emisiones de COV's en fuentes fijas de jurisdicción del Distrito Federal que utilizan solventes orgánicos o productos que los contienen.   | Para tolueno se especifica un límite máximo permisible de 13 ton/año y para benceno de 72 ton/año. Para ambos casos se puede usar balance de materiales o medición en fuente como métodos de evaluación con una frecuencia anual.  |

Por otro lado, la NOM-010-STPS-1999 establece las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio laboral. En esta norma se incluye al benceno con una connotación de carcinógeno A2 y al tolueno como PIEL, A4. Además, se establecen sus límites máximos permisibles de exposición promedio ponderado en tiempo (LMPE-PPT)<sup>7</sup> y, para el caso del benceno, su límite máximo permisible de exposición de corto tiempo (LMPE-CT)<sup>8</sup>. Estos valores están calculados para condiciones normales de temperatura y presión, y para una jornada laboral de 8 horas diarias y 40 horas a la semana (Tabla 2.4.3e). En el Apéndice II de esta norma se mencionan los procedimientos para la determinación de sustancias químicas en el medio ambiente laboral, siendo el 015 y el 020 los correspondientes para determinar, mediante Cromatografía de gases, benceno y tolueno, respectivamente.

La Secretaría de Salud también cuenta con normas referentes a COV's. Es de mencionar la NOM-047-SSA1-1993, que establece los límites biológicos máximos permisibles de disolventes orgánicos en el personal ocupacionalmente expuesto (POE). Éstos los define como los valores de referencia usados como guías para la evaluación de riesgos potenciales para la salud en higiene industrial y establece para el benceno un valor de fenoles totales en orina al final del turno de trabajo de 50 mg/g de creatinina; para el tolueno se tienen dos valores: ácido hipúrico en orina al final del turno de trabajo (2.5 g/g de creatinina) y tolueno en sangre venosa al final del turno de trabajo (1 mg/L). Se miden estas sustancias en orina ya que son metabolitos resultantes de la asimilación de benceno y tolueno en el cuerpo humano. Además, cuenta con criterios para la conservación de la salud de los trabajadores expuestos a estas sustancias.

---

<sup>7</sup> LMPE-PPT: Concentración promedio ponderada en tiempo de un contaminante del medio ambiente laboral para una jornada de ocho horas diarias y una semana laboral de cuarenta horas, a la cual se pueden exponer la mayoría de los trabajadores sin sufrir daños a su salud.

<sup>8</sup> LMPE-CT: Concentración máxima del contaminante del medio ambiente laboral, a la cual los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un periodo máximo de quince minutos, con intervalos de al menos una hora de no exposición entre cada periodo de exposición y un máximo de cuatro exposiciones en una jornada de trabajo y que no sobrepase el LMPE-PPT.



**Tabla 2.4.3e.** Límites máximos permisibles de exposición a benceno y tolueno del medio ambiente laboral y sus connotaciones.

| Sustancia | Connotación  | LMPE-PPT |                   | LMPE-CT |                   |
|-----------|--|----------|-------------------|---------|-------------------|
|           |  | ppm      | mg/m <sup>3</sup> | ppm     | mg/m <sup>3</sup> |
| Benceno   | A2 Carcinógeno humano sospechoso. El agente es carcinógeno en animales de experimentación, por vías de administración, en órganos o tejidos o por mecanismos que se consideren relevantes para la exposición del trabajador. Se debe controlar cuidadosamente la exposición de los trabajadores por todas las vías de ingreso para mantener esta exposición lo más bajo posible de dicho límite. | 1        | 3.2               | 5       | 16                |
| Tolueno   | PIEL, A4: Puede ser absorbido a través de la piel, las membranas mucosas o los ojos en cantidades significativas, incrementando el riesgo por la exposición a éste. Los datos son insuficientes para clasificar al agente en términos de su carcinogenicidad en humanos o en animales.   | 50       | 188               | -       | -                 |

## 3. METODOLOGÍA

Este trabajo consistió de dos partes. La parte principal consistió en recabar e interpretar los datos obtenidos de la búsqueda bibliográfica. En la segunda parte se realizó una campaña de muestreo para comparar los niveles actuales de benceno y tolueno con los reportados anteriormente. Para ambos casos, se consideró la relación tolueno/benceno, cuya importancia se justifica a continuación.

### **3.1 Importancia de la relación tolueno/benceno y su relación con las estaciones PAMS.**

En 1991, la Academia Nacional de las Ciencias de los Estados Unidos (US NAS, por sus siglas en inglés) realizó un reporte titulado “Replanteando el Problema de Ozono en la Contaminación del Aire Urbano y Regional”. Este programa criticó a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) por haber fallado al establecer redes de monitoreo para rastrear adecuadamente las tendencias en las emisiones de los precursores de ozono, corroborar inventarios de emisiones y apoyar al modelamiento fotoquímico. En respuesta a las recomendaciones hechas por la US NAS, se creó el programa PAMS (Photochemical Assessment Monitoring Stations), que estipula las características requeridas para formar una red de estaciones de monitoreo para la evaluación fotoquímica. Muchos estados implementaron las estaciones PAMS en 1994 y cada una de estas estaciones colecta rutinariamente datos de hidrocarburos y carbonilos, así como datos meteorológicos.

A raíz de la implementación de la gasolina reformulada (RFG, por sus siglas en inglés) a finales de 1992 en California y más adelante en otras regiones de los E.U.A., se realizó un estudio (Main, 1998) que evaluó el uso de datos obtenidos por las PAMS para determinar si éstos indicaban reducciones reales en las concentraciones ambientales de precursores de ozono y tóxicos, más que fluctuaciones, y en qué medida estas reducciones en las concentraciones ambientales se podían asociar a la implementación del programa de RFG. Las

diferencias principales entre la RFG y la gasolina convencional incluyeron (Main, 1998):

- Niveles de benceno limitados a no más de 1.0% volumen en RFG; en la gasolina convencional, el benceno puede estar presente hasta en un 5.0% volumen.
- Se requiere un mínimo de 2.0% de oxígeno en peso en la RFG. Este requerimiento típicamente es alcanzado tanto por adicionar alrededor de 10% en etanol o el 11% en volumen de metilterbutil éter (MTBE). Las refinerías reemplazan los hidrocarburos aromáticos con oxigenados de alto octanaje para alcanzar el requerimiento de contenido de oxígeno y para disminuir los niveles de hidrocarburos aromáticos.
- Reducción de la Presión de Vapor Reid (RVP, por sus siglas en inglés), que es una medida de la volatilidad de la gasolina. Típicamente, los butanos pueden reducirse y se pueden agregar alcanos mayores y aromáticos para reducir la RVP.
- Las reducciones requeridas de gases tóxicos y emisiones de COV's al 15% resultan en RFG que tienen menor contenido aromático comparado con los combustibles base. Normalmente, las RFG contienen del 20 al 27% de aromáticos, mientras que el contenido de aromáticos en los combustibles convencionales fue de 32% en verano y 26% volumen en invierno.

Hay muchas concentraciones de especies y de grupos de especies que pueden ser buenos indicadores ambientales del cambio de una gasolina a la otra (Tabla 3.1a). En el caso de la relación tolueno/benceno, se espera que el tolueno disminuya debido a la reducción en la concentración de aromáticos, pero la reducción de benceno debe ser significativamente mayor. De este modo, la relación tolueno/benceno se puede usar como un indicador de las posibles fuentes de estos compuestos, debido a que existen relaciones características (también llamadas huellas) de COV's específicas para cada fuente. También es un indicador de la efectividad de las estrategias de control cuando se cuenta con información durante mucho tiempo (Sosa, 2001; Sosa et al, 2009).

**Tabla 3.1a.** Especies (concentración y porcentaje en peso de HCNM) y relaciones usadas como posibles indicadores de la implementación de la RFG.

| Indicador                     | Motivación  |
|-------------------------------|---|
| <b>Benceno</b>                | Reducciones específicas exigidas por las regulaciones de la RFG.  |
| <b>1,3-Butadieno</b>          | Los estudios de modelamiento predicen una disminución del 20%.  |
| <b>Xilenos</b>                | Se requiere que los aromáticos sean reducidos para la RFG.  |
| <b>i-Buteno</b>               | Producto de la descomposición del MTBE; el MTBE es un oxigenado usado para cumplir los requerimientos de la RFG.  |
| <b>Trimetilbencenos (TMB)</b> | Un compuesto aromático; se necesita que los aromáticos sean reducidos para la RFG, particularmente los C9-C10.  |
| <b>Alcanos C8</b>             | Posiblemente sustituidos por aromáticos para alcanzar las reducciones de la RVP.  |
| <b>HCNM</b>                   | La RFG debe resultar en una reducción de la cantidad total de hidrocarburos.  |
| <b>Tolueno/Benceno</b>        | Si no está disponible, éste es un buen sustituto para el porcentaje en peso de benceno ya que el tolueno típicamente es medido con precisión y no cambia tanto con la RFG como el benceno.                                  |
| <b>n-Butano/i-Pentano</b>     | Si no está disponible, éste es un buen sustituto para el porcentaje en peso de n-butano ya que no se espera que cambie el i-pentano.  |
| <b>Benceno/Acetileno</b>      | Si no está disponible, éste es un buen sustituto para el porcentaje en peso del benceno debido a que el acetileno típicamente no cambia con la RFG y tiene pocas fuentes diferentes a los escapes de vehículos motorizados. |

*Fuente: Main, 1998.*

Muchas especies de hidrocarburos son usadas como indicadores del potencial de formación de ozono y trazadores de emisiones urbanas. Asumiendo que las relaciones entre estas especies de interés y las emisiones permanecen relativamente constantes a lo largo del día, la abundancia relativa de las especies más reactivas (olefinas e hidrocarburos aromáticos más reactivos como los xilenos) debe disminuir con el tiempo durante las horas del día y disminuir entre un sitio urbano y uno rural, y la abundancia de especies menos reactivas (como las parafinas y los hidrocarburos aromáticos menos reactivos) tenderá a aumentar. Las relaciones de las

concentraciones de especies más reactivas entre especies menos reactivas son también útiles como indicadores de los cambios relativos en la composición y edad de las especies. Gráficos de dispersión entre especies más reactivas y especies menos reactivas, gráficos diurnos de las relaciones pertinentes, y la comparación de las relaciones durante el día y la noche son útiles para investigar la edad de la mezcla. La comparación de las relaciones entre sitios puede ser usada para estimar la edad relativa de las parcelas de aire y ayudar a proporcionar evidencia del transporte de contaminantes. Además, este análisis puede presentar evidencia de la presencia de emisiones frescas o de fuentes regionales únicas para las especies (Hafner et al., 2004).

Las concentraciones ambientales de contaminantes son influidas no sólo por emisiones frescas en los alrededores cercanos a un muestreador, sino también por el transporte de contaminantes que llevan más tiempo en el ambiente (por ejemplo, contaminantes químicamente modificados). Los periodos de muestreo matutinos ofrecen el mejor potencial para minimizar los efectos de estas influencias. Durante las horas matutinas las emisiones son generalmente altas, el grosor de la capa de mezclado<sup>9</sup> es pequeño, mientras que el transporte de largo alcance y las reacciones químicas son mínimas (Hafner et al., 2004).

En el 2010 Jaimes y colaboradores publicaron el documento titulado “Diseño del monitoreo de precursores oxidantes fotoquímicos en la Ciudad de México y su área metropolitana”. En este documento se presenta información relacionada con la implementación de una red de monitoreo atmosférico para la Ciudad de México y su área metropolitana basándose en las recomendaciones hechas por la US EPA para la implementación de estaciones PAMS. Entre las recomendaciones se encuentra la

---

<sup>9</sup> La capa de mezclado, por definición, es la región de la atmósfera en la cual se dispersan los contaminantes. Su altura varía constantemente dependiendo de las condiciones de calentamiento del aire y de la velocidad del viento, por lo tanto, está en función de la estabilidad de la atmósfera. Al igual que muchas variables meteorológicas, la capa de mezclado presenta una evolución a través del día y a lo largo del año. El valor de este parámetro es muy importante, ya que nos da una idea del volumen de aire en el que se está llevando a cabo la mezcla de contaminantes, a causa de la turbulencia atmosférica en las capas bajas (SMA-GDF, 2008a).

definición de 4 tipos de sitios; sus características, así como los sitios recomendados para la ZMCM (Tabla 3.1b).

**Tabla 3.1b.** Características de los sitios PAMS por tipo y propuesta de la configuración de la red de monitoreo de compuestos reactivos precursores de ozono en la ZMCM.

|   | Tipo I   | Tipo II   | Tipo III  | Tipo IV   |
|---|--|---|---|---|
| <b>Propósito</b>                                      | Monitoreo viento arriba, evaluación de las concentraciones de ozono y sus precursores                                | Evaluación de las emisiones máximas de precursores  | Evaluación de las concentraciones máximas de ozono  | Monitoreo viento abajo, evaluación del transporte de ozono y sus precursores                                |
| <b>Escala de representatividad recomendada</b>        | Urbana   | Vecinal   | Urbana  | Urbana  |
| <b>Proximidad a fuentes de emisión de precursores</b> | Alejada de la influencia de las emisiones de los precursores   | Cerca de la zona en donde la mezcla favorece las concentraciones máximas de precursores                                   | Alejada de las zonas de las máximas emisiones (15 a 45 km)  | Alejada de las zonas de las máximas emisiones   |
| <b>Tipo de uso de suelo recomendado</b>               | Residencial  | Comercial, industrial, de servicios   | Residencial   | Residencial   |
| <b>Proximidad a tránsito y vialidades</b>             | Alejada de las vialidades  | Cerca de las vialidades   | Lejos de la influencia de emisiones de NOx  | Lejos de la influencia de emisiones de NOx  |
| <b>Meteorología</b>                                   | Viento arriba de la zona de emisiones  | Viento abajo de la zona de máxima emisión   | Viento abajo de la zona de máxima emisión entre 5 a 7 horas de distancia  | Viento abajo de la zona de máxima emisión entre 5 a 7 horas de distancia y de las zonas del máximo de ozono |
| <b>Calidad del aire</b>                               | Concentraciones bajas de precursores   | Concentraciones altas de precursores  | Concentraciones altas de ozono  | Concentraciones altas de ozono  |
| <b>Obligatoriedad</b>                                 | Sitio obligatorio, su instalación puede ser 9 meses después del Tipo 2   | Sitio obligatorio y primero a instalar  | Sitio obligatorio, su instalación puede ser 6 meses después del Tipo 2  | Opcional  |
| <b>Parámetros recomendados</b>                        | Requeridos: O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , meteorología.<br>Opcionales: COV's, NO <sub>y</sub> | Requeridos: O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COVs, CO, meteorología.<br>Opcionales: PM <sub>2.5</sub> | Requeridos: O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COV's, meteorología.<br>Opcionales: NO <sub>y</sub> , PM <sub>2.5</sub>  | Requeridos: O <sub>3</sub> , meteorología.<br>Opcionales: NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COV's, CO     |
| <b>Nombre y clave del sitio propuesto</b>             | Acolman (ACO)  | Merced (MER)  | Pedregal (PED)<br>FES Acatlán (FAC)   | Ajusco (AJS)  |
| <b>Configuración final</b>                            | O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , meteorología  | O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COVs, CO, PM <sub>2.5</sub> , meteorología                           | PED: O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NO <sub>y</sub> , PM <sub>2.5</sub> , COV, meteorología.<br>FAC: O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COV, meteorología | O <sub>3</sub> , meteorología   |

*Fuente: Jaimes et al., 2010.*

De acuerdo a la página web del SIMAT, se reportan las concentraciones promedio de 24 horas de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno en 5 estaciones: San Agustín (SAG), FES Acatlán (FES), Merced (MER), UAM Iztapalapa (UIZ) y Pedregal (PED); abarcando desde 2011 hasta 2013. Por su cercanía con los sitios de muestreo elegidos para este trabajo, se decidió usar únicamente los datos generados en la estación PED, que corresponde a un sitio PAMS Tipo III.

Además de la información generada por el SIMAT, se realizó una búsqueda en medios electrónicos e impresos para obtener información referente a las concentraciones de benceno y tolueno en la atmósfera de la zona sur de la Ciudad de México. Esta información se presenta en la sección 3.2 y se analiza a detalle en el Capítulo 4.

### **3.2 Información obtenida sobre los niveles de benceno y tolueno en la atmósfera de la zona suroeste de la ZMCM.**

Se han realizado varios trabajos relacionados con la concentración de COV's en la atmósfera de la ZMCM, debido a que su importancia fue mayor al saber que eran precursores de ozono, compuesto que presentó las concentraciones más altas en la historia de la Ciudad de México durante esa época. Las primeras mediciones se hicieron a finales del año 1991 en un esfuerzo conjunto del Instituto Nacional de Ecología (INE) de México y la US EPA (Ruiz et al., 1996).

Las tablas 3.2a 3.2b y 3.2c contienen información referente a la concentración de benceno y tolueno en la ZMCM. Como puede observarse, mucha de la información disponible se refiere a niveles de exposición personal en ambientes laborales ya que las mayores fuentes de exposición se encuentran en ambientes laborales como las gasolineras y cualquier otro lugar donde se usen disolventes, así como en la industria química. La información más importante obtenida de todos los trabajos citados en las tablas anteriores, se puede resumir como sigue:



**Niveles de exposición en interiores y exteriores.** Los niveles en interiores y exteriores en la ZMCM fueron mayores que los registrados en otros países. En 1996 se reportó que el nivel de exposición promedio en personas que venden en la calle (exterior) fue aproximadamente 5 veces mayor que los niveles observados en países como Alemania y EUA; en oficinistas (interior) los niveles fueron entre 3 y 4 veces mayores que en esos países (Romieu et al, 1999; Ruiz et al, 1996).

Los niveles de exposición ocupacional están significativamente relacionados con el grupo de trabajo y con las actividades realizadas, aunque se observan mayores concentraciones en exteriores que en interiores (Tovalín-Ahumada y Whitehead, 2007). Mediciones de benceno en sangre mostraron que en trabajadores de gasolineras los niveles fueron dos veces mayores que los vendedores en la calle y más de tres veces mayores que los trabajadores de oficina (Meneses et al, 1999). Por otro lado, Serrano-Trespacios (2004) y colaboradores resaltaron las altas exposiciones personales en interiores, asociadas con altas emisiones de COV's provenientes de materiales, productos de limpieza, agua y desodorantes.

**Fuentes de emisión.** Estudios como el de Mugica y colaboradores (2003) señalaron que los escapes vehiculares contribuyeron con el 76% de las emisiones para benceno y con el 60% para el tolueno, teniendo altas concentraciones de aromáticos volátiles en lugares de alta densidad vehicular como cruceros y estacionamientos, varias veces mayores que en otras partes de la ciudad.

De este modo, las concentraciones ambientales de benceno y tolueno están significativamente relacionadas con el tránsito y la densidad vehicular. El perfil diurno del benceno, por ejemplo, tiene el siguiente comportamiento: Máximos en la mañana, asociados con altas emisiones y mezclado limitado. Mínimos a medio día, asociados con la disminución de las emisiones de las fuentes móviles, el aumento de la velocidad de reacción debida a las altas temperaturas (máxima radiación solar) y con el aumento del mezclado debido al crecimiento de la capa límite durante el día. Un máximo cercano a la noche asociado con el aumento gradual de las emisiones vehiculares y la acumulación por la disminución del mezclado (Bueno, 2005). Este comportamiento concuerda con lo reportado por Velasco et al (2007) quienes

estipularon que en los sitios urbanos, la concentración ambiental de los COV's depende fuertemente de la interacción de la actividad vehicular con los procesos meteorológicos. Al comparar las fuerzas relativas de los picos de concentración de COV's en la mañana y en la tarde en sitios como La Merced con aquellos del Pedregal, se tuvo que en La Merced, los picos en la mañana fueron muy altos y en la tarde el pico apenas fue perceptible. En el Pedregal, los picos de la mañana y la tarde fueron de igual magnitud pero de todos los niveles fueron menores a los de La Merced por un factor de aproximadamente 3. Esta diferencia se atribuyó al tráfico propio de cada sitio (en el Pedregal existen las horas pico típicas para la mañana y la tarde) y a una mayor dispersión en el Pedregal, comparada con las mínimas dispersiones horizontales en sitios centrales como La Merced.

**Tabla 3.2a.** Niveles ambientales de benceno y tolueno en estaciones de monitoreo de la ZMCM.

| Referencia                                      | Periodo  | Concentración (ppb) |         | Observaciones   |
|---|--|---------------------|---------|---|
|   |  | Benceno             | Tolueno |   |
| Ruiz et al, 1996                                | Campaña II (marzo 1992)                              | 0.19                | 0.47    | Varias campañas de muestreo (1991-1993).<br>Estación PED.                                     |
|   | Campaña IV (marzo 1993)                              | 0.23                | 0.62    |   |
|   | Campaña V (noviembre 1993)                           | 0.19                | 0.69    |   |
| Meneses et al, 1999 <sup>A</sup>                | Año 1995   | 14.20               |         | Promedio anual por hora en el área central de la ZMCM.  |
|   | Enero-Mayo 1996                                      | 14.50               |         |   |
| Mugica et al, 2003                              | Febrero y marzo de 1997                              | 3.13                | 9.29    | Estación PED.   |
| Serrano-Trespalcios et al, 2004 <sup>A</sup>    | Marzo 1998 a febrero 1999                            | 1.78                | 8.52    | Promedio en las afueras de las estaciones de monitoreo centrales: MER, FAC, SAG, Plateros UIZ |
| SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008 <sup>A</sup> | 23 de septiembre de 2005 al 26 de septiembre de 2006 | 1.66                |         | Promedio anual por hora en estaciones: PED, MER, CENICA, TLA y SAG.                           |

<sup>A</sup> Se incluyen estos valores para tener una referencia con otras estaciones de monitoreo de la ZMCM diferentes a PED.

**El tolueno como precursor de ozono.** En 1996, Ruiz et al. reportaron que el tolueno presentó un comportamiento similar al del ozono. Esto sugirió que el tolueno era un precursor en su formación. Posteriormente en el 2007, se incluyó al tolueno dentro de los diez HCNM (hidrocarburos no metano) más importantes en la atmósfera urbana de la ZMCM en términos de reactividad con el radical hidroxilo (OH). Una comparación de los niveles de reactividad entre los sitios urbanos y los industriales indicó que en promedio la atmósfera de la locación industrial es 1.8 veces más reactiva que en los sitios urbanos; y éstos a su vez fueron 4.6 veces más reactivos que los sitios rurales en la ZMCM (Velasco et al, 2007).

El tolueno fue el compuesto aromático más abundante en 1997, contando junto con especies como los xilenos y el benceno para el 80% del total de compuestos aromáticos. Esto concuerda con lo reportado por Velasco y colaboradores (2007), quienes señalan que los aromáticos más abundantes fueron las especies BTEX, que representaron cerca del 75% del aporte de aromáticos. Posteriormente también se incluyó dentro de los COV's más abundantes del sur de la ZMCM (Bueno et al, 2004; Mugica et al, 2003). La importancia de medir la concentración de tolueno atmosférico en la ZMCM se vio entonces reflejada por la abundancia de éste en el ambiente y por su relación con la formación de ozono en la atmósfera.

**Abundancia relativa en la estación PED.** El tolueno tuvo una mayor abundancia relativa en PED, comparado con otras estaciones de monitoreo, mientras que para el benceno la abundancia fue similar en todas las estaciones (SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008). Este hecho se había reportado anteriormente por Bueno (2005) quien además identificó el sábado como el día que presentó las concentraciones más altas de benceno y tolueno en la zona suroeste de la ZMCM (Bueno, 2005).

**Tabla 3.2b.** Exposición a benceno y tolueno en la ZMCM.

| Referencia                        | Periodo  | Zona   | Concentración (ppb) |                    | Observaciones   |
|-----------------------------------|--|--|---------------------|--------------------|---|
|                                   |  |  | Benceno             | Tolueno            |   |
| Meneses et al, 1999               | Una jornada laboral en 1996 <sup>A</sup>           | Gasolinera   | 112.58 <sup>B</sup> |                    | Tres grupos ocupacionales en el centro de la ZMCM: despachadores de gasolina, vendedores y oficinistas.   |
|                                   |  | Calle  | 26.21               |                    |   |
|                                   |  | Oficina  | 14.15               |                    |   |
| Ortiz et al, 2002                 | Del 16 al 20 de noviembre de 1998                  | Personal   | 13.51               | 78.91              | Exposición personal a benceno tolueno y xilenos en diferentes lugares y en 5 estaciones de monitoreo cercanas a éstos (2 km a la redonda).  |
|                                   |  | Monitor 3M <sup>C</sup>                            | 6.54                | 32.67              |   |
|                                   |  | Canister <sup>C</sup>                              | 3.35                | 17.59              |   |
| Romieu et al, 1999                | Una jornada laboral en 1996 <sup>A</sup>           | Gasolinera   | 97.08               | 180.57             | Exposición y concentración en sangre de COV's en residentes del centro de la ZMCM.  |
|                                   |  | Calle  | 24.11               | 42.49              |   |
|                                   |  | Oficina  | 13.78               | 124.81             |   |
| Serrano-Trespalcios et al, 2004   | De marzo 1998 a febrero 1999                       | Casa   | 1.82 <sup>D</sup>   | 9.93 <sup>D</sup>  | Exposición personal a 34 COV's para 90 voluntarios de 30 familias que vivían cerca de una de las 5 estaciones de monitoreo centrales.   |
|                                   |  | Personal   | 3.29                | 23.58              |   |
| Cruz-Núñez et al, 2003            | Septiembre a diciembre de 2000                     | 9 gasolineras de la ZMCM. 7 localizadas en el sur. | 1.10 <sup>D</sup>   | 64.01 <sup>D</sup> | Evaluación de la eficiencia de los SRV usados en gasolineras. Exposición a benceno, tolueno y xilenos en interiores (oficinas) y exteriores (área de servicio).   |
|                                   |  |  | 0.76 <sup>E</sup>   | 87.58 <sup>E</sup> |   |
| Gómez-Perales et al, 2004         | Del 6 de mayo al 1 de junio de 2002.               | Microbús <sup>F</sup>                              | 8                   |                    | Exposición de pasajeros a PM <sub>2.5</sub> , CO y benceno en diferentes vías de transporte en horario matutino (am) y vespertino (pm). Tres rutas cubriendo los cuatro puntos cardinales: de norte a sur, de este a oeste y de noreste a centro. |
|                                   |  | Microbús <sup>G</sup>                              | 9                   |                    |   |
|                                   |  | Microbús <sup>H</sup>                              | 7                   |                    |   |
|                                   |  | Autobús <sup>F</sup>                               | 7                   |                    |   |
|                                   |  | Autobús <sup>G</sup>                               | 5                   |                    |   |
|                                   |  | Autobús <sup>H</sup>                               | 6                   |                    |   |
|                                   |  | Metro <sup>F</sup>                                 | 4                   |                    |   |
|                                   |  | Metro <sup>G</sup>                                 | 4                   |                    |   |
| Shiohara et al, 2005              | Junio y julio de 2002                              | Automóvil  | 13.12               | 40.63              | Niveles de exposición de pasajeros a COV's en: automóvil, microbús, autobús y metro a lo largo de avenida Tlalpan, avenida Insurgentes y varios ejes viales.  |
|                                   |  | Microbús   | 10.46               | 34.52              |   |
|                                   |  | Autobús  | 7.39                | 29.21              |   |
|                                   |  | Metro  | 3.57                | 16.68              |   |
| Tovalín-Ahumada y Whitehead, 2007 | Abril y mayo de 2002 (18 días)                     | ZMCM   | 18.48 <sup>D</sup>  | 67.98 <sup>D</sup> | Comparación de las diferencias entre las exposiciones personales, ocupacionales y no ocupacionales a COV's de trabajadores en interiores y exteriores de la ZMCM y Puebla (menor contaminación ambiental).  |
|                                   |  | ocupacional  | 3.76 <sup>E</sup>   | 59.22 <sup>E</sup> |   |
|                                   |  | ZMCM no ocupacional                                | 13.78 <sup>D</sup>  | 21.24 <sup>D</sup> |   |
|                                   |  | Puebla   | 3.76 <sup>E</sup>   | 22.31 <sup>E</sup> |   |
|                                   |  | ocupacional  | 3.44 <sup>D</sup>   | 12.48 <sup>D</sup> |   |
|                                   |  | Puebla no ocupacional                              | 1.88 <sup>E</sup>   | 21.77 <sup>E</sup> |   |
| Wöhnschimmel et al, 2008          | De mayo a agosto de 2004; de agosto a octubre 2005 | Microbús   | 18.2                |                    | Medición de CO, partículas suspendidas, PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , benceno y otros COV's dentro de vehículos de transporte público en la avenida Insurgentes.   |
|                                   |  | Autobús  | 10.4                |                    |   |
|                                   |  | Metrobús   | 4.0                 |                    |   |

<sup>A</sup> Sin información disponible.

<sup>B</sup> Promedio de todos los ambientes laborales: 75.35 ppb.

<sup>C</sup> Promedio en todos los lugares. Promedio ambiente y lugar: 61 ppb benceno y 275 ppb tolueno.

<sup>D</sup> Exteriores.

<sup>E</sup> Interiores.

<sup>F</sup> Matutino: am.

<sup>G</sup> Vespertino: pm.

<sup>H</sup> Promedio matutino y vespertino.

**Tabla 3.2c.** Niveles ambientales de benceno y tolueno en la ZMCM.

| Referencia   | Periodo   | Zona          | Concentración (ppb) |         | Observaciones   |
|--|---|---------------|---------------------|---------|---|
|  |   |               | Benceno             | Tolueno |   |
| Bravo et al., 2001<br>Bravo et al., 2002a, 2002b<br>Sosa, 2001<br>Sosa, et al., 2009 | 12 agosto a 14 noviembre 1999<br><br>10 julio 2000 a 20 febrero 2001                            | CCA grab      | 3.11                | 13.19   | Evaluación de las concentraciones de benceno y tolueno para proponer estrategias de control.<br>Tres sitios del suroeste de la ZMCM: gasolinera, CCA, unidad habitacional.<br>Muestreo grab (instantáneo) e integrado (24 horas).   |
|  |   | CCA integrado | 1.66                | 7.50    |   |
| Velasco et al., 2006<br><br>Velasco et al., 2007                                     | MCMA-2002 (del 7 al 24 de febrero de 2002) y<br>MCMA-2003 (Del 1 de abril al 5 de mayo de 2003) | Urbano        | 3.17                | 13.45   | Evaluación de la concentración y las distribuciones espaciales, los patrones diurnos, origen y reactividad de los COV's.<br>Medición en 4 sitios urbanos (MER, Constituyentes, PED y CENICA), en 1 sección industrial (XAL) y en 3 frontera con áreas rurales (La Reforma, Teotihuacán y Santa Ana Tlacotengo). |
|  |   | Rural         | 0.80                | 1.89    |   |
| Bueno et al., 2004<br>Bueno, 2005  | 1 de junio de 2003 al 27 de abril de 2004   | Sureste (SE)  | 0.90                | 7.20    | Muestreos simultáneos para la evaluación de la concentración de COV's en dos sitios de la ZMCM.   |
|  |   | Suroeste (SW) | 1.10                | 5.10    |   |

Para complementar la información recopilada, se realizó una campaña de muestreo en dos sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México (azotea del CCA y estación de servicio en la Avenida Copilco) del miércoles 7 al lunes 19 de mayo de 2014. Las características de esta campaña se mencionan a continuación.

### **3.3 Medición de benceno y tolueno en dos sitios de la zona suroeste de la ZMCM.**

#### **3.3.1 Métodos Toxic Organic (TO).**

La US EPA cuenta con un compendio de métodos para la determinación de compuestos orgánicos tóxicos en el aire ambiente, denominados métodos TO (Toxic Organic, por sus siglas en inglés). A la fecha existen 17 métodos, dentro de los cuales se encuentra el TO-14a (Tabla 3.3.1a). El método originalmente estaba basado en la obtención de muestras de aire en canisters de acero inoxidable SUMMA, pero actualmente se generaliza el uso de cualquier tipo de canister preparado para evitar la pérdida de compuestos, además de que aplica para presiones finales tanto inferiores como superiores a la presión atmosférica (muestreo subatmosférico y presurizado, respectivamente).

El método TO-14a se aplica a COV's específicos que se ha determinado que son estables cuando se almacenan en canisters<sup>10</sup>, ya sea presurizados o a vacío. De acuerdo a este método, es posible determinar las concentraciones de benceno y tolueno en la atmósfera. Para poder colectar la muestra, el canister es puesto a vacío de modo que se pueda llenar con aire una vez que se lleve al sitio de muestreo. También se puede usar una bomba para presurizar el canister con aire ambiente. El muestreo puede ser instantáneo (grab) o integrado (periodos de tiempo específicos: 1 hora, 3 horas, 24 horas, etc.). Al final del muestreo se cierra la válvula del canister y es llevado al laboratorio para su análisis.

Durante el análisis, la concentración del vapor de agua se reduce con un flujo de gas inerte utilizando secadores Nafion (membrana permeable al agua) y los COV's se colectan en una trampa de enfriamiento criogénico. Esta trampa colecta y concentra los COV's por condensación o adsorción, de modo que gases como el nitrógeno y el oxígeno pasan a través de la trampa sin retenerse. Una vez retenidos los COV's, se calienta la trampa para revolatilizarlos y transportarlos con un flujo de helio hacia el

---

<sup>10</sup> Un canister es un contenedor de acero inoxidable cuya superficie interna es preparada mediante el proceso de electropulido "SUMMA" o equivalente con el fin de evitar la adsorción de compuestos en esta superficie.

cromatógrafo, donde la muestra se inyecta a la columna del cromatógrafo mediante un criofocus (Figura 3.3.1a). Los COV's atrapados en la trampa se volatilizan y se separan mediante Cromatografía de Gases (CG).

**Tabla 3.3.1a.** Métodos Toxic Organic (TO) para la determinación de compuestos orgánicos tóxicos en el ambiente.

| Número de método | Tipo de compuestos determinados                        | Dispositivo de colección de muestra | Metodología analítica <sup>a</sup> |
|------------------|--|-------------------------------------|------------------------------------|
| TO-1             | COV's (80 a 200°C)                                     | Adsorbente sólido Tenax®            | GC/EM                              |
| TO-2             | COV's (-15 a 120°C)                                    | Adsorbente de tamizado molecular    | CG/EM                              |
| TO-3             | COV's (-10 a 200°C)                                    | Trampa criogénica                   | CG/FID                             |
| TO-4A            | Pesticidas/PCBs (semivolátiles)                        | Espuma de poliuretano               | CG/MD                              |
| TO-5             | Aldehídos/Cetonas                                      | Burbujeador de gases (impinger)     | HPLC                               |
| TO-6             | Fosgeno  | Impinger                            | HPLC                               |
| TO-7             | Anilinas (N-Nitrosodimetilamina)                       | Adsorbente                          | GC/EM                              |
| TO-8             | Cresoles/Fenoles                                       | Impinger                            | HPLC                               |
| TO-9A            | Dioxinas   | Espuma de poliuretano               | HPGC/HRMS                          |
| TO-10A           | Pesticidas/PCBs  | Espuma de poliuretano               | CG/MD                              |
| TO-11A           | Aldehídos/Cetonas (formaldehído)                       | Adsorbente                          | HPLC                               |
| TO-12            | Compuestos orgánicos no metano (NMOC)                  | Canister o en línea                 | FID                                |
| TO-13A           | Hidrocarburos aromáticos policíclicos (semi-volátiles) | Espuma de poliuretano               | CG/EM y CG/MD                      |
| TO-14A           | COV's (no polares, -158 a 170°C)                       | Canisters                           | CG/EM y CG/MD                      |
| TO-15            | COV's (polar/no polar, -50 a 170°C)                    | Canisters                           | CG/EM                              |
| TO-16            | COV's  | Monitoreo de trayectoria abierta    | FTIR                               |
| TO-17            | COV's  | Tubos adsorbentes                   | CG /EM/, FID, etc.                 |

<sup>a</sup> GC/EM: Cromatografía de gases/ Espectrometría de Masas.

CG/FID: Cromatografía de gases/ Detector de Ionización de Flama.

HPLC: Cromatografía Líquida de Alta Resolución.

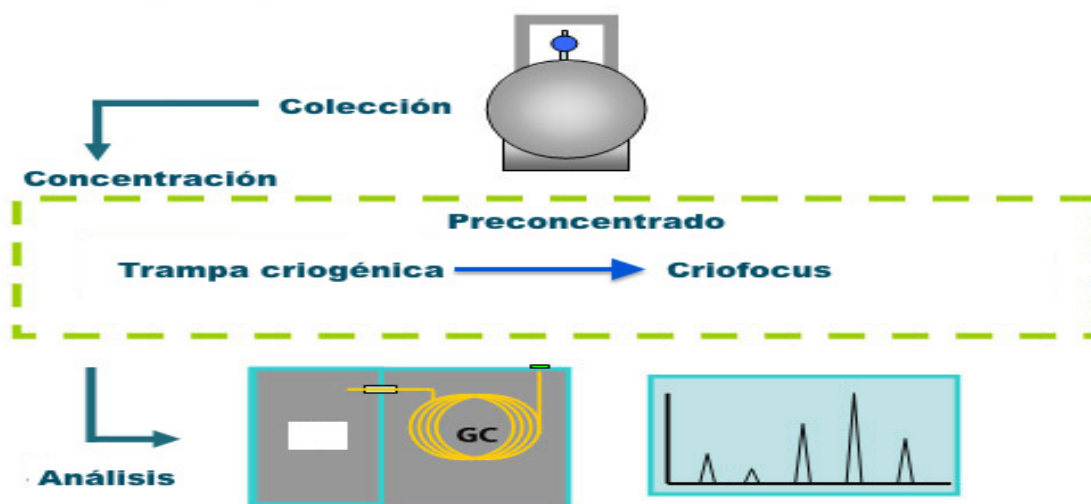
CG/MD: Cromatografía de gases/ Multi-detector.

FTIR: Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier.

HRGC/HRMS: Cromatografía de Gases de Alta Resolución/ Espectrometría de Masas de Alta Resolución.

Fuente: US EPA, 1999.

El cromatógrafo puede estar acoplado a uno o más detectores para identificar y cuantificar los COV's de interés. Los detectores pueden ser específicos y no específicos. Dentro de los detectores específicos se encuentran: espectrómetro de masas con cuadrupolo. Los detectores no específicos incluyen los siguientes: detector de nitrógeno fósforo, detector de ionización por flama (FID), detector de captura electrónica y detector de fotoionización. Dependiendo de la aplicación que se realice será el tipo de detector a usar. Por ejemplo, es recomendable usar un FID o un detector de fotoionización para el análisis de hidrocarburos.



**Figura 3.3.1a.** Diagrama del muestreo y análisis descritos por el método TO-14a (Restek, 2014).

### 3.3.2 Método de muestreo y análisis.

El método realizado fue el TO-14a (US EPA, 1999). Las muestras de aire ambiente fueron colectadas en canisters SilcoCan®<sup>11</sup> de la marca Restek con capacidad de 6 L y que cuentan con electropulido y una capa inerte unida a su superficie interna para asegurar que no se adsorban los compuestos. Previo al muestreo, los canisters se limpiaron con un sistema de limpieza modelo 3100A de la marca Entech Instruments y se dejaron a una presión subatmosférica de 25 in Hg. Las muestras fueron analizadas con un sistema de concentración criogénica modelo 3550A de la

<sup>11</sup> Canisters de acero inoxidable con superficie interna electropulida y con tratamiento Siltek®, que consiste en unir químicamente una capa inerte a la superficie interna del canister.



compañía Nutech acoplado a un cromatógrafo de gases con detector de ionización de flama marca Perkin Elmer modelo Autosystem.

En total, el sistema de análisis estuvo constituido por: conexión de canisters, unidad de concentración criogénica, dispositivo de inyección (criofocus), cromatógrafo de gases con detector de ionización por flama (FID), computadora para el control de la unidad criogénica, computadora con programa TurboChrom (proporcionado por Perkin Elmer) para la integración, visualización y edición de cromatogramas, así como un sistema de limpieza de canisters y computadora para su control.

Los gases de apoyo fueron los siguientes: helio, hidrógeno, nitrógeno, aire extra seco y aire cero, grado cromatográfico. Estándar certificado de calibración marca AirProducts con mezcla de gases benceno, tolueno y 1,3-butadieno, de concentración 1 ppm. Para la unidad criogénica se requirió de nitrógeno líquido comprado en el Instituto de Materiales de la UNAM.

El cromatógrafo de gases contó con una columna Rtx-1® Restek de 60 m con 100% de polisiloxano. Para lograr una correcta separación de los analitos, se programó una rampa de calentamiento similar a la sugerida por el fabricante. El programa de temperatura del horno consistió en lo siguiente: temperatura inicial de 37°C por 4 minutos, rampa de 7°C por minuto hasta 250°C, manteniendo esta temperatura final por 5 minutos.

### **3.3.3 Sitios y programa de muestreo.**

Se realizaron muestreos tipo instantáneos o grab para la evaluación de la concentración de benceno y tolueno en dos sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México. El primer sitio corresponde al área académica de Ciudad Universitaria (Centro de Ciencias de la Atmósfera, CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el segundo sitio corresponde a la gasolinera (GAS) ubicada en la salida principal de la UNAM, campus Ciudad Universitaria (CU). La figura 3.3.3a muestra la ubicación de los dos sitios de muestreo y su cercanía con la estación

Pedregal (PED) del SIMAT, cuyos datos se incluirán en los capítulos siguientes para compararlos con lo obtenido experimentalmente en los dos sitios descritos.

La zona Suroeste (SW) donde fueron realizados los muestreos está localizada a 19°21' latitud y 99°04' longitud. En ambos lugares las muestras ambientales se obtuvieron a las 8:30 de la mañana. Para el caso de la zona académica, las muestras se obtuvieron en la azotea del edificio del CCA y dirigiéndose hacia el norte, que es de donde vienen las corrientes de aire. En la gasolinera, que es un sitio con potencial de emisión de COV's, las muestras se obtuvieron lo más cercano posible a la toma de gasolina del automóvil, justo cuando se estaba despachando la gasolina.



**Figura 3.3.3a.** Ubicación de los sitios de muestreo experimental y de la estación de monitoreo PED (Googlemaps, 2014).

El muestreo se realizó cada dos días en ambos sitios, abarcando del miércoles 7 al lunes 19 de mayo de 2014. Para poder determinar la incertidumbre en el muestreo, se realizó muestreo por duplicado. De este modo, se obtuvieron 2 muestras de cada sitio para cada día de la semana, teniendo en total 4 muestras por día o por serie de muestreo.

**Tabla 3.3.1b.** Calendario de muestreo.

| MAYO 2014 |        |           |        |         |        |         |
|-----------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| LUNES     | MARTES | MIÉRCOLES | JUEVES | VIERNES | SÁBADO | DOMINGO |
| 5         | 6      | 7 M       | 8      | 9 M     | 10     | 11 M    |
| 12        | 13 M   | 14        | 15 M   | 16      | 17 M   | 18      |
| 19 M      | 20     | 21        | 22     | 23      | 24     | 25      |

M: Día de muestreo.

### Aseguramiento y control de calidad.

Para asegurar la calidad de los datos durante el muestreo y análisis se aplicaron los siguientes criterios:

- Calibración del equipo. Se realizó una curva de calibración multipunto del gas estándar para benceno y tolueno (Anexo A2), usando un calibrador de dilución dinámica de la marca Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, modelo T700. La concentración de las muestras se calculó considerando los volúmenes indicados en el manual de la unidad criogénica (Graseby Nutech, 1993) para los loops de muestra (5.3 mL) y estándar (2.4 mL).

La composición del gas estándar se presenta en la tabla 3.3.1c (determinada por CG/FID), cuya mezcla consistió de: benceno, tolueno y 1,3-butadieno. Este último se está utilizando para realizar otro proyecto de la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) en el CCA, UNAM. El cilindro (número EB00045453) con número de referencia 126-400286572-1 indicó una vida útil de la mezcla de 12 meses, siendo la fecha de caducidad el 6 de diciembre de 2014.

**Tabla 3.3.1c.** Composición del gas estándar.

| COMPUESTO   | CONCENTRACIÓN (ppm) |
|---|---------------------|
| 1,3-butadieno   | 0.994               |
| Benceno (intervalo de mezcla: $\pm 30$ ppb;<br>precisión analítica relativa: $\pm 20\%$ ) | 1.020               |
| Tolueno   | 1.008               |
| Nitrógeno   | Balance             |

b) Verificación de los tiempos de retención y la respuesta para cada día de análisis. Al final de cada día de análisis de muestras, se analizó el gas estándar para determinar la variación de los tiempos de retención y la respuesta para cada compuesto (Tabla 3.3.1d). Con pruebas anteriores se determinó que la altura fue un mejor parámetro de respuesta para este trabajo.

**Tabla 3.3.1d.** Promedio y desviación estándar de la respuesta de gas estándar para benceno y tolueno.

| Compuesto | Tiempo de retención |                     | Cuentas de altura |                     |
|-----------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
|           | Promedio            | Desviación estándar | Promedio          | Desviación estándar |
| Benceno   | 12.595              | 0.069               | 101330.97         | 5774.50             |
| Tolueno   | 16.210              | 0.054               | 128888.95         | 8751.20             |

c) Se analizaron blancos con gas de dilución (aire cero) y con nitrógeno para verificar que las líneas por donde pasa la muestra estuvieran limpias (Anexo A2).

d) Limpieza de canisters. Antes de los muestreos, se realizó la limpieza de todos los canisters, que consistió de 10 ciclos de limpieza a 100°C. El equipo usado para su limpieza utiliza un horno (donde se pueden colocar hasta 12 canisters) acoplado a dos bombas que se encargan de extraer el aire contenido en cada canister. Después de extraer el aire, se hace pasar nitrógeno humidificado para enjuagar la superficie interna y que es removido al final de cada ciclo de limpieza. La limpieza se realizó en lotes de 6 canisters. Para verificar que estuvieran limpios, se analizó el nitrógeno contenido en el último ciclo de limpieza de uno de los canisters en cada lote (Anexo A2).

- e) Se determinó la sensibilidad del método analítico calculando los límites de detección (UATMP, 1999). Para el benceno se tuvo un límite de detección de 0.38 ppm y un límite de cuantificación de 1.28 ppm. Para el tolueno el límite de detección fue de 4.63 ppm y el de cuantificación fue de 15.44 ppm.
- f) Validación de los resultados. Se determinó la precisión de los datos con la Diferencia Porcentual Relativa (RPD, por sus siglas en inglés), un indicador usado en el monitoreo de compuestos tóxicos en aire urbano (UATMP, 1999) y cuya ecuación es la siguiente:

$$RPD = \frac{|x_1 - x_2|}{x} (100)$$

$x_1$ : concentración de un compuesto en aire ambiente de una muestra.

$x_2$ : concentración del mismo compuesto en la réplica de un análisis o el duplicado de una muestra.

$x$ : promedio aritmético entre  $x_1$  y  $x_2$ .

Usando esta ecuación, los compuestos que presenten valores bajos de RPD tienen muy poca variación y, por tanto, una mejor precisión. Valores del orden del 20% o menores son considerados excelentes (UATMP, 1999).

Para determinar la RPD se realizó muestreo por duplicado (precisión del muestreo y del análisis) y análisis por réplica (análisis de un mismo canister para cada día y cada sitio para determinar la precisión analítica). Se obtuvieron valores para la precisión analítica de 2.12% y para la precisión de muestreo y analítica de 9.31%. Es importante mencionar que aunque son valores muy buenos, los valores de RPD pueden variar dependiendo del número de datos que se tengan, por lo que el hecho de tener una campaña de muestreo con pocos datos influyó en los valores de RPD.

## 4. RESULTADOS

## 4.1 Concentración de benceno y tolueno durante las Campañas I, II y III realizadas en la SCA del CCA, UNAM.

La Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del CCA en colaboración con el CENICA han realizado dos campañas de muestreo que incluyen la determinación de benceno y tolueno en el CCA, así como en una gasolinera de la zona suroeste (SW) de la ZMCM. Las características de las campañas se resumen en la tabla 4.1a. De las primeras dos campañas, se pudo acceder a las bases de datos para realizar el análisis correspondiente. La campaña III correspondió tanto el muestreo como el análisis a la SCA, CCA-UNAM y es la más reciente llevada a cabo.

**Tabla 4.1a.** Características de las campañas de muestreo realizadas por el CCA.

| Campaña | Periodo   | N  | Sitios   | Observaciones  |
|---------|---|----|--|--|
| I       | 12 de agosto al 14 de noviembre de 1999<br>10 de julio de 2000 al 20 de febrero de 2001 | 33 | CCA (CU)<br>Gasolinera (GAS)<br>Unidad Habitacional (UH) | Se obtuvo la concentración de 13 COV's en la zona SW de la ZMCM. Método TO-15 de la US EPA. Muestreo grab e integrado (24 horas) cada 6 días para cubrir todos los días de la semana.                  |
| II      | Junio 2003 a abril de 2004  | 35 | UAM-I (SE)<br>CCA (SW)                                   | Se obtuvo la concentración de 13 COV's. Método TO-15 de la US EPA. Muestreo cada 6 días. Muestreo cada hora de 7:00 a 19:00 hrs en SW e integrado (24 horas) en SE.                                    |
| III     | 7 a 19 de mayo de 2014  | 7  | CCA (CU)<br>Gasolinera (GAS)                             | Se obtuvo la concentración de 3 COV's en dos sitios de la zona SW de la ZMCM. Método TO-14a de la US EPA. Muestreo cada 2 días para cubrir todos los días de la semana. Muestreo grab en ambos sitios. |

### 4.1.1 Concentración de benceno y tolueno durante la Campaña I.

Las conclusiones más importantes de esta campaña se pueden resumir en lo siguiente (Sosa, 2001):

- Los niveles obtenidos en la gasolinera son mucho mayores que los encontrados para el CCA.
- Se observó un aumento de las concentraciones los sábados en la gasolinera. Esto se atribuyó a una mayor actividad durante la mañana en este sitio y al

hecho de que este día no se aplicaba el programa “Hoy no circula”. A partir del año 2008, este programa se extendió a los días sábados como consecuencia de los altos niveles de contaminantes atmosféricos que se presentaban en este día. Cabe destacar que el muestreo que se hizo en la gasolinera fue representativo del momento en que se cargó combustible a nivel del cliente y estos muestreos se llevaron a cabo a las 8:00 AM. Lo anterior, puede justificar el incremento en la concentración de las muestras tomadas durante los fines de semana, conjuntamente con una mayor actividad los sábados.

- Existe una mayor influencia en las concentraciones por las actividades que generan emisiones de COV's que por las condiciones meteorológicas.
- La concentración promedio de benceno (Tabla 4.1.1a) obtenida a partir de los muestreos integrados (24 horas) fue mayor que la norma de calidad del aire establecida en países como Japón y Reino Unido que estipulan 1 ppb promedio anual en muestreos 24 horas, aún cuando el CCA se encuentra alejado de avenidas de intenso tráfico vehicular.

**Tabla 4.1.1a.** Concentraciones promedio (ppb) de benceno y tolueno por sitio de muestreo para los diferentes días de la semana durante la Campaña I.

| Sitio          | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
|----------------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| <b>BENCENO</b> |       |        |           |        |         |        |         |
| <b>CCAI</b>    | 2.42  | 2.09   | 1.06      | 1.83   | 1.80    | 1.39   | 1.35    |
| <b>CCA</b>     | 3.80  | 3.13   | 2.70      | 3.44   | 2.69    | 3.00   | 2.91    |
| <b>GAS</b>     | 32.73 | 30.34  | 23.44     | 12.91  | 7.23    | 47.96  | 26.89   |
| <b>TOLUENO</b> |       |        |           |        |         |        |         |
| <b>CCAI</b>    | 9.92  | 10.31  | 4.71      | 7.38   | 6.76    | 8.71   | 6.01    |
| <b>CCA</b>     | 11.88 | 13.20  | 10.39     | 13.61  | 12.00   | 13.97  | 17.23   |
| <b>GAS</b>     | 80.98 | 100.87 | 61.74     | 56.17  | 29.97   | 147.23 | 118.68  |

CCAI: Muestreo integrado (24 horas) en el CCA.

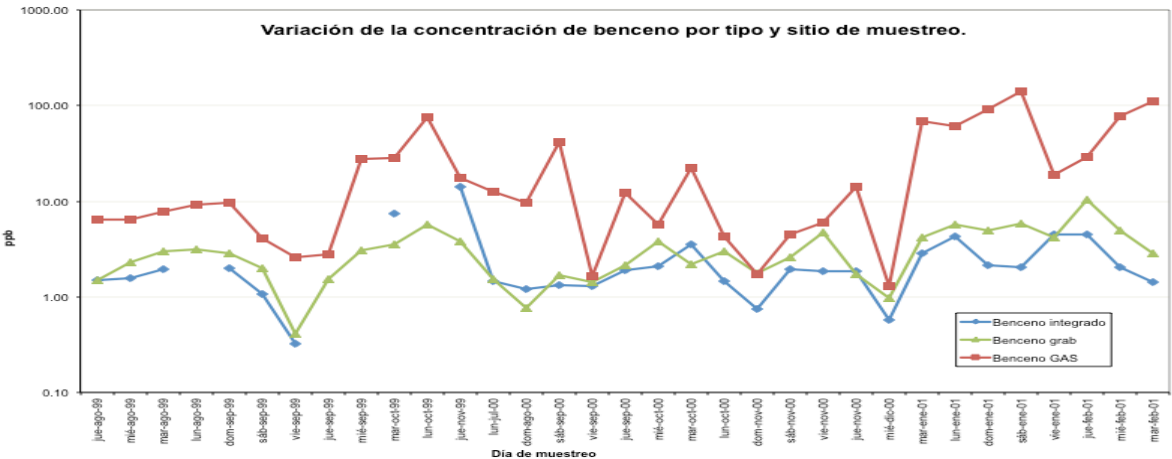
CCA: Muestreo instantáneo en el CCA.

Muestreo en gasolinera.

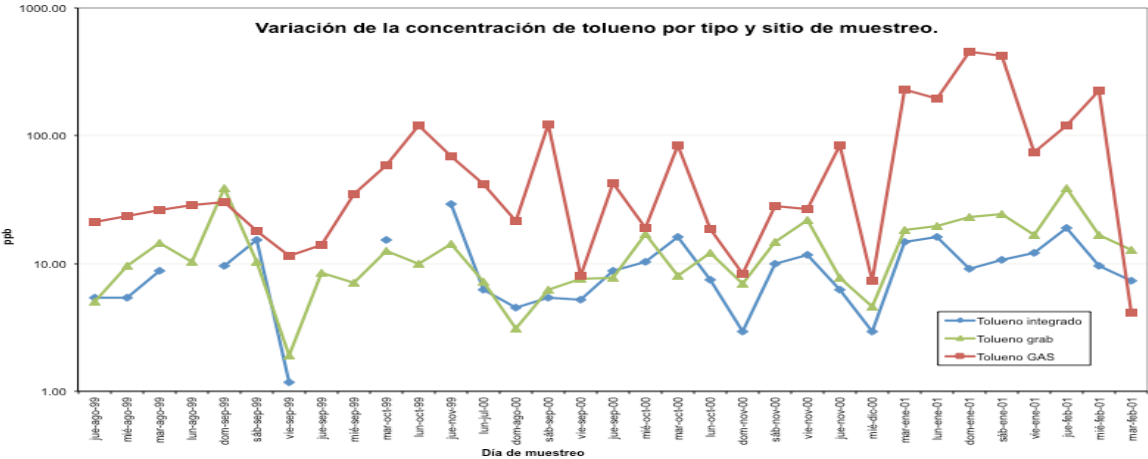
*Fuente: Sosa, 2001.*



Se obtuvo la variación de la concentración de benceno y tolueno en el CCA y en la gasolinera comparando entre el tipo de muestreo grab y el integrado (Figuras 4.1.1a y 4.1.1b). Se puede observar que el muestreo grab es generalmente mayor al integrado debido a que las muestras se tomaron en la mañana, cuando las emisiones suelen ser mayores y al tener una medición de todo el día (integrado), este muestreo considerará aún los periodos de mínima concentración en las horas de menor actividad. Al comparar la línea obtenida para benceno en muestreo grab con la obtenida para gasolinera, se puede observar que tienen un comportamiento similar, especialmente en los primeros días de muestreo. Para el caso del tolueno, no se observa este comportamiento.



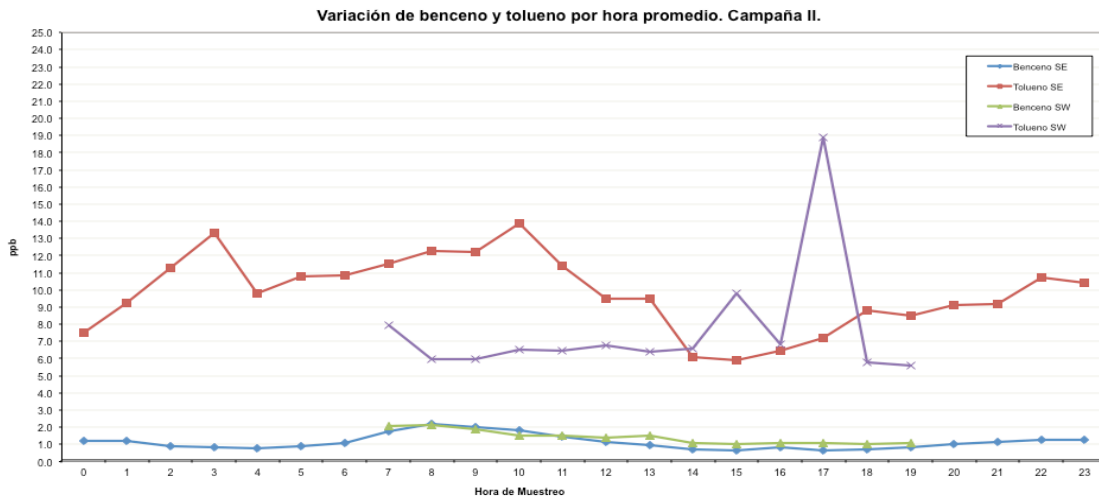
**Figura 4.1.1a.** Variación de la concentración de benceno por sitio de muestreo: CCA (integrado y grab) y gasolinera (GAS) durante la Campaña I.



**Figura 4.1.1b.** Variación de la concentración de tolueno por sitio de muestreo: CCA (integrado y grab) y gasolinera (GAS) durante la Campaña I.

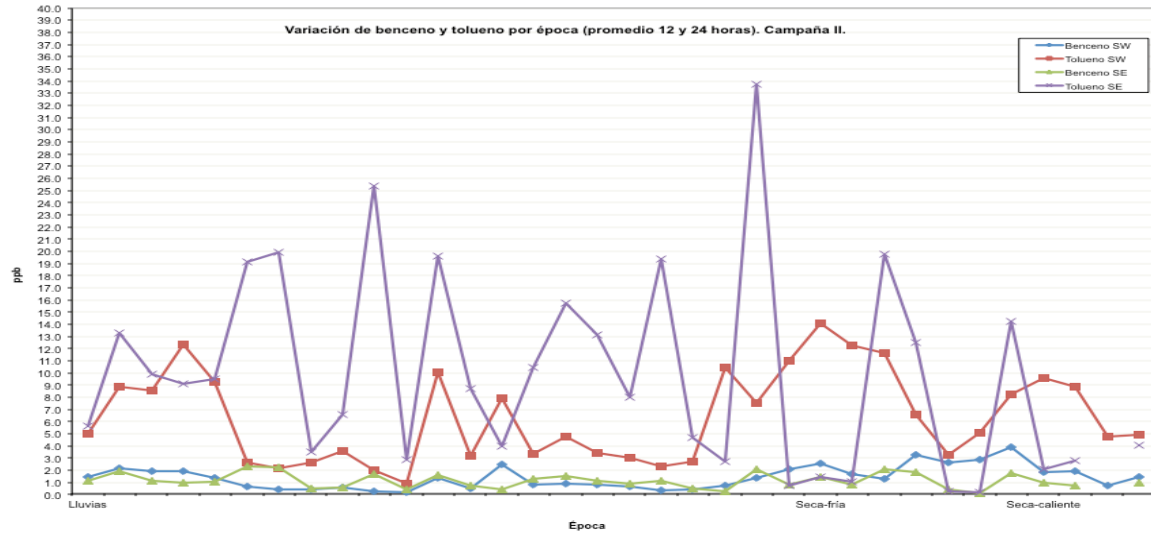
#### 4.1.2 Concentración de benceno y tolueno durante la Campaña II.

Para la campaña II se obtuvo el promedio de cada hora (Figura 4.1.2a) durante todas las series de muestreo con el fin de tener la variación temporal de benceno y tolueno en el sitio ubicado en el suroeste SW (CCA) y en el sitio ubicado en el sureste SE (UAM Iztapalapa).



**Figura 4.1.2a.** Variación de benceno y tolueno por hora promedio en el CCA durante la Campaña II.

Durante esta campaña fue posible muestrear en algunos días de las tres épocas observadas en la ZMCM. La Figura 4.1.2b muestra el promedio (12 horas para suroeste y 24 horas para sureste) de las concentraciones de benceno y tolueno en ambos sitios de muestreo durante las tres épocas. Se observa un ligero aumento de las concentraciones de ambos en el SW durante las épocas secas. Los niveles de benceno son de la misma magnitud a lo largo de todas las épocas y en los dos sitios de muestreo con máximos menos pronunciados que los de tolueno. Junto con la Figura 4.1.2a esto confirmaría que el comportamiento del tolueno está muy influido por las actividades realizadas en cada día de muestreo y a cierta hora en específico.



**Figura 4.1.2b.** Variación de benceno y tolueno por época en el SE y SW durante la Campaña II. Concentración promedio (12 horas).

#### 4.1.3 Concentración de benceno y tolueno durante la Campaña III.

Se obtuvieron las concentraciones de benceno y tolueno para cada día de la semana, resultado del muestreo descrito en la Tabla 4.1a. La Tabla 4.1.3a presenta un comparativo de las concentraciones de benceno determinadas en el CCA. Para la Campaña I se consideraron los valores del muestreo instantáneo, mientras que para la Campaña II se consideraron los valores correspondientes al muestreo realizado a las 8:00 AM. Además se incluyen las concentraciones determinadas en la gasolinera durante las campañas I y III, cuyos muestreos también fueron instantáneos.

**Tabla 4.1.3a.** Concentración promedio diaria (ppb) de benceno en el CCA y gasolinera durante las Campañas I, II y III.

| CONCENTRACIÓN DE BENCENO (PPB) |       |       |        |       |      |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------|-------|
| SITIO                          | L     | M     | M      | J     | V    | S     | D     | PROM. |
| CCA I                          | 3.80  | 3.13  | 2.70   | 3.44  | 2.69 | 3.00  | 2.91  | 3.10  |
| CCA II                         | 2.43  | 1.82  | 2.37   | 2.72  | 2.18 | 2.39  | 1.41  | 2.19  |
| CCA III                        | 5.41  | 2.65  | 3.96   | 0.94  | 4.55 | 4.09  | 1.67  | 3.32  |
| GAS I                          | 32.73 | 30.34 | 23.44  | 12.91 | 7.23 | 47.96 | 26.89 | 25.93 |
| GAS III                        | 81.14 | 26.65 | 103.94 | 2.83  | 7.76 | 12.46 | 30.17 | 37.85 |

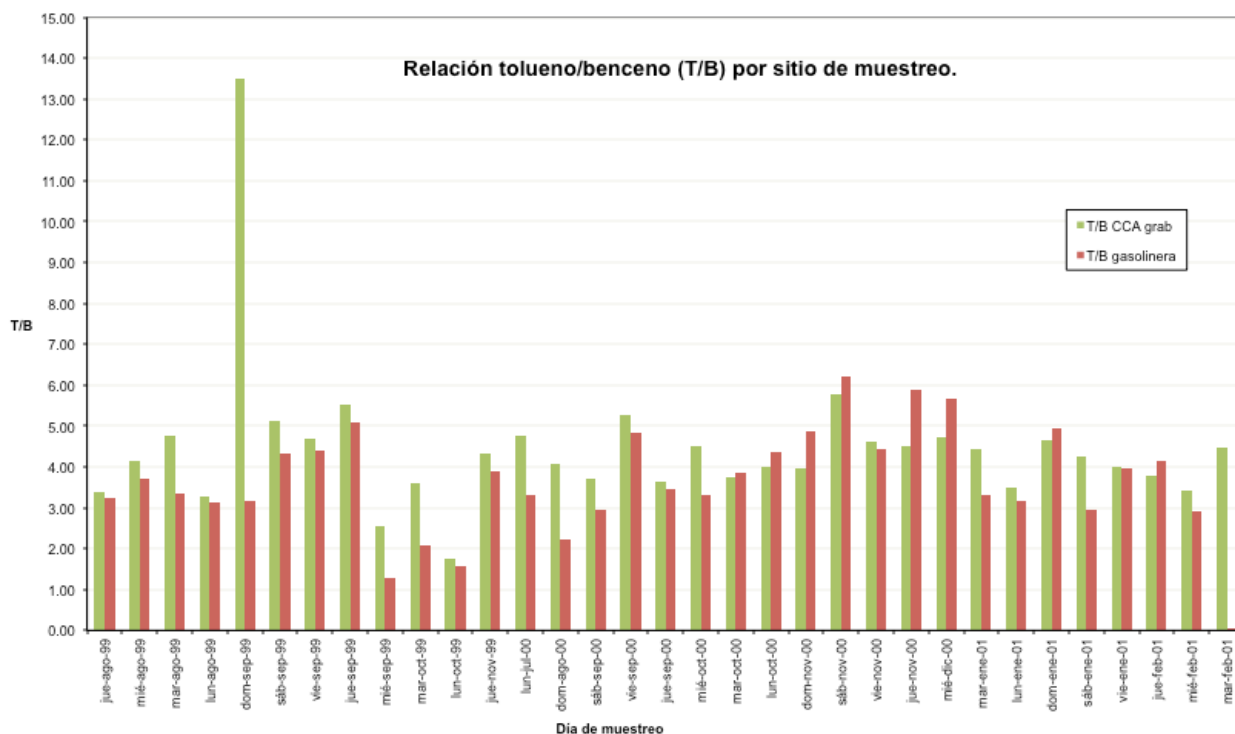
De manera similar al benceno, la Tabla 4.1.3b presenta las concentraciones de tolueno durante las 3 campañas de muestreo.

**Tabla 4.1.3b.** Concentración promedio diaria (ppb) de tolueno en el CCA y gasolinera durante las Campañas I, II y III.

| CONCENTRACIÓN DE TOLUENO (PPB) |        |        |        |       |       |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| SITIO                          | L      | M      | M      | J     | V     | S      | D      | PROM.  |
| CCA I                          | 11.88  | 13.20  | 10.39  | 13.61 | 12.00 | 13.97  | 17.23  | 13.18  |
| CCA II                         | 8.99   | 7.95   | 12.59  | 7.94  | 6.47  | 6.21   | 8.62   | 8.39   |
| CCA III                        | 17.04  | 7.24   | 12.93  | 2.64  | 13.54 | 23.96  | 6.91   | 12.04  |
| GAS I                          | 80.98  | 100.87 | 61.74  | 56.17 | 29.97 | 147.23 | 118.68 | 85.09  |
| GAS III                        | 197.08 | 158.61 | 198.70 | 7.81  | 21.11 | 65.56  | 188.15 | 119.57 |

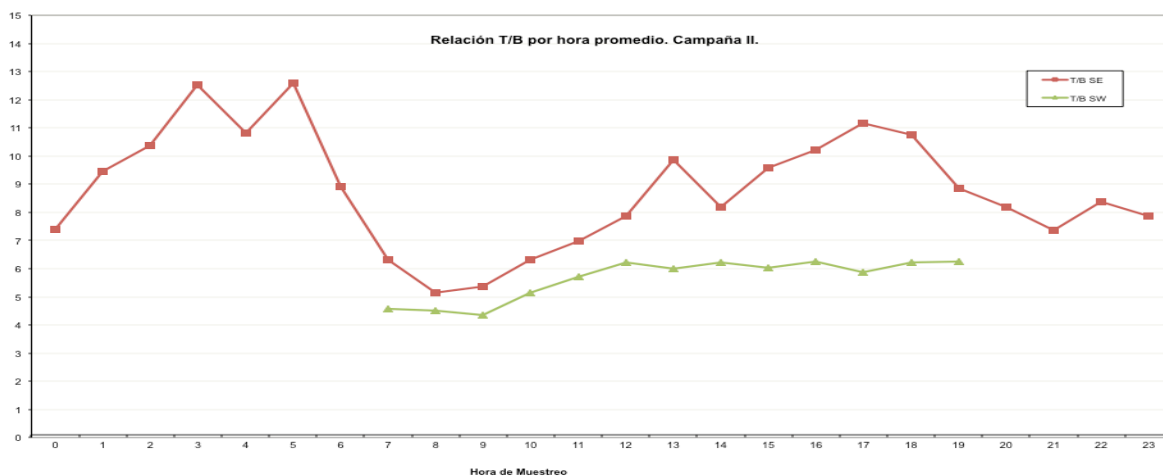
#### 4.1.4 Relación tolueno/benceno (T/B) durante las Campañas I, II y III.

La Figura 4.1.4a muestra una comparación de la relación T/B para el muestreo en el CCA y en la gasolinera en la Campaña I.



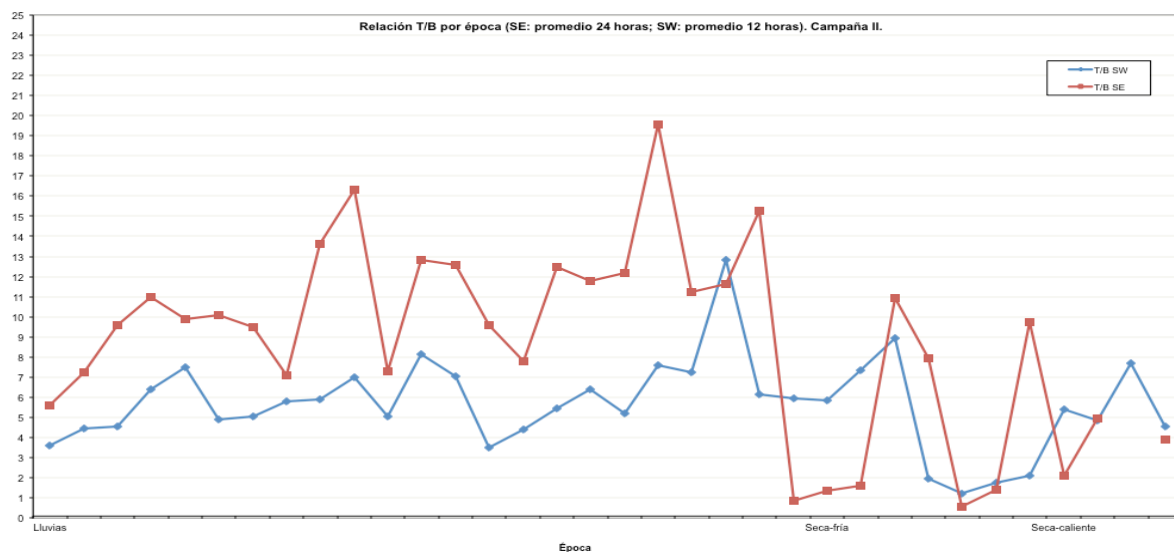
**Figura 4.1.4a.** Relación T/B por lugar de muestreo: CCA y gasolinera durante la Campaña I.

De la Campaña II se obtuvo la relación T/B por hora promedio de muestreo (Figura 4.1.4b).



**Figura 4.1.4b.** Relación T/B por hora promedio en el CCA (SW) y en la UAM Iztapalapa (SE) durante la Campaña II.

La figura 4.1.4c muestra la variación por época de la relación T/B en el CCA (SW) y en la UAM Iztapalapa (SE).



**Figura 4.1.4c.** Relación T/B por época en el CCA (SW, promedio 12 horas) y en la UAM Iztapalapa (SE, promedio 24 horas) durante la Campaña II.

La Tabla 4.1.4a. presenta una comparación de la relación T/B determinada durante las tres Campañas de muestreo para cada día de la semana, calculada a partir de los datos presentados anteriormente en las Tablas 4.1.3a y 4.1.3b.

**Tabla 4.1.4a.** Relación T/B diaria para CCA y gasolinera (GAS) durante las Campañas I, II y III.

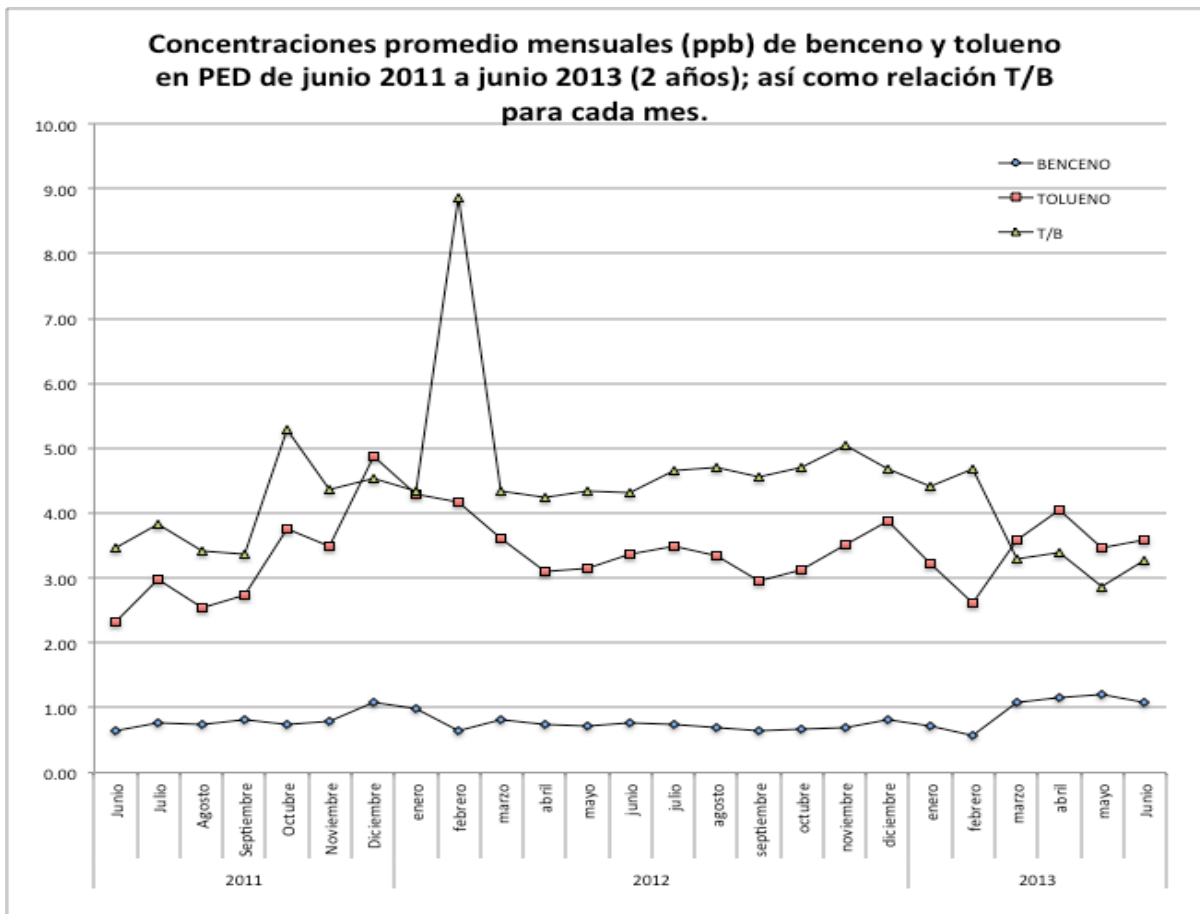
| RELACIÓN TOLUENO/BENCENO (T/B) |      |      |      |      |      |      |      |          |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| SITIO                          | L    | M    | M    | J    | V    | S    | D    | PROMEDIO |
| CCA I                          | 3.13 | 4.22 | 3.85 | 3.96 | 4.46 | 4.66 | 5.92 | 4.31     |
| CCA II                         | 4.99 | 6.62 | 7.80 | 5.54 | 5.12 | 4.61 | 6.85 | 5.93     |
| CCA III                        | 3.15 | 2.74 | 3.26 | 2.81 | 2.98 | 5.86 | 4.14 | 3.56     |
| GAS I                          | 2.47 | 3.32 | 2.63 | 4.35 | 4.15 | 3.07 | 4.41 | 3.49     |
| GAS III                        | 2.43 | 5.95 | 1.91 | 2.76 | 2.72 | 5.26 | 6.24 | 3.90     |

## 4.2 Estación Pedregal (PED).

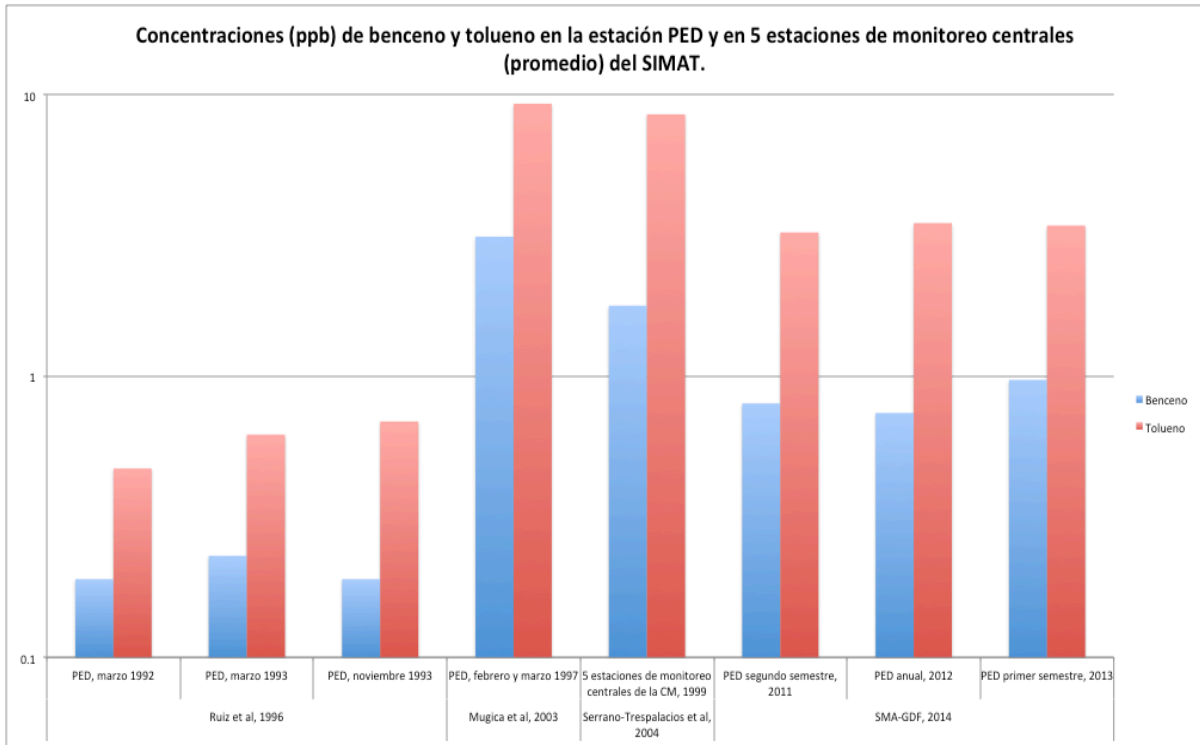
Como se mencionó en el Capítulo 3, el SIMAT cuenta con una base de datos donde se reportan las concentraciones promedio de 24 horas de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno en 5 estaciones: San Agustín (SAG), FES Acatlán (FES), Merced (MER), UAM Iztapalapa (UIZ) y Pedregal (PED); abarcando desde 2011 hasta 2013. Se analizaron los datos disponibles para PED, obteniéndose lo observado en la Figura 4.2a.

De acuerdo al “Informe técnico de Monitoreo y Evaluación de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” (SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI 2008), durante el periodo de septiembre de 2005 a septiembre de 2006 la estación PED presentó las menores concentraciones de COV’s totales comparadas con el norte y el centro. De entre todas las épocas, en la seca-fría se presentaron las mayores concentraciones de COV’s totales, presentándose en PED en esta misma época las mayores concentraciones de aromáticos. También fue en esta estación de monitoreo que se presentó la mayor abundancia relativa de compuestos tóxicos (entre los que se encuentran el tolueno y el benceno).

El benceno presentó un promedio anual en la ZMCM de 1.66 ppb (SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI, 2008), que es mayor a lo presentado para los años 2011 a 2013 en la Figura 4.2a. Por otro lado, si se comparan estas concentraciones con lo reportado en otros estudios (Figura 4.2b), se observa que a principios de los 90's las concentraciones de benceno y tolueno (Ruiz et al, 1996) eran menores que las que se reportan actualmente. También se observa que en 1997 se tuvieron las mayores concentraciones de benceno y tolueno, comparables sólo con el promedio en 5 estaciones de monitoreo centrales (MER, FAC, SAG, Plateros y UIZ) reportado por Serrano-Trespalcios y colaboradores (2007) para el año 1999.



**Figura 4.2a.** Variación de las concentraciones promedio mensuales de benceno y tolueno y relación T/B en la estación PED durante 2 años (junio 2011 a junio 2013).



**Figura 4.2b.** Concentración de benceno y tolueno en la estación de monitoreo PED y promedio en 5 estaciones centrales de la ZMCM.

Respecto a la relación T/B, se observa que ésta se ha mantenido en un intervalo de 3.5 a 5.4, con excepción de febrero de 2012, donde influyó una alta concentración de tolueno asociada a una de las más bajas concentraciones de benceno. Por otro lado, a partir de noviembre de 2012 esta relación disminuyó como reflejo de un aumento en las concentraciones de benceno (Figura 4.2a).



## 5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

## **5.1 Concentración de benceno y tolueno durante las Campañas I, II y III, realizadas en la SCA del CCA, UNAM.**

Los resultados de la Campaña I son similares a los de otros estudios que usaron el mismo tipo de muestreo (Tabla 5.1.a). La influencia del tipo de muestreo se puede observar aún más si se comparan los resultados de un mismo estudio usando diferentes metodologías. Tal es el caso de los valores reportados por Ortiz et al (2002) usando monitores 3M y canisters, en los mismos sitios y con el mismo tiempo de muestreo. En este caso se obtuvo un valor similar para benceno y un poco más alto para tolueno, comparados con los resultados para CCA en muestreo instantáneo. La diferencia al compararlo con el muestreo integrado podría ser debida a menores niveles de concentración (menor actividad) que se pudieran observar en un horario nocturno y que no se abarcan en el estudio de Ortiz. Muestreos en tres diferentes medios de transporte realizados en el año 2002 (Gómez-Perales et al, 2004) mostraron valores más altos aunque de la misma magnitud, comparados con los resultados de muestreo grab e integrado en el CCA. Esta diferencia es de esperarse ya que al estar en alguno de estos medios de transporte, se está expuesto a mayores fuentes de emisión de COV's y, por lo tanto, a mayores concentraciones de éstos. Esta exposición a fuentes de emisión también puede verse reflejada en los resultados de exposición personal tanto ocupacional como no ocupacional reportados en otros estudios.

En dos estudios anteriores (Meneses et al, 1999 y Romieu et al, 1999) se reportan niveles en gasolineras usando monitores pasivos. Al comparar los resultados de estos dos estudios con lo obtenido para la Campaña I, se tiene que los niveles en los estudios son mucho mayores (casi tres veces más) que los obtenidos por la SCA (Tabla 5.1b). Un tercer estudio (Cruz-Núñez et al., 2003), donde se evalúa la eficacia de los SRV implementados por la NOM-092-SEMARNAT-1995, comparó sus resultados con lo obtenido por Romieu et al (1999), haciendo notar el efecto de estos SRV, así como de la reducción de benceno en las gasolinas mexicanas.

**Tabla 5.1a.** Comparación de los resultados obtenidos en el CCA durante la campaña I con otros estudios realizados en fechas similares.

| Referencia                                    | Periodo                                      | Zona                    | Concentración promedio (ppb) |                    | Tipo de muestreo   |
|---|--|-------------------------|------------------------------|--------------------|--|
|   |  |                         | Benceno                      | Tolueno            |  |
| <b>Bravo et al, 2001</b>                      | 12 agosto a 14 noviembre 1999                | CCA grab                | 3.11                         | 13.19              | En canisters siguiendo el método TO-15 de la US EPA. CCA grab: Muestreo instantáneo en hora pico matutina (7:00-8:00 am). CCA integrado: Muestreo integrado de 24 horas. |
| <b>Bravo et al, 2002a, 2002b</b>              | 10 julio 2000 a 20 febrero 2001              | CCA integrado           | 1.66                         | 7.50               |  |
| <b>Sosa, 2001</b><br><b>Sosa, et al, 2009</b> |  |                         |                              |                    |  |
| <b>Ortiz et al, 2002</b>                      | Del 16 al 20 de noviembre de 1998            | Personal                | 13.51                        | 78.91              | En canisters siguiendo el método TO-14 de la US EPA, con un tiempo de muestreo de 12 horas (8:00 a 20:00 horas).   |
|   |  | Monitor 3M <sup>A</sup> | 6.54                         | 32.67              |  |
|   |  | Canister <sup>A</sup>   | 3.35                         | 17.59              |  |
| <b>Romieu et al, 1999</b>                     | Una jornada laboral en 1996 <sup>B</sup>     | Calle                   | 24.11                        | 42.49              | Uso de monitores pasivos de vapores orgánicos (badges). Muestreo por 6 horas.  |
|   |  | Gasolinera              | 97.08                        | 180.57             |  |
|   |  | Oficina                 | 13.78                        | 124.81             |  |
| <b>Serrano-Trespacios et al, 2004</b>         | De marzo 1998 a febrero 1999                 | Casa                    | 1.82 <sup>C</sup>            | 9.93 <sup>C</sup>  | En tubos de desorción térmica, similares a los tubos tipo 2 descritos en el método TO-17 de la US EPA. Muestreo 24 horas.  |
|   |  |                         | 2.00 <sup>D</sup>            | 16.38 <sup>D</sup> |  |
|   |  | Personal                | 3.29                         | 23.58              |  |
| <b>Gómez-Perales et al, 2004</b>              | Del 6 de mayo al 1 de junio de 2002.         | Microbús <sup>E</sup>   | 8                            |                    | Muestreo en canisters siguiendo el método TO-14 de la US EPA. Horario matutino: 6:30-9:30 hrs. Horario vespertino: 17:30-20:30 hrs.                                      |
|   |  | Microbús <sup>F</sup>   | 9                            |                    |  |
|   |  | Microbús <sup>G</sup>   | 7                            |                    |  |
|   |  | Autobús <sup>E</sup>    | 7                            |                    |  |
|   |  | Autobús <sup>F</sup>    | 5                            |                    |  |
|   |  | Autobús <sup>G</sup>    | 6                            |                    |  |
|   |  | Metro <sup>E</sup>      | 4                            |                    |  |
|   |  | Metro <sup>F</sup>      | 4                            |                    |  |
| <b>Tovalín-Ahumada y Whitehead, 2007</b>      | Abril y mayo de 2002 (18 días)               | ZMCM                    | 18.48 <sup>C</sup>           | 67.98 <sup>C</sup> | Monitores 3M de vapores orgánicos. Promedio de tiempo de muestreo ocupacional: 14.8 horas. Promedio de tiempo de muestreo no ocupacional: 29.4 horas.                    |
|   |  | ocupacional             | 3.76 <sup>D</sup>            | 59.22 <sup>D</sup> |  |
|   |  | ZMCM no ocupacional     | 13.78 <sup>C</sup>           | 21.24 <sup>C</sup> |  |
|   |  | ocupacional             | 3.76 <sup>D</sup>            | 22.31 <sup>D</sup> |  |
|   |  | Puebla                  | 3.44 <sup>C</sup>            | 12.48 <sup>C</sup> |  |
|   |  | ocupacional             | 1.88 <sup>D</sup>            | 21.77 <sup>D</sup> |  |
| <b>Velasco et al, 2006</b>                    | MCMA-2002 (7 al 24 de febrero de 2002).      | Urbano                  | 3.17                         | 13.45              | En canisters siguiendo los métodos TO-14 y TO-15 de la US EPA. Muestreo matutino (entre 6:00 y 9:00 horas).  |
|   |  | Rural                   | 0.80                         | 1.89               |  |
| <b>Velasco et al, 2007</b>                    | MCMA-2003 (1 de abril al 5 de mayo de 2003). | Industrial              | 6.07                         | 30.35              |  |

<sup>A</sup> Promedio de todos los lugares cercanos a una de las 5 estaciones de monitoreo ubicadas en la zona intermedia de la ZMCM, abarcando los 4 puntos cardinales y el centro.

<sup>B</sup> Sin información disponible.

<sup>C</sup> Exteriores

<sup>D</sup> Interiores.

<sup>E</sup> Matutino: am.

<sup>F</sup> Vespertino: pm.

<sup>G</sup> Promedio matutino y vespertino.

Así, se tiene que las concentraciones reportadas por Meneses et al (1999) y por Romieu et al (1999) corresponden a gasolineras donde aún no se implementaban estas dos medidas de control de COV's. Considerando que el estudio realizado por Cruz-Núñez et al (2003) se realizó en fechas similares a las de la SCA y que se sabe que la gasolinera reportada en la Campaña I sí contaba con un SRV, las diferencias entre los niveles reportados pueden ser debidas al tipo de muestreo (forma de tomar la muestra y horario) y a la presencia del sistema de recuperación de vapores en ambas estaciones de servicio.

**Tabla 5.1b.** Comparación de los resultados obtenidos en la gasolinera durante la Campaña I con otros estudios realizados.

| Referencia                       | Periodo   | Zona                                      | Concentración promedio (ppb) |                    | Tipo de muestreo  |
|----------------------------------|---|---|------------------------------|--------------------|---|
|                                  |   |   | Benceno                      | Tolueno            |   |
| <b>Sosa, 2001</b>                | Agosto a noviembre 1999 y julio 2000 a febrero 2001 | Gasolinera ubicada al suroeste de la ZMCM | 25.83                        | 84.87              | En canisters siguiendo el método TO-15 de la US EPA. Muestreo instantáneo en hora pico matutina (7:00-8:00 am). Valor correspondiente a muestreo nivel despachador. |
| <b>Meneses et al, 1999</b>       | Una jornada laboral en 1996 <sup>A</sup>            | Gasolinera                                | 112.58 <sup>B</sup>          |                    | Monitores pasivos de vapores orgánicos 3M (badges). Muestreo promedio de 6 horas.   |
|                                  |   | Calle                                     | 26.21                        |                    |   |
|                                  |   | Oficina                                   | 14.15                        |                    |   |
| <b>Romieu et al, 1999</b>        | Una jornada laboral en 1996 <sup>A</sup>            | Gasolinera                                | 97.08                        | 180.57             | Uso de monitores pasivos de vapores orgánicos (badges). Muestreo por 6 horas.   |
|                                  |   | Calle                                     | 24.11                        | 42.49              |   |
|                                  |   | Oficina                                   | 13.78                        | 124.81             |   |
| <b>Cruz-Núñez et al, 2003</b>    | Septiembre a diciembre de 2000                      | Nueve gasolineras de la ZMCM.             | 1.10 <sup>C</sup>            | 64.01 <sup>C</sup> | Muestreadores personales activos (tubos de muestreo). El tiempo de muestreo fue de 2 horas, generalmente de 11:00 a 13:00 hrs.                                      |
|                                  |   | Siete localizadas en el sur.              | 0.76 <sup>D</sup>            | 87.58 <sup>D</sup> |   |
| <b>Shiohara et al, 2005</b>      | Junio y julio de 2002                               | Automóvil                                 | 13.12                        | 40.63              | Muestreo en tubos de carbono teniendo como referencia el método NIOSH 1501, Edición 3. Tiempo de muestreo: hora pico matutina (7:00-9:00 horas).                    |
|                                  |   | Microbús                                  | 10.46                        | 34.52              |   |
|                                  |   | Autobús                                   | 7.39                         | 29.21              |   |
|                                  |   | Metro                                     | 3.57                         | 16.68              |   |
| <b>Wöhrnschimmel et al, 2008</b> | De mayo a agosto de 2004; de agosto a octubre 2005  | Microbús                                  | 18.2                         |                    | En canisters siguiendo el método TO-14a de la US EPA. Muestreo por dos horas, a nivel pasajero en la hora pico matutina (7:30-9:00 horas).                          |
|                                  |   | Autobús                                   | 10.4                         |                    |   |
|                                  |   | Metrobús                                  | 4.0                          |                    |   |

<sup>A</sup> Sin información disponible.

<sup>B</sup> Promedio de todos los ambientes laborales: 75.35 ppb.

<sup>C</sup> Exteriores.

<sup>D</sup> Interiores.

Durante la Campaña II se observó un comportamiento del benceno en el SE y SW muy similar y constante, además carecer de máximos muy pronunciados. El tolueno, en cambio, tuvo un comportamiento muy distinto en ambos sitios, con concentraciones mayores a las de benceno y máximos más pronunciados. Esto quiere decir que las fuentes de emisión de benceno son las mismas para los dos sitios (fuentes móviles), sin que influyan otro tipo de fuentes a lo largo del día y que para el tolueno influyen muchas otras fuentes, teniendo una mayor variación al pasar de las horas; es decir, las actividades específicas de cada hora influyen más sobre las concentraciones de tolueno que de benceno.

Tanto para benceno como para tolueno se observó un aumento en sus concentraciones entre 7:00 y 10:00 de la mañana; esto coincide con los perfiles determinados por Bueno en 2005 y se relaciona con el mayor tráfico vehicular a esas horas matutinas. El tolueno mantuvo niveles de concentración muy altos en el SE, especialmente durante las primeras horas del día. Además de estar relacionado con una mayor actividad industrial en el SE, a comparación con el SW.

Se observó un ligero aumento de las concentraciones de ambos contaminantes en el SW durante las épocas secas. Los niveles de benceno son de la misma magnitud a lo largo de todas las épocas, tanto en SE como en SW, con máximos menos pronunciados que los de tolueno. Esto confirmaría que el comportamiento del tolueno, a comparación del benceno, está muy influido por las actividades realizadas en cada día de muestreo y a cierta hora en específico.

La Tabla 5.1c presenta una comparación sobre algunas actividades económicas y vehículos en circulación en las delegaciones Coyoacán e Iztapalapa. Se observa un número mucho mayor de industrias manufactureras y comercios en la delegación Iztapalapa comparada con la delegación Coyoacán; esto explicaría la mayor cantidad de tolueno observada en la UAM-Iztapalapa. Por otro lado, se observan cantidades similares de vehículos y camiones de pasajeros en circulación en ambos sitios, lo que comprobaría las cantidades similares de benceno observadas.

**Tabla 5.1c.** Registros de algunas actividades económicas y de vehículos en circulación en las delegaciones Coyoacán e Iztapalapa para los años 1998, 2003 y 2008.

| ACTIVIDAD<br>Delegación                                 | AÑO    |        |        |
|---|--------|--------|--------|
|   | 1998   | 2003   | 2008   |
| <b>INDUSTRIAS MANUFACTURERAS</b>                        |        |        |        |
| Coyoacán  | 1311   | 1106   | 1388   |
| Iztapalapa  | 5814   | 5578   | 6573   |
| <b>COMERCIOS</b>  |        |        |        |
| Coyoacán  | 8087   | 8226   | 8795   |
| Iztapalapa  | 32917  | 33678  | 36887  |
| <b>AUTOMÓVILES REGISTRADOS EN CIRCULACIÓN</b>           |        |        |        |
| Coyoacán  | 230365 | 206179 | 292764 |
| Iztapalapa  | 254248 | 228003 | 333522 |
| <b>CAMIONES DE PASAJEROS REGISTRADOS EN CIRCULACIÓN</b> |        |        |        |
| Coyoacán  | 283    | 1325   | 1728   |
| Iztapalapa  | 230    | 1028   | 4389   |

*Fuente: INEGI, 2014.*

En el 2008 se presentó el Informe técnico de Monitoreo y Evaluación de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI) donde se reportaron los resultados de una campaña de muestreo (24 horas, cada 6 días, del 23 de septiembre de 2005 al 26 de septiembre de 2006) para cuantificar las concentraciones atmosféricas de COV's a lo largo de un año en cinco estaciones de monitoreo consideradas representativas de los cuatro puntos cardinales y del centro de la ZMCM (Tlalnepantla, San Agustín, Merced, Pedregal y CENICA). La metodología de muestreo y de análisis fue similar a lo presentado por Ortiz y colaboradores (2002). En este caso, el benceno presentó un promedio anual en las cinco estaciones de monitoreo de 1.66 ppb, que es ligeramente mayor que lo encontrado en el SW y SE (1.1 y 0.90 ppb respectivamente) en el año 2004.

Al realizar la comparación entre las tres campañas realizadas en el CCA, se puede observar que, en promedio, aumentaron las concentraciones de benceno. No obstante, hay que tomar en cuenta que la campaña III fue preliminar, ya que contó con 7 días de muestreo (lunes a domingo), en un periodo de 2 semanas y con una frecuencia de cada 2 días, lo que hace que no se tengan los suficientes datos para

ser estadísticamente significativos. El lunes fue el día que se presentó la concentración más alta en el CCA; para la gasolinera se presentaron valores muy variados entre días, siendo el lunes y el miércoles los días con las concentraciones más altas. Esta variación, presente en la gasolinera y no en el CCA, podría ser debida a la cercanía del canister con el depósito de gasolina del auto; ya que aunque se procuró mantener la misma distancia, en algunas ocasiones no fue posible porque el despachador permanecía deteniendo la pistola despachadora hasta que terminara de suministrar gasolina, dificultando el muestreo en ese momento.

Para el tolueno se observó un aumento de las concentraciones en el CCA y en la GAS a lo largo de las tres campañas y en la mayoría de los días. El día jueves se presentaron las concentraciones más bajas de tolueno y benceno en la gasolinera y en el CCA durante la Campaña III, debido a que correspondió al 15 de mayo, que por ser día inhábil presentó menores actividades que en un día normal. Cabe destacar que una limitante durante este estudio fue el hecho de que el equipo con el que se realizó la dilución del estándar para la curva de calibración sólo alcanzó una concentración mínima de 16 ppb y una máxima de 52 ppb, por lo que se tendría que realizar una curva usando un equipo más adecuado para tal fin. También sería necesario realizar una campaña de muestreo con un mayor número de datos, de modo que se pudieran corroborar estas concentraciones. Otro factor que pudiera influir en el CCA es el hecho de que se han estado realizando obras de restauración y ampliación del edificio, así como la construcción de un edificio nuevo en las áreas aledañas a éste, lo que pudiera ser causa de fuentes de emisión que no existieron en las campañas anteriores. De cualquier modo, esto no justificaría las altas concentraciones observadas en la gasolinera durante la campaña III y cuyos valores fueron hasta cuatro veces mayores que en la Campaña I para benceno y tres veces mayores para tolueno (día miércoles) .

Chaudhary y Kumar en 2012 reportaron valores promedio de benceno para áreas residenciales de hasta 921 ppb, en áreas comerciales de hasta 274 ppb y en gasolineras de hasta 6396 ppb; para tolueno los valores encontrados para cada una de estas áreas fueron los siguientes: 231, 1765 y 4353 ppb respectivamente. Por

estar en otros países, no se pueden comparar directamente con lo encontrado en esta Campaña aunque los niveles de benceno y tolueno en gasolinera tienen la misma magnitud que algunos de ellos. No obstante, lo ideal sería realizar una campaña más amplia y que contemple más sitios con potencial de emisión, como es el caso de las gasolineras. Otro factor importante sería verificar el correcto funcionamiento de los SRV en las gasolineras ya que, como se mencionó en el Capítulo 3, se cancelaron las normas concernientes a tal fin, siendo la norma ambiental para el D.F. (NADF-010-AMBT-2007: Que establece el método de prueba para determinar la eficiencia de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina y su límite mínimo permisible, que deberán cumplir los propietarios o responsables de estaciones de servicio y autoconsumo ubicadas en el territorio del Distrito Federal) relativamente nueva.

## **5.2 Relación tolueno/benceno (T/B) durante las Campañas I, II y III.**

De los datos obtenidos en la Campaña I se observa que en más de la mitad de éstos se tiene una mayor relación T/B en el CCA que en GAS, lo que sugiere que existen fuentes de emisión de tolueno en el CCA que hacen que la relación sea ligeramente mayor con respecto a la gasolinera. En septiembre de 1999 se presentó el mayor valor de T/B para el CCA y que fue debido a que ese día se realizó la impermeabilización de la azotea del edificio del CCA.

Comparando los valores de los muestreos en el CCA con los obtenidos para la gasolinera se tiene que al principio de la Campaña I (correspondiente a época de lluvias), la relación T/B en la gasolinera fue menor que la observada para el CCA. Sin embargo, las últimas series de muestreo reflejan una mayor relación T/B para la gasolinera en comparación con el CCA. Esto puede deberse a que los últimos datos concuerdan con el periodo de vacaciones intersemestrales de la UNAM, donde se observa una menor actividad dentro de la universidad.

El comportamiento observado en el SW (Campaña II) señala un aumento a partir de las 9:00 de la mañana que se mantiene casi constante hasta las 19:00 horas. Esto puede deberse al aumento de actividades que tienen que ver con el uso de



disolventes (una de las principales fuentes de emisión de tolueno) en horario laboral. También se pueden observar mayores valores de T/B en la zona SE que en la SW, relacionados con la mayor actividad industrial y comercial en la zona SE comparada con la SW y que se justificaron en la sección anterior.

Se observaron mayores valores de la relación T/B durante la época de lluvias que en épocas secas (Campaña II); esta tendencia es más notable en la zona SE, pudiéndose explicar por la mayor actividad fotoquímica observada en épocas secas, lo que disminuiría la cantidad de tolueno en el ambiente y, por ende, la relación T/B.

Comparando los resultados de T/B para el CCA en muestreo integrado durante el 2001 (Campaña I) y el 2004 (Campaña II) se tienen prácticamente los mismos valores, lo que podría sugerir que, además de que las fuentes de emisión siguen siendo las mismas, han disminuido tanto el benceno como el tolueno en proporción similar ya que la relación se conserva.

De entre las tres campañas realizadas en el CCA, durante la Campaña II se obtuvieron los mayores valores de T/B, mientras que en la última campaña se obtuvieron los valores más bajos. Los valores en las Campañas I y III son más similares entre sí, lo que podría atribuirse a una menor concentración de benceno observada durante la Campaña II, comparada con las otras dos Campañas.

Al considerar la variación de T/B en el CCA a lo largo de las tres campañas se observa que, a pesar de haber aumentado la concentración de ambos contaminantes en la Campaña III, éste aumento fue más significativo para los niveles de benceno, lo que se traduce en una relación T/B más baja que la de las otras dos campañas. De hecho, los niveles de benceno en la Campaña III fueron los más altos; mientras que para el caso del tolueno, los niveles más altos se presentaron en la Campaña I, seguidos de la Campaña III y por último la II. En la gasolinera (Campañas I y III) se observó que el aumento en las concentraciones de tolueno fue más significativo que para el benceno.

El IMP publicó un estudio en 1992, donde se incluye el contenido de benceno y tolueno en las gasolinas sin plomo y con plomo de la ZMCM en ese año, dando una relación T/B de 3.06 y 2.83 respectivamente. Si la restricción de benceno en gasolinas a menos de 1% comenzó a mediados de los 90's, se esperaría entonces que esta relación subiera, especialmente por esta reducción.

De acuerdo a estimaciones con base al consumo total de gasolina en México (Granados, 2014), se obtuvo una relación T/B de 3.96 para el año 2001 (29 Ton de benceno/año y 115 Ton de tolueno/año) y de 3.89 para el año 2011 (46 Ton de benceno/año y 179 Ton de tolueno/año), lo que indicaría la reducción esperada para el benceno.

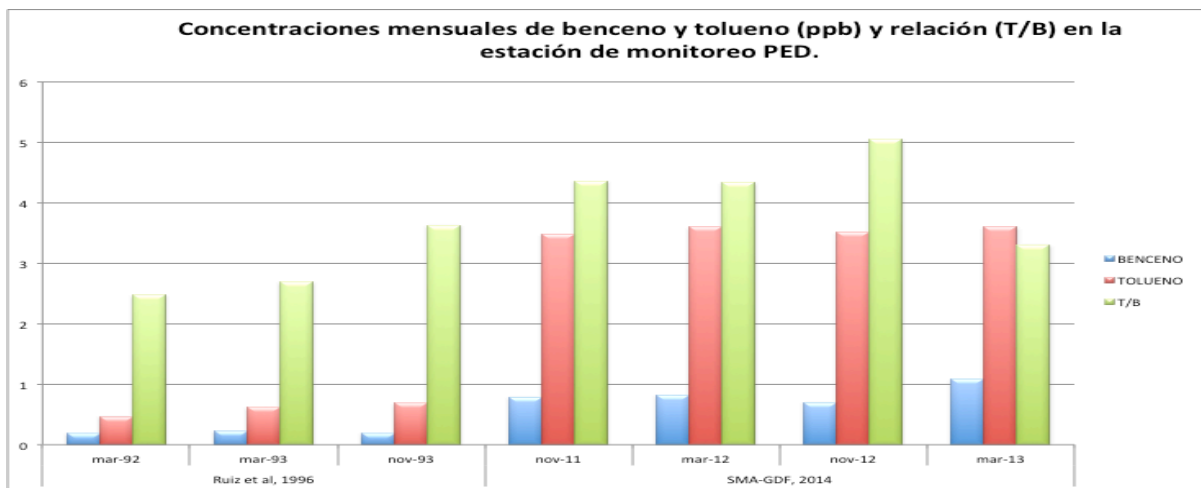
Para el caso de la gasolinera, si se comparan los valores de las Campañas I y III (3.49 y 3.90) con las estimaciones realizadas por Granados (3.96 y 3.89), se tiene que el valor obtenido en la Campaña I fue ligeramente menor que el reportado para el año 2001; mientras que para la Campaña III, el valor fue prácticamente el mismo que el del año 2011. Esto confirmaría una reducción de benceno en gasolinas, desde principios de los años 90's hasta la fecha. No obstante, es necesario que exista información disponible y confiable sobre la composición actual de las gasolinas mexicanas; para lo cual se requeriría un mayor número de estudios, tanto de parte de PEMEX como de otras instancias que sean ajenas a ésta institución para que no exista manipulación de la información debida a intereses de por medio.

### **5.3 Estación de monitoreo Pedregal (PED).**

Como se ha visto en secciones anteriores, no sólo influyen las fuentes móviles en la concentración de benceno y tolueno en la atmósfera. La Tabla 2.3.2a, presentada en el Capítulo 2, muestra por año y por sector el aporte de cada fuente a estos contaminantes. Se puede observar que aunque han disminuido las emisiones por fuentes puntuales (relacionadas con la industria de productos metálicos y de sustancias químicas) de benceno, las emisiones provenientes de las fuentes móviles (especialmente de autos particulares) y en menor medida las de área, han aumentado. Las emisiones de tolueno por fuentes puntuales disminuyeron pero las provenientes de fuentes de área (con un mayor aporte para éste contaminante y

relacionado con el uso de pinturas vinílicas, recubrimiento de superficies industriales, como solvente para limpieza y desengrase, etc.) y móviles aumentaron. Esto coincide con el mismo crecimiento de la ciudad que aumenta la demanda en productos y servicios, dando como consecuencia una mayor emisión de contaminantes.

Comparando los datos disponibles en línea (SMA-GDF, 2014) con los mismos meses que reporta Ruiz et al (1996) se observa que las concentraciones de benceno y tolueno han aumentado a más del doble en 20 años siendo marzo de 2013 el mes que presentó las concentraciones más altas (Figura 5.3a). La relación T/B a partir de noviembre de 2011 estuvo más influida por el aumento en la concentración de benceno, ya que el tolueno se mantuvo casi constante, tal como se observó en la Figura 4.2a del capítulo anterior.



**Figura 5.3a.** Comparación mensual de las concentraciones de benceno y tolueno y su relación T/B en la estación de monitoreo PED.

Esta tendencia observada para las concentraciones de benceno y tolueno en la estación de monitoreo PED se puede entender si se considera el aumento en la cantidad de vehículos que ha habido en los últimos años. La Figura 5.3b muestra el aumento en el número de automóviles y camiones de pasajeros registrados en circulación para el periodo de 1994 a 2012 en la delegación Coyoacán, que es donde se encuentra ubicada la estación PED. Desde 1994 se observa un aumento, aunque

entre los años 2002 y 2003 hubo una pequeña disminución, éste aumento sigue en los años posteriores. Así, se tiene que para 1994 se registraron 177 938 vehículos y 182 camiones de pasajeros en circulación; en cambio para el año 2012 se registraron 363 361 vehículos y 2145, lo que significa que en la actualidad existen más del doble de vehículos y 10 veces más camiones en circulación que hace 20 años.



**Figura 5.3b.** Automóviles y camiones de pasajeros registrados en circulación para la delegación Coyoacán de 1994 a 2012 (INEGI, 2014).

Las concentraciones de benceno y tolueno encontradas en este estudio (Campaña III) resultaron ser mayores (en un factor de 4.10 para el benceno y de 3.53 para el tolueno) que las reportadas para la estación PED. No obstante, el promedio de la relación T/B para el periodo de 2011 a 2013 en PED fue de 4.36, que resulta ser de la misma magnitud tanto para CCA como para gasolinera (3.56 y 3.90 respectivamente). Es importante señalar que la estación PED al ser un sitio PAMS tipo III se encuentra alejada de las fuentes de emisión de precursores de ozono y no está diseñado para evaluar las emisiones máximas de precursores. Además, las concentraciones reportadas en PED son el promedio 24 horas, a diferencia de la Campaña III que evaluó la concentración durante la hora pico matutina de estos contaminantes. Esto podría explicar la diferencia entre las concentraciones de PED y CCA. El valor de T/B más alto en PED que en el CCA es función de mayores niveles de benceno observados en el CCA.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se realizó una revisión bibliográfica sobre las concentraciones de benceno y tolueno en la Ciudad de México, enfocándose en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM, Campus Ciudad Universitaria) y en la gasolinera que se encuentra en la salida principal de Ciudad Universitaria, ambos ubicados en la zona suroeste de la Ciudad de México. Además, se realizó un muestreo de 7 días en estos dos sitios, cubriendo todos los días de la semana para tener un comparativo con lo obtenido en la revisión bibliográfica.

Se observaron comportamientos similares de la concentración de benceno en la gasolinera y en el CCA (aunque los niveles en gasolinera fueron más altos), lo que confirma que el benceno proviene principalmente de la gasolina (fuentes móviles). En cambio, el comportamiento del tolueno fue distinto en ambos sitios, señal de que existen otras fuentes que influyen en éste. En general, el benceno proviene principalmente de fuentes móviles, mientras que el tolueno tiene la influencia de fuentes de área y puntuales.

Al comparar los resultados de las tres Campañas realizadas en el CCA con lo obtenido en otros estudios en fechas similares, se observaron niveles de la misma magnitud, siendo más parecidos aquellos estudios que usaron la misma metodología.

La relación T/B fue un importante indicador para identificar fuentes en común entre sitios, así como de las actividades realizadas diariamente. Así, el tolueno resultó ser más dependiente que el benceno de las actividades diarias, al presentar variaciones de concentración más pronunciadas.

La ZMCM es compleja en cuanto al uso de suelo, pudiéndose encontrar desde zonas consideradas como rurales hasta las que son industriales. Cada una de estas zonas se podría identificar con una relación T/B característica que podría ayudar a identificar posibles cambios anómalos en las concentraciones de benceno o tolueno, ya sea debido a que existan fuentes diferentes a las propias o a que se presente algún evento que altere las concentraciones normales del lugar.

Se observó una disminución de la relación T/B durante las épocas secas (Campaña II) en la zona sur de la ZMCM, lo que sugiere que la mayor actividad fotoquímica provoca que disminuya la concentración de tolueno más que la de benceno.

En el CCA los valores de T/B se han mantenido de la misma magnitud, lo que significa que casi no han cambiado las actividades y las fuentes de emisión existentes en la zona. En la gasolinera el valor aumentó debido a las limitaciones que se implementaron para reducir el benceno en la gasolina. Esto comprueba la utilidad de la relación T/B para evaluar este tipo de cambios ya que al observar individualmente las concentraciones de benceno y tolueno en el ambiente se notó que ambas aumentaron, pero al usar este indicador, se observó un aumento en la relación T/B en la gasolinera, que sería lo esperado para la reducción de benceno en gasolinas. Sin embargo, se requiere una mayor información respecto al contenido de benceno y tolueno en gasolinas, ya que se observó que la información disponible fue limitada.

Los cambios en la relación T/B en la estación de monitoreo PED fueron debidos principalmente al aumento en la concentración de benceno, ya que la concentración de tolueno ha permanecido relativamente constante en los últimos años.

Desde las primeras mediciones que se tienen reportadas en PED (1992), hasta las últimas reportadas en la página web del SIMAT (2011-2013), se ha observado un aumento en las concentraciones de benceno y tolueno, rebasando en varias ocasiones lo recomendado por instancias como la US EPA. Esto se debe principalmente al crecimiento poblacional de la ciudad, lo que ha propiciado un aumento en la demanda de productos y servicios y a que las medidas implementadas por el gobierno no han respondido proporcionalmente a este crecimiento. Por esta razón, es de vital importancia que se establezcan normas de calidad de aire para estos contaminantes. En todos los sitios estudiados se rebasa en al menos una ocasión la recomendación hecha por la Unión Europea de 1.5 ppb de benceno en aire ambiental, lo que refuerza la importancia de establecer una norma de calidad de aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Las mediciones realizadas en este estudio se deberán corroborar con una campaña más extensa que permita monitorear de manera más adecuada y completa estos dos contaminantes.

Además de la norma de calidad de aire, se observó que no existen regulaciones suficientes para los vehículos que circulan en la ZMCM. Requiere especial atención el caso de las motocicletas que han aumentado en gran medida en los últimos años. También se requiere de una red de transporte público que responda a las necesidades de la población de manera eficiente, de tal modo que las personas prefieran el transporte público al particular. Para lograr este fin, se requiere una mejor planeación de las obras viales, mayor presupuesto, menor corrupción al momento de realizar los proyectos de transporte público y una mejor educación vial por parte de la población.

Se debe incluir entre las estrategias de prevención, minimización y control, la formulación de gasolinas que sean adecuadas para la ZMCM y su parque vehicular. Para tal fin, también se requiere que exista un mayor interés y presupuesto para proyectos de investigación que sean independientes del sector gobierno y privado, para que no existan intereses de por medio que puedan alterar o modificar los resultados de las investigaciones.

Para las emisiones provenientes de fuentes fijas y de área se podrían ampliar el marco regulatorio en pequeñas y medianas industrias así como en las instalaciones de servicios donde se realizan actividades relacionadas con el uso de solventes.

Es importante implementar sistemas de recuperación de vapores en gasolineras, no sólo de la ZMCM, sino de todo el país, así como verificar que éstos sean eficientes.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

**\*Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2007).** *Toxicological profile for Benzene*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

**\*Bravo, H., Sosa, R., Sánchez, P., Bueno, E., González, L. (2001).** *Concentrations of benzene and toluene in the atmosphere of the southwestern area at the Mexico City Metropolitan Zone*. 12th World Clean Air and Environment Congress and Exhibition.

**\*Bravo, H., Sosa, R., Sánchez, P., Bueno, E., González, L. (2002a).** *Concentrations of benzene and its importance in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Zone*. Air & Waste Management Association (A&WMA) Baltimore 95th Annual Meeting.

**\*Bravo, H., Torres, R. (2002b).** *Air Pollution Levels and Trends in the Mexico City Metropolitan Area. Urban Air Pollution and Forest. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Pp. 121-159.

**\*Bueno, E., Gutiérrez, V., Bravo, H., Sosa, R. (2004).** *Simultaneous Measurements of Diurnal Concentrations of Volatile Organic Compounds in the Southeastern and Southwestern of Mexico City*. 97th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association. Indianapolis, Indiana.

**\*Bueno, L. M. E. N.** *Evaluación temporal de compuestos orgánicos volátiles en dos sitios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2005.

**\*Chaudhary, S; Kumar, A. (2012).** *Monitoring of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) concentrations in ambient air in Firozabad, India*. International Archive of Applied Sciences & Technology; 3 [2] 92.

\***Cho-Ching**, L., Ming-He, H., Chung-Shin, Y. (2002). *Influence of Meteorological Factors on the Characteristics of Volatile Organic Compounds in the Atmosphere at the Surrounding Area of an Oil Storage and Pumping Station*. Paper # 45359. Air & Waste Management Association, Baltimore 95th Annual Meeting.

\***Cruz-Núñez**, X., Hernández-Solís, J. M., and Ruiz-Suárez, L. G. (2003). *Evaluation of vapor recovery systems efficiency and personal exposure in service stations in Mexico City*. Sci. Total Environment, 309, 59–68.

\***De Celis** Carrillo, Ruth Araceli. *Efectos de la exposición crónica a benceno y tolueno sobre las características del semen de humanos*. Tesis de maestría. ENEP Iztacala, UNAM, 1998.

\***Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación (DGPCC)**. *Inventario de fuentes de área, precursores de ozono y monóxido de carbono para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Departamento del Distrito Federal. 1995.

\***Espinosa** Rubio, Matilde Eva. *Análisis y revisión de información que sustente la elaboración de una NOM sobre benceno, tolueno y xilenos*. Informe final del contrato de prestación de servicios. No. INE/ADA-014/2008. 82 pp. D.F. Octubre 2008.

\***Galicia** Rosas, Georgina Antígona. *Efecto citotóxico y genotóxico de compuestos orgánicos volátiles, provenientes de la gasolina, en una población ocupacionalmente expuesta*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, 1998.

\***Gao**, Frank F; Otten, John L; Fees, David F. (2002). *Emission Trends of VOC and NOx in Delaware Rate-of-Progress Planning and Periodic Emission Inventories*. Paper #45357. Air & Waste Management Association (A&WMA) Baltimore 95th Annual Meeting.

\***García Paredes, Jesús.** *Análisis de un monitoreo biológico de exposición laboral a agentes químicos en trabajadores expuestos a benceno, tolueno y xilenos en una planta petroquímica de México.* Tesis de Posgrado. Facultad de Medicina, UNAM, **2007.**

\***Garrido, J., Ruiz, C., Vasquez, L. (2008).** *Alteraciones Cromosómicas en Trabajadores Expuestos a Benceno en una Refinería de Ecuador.* VI Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales. VI International Conference on Occupational Risk Prevention. Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales. Núm. 6. A Coruña.

\***Gómez-Perales J. E., Colvile, R. N., Nieuwenhuijsen, M. J., Fernandez-Bremauntz, A., Gutiérrez-Avedoy, V. J., Páramo-Figueroa, V. H., Blanco-Jiménez, S., Bueno-López, E., Mandujano, F., Bernabé-Cabanillas R., Ortiz-Segovia, E. (2004).** *Commuters' exposure to PM<sub>2.5</sub>, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City.* Atmospheric Environment; 38: 1219–1229.

\***Googlemaps, 2014.** Mapa generado en línea en la página: [www.google.com.mx/maps](http://www.google.com.mx/maps)

\***Granados, H. E. 2014.** Comunicación personal.

\***Graseby Nutech.** 3550A Cryogenic concentrator operating manual. Version 2.0 December, **1993.**

\***Haro, L. (2008).** *Exposición ocupacional a mezcla de benceno-tolueno-xileno. Manifestaciones hematoinmunológicas.* Revista médica del Instituto Mexicano del Seguro Social, México 46 [6] Nov-Dic, 643-650.

\***Hafner**, Hilary; MacDonald, Clinton; Brown, Steven; Funk, Tami. *Analysis of Photochemical Assessment Monitoring Station (PAMS) Data Final Work Plan*. Sonoma Technology, Inc. Petaluma, CA. **(2004)**.

\***Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)**. *Censos económicos 1998, 2003 y 2008. Estadísticas de vehículos de motor registrados*: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/default.aspx> [Fecha de consulta: 2 de junio de **2014**].

\***Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT)**. *Diagnóstico de la medición de la calidad del aire en México*. Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Dirección de Investigación en Monitoreo Atmosférico y Caracterización Analítica de Contaminantes. México, D.F., marzo de **2012**. Primera edición.

\***Jaimes**, M; Bravo, H; Sosa, R; Retama, A. *Diseño del monitoreo de precursores oxidantes fotoquímicos en la Ciudad de México y su área metropolitana*. Fundación MAPFRE, **2010**.

\***Jo-Chun**, K., Ki-Jun, K., Jae-Hyung, L., BumSoo, H., Myun-Joo, Lee., **(2001)**. *Factors of VOC Decomposition by Electron Beam Irradiation*. Environmental Engineering, Dongshin University, Naju, Korea. Boram Environment & Technology Co. Ltd, Kwangju, Korea. EB-Tech Co., Ltd, Daejeon, Korea. Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea. 12th World Clean Air and Environment Congress and Exhibition.

\***Main**, Hilary; Roberts, Paul; Reiss, Richard. *Analysis of Photochemical Assessment Monitoring Station (PAMS) Data to Evaluate a Reformulated Gasoline (RFG) Effect*. Final Report. Sonoma Technology, Inc. US. EPA. April **1998**.

\***Mehlman, M.A. (1994).** *Dangerous and cancer-causing properties of products and chemicals in the oil refining and petrochemical industry. Part XX: Health dangers of petroleum hydrocarbons: gasoline, methyl-tertiary butyl ether, benzene, 1,3-butadiene and alkylbenzenes.* Journal of Clean Technology and Environmental Sciences, 4, 37-57

\***Meneses, F., Romieu, I., Ramírez, M., Colome, S., Fung, K., Ashley, D., Hernández-Ávila, M. (1999).** *A survey of personal exposures to benzene in Mexico City.* Archives of Environmental Health; 54 [5] 359–363.

\***Mugica, V., Ruiz, M. E., Watson, J., and Chow, J. (2003).** *Volatile aromatic compounds in Mexico City atmosphere: levels and source apportionment.* *Atmósfera*, 16, 15–27.

\***Ortiz, E., Alemon, E., Romero, D., Arriaga, J., Olaya, P., Guzmán, F., Ríos, C. (2002).** *Personal exposure to benzene, toluene and xylene in different microenvironments at the Mexico City Metropolitan Zone.* *The Science of The Total Environment.* 287, 241-248.

\***Petrucci, Ralph H.; Harwood, William S.; Herring, F. Geoffrey.** *Química General.* Pearson Educación. Octava Edición. Madrid (2003).

\***Restek.** Early Detection of Structural Mold with SilcoCan™ Air Sampling Canisters. [http://www.restek.com/Technical-Resources/Technical-Library/Air-Sampling/air\\_A002](http://www.restek.com/Technical-Resources/Technical-Library/Air-Sampling/air_A002) [consultado el 2 de mayo de 2014].

\***Rodarte Candiani, Evangelina.** *Alteraciones hematológicas por exposición a benceno en trabajadores de una imprenta y una gasolinera.* Tesis de especialidad. Facultad de Medicina, UNAM, 2009.

**Rodríguez, M., Tamayo, M., Rivadeneira, F.** *Agentes teratogénicos y teratogenicidad*. Colección Derecho a vivir en desventaja. Folleto No. 10. Instituto de Genética Humana. Facultad de Medicina, Universidad Javeriana. [http://pujportal.javeriana.edu.co/portal/page/portal/Facultad%20de%20Medicina/1documentos/colecc\\_der/Teratogeno.pdf](http://pujportal.javeriana.edu.co/portal/page/portal/Facultad%20de%20Medicina/1documentos/colecc_der/Teratogeno.pdf) [consultado el 10 de agosto de **2013**].

\***Romieu I, Ramirez M, Meneses F, Ashley D, Lemire S, Colome S, et al. (1999).** *Environmental exposure to volatile organic compounds among workers in Mexico City as assessed by personal monitors and blood concentrations*. *Environmental Health Perspect*; 107, 511–515.

\***Ruiz, M; Arriaga, J; García, I. (1996).** *Determinación de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la Ciudad de México mediante el uso de sistemas ópticos y métodos convencionales*. *Atmósfera* 9, 119-135.

\***Sánchez, G; Vega, E; Reyes, E.** *Compuestos orgánicos volátiles en la ciudad de México*. *Ciencia y Desarrollo en Internet*. Mayo-junio, **2004**.  
<http://www.conacyt.gob.mx/comunicacion/Revista/ArticulosCompleto/pdf/COV.pdf>  
[consultado el 30 de septiembre de 2013].

\***Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF, 2004).** *Inventario de Contaminantes Tóxicos del Aire en la ZMVM 2004*.

\***Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF, 2008a).** *Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006*.

\***Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF, 2008b).** *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México. Contaminantes tóxicos 2006*.

**\*Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF, 2010).** *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México. Contaminantes tóxicos 2008.*

**\*Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF, 2012a).** *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2011.*

**\*Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF, 2012b).** *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México. Contaminantes tóxicos 2010.*

**\*Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).** *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo.* Semarnat. México. **2007**

**\*Serrano-Trespalacios, P. I., Ryan, L., Spengler, J. D. (2004).** Ambient, indoor and personal exposure relationships of volatile organic compounds in Mexico City Metropolitan Area. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology.* 14 [118] 132.

**\*Shiohara, N., Fernández-Bremauntz, A., Blanco-Jiménez, S., Yanagisawa, Y., (2005).** The commuters' exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in Mexico City. *Atmospheric Environment* 39, 3481–3489.

**\*SMA-GDF, INE-DGCENICA y UAMI.** *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. **2008.**

**\*Sosa, E. R.** *Evaluación y control de benceno en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.* Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. **2001.**



\***Sosa, R., Bravo, H., Mugica, V., Sánchez, P., Bueno, E., Krupa, S. (2009).** *Levels and source apportionment of volatile organic compounds in southwestern area of Mexico City.* Environmental Pollution 157, 1038-1044.

\***Tovalin-Ahumada, H; Whitehead, L. (2006).** *Personal Exposure to volatile organic compounds among outdoor and indoor workers in two Mexican cities.* Science of the Total Environment 376, 60–71.

\***Universidad de Granada (UG).** Departamento de Medicina Legal, Toxicología y Psiquiatría. Apoyo multimedia a la enseñanza de la Toxicología básica. Tema 1.  
<http://www.ugr.es/~ajerez/proyecto/index.html>  
[consultado el día: 20 de agosto de **2013**].

\***US Environmental Protection Agency (US EPA).** *Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air.* Second Edition. EPA/625/r-96/010b. **1999**.

\***UATMP (Urban Air Toxics Monitoring Program), 1999.** EPA-454/R-99-036. January 1999. United States Environmental Protection Agency.

\***Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2006).** *Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns.* Atmos. Chem. Phys., 6, 7563-7621.

\***Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2007).** *Distribution, magnitudes, reactivities, ratios*

*and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns. Atmos. Chem. Phys., 7, 329-353,*

**\*Wöhrnschimmel, H; Zuk, M; Martínez-Villa, G; Cerón, J; Cárdenas, B; Rojas-Brach, L; Fernández-Bremauntz, A. (2008).** *The impact of a Bus Rapid Transit System on Commuter's Exposure to benzene, CO, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City.* Atmospheric Environment. 42, 8194-8203.

**ANEXOS**

## A1. Acciones realizadas en la instrumentación de los diferentes PROAIRE enfocadas al control y reducción de emisiones de COV's en la Ciudad de México.

**Tabla A1.a** Acciones realizadas en la instrumentación del PROAIRE 1995-2000.

| Año  | Acciones  |
|------|---|
| 1995 | PEMEX refinación incorporó sistemas de recuperación de vapores (fase 0), en cuatro terminales de distribución y almacenamiento de gasolina.   |
| 1996 | Se modificó el programa Hoy No Circula, introduciendo los hologramas "1" y "2". Se aplicó una nueva regulación de gasolinas, limitando de manera importante la presión de vapor, el contenido de olefinas aromáticas, benceno y azufre, para lo cual PEMEX introdujo la gasolina PEMEX Premium.<br>Se concluyó la instalación de Sistemas de Recuperación de Vapores en tanques de almacenamiento y descarga de combustibles (Fase 0 y 1).<br>Entra en vigor la Ley Ambiental del Distrito Federal.   |
| 1997 | PEMEX puso a la venta la nueva gasolina PEMEX Magna reformulada menos reactiva que sustituyó a la PEMEX Magna y deja de distribuir la gasolina NOVA en la ZMCM.<br>Se pone en marcha el programa de detención y retiro de la circulación de vehículos ostensiblemente contaminantes en la ZMCM.<br>La Comisión Metropolitana de Transporte y Vialidad (COMETRAVI) presenta la Estrategia Integral de Transporte y Calidad del Aire en la ZMCM.<br>Introducción de transporte eléctrico dedicado a la distribución de refrescos y alimentos perecederos en el primer cuadro de la Ciudad de México.<br>Se incorpora el holograma "0" al Programa de Verificación Vehicular.  |
| 1998 | Se consolida la instalación de sistemas de recuperación de vapores.<br>Inicia el programa piloto de Gas Natural Comprimido (GNC), para vehículos de pasajeros y de carga de la ZMCM.  |
| 1999 | Se modifica el Programa Hoy No Circula, introduciendo el holograma doble cero. El GDF hizo entrega de 100 nuevos autobuses que se incorporan al transporte público de pasajeros.<br>Inicia el Programa Integral de Reducciones de Emisiones Contaminantes (PIREC), para sustituir los convertidores catalíticos.<br>Se pone en funcionamiento el segundo tramo de la línea B del Sistema de Transporte Colectivo (METRO), en el tramo Buena Vista a Villa de Aragón.<br>Se publicó el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en la ZMVM.<br>Se instrumentó el procedimiento para exentar a la industria manufacturera del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.<br>Se implementa el mecanismo para exentar de la verificación vehicular y de las restricciones a la circulación, emitiendo 2 tipos de hologramas doble cero "00" con una vigencia de 2 y 1 año, respectivamente, en función de si se trata de un vehículo particular o de uno de uso intensivo. |
| 2000 | Se amplió el sistema de trolebuses de la Ciudad de México con 200 nuevas unidades.<br>Se pone en funcionamiento el segundo tramo de la línea B del Sistema de Transporte Colectivo (METRO), que va de Continentes a Ciudad Azteca.  |
| 2001 | El Gobierno del D.F. incorporó 881 autobuses a la Red de Transporte de Pasajeros y retiró de la circulación 361 autobuses viejos.   |

*Fuente: PROAIRE 2011-2020.*

**Tabla A1.b. Acciones realizadas en el PROAIRE 2002-2010.**

| Año  | Acciones  |
|------|---|
| 2002 | Se inicia la renovación de la flota vehicular de taxis y sustitución de microbuses. Se modificó el esquema operativo del programa de sustitución de convertidores catalíticos (PIREC). Las SMA inician el diseño del Sistema de Verificación Vehicular (SIVEV) de la ZMCM. Se instala el Consejo Asesor del Sistema de Monitoreo Atmosférico. Con recursos del Fideicomiso Ambiental del Valle de México se impulsa la instrumentación del RETC.  |
| 2003 | Se concluyó el distribuidor vial de San Antonio y se construyeron 4 puentes vehiculares que forman parte del Eje Troncal Metropolitano. Se concluyó la primera ciclopista del D.F. a lo largo de 75 kilómetros. Se realizó el proyecto Diseño de una Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México 2001-2010.   |
| 2004 | Se adquieren 100 unidades nuevas de RTP. El 70% fueron renovadas en los últimos cuatro años. Se actualizó el Programa Hoy No Circula, haciendo más estrictos los criterios de exención. Se realizan cambios al software de verificación con el objeto de evitar la manipulación de los motores por parte de los preverificadores y para identificar convertidores catalíticos en mal estado. Se concluye la implantación del Sistema de Verificación Vehicular (SIVEV) en el D.F.   |
| 2005 | Se construyó el corredor confinado para el transporte de pasajeros sobre avenida Insurgentes (Metrobús). Finalizó la renovación de los autobuses de la RTP. Se publicó la NOM-042 para asegurar que los vehículos nuevos que se comercialicen en México presenten niveles de emisión equivalentes a las normas de EUA (TIER 2) y Europeas (EURO IV).  |
| 2006 | Se concluyó el segundo piso de San Antonio a San Jerónimo y se inauguró el distribuidor vial Ermita Iztapalapa– Eje vial 3 Oriente. Se publicó la NOM-086: condiciones fisicoquímicas que deberán cumplir los combustibles en la ZMCM. Se incentiva el uso de vehículos híbridos gasolina-eléctricos en el Valle de México. Se publica la norma técnica estatal NTEA-004-SMA-DS-2006, que establece las especificaciones de protección al ambiente que deberán seguir las estaciones de servicio.   |
| 2007 | Entró en vigor la norma NOM-041-SEMARNAT-2006 (límites de emisión más estrictos a los vehículos en circulación). Se publicó la norma local NADF-010-AMBT-2006 (método de prueba para determinar la eficiencia de los SRV). Se publicaron la Agenda Ambiental y el Plan Verde de la Ciudad de México. Se instrumenta el Programa de Eficiencia Energética y bajas emisiones para vehículos nuevos en la ZMCM, con el refrendo del holograma “00” hasta por 2 ocasiones. Se inició el proyecto “Muévete en Bici”, como parte del Programa de Movilidad no Motorizada. Se modificó el esquema de asignación de hologramas a vehículos, eliminándose el holograma de verificación no. 1. Los gobiernos de la Comisión Ambiental Metropolitana implementaron un mecanismo para la regulación de emisiones de vehículos con placas de otras entidades que circulan en la ZMCM.  |
| 2008 | Se publicó la NADF-011-AMBT-2007 (límites máximos permisibles de emisiones de COV's por fuentes fijas en el DF). Se implementan 7 medidas para reducir la contaminación del aire: Extensión del HNC a los sábados, se reduce la edad máxima a 8 años para que los vehículos obtengan el holograma “0”, reforzamiento de verificación vehicular a transporte de carga y a operativos de retiro a vehículos contaminantes, auditorías a verificentros y restricción de circulación a vehículos de otras entidades o del extranjero que no porten holograma “0” o “00” y ajuste a los niveles de activación de las contingencias y precontingencias ambientales atmosféricas de la ZMCM. Los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México acuerdan la homologación del programa de verificación vehicular. Se inició el Plan Estratégico para la Creación de una Red de Ciclovías en la Ciudad de México. |
| 2009 | Se inicia la ampliación del Metrobús en Insurgentes. Se inicia la construcción de la línea 12 del Metro que correrá de Mixcoac a Tláhuac (24 km). Se inaugura el corredor Cero Emisiones en el Eje Central con trolebuses eléctricos, limitando la circulación de vehículos de carga de 7:00-22:00 hrs. y sacando de la circulación a los microbuses. Se inicia el servicio expreso en 10 rutas de autobuses del D.F. Se lleva a cabo la consolidación y renovación física del Circuito Interior del D.F. Se otorga el holograma “0” a vehículos a diesel con tecnología Euro III o superior. Inicia el programa para sustitución de vehículos con placas federales. Se fortaleció y puso en marcha el RETC en la ZMCM.   |
| 2010 | Inicia el Sistema de Transporte Público Individual ECOBICI de la Ciudad de México. Inicia la operación de la línea 3 del Metrobús. Se concluyó la Evaluación Integral de los Programas de Verificación Vehicular Obligatoria de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.   |

*Fuente: PROAIRE 2011-2020.*

**Tabla A1.c. Estrategias, medidas y acciones propuestas en el PROAIRE 2010-2020 (Estrategias 1-3).**

| MEDIDA   | ACCIÓN   |
|--|--|
| <b>ESTRATEGIA 1. Ampliación y refuerzo de la protección a la salud.</b>  |  |
| 1. Actualización de los marcos legales de gestión de la calidad del aire en sus órdenes federales y locales.                                 | 1.1 Actualizar los reglamentos de la LGEEPA y de la legislación ambiental del DF y del EM en materia de contaminación del aire.  |
| 2. Actualización del marco legal federal para la protección de la salud por exposición a la contaminación atmosférica y al cambio climático. | 2.1 Actualizar la Ley General de Salud, su reglamento y las Normas Oficiales Mexicanas que establecen los criterios de calidad del aire.   |
| 5. Actualización del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.   | 5.4. Diseñar y aplicar un subprograma de exención en diferentes fases del programa por reducción de emisiones de COV's.  |
| 8. Rediseño y actualización del SIMAT.   | 8.1 Realizar diagnósticos del SIMAT, en términos de su representatividad, cobertura espacial y operación.<br>8.2 Reforzar el monitoreo de la calidad del aire.   |
| 9. Construcción de un Sistema de Indicadores de la Calidad del Aire.   | Revisar los indicadores actuales y construir los necesarios para contar con un sistema que permita medir espacial y temporalmente los contaminantes.   |
| <b>ESTRATEGIA 2. Disminución estructural del consumo energético de la ZMCM.</b>  |  |
| 10. Creación de un programa permanente de análisis ecosistémico de la ZMCM.  | 10.4 Desarrollar los argumentos técnicos para proponer un enfoque ecosistémico en la elaboración de los planes y programas delegacionales y municipales de desarrollo urbano, vialidad y transporte.   |
| <b>ESTRATEGIA 3. Calidad y eficiencia energéticas en todas las fuentes.</b>  |  |
| 14. Modernización y homologación del programa de verificación vehicular.   | 14.2 Desarrollar y aplicar normas oficiales mexicanas para la evaluación de las emisiones provenientes de motocicletas nuevas y en circulación en la ZMCM.<br>14.3 Homologar los procedimientos y criterios de verificación de los vehículos con placas federales y locales. |
| 15. Fortalecimiento del programa de sustitución de convertidores catalíticos.  | 15.1 Fortalecer la aplicación del programa para la sustitución de convertidores catalíticos.   |
| 16. Modernización del programa de detección y retiro de vehículos ostensiblemente contaminantes.   | Fortalecer el programa ostensiblemente contaminante con nuevo equipo para su operación y tecnología de detección.  |
| 17. Promover el uso de vehículos híbridos y eléctricos para uso particular, de transporte público y de carga.                                | 17.1 Crear instrumentos que fomenten el uso de vehículos híbridos.   |
| 18. Modernización del programa "Hoy No Circula" (HNC).   | 18.1 Actualizar el Programa HNC.<br>18.2 Promover mecanismos para desincentivar el uso de vehículos con carburador.  |
| 19. Actualizar la normatividad para vehículos automotores.   | 19.1 Publicar la NOM de eficiencia energética para vehículos nuevos.<br>19.2 Revisar y actualizar las NOM relativas a vehículos en circulación.  |
| 21. Renovación de vehículos a diesel con sustitución de motores y adaptación de sistemas de control de emisiones.                            | 21.1 Diseñar un programa de sustitución de motores a diesel con más de 10 años de operación y adaptación de equipos de control de emisiones.   |
| 22. Renovación de las flotas vehiculares de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad.                                       | 22.1 Renovar la flota vehicular de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad de la ZMCM.   |
| 23. Promoción del uso de energías y combustibles alternos.   | 23.1 Promover el uso de combustibles menos contaminantes en vehículos de transporte público de pasajeros y de carga.<br>23.2 Promover el uso de combustibles gaseosos en establecimientos industriales y de servicios.   |
| 24. Modernización de la flota vehicular del servicio de limpia.  | 24.1 Renovar la flota vehicular del servicio de limpia por vehículos eficientes y con bajas emisiones contaminantes.   |
| 25. Impulso de los programas de autorregulación para las empresas con flotas de vehículos a diesel.  | 25.1 Fortalecer el programa de autorregulación de vehículos a diesel.  |

**Tabla A1.d. Estrategias, medidas y acciones propuestas en el PROAIRE 2010-2020**  
(Estrategia 4).

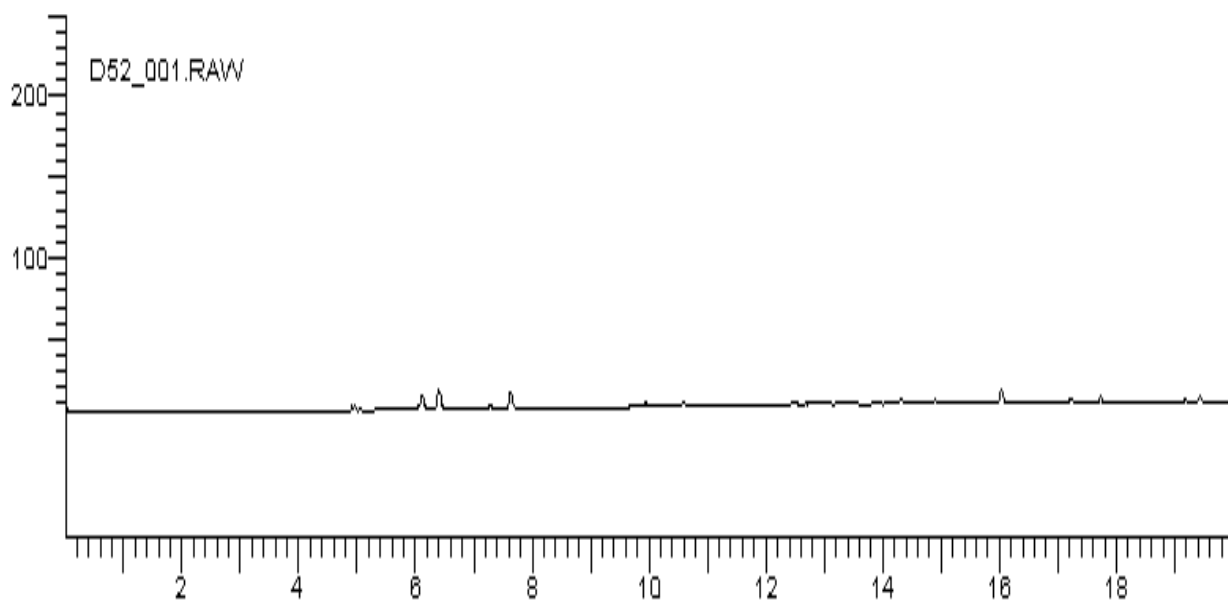
| MEDIDA   | ACCIÓN   |
|--|--|
| <b>ESTRATEGIA 4. Movilidad y regulación del consumo energético del parque vehicular.</b>   |  |
| 30. Planeación de las redes de transporte como un solo sistema metropolitano.  | 30.1 Promover el desarrollo de una herramienta de planeación metropolitana en materia de transporte.<br>30.2 Establecer estacionamientos planeados para mejorar la eficiencia del sistema de transporte metropolitano.<br>30.3 Continuar con el establecimiento de rutas express, locales y metropolitanas de transporte público, así como continuar promoviendo la construcción de los sistemas de transporte público de alta capacidad y eficiencia.<br>30.4 Promover la instalación estratégica de bases para taxis en el Distrito Federal. |
| 31. Reordenación de las paradas para el transporte público de pasajeros.   | 31.1 Fortalecer los sistemas de paradas del transporte público.  |
| 32. Creación de la red de monitoreo en tiempo real de los flujos vehiculares de la ZMCM.   | 32.1 Diseñar, desarrollar y poner en operación una red que monitoree e informe en tiempo real sobre la situación de los principales flujos vehiculares en la ZMCM.   |
| 33. Regulación de la circulación de vehículos de carga en rutas seleccionadas.   | 33.1 Concertar con el sector transporte de carga un programa que oriente la circulación de estos vehículos.  |
| 34. Consideración del marco ecosistémico de la ZMCM en la planeación de los nuevos proyectos de transporte público y vialidades.                                       | 34.1 Utilizar el marco ecosistémico para identificar principios, relaciones funcionales y aspectos críticos a tomar en cuenta dentro del proceso de planeación conjunta de nuevos proyectos de transporte y vialidades.  |
| 35. Elaboración de un programa de agilización permanente de los flujos vehiculares.  | 35.1 Identificar, catalogar y analizar todo tipo de reductores y obstrucciones del flujo vehicular para proponer medidas y acciones que agilicen permanentemente la circulación de los vehículos en el sistema vial metropolitano.   |
| 36. Revisión de la normatividad metropolitana para mejorar la circulación vehicular.   | 36.1. Ofrecer elementos normativos para minimizar los incrementos en la emisión de contaminantes atmosféricos causados por obstrucciones viales asociadas a eventos masivos y de alta atracción de viajes.<br>36.2. Promover la elaboración de un sistema metropolitano de señalización.   |
| 37. Fomento del uso de transporte escolar.   | 37.1 Fomentar la utilización del transporte escolar en la ZMCM.  |
| 38. Diseño y aplicación de un programa de transporte de personal a nivel metropolitano.  | 38.1. Promover el servicio de transporte de personal en la ZMVM.<br>38.2. Promover el uso del automóvil compartido en instituciones públicas y privadas.   |
| 39. Promoción del uso de la bicicleta como medio alternativo de transporte no contaminante.  | 39.1 Promover el uso de la bicicleta como un medio de transporte en la ZMCM.   |
| 40. Modernización de los paraderos del transporte en la ZMCM.  | 40.1 Ofrecer elementos ecosistémicos para incrementar el número de paraderos y modernizar los existentes.  |
| 41. Suministro de combustible a las estaciones de servicio en horario nocturno.  | 41.1 Acordar con PEMEX un programa de suministro nocturno de estaciones de servicio.   |
| 42. Regulación de la circulación de vehículos cuyo único propósito sea el de la publicidad móvil.  | 42.1 Regular la circulación de vehículos utilizados para fines publicitarios.  |
| 43. Desarrollo de un sistema de movimiento de carga que considere la ubicación espacial de sitios de almacenamiento y centros de distribución.                         | 43.1 Diseñar un sistema logístico de movimiento de carga en la ZMCM.   |
| 44. Revisar la licencia ambiental para que incluya las emisiones generadas por trayectos vehiculares asociados a la operación de establecimientos públicos y privados. | 44.1 Actualizar el concepto de la licencia ambiental para que incluya el total de las emisiones asociadas a la operación de todo tipo de establecimientos.   |

**Tabla A1.e.** Estrategias, medidas y acciones propuestas en el PROAIRE 2010-2020  
(Estrategias 5-8).

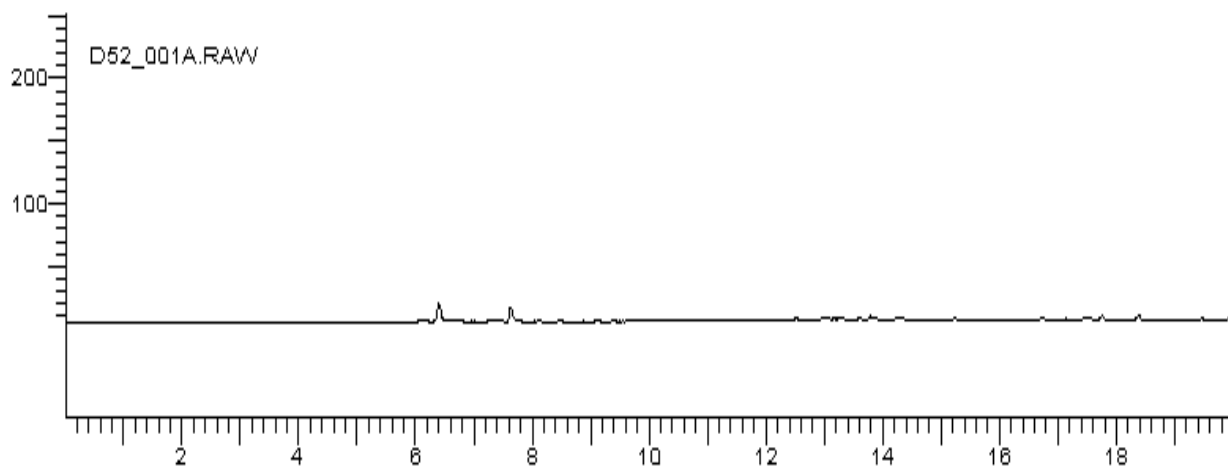
| MEDIDA   | ACCIÓN  |
|--|---|
| <b>ESTRATEGIA 5. Cambio tecnológico y control de emisiones.</b>  |   |
| 45. Elaboración de normas para reducir el contenido de solventes orgánicos en productos de consumo personal y de uso en servicios.   | 45.1 Desarrollar normas para reducir el contenido, toxicidad y la reactividad de los compuestos orgánicos que se utilizan en productos de consumo personal y de limpieza en la industria y los servicios.   |
| 47. Establecimiento de metas de reducción de emisiones para la industria y los servicios.  | 47.1 Establecer instrumentos de reducción adicional de emisiones con la iniciativa privada.   |
| 49. Ampliación de los alcances de los programas de producción más limpia.  | 49.1. Rediseñar los programas de autorregulación y de auditoría ambiental en la industria.<br>49.2 Promover programas de producción más limpia.   |
| 50. Revisión y verificación del funcionamiento de sistemas de recuperación de vapores instalados en las estaciones de servicio.  | 50.1 Verificar los sistemas de recuperación de vapores en todas las estaciones de servicio de la ZMCM.  |
| 54. Actualización de las normas de emisión de partículas en la industria y desarrollar las correspondientes para el control de COV's.  | 54.1 Desarrollar la normatividad para limitar las emisiones de partículas y COV's en la industria.  |
| 55. Reducción de las emisiones de hidrocarburos en lavanderías de lavado en seco.  | 55.1 Desarrollar la normatividad para limitar las emisiones de HC en los procesos de lavado en seco.  |
| 58. Regulación de actividades de pintura al aire libre.  | 58.1 Desarrollar la normatividad y los programas para regular las emisiones en actividades de pintado al aire libre.  |
| <b>ESTRATEGIA 6. Educación ambiental, cultura de la sustentabilidad y participación ciudadana.</b>   |   |
| 66. Incorporación de la sociedad civil en la gestión de la calidad del aire en la ZMCM.  | 66.1 Fomentar la participación ciudadana en la gestión de la calidad del aire.<br>66.2 Evaluación permanente del PROAIRE de la ZMCM 2011-2020.<br>66.3 Desarrollar campañas permanentes de educación vial.  |
| <b>ESTRATEGIA 7. Manejo de áreas verdes, reforestación y naturación urbanas.</b>   |   |
| 74. Limpieza, pavimentación y estabilización de vialidades.  | 74.1 Limpiar y pavimentar las vialidades que formen parte del área urbana.  |
| <b>ESTRATEGIA 8. Fortalecimiento institucional e investigación científica.</b>   |   |
| 78. Fortalecimiento de los instrumentos de gestión de la calidad del aire.   | 78.1 Actualizar los inventarios de emisiones.   |
| 79. Elaboración de estudios y fomento de la investigación científica necesaria para avanzar en el conocimiento de los temas relacionados con el manejo ecosistémico de la calidad del aire en la ZMCM. | 79.1 Elaborar un estudio que explore diversos esquemas de racionalización de la circulación vial.<br>79.2 Investigar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud de la población en la ZMCM.<br>79.5 Instalar un laboratorio metropolitano de fuentes móviles.<br>79.6 Realizar estudios sobre la dinámica y química atmosférica de la ZMCM.<br>79.7 Realizar estudios para establecer indicadores de movilidad vehicular sustentable en la ZMCM. |
| 81. Reactivación del Fideicomiso Ambiental del Valle de México (FIDAM).  | 81.1 Restablecer un mecanismo que alimente de recursos financieros para la implementación de las medidas del PROAIRE (Fideicomiso 1490-FIDAM).  |



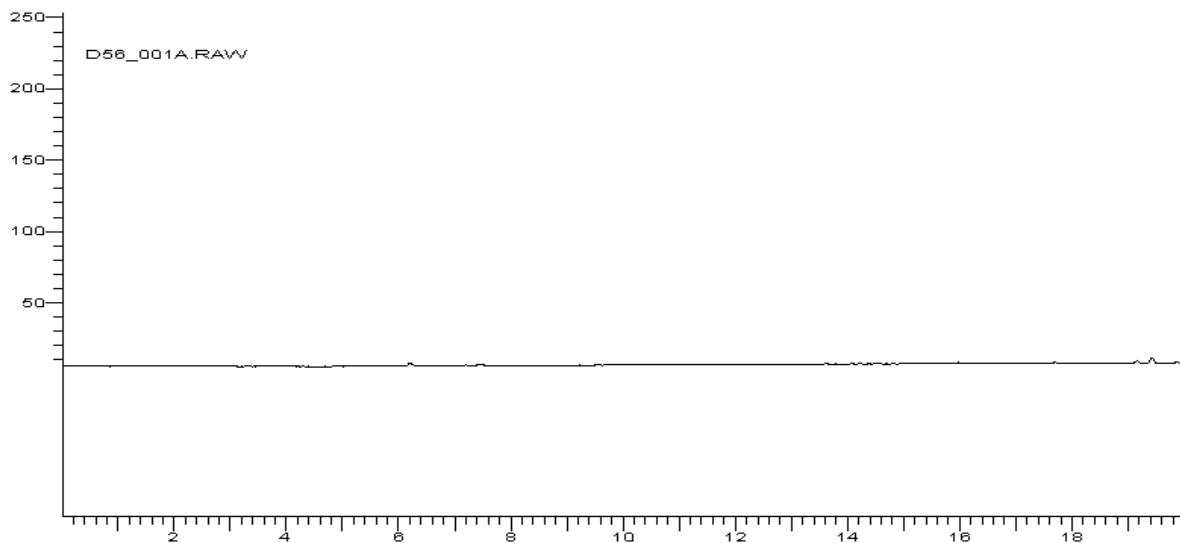
## A2. Cromatogramas y curvas de calibración.



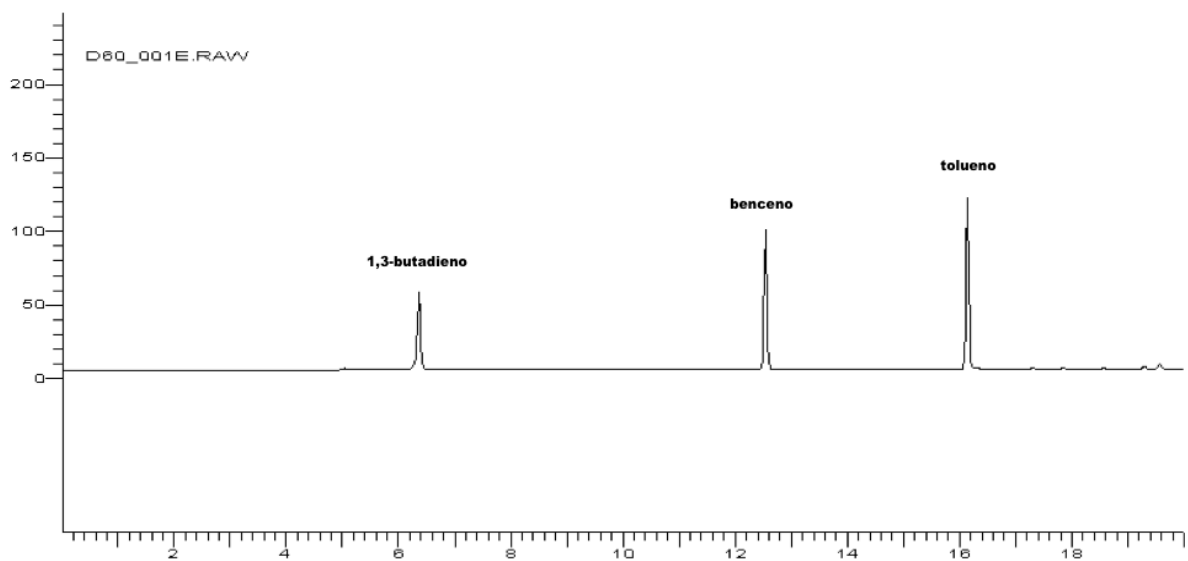
**Figura A2a.** Cromatograma del blanco con nitrógeno grado cromatográfico.



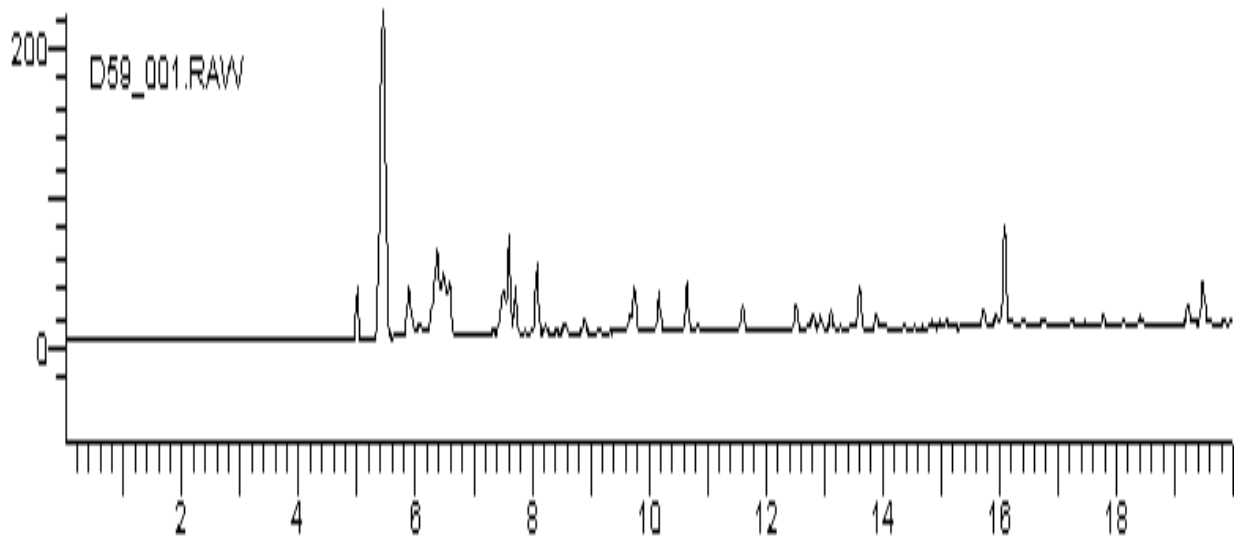
**Figura A2b.** Cromatograma del nitrógeno contenido en un canister posterior a su limpieza.



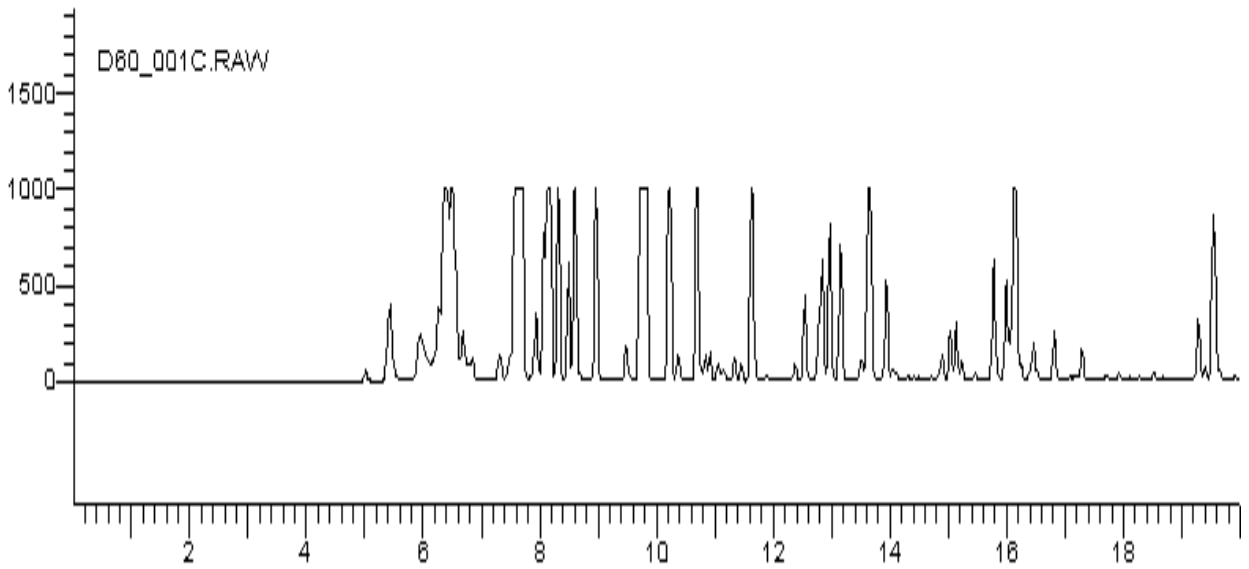
**Figura A2c.** Cromatograma del aire cero usado como diluyente en la curva de calibración.



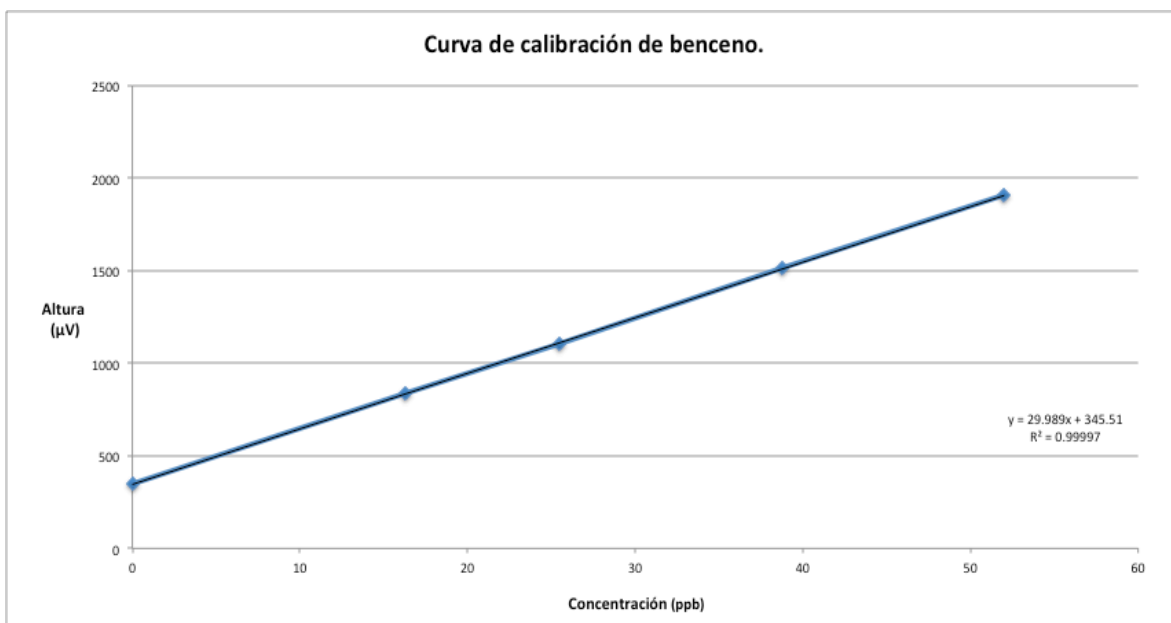
**Figura A2d.** Cromatograma del gas estándar, 1 ppm.



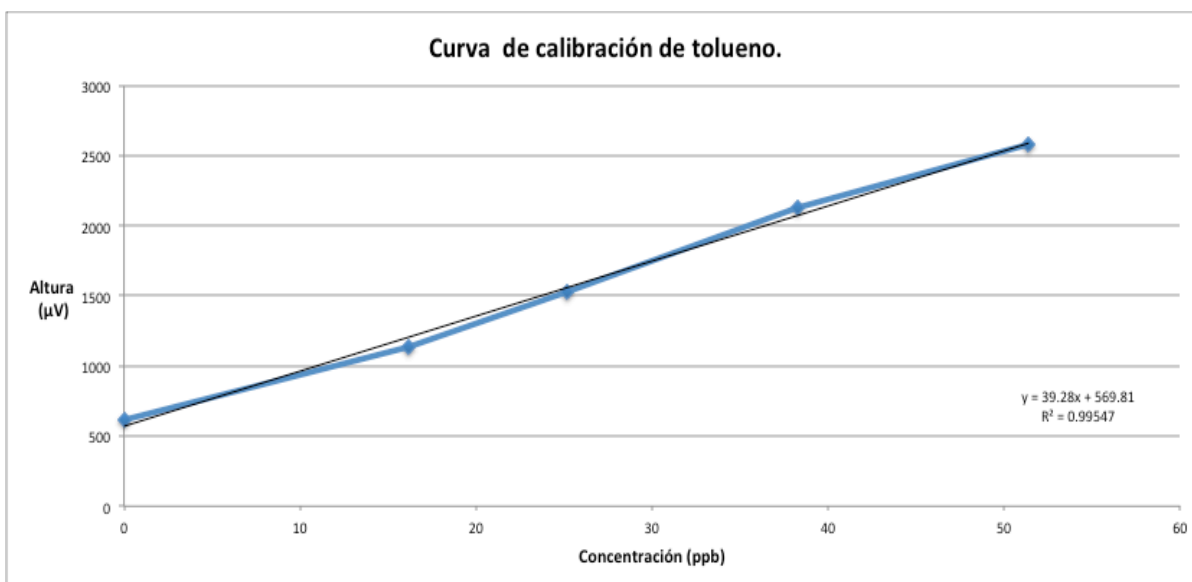
**Figura A2e.** Ejemplo de cromatograma para una muestra en el CCA.



**Figura A2f.** Ejemplo de cromatograma para una muestra en la gasolinera.



**Figura A2g.** Curva de calibración usada para la determinación de las concentraciones de benceno durante la Campaña III.



**Figura A2h.** Curva de calibración usada para la determinación de las concentraciones de tolueno durante la Campaña III.