



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Análisis y evaluación del impacto ambiental de las gasolinas que se comercializan en la CDMX respecto al contenido de BTEX.

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Químico

PRESENTA:

Daniel López Herrera

DIRECTOR DE TESIS

Dr. M. Javier Cruz Gómez

Ciudad Universitaria, CD.MX., 2017





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: MARIA RAFAELA GUTIERREZ LARA

VOCAL: Profesor: MODESTO JAVIER CRUZ GOMEZ

SECRETARIO: Profesor: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

1er. Suplente: Profesor: HUGO ORTIZ MORENO

2do. Suplente: Profesor: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

Sitio donde se desarrolló el tema:

Facultad de Química Laboratorio 212, conjunto E, Departamento de Ingeniería Química,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Del. Coyoacán, Ciudad de México.

Asesor del tema:

Modesto Javier Cruz Gómez

Sustentante:

Daniel López Herrera

Índice

Resumen	9
Capítulo 1. Introducción	10
Objetivos	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Particulares.....	11
Hipótesis.....	11
Capítulo 2. Marco Teórico	12
2.1 Fundamentos	12
2.1.1 Atmósfera.....	12
2.1.2 Contaminación atmosférica	13
2.1.3 Tipos de contaminantes.....	14
2.1.3.1 Contaminantes primarios.	14
2.1.3.2 Contaminantes secundarios.....	15
2.1.4 Precursores de Ozono.....	16
2.1.5 Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).....	17
2.1.6 Grupo BTEX.	17
2.1.7 Tipos de fuentes de emisión	20
2.1.8 Gasolina y composición	20
2.1.9 Factores de emisión en repostaje de gasolina.....	22
2.2 Características de la ZMVM	24
2.2.1. Venta de gasolina en la CDMX	25
2.3 Monitoreo de la calidad del aire	25

2.3.1 Modelos de la calidad del aire (MCA)	26
2.3.2 ALOHA® (Versión 5.4.7, sept 2016)	27
2.3.3 ArcGIS® ESRI (Versión 10.2.2).....	27
2.4 Normatividad	28
2.4.1 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)	28
2.4.2 Límites permisibles de emisiones para compuestos orgánicos volátiles en fuentes fijas de la CDMX.	30
2.4.3 Especificaciones de calidad de los petrolíferos	31
2.4.4 Normas ASTM	32
Capítulo 3. Metodología	33
3.1 Implementación del método ASTM D5769.....	34
3.1.1 Cambio de columna y calibración del equipo.	34
3.1.2 Estándares químicos y cuantificación.....	36
3.2 Muestreo	39
3.2.1. Estaciones de servicio seleccionadas	39
3.2.2 Recolección de muestras	42
3.3 Determinación de BTEX.....	45
3.3.1 Cálculo de densidad	45
3.4 Simulación de concentración por la emisión de BTEX.....	46
3.4.1 Radios de afectación en ALOHA ® 5.4.7	47
3.4.2 Proyección desde una imagen satelital.....	50
Capítulo 4. Resultados.....	52
4.1 Cuantificación de BTEX en gasolinas de la CDMX	52
4.2. Estimación de la emisión de BTEX en zonas aledañas a CU	63

4.3 Concentración de BTEX alrededor de Ciudad Universitaria	64
Conclusiones.....	72
Bibliografía	74
Anexo A. Cálculo de la emisión de los BTEX	79
Anexo B. Curvas de calibración del cromatógrafo.....	84

Abreviaturas

CDMX	Ciudad de México
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
%v	porcentaje en volumen
%m/m	porcentaje en masa
ppm	partes por millón
ppb	partes por billón
GC/MS	cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas
US EPA	Agencia de Protección Ambiental
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
EEA	Agencia Ambiental Europea
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos
MRI	Máxima Reactividad Incremental
CAS RN	Número de registro CAS (Chemical Abstracts Service)
LMP	Límite Máximo Permisible
OMS	Organización Mundial de la Salud
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente

ATDSR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional
ACGIH	Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales
OAQPS	Oficina de Planificación y Normas de Calidad del Aire
SENER	Secretaría de Energía
CRE	Comisión Reguladora de Energía
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Hidrocarburos detectables encontrados en las gasolinas de Estados Unidos de América.

Tabla 2.2. Factores de emisión para repostaje de gasolina.

Tabla 2.3. Intervalos de concentración para asignación de colores.

Tabla 2.4. Ecuaciones simplificadas para cálculo del IMECA.

Tabla 2.5. Límites permisibles en fuentes fijas.

Tabla 3.1. Condiciones de operación del cromatógrafo de gases.

Tabla 3.2. Concentraciones del kit de estándares químicos

Tabla 3.3. Muestreo estratificado de asignación proporcional.

Tabla 3.4. Cronograma para la recolección de muestras y su análisis.

Tabla 3.5. Dirección de las gasolineras alrededor de CU.

Tabla 4.1. Densidad de las gasolinas.

Tabla 4.2. Concentración en porcentaje volumen para BTEX.

Tabla 4.3. Emisión de BTEX en las gasolineras aledañas a CU.

Tabla 4.4. Radios de concentración de benceno para cada gasolinera.

Tabla 4.5. Radios de concentración de tolueno para cada gasolinera.

Tabla 4.6. Radios de concentración de etibenceno para cada gasolinera.

Tabla 4.7. Radios de concentración de xilenos para cada gasolinera.

Tabla 4.8. Niveles mínimos de exposición de BTEX.

Tabla A.1 Factores de emisión de repostaje de gasolina.

Índice de Figuras

Figura 2.1. Capas de la atmósfera.

Figura 2.2. Llenado del depósito subterráneo.

Figura 2.3. Repostaje de combustible en vehículos.

Figura 3.1. Esquema para describir metodología.

Figura 3.2. Cromatógrafo de gases.

Figura 3.3. Retiro de la columna con afinidad a hidrocarburos.

Figura 3.4. Horno del cromatógrafo con la columna.

Figura 3.5. Kit de estándares para la determinación de compuestos aromáticos en las gasolinas.

Figura 3.6. Curva de calibración de benceno (regresión lineal).

Figura 3.7. Imagen de la CDMX identificando las gasolineras del muestreo.

Figura 3.8. Recolección de gasolina Premium.

Figura 3.9. Recolección de gasolina Magna.

Figura 3.10. Etiquetado y almacenado de muestras

Figura 3.11. Determinación de densidad con picnómetro.

Figura 3.12. Datos requeridos para generar los radios de afectación.

Figura 3.13. Radios de afectación por ALOHA ® 5.4.7.

Figura 3.14. Imagen satelital de Google Earth Pro 7.1.8.3036.

Figura 3.15. Radios de afectación a escala 1:50,000.

Figura 4.1. Máximos y mínimos de %v de benceno.

Figura 4.2. Máximos y mínimos de %v de tolueno.

Figura 4.3. Máximos y mínimos de %v de etilbenceno.

Figura 4.4. Máximos y mínimos de %v de xilenos.

Figura 4.5. Concentraciones promedio de BTEX para CDMX.

Figura 4.6. Concentración de benceno por delegación vs NOM

Figura 4.7. Suma de los promedios de BTEX vs NOM

Figura 4.8. Mapa de emisión de benceno (día).

Figura 4.9. Mapa de emisión de benceno (noche).

Figura 4.10. Mapa de emisión de tolueno (día).

Figura 4.11. Mapa de emisión de tolueno (noche).

Figura 4.12. Mapa de emisión de etilbenceno (día).

Figura 4.13. Mapa de emisión de etilbenceno (noche).

Figura 4.14. Mapa de emisión de xilenos (día).

Figura 4.15. Mapa de emisión de xilenos (noche).

Figura B.1. Curva de calibración de tolueno (regresión lineal).

Figura B.2. Curva de calibración de etilbenceno (regresión lineal).

Figura B.3. Curva de calibración de m-xileno (regresión lineal).

Figura B.4. Curva de calibración de p-xileno (regresión lineal).

Figura B.5. Curva de calibración de o-xileno (regresión lineal).

Resumen

En el presente trabajo se estudió la calidad de los petrolíferos respecto a la concentración de BTEX en las gasolinas Magna y Premium en el mes de febrero de 2017. Para esto se generó una base de datos de los porcentajes en volumen de BTEX y de la densidad de las gasolinas Magna y Premium de las 100 estaciones de servicio incluidas en el muestreo estratificado proporcional realizado en la Ciudad de México.

Además, se evaluó el impacto ambiental generado por la evaporación de BTEX en las gasolineras aledañas a Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México utilizando la base de datos, factores de emisión, el software ALOHA® 5.4.7 y ArcGIS 10.2.2 para la obtención de un mapa con los radios de afectación determinados a partir de diferentes concentraciones de contaminantes.

Los resultados obtenidos para la gasolina de la CDMX son aceptables debido a que no sobrepasan los límites establecidos por las normas oficiales mexicanas. Y no existe riesgo para la población aledaña a Ciudad Universitaria en cuanto a evaporación de contaminantes de BTEX se refiere.

Capítulo 1. Introducción

El deterioro en la calidad del aire es un problema que afecta el bienestar de los seres humanos y el ambiente que nos rodea. En una ciudad las fuentes no naturales son las principales emisoras de contaminantes tomando en cuenta automóviles, industrias, negocios particulares, cosméticos de higiene personal, etc. La CDMX ha sufrido grandes cambios en los últimos 20 años en cuanto a cambios demográficos y climatológicos, lo que hace que actualmente afronte dificultades en la contaminación debido a la gran cantidad de personas en una misma zona.

Se buscan soluciones a estos fenómenos demográficos, pero a pesar de los esfuerzos muchos de estos contaminantes siguen afectando la calidad del aire. Los contaminantes que persisten son el ozono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y las partículas sólidas de 10 micras. La solución al problema de la calidad del aire requiere un extenso programa de regulación y monitoreo en el cual se tomen las medidas necesarias de acuerdo a las concentraciones de los contaminantes.

En este trabajo se pretende conocer la cantidad de BTEX presente en la gasolina de la CDMX en el mes de febrero de 2017, ya que al ser el combustible más utilizado es necesario mantenerlo en los límites establecidos para no generar exceso de contaminantes y daños a la salud por la gran flota de automóviles que circula a diario por la CDMX.

Además, se realizó una simulación de emisión de BTEX en zonas aledañas a Ciudad Universitaria para conocer las concentraciones de contaminantes que se podrían tener por repostaje en automóviles cerca de las gasolineras que es donde se reabastecen los automóviles

Objetivos

Objetivo General

Analizar, evaluar y correlacionar la información obtenida sobre la concentración de BTEX en las gasolinas de la Ciudad de México.

Objetivos Particulares

- Determinar las concentraciones de benceno, tolueno, xilenos, y etilbenceno en las gasolinas que se venden en la CDMX.
- Realizar una base de datos con los valores obtenidos del análisis de BTEX en las gasolinas, para verificar el cumplimiento de los límites establecidos por las normas mexicanas.
- Correlacionar la información obtenida para determinar los posibles riesgos que existen para la población que se encuentra cerca de las estaciones de servicio o que trabaja en ellas.
- Conocer las posibles concentraciones que se encuentran en el aire que fluye por Ciudad Universitaria y que respira la población estudiantil (impacto ambiental).

Hipótesis

Es posible determinar la concentración de BTEX presente en la gasolina para evaluar el impacto ambiental de estos contaminantes.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Fundamentos

2.1.1 *Atmósfera*

La atmósfera es una mezcla de gases transparentes de 640 km, de espesor que envuelve a la Tierra.

La mezcla de gases se compone por el 78 % de nitrógeno (N_2), 21 % de oxígeno (O_2) y el 1 % restante son gases traza, como vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), ozono (O_3), partículas volcánicas, polvos y humos. A pesar de la poca cantidad de estos gases traza, estos gases desempeñan un papel fundamental en los fenómenos meteorológicos (SEMARNAT, 2013)

Las capas bajas de la atmósfera se encuentran en los 5 kilómetros más próximos a la superficie terrestre, donde se concentra la mitad de la masa total atmosférica y en la cual se presentan los fenómenos meteorológicos y reacciones químicas que intervienen en procesos como la erosión y el ciclo hidrológico.

La composición química y la temperatura de la atmósfera varían en función de la altura. La Unión Internacional de Geodesia y Geofísica adoptaron como estructura cuatro capas atmosféricas: troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera (Contreras A. M., 2013). En la **figura 2.1** se puede apreciar la distancia que existe entre las diferentes capas atmosféricas y la capa de ozono que nos protege de la radiación ultravioleta.



Figura 2.1. Capas de la atmósfera

Fuente: Contreras A.M. , 2013.

El O_3 se encuentra en dos capas de la atmósfera en la estratosfera y en la tropósfera. En la estratosfera es considerado como favorable, ya que protege la vida en la tierra de la radiación ultravioleta (UV) del sol, en la troposfera es un contaminante que afecta la salud humana y los ecosistemas (UNEP y OMS, 2011).

2.1.2 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se puede definir de varias formas, por ejemplo, la Agencia Ambiental Europea (EEA) lo define como “la presencia en el aire de contaminantes o sustancias contaminantes en una concentración tal que interfiere con la salud o el bienestar humano, o que produce otros efectos medioambientales perjudiciales”. Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) la define como “la aparición en el aire de una o varias sustancias extrañas en cantidades y durante períodos de tiempo suficientemente prolongados como para producir efectos nocivos sobre el hombre, los animales, las plantas o las tierras” (Gallego, 2012).

Ambas definiciones concluyen en que es un problema que puede tener efectos adversos en todos los receptores del medio ambiente y su conjunto.

2.1.3 Tipos de contaminantes

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales clasifica a los contaminantes de la siguiente forma.

2.1.3.1 Contaminantes primarios.

Los contaminantes primarios son vertidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros.

Los contaminantes atmosféricos que integran este grupo son:

- Óxidos de azufre (SO_x). Se forman por la combustión del azufre presente en el carbón y el petróleo. Los SO_x forman con la humedad ambiente aerosoles, incrementando el poder corrosivo de la atmósfera, disminuyendo la visibilidad y provocando la lluvia ácida.
- Monóxido de carbono (CO). Es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera. Se produce por la combustión incompleta de compuestos de carbono. Es un gas inestable que se oxida generando dióxido de carbono (CO_2). Alrededor del 70 por ciento del CO provienen de los vehículos (SEMARNAT, 2013).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x). Se producen en la combustión de productos fósiles, destacando los vehículos, carbón y quemas de madera. La producción de fertilizantes y explosivos, tabaco y calderas

generan emisiones importantes de NO_x . El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) requieren especial atención. El NO se oxida formando NO_2 , mientras que el NO_2 es precursor del esmog fotoquímico.

- Partículas. Es material respirable presente en la atmósfera en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras). De acuerdo con su tamaño se pueden dividir en dos grupos principales: las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) y las de fracción respirable más pequeña ($\text{PM}_{2.5}$).
- Hidrocarburos (HC). Las emisiones de HC están asociadas a la mala combustión de derivados del petróleo. Las fuentes más importantes de emisión son el transporte por carretera, los disolventes, pinturas, vertederos y la producción de energía. Los de mayor interés son los compuestos orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (PCB) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH).

2.1.3.2 Contaminantes secundarios.

Los contaminantes secundarios son los contaminantes originados en el aire como consecuencia de la transformación y reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera. Se puede considerar:

- Ozono (O_3). Como se mencionó anteriormente el O_3 forma parte de la composición de la atmósfera; sin embargo, a baja altura (O_3 troposférico) resulta perjudicial por su carácter oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico, por lo que reacciona con rapidez generando compuestos secundarios (SEDEMA, 2014).

- Contaminación fotoquímica. La constituyen la luz solar y sustancias susceptibles de ser oxidadas. El smog fotoquímico es una mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios (Contreras A. M., 2013).

2.1.4 Precursores de Ozono

El ozono en la tropósfera es un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas, no es emitido por ninguna fuente. Ya que el O₃ y otros oxidantes, como el nitrato de peroxiacilo (PAN) y el peróxido de hidrogeno (H₂O₂) se forman en áreas contaminadas cuyos precursores principales son los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno.



El CO es fundamental para la formación de ozono en la tropósfera. La producción de O₃, de oxidantes y de los productos oxidantes de estos precursores es compleja, ya que tienen un comportamiento no lineal en la que se involucran muchos factores como:

La intensidad y distribución del espectro de la luz solar, la altura de la capa de mezcla atmosférica, la concentración de los precursores en el ambiente y las velocidades de reacción química. Además, de la transformación por efectos meteorológicos y de aerosoles (EPA, 2013).

Los NO_x, se emiten principalmente en el sector transporte o fuentes móviles. Estas fuentes representan el 78% de los NO_x en la ZMVM (SEDEMA, 2014).

2.1.5 Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

Los compuestos orgánicos volátiles se agrupan principalmente en las siguientes tres familias de compuestos: alifáticas, aromáticas y heterocíclicas. Los compuestos aromáticos son los que requieren mayor atención dado su carácter toxicológico, siendo benceno, sus derivados y las especies aromáticas policíclicas las que concitan mayor interés.

Las emisiones de los COV se sitúan como uno de los principales problemas de contaminación del aire de la ZMVM, debido a su participación en la formación del ozono troposférico y porque algunos de sus compuestos son considerados tóxicos o contaminantes peligrosos del aire.

Los COV son emitidos por un conjunto numeroso y variado de categorías o fuentes, en general incluyen actividades de uso de solventes, de procesos de combustión, y de recubrimientos, entre otros (SEDEMA, 2014).

2.1.6 Grupo BTEX.

En el caso de la serie derivada del benceno, con sustituyentes alquílicos, destacan el tolueno, etilbenceno y los xilenos en sus tres formas isoméricas: ortoxileno, metaxileno y paraxileno. Estos compuestos en conjunto son conocidos como el grupo BTEX y se les encuentra principalmente en la combustión del carbón, leña, petróleo crudo y alquitrán (Morales, 2006).

En general los hidrocarburos aromáticos afectan los sistemas linfático, hematopoyético, renal y nervioso, además de causar irritación inmediata al contacto sobre la piel y las mucosas (Scheutz, 2004).

La toxicidad de los disolventes orgánicos y compuestos aromáticos en particular del grupo BTEX, es reconocida por la investigación científica desde varias décadas.

El benceno es uno de los componentes de la gasolina más estudiados ya que se utiliza como antidetonante. Es considerado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) como agente carcinógeno del grupo 1, lo cual significa que existe suficiente evidencia para relacionar la exposición a este tóxico y el desarrollo de cáncer, principalmente leucemia y cáncer en la médula ósea (Harper, 1993).

La exposición breve (5 a 10 minutos) a niveles muy altos de benceno en el aire (10,000 a 20,000 ppm) puede producir la muerte. Niveles más bajos (700 a 3,000 ppm) pueden producir letargo, mareo, aceleración del latido del corazón, dolor de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento (ATSDR, 2007).

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) recomienda el nivel máximo de benceno de 1 ppm en el aire del trabajo durante una jornada de 8 horas diarias (ATSDR, 2007).

Por otra parte, la exposición al tolueno se da en personas que trabajan con gasolina, pintura, laca, etc. Sus efectos al sistema nervioso pueden ser pasajeros tales como dolor de cabeza, mareo o pérdida del conocimiento. Sin embargo, la incoordinación, alteraciones mentales y la audición pueden transformarse en permanentes con exposición repetida o inhalación intencional. Entre otros efectos son el daño al riñón, el hígado y la reproducción.

Los estudios en trabajadores y en animales expuestos al tolueno generalmente indican que el tolueno no produce cáncer. La Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) recomienda que la concentración de tolueno en el aire del trabajo no sobrepase 20 ppm en un promedio de 8 horas (ATSDR, 2015).

Mientras que el contacto con los xilenos se puede dar por diversos productos como gasolina, pintura, barniz, laca, productos para prevenir la corrosión y humo de cigarrillo, pero principalmente desde fuentes industriales, en el escape de automóviles y al usarse como disolvente.

Tanto las exposiciones breves como prolongadas a altas concentraciones de xileno pueden producir numerosos efectos sobre el sistema nervioso, como por ejemplo dolor de cabeza, falta de coordinación muscular, mareo, confusión y pérdida del sentido del equilibrio. El nivel máximo de xileno en el aire del trabajo según la OSHA no debe exceder 100 ppm (435 mg/m³) durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas semanales (ATSDR, 2007).

En el caso del etilbenceno, éste se encuentra en el aire principalmente cerca de fábricas o carreteras con mucho tráfico o en productos que lo contienen como la gasolina, sustancias para pegar alfombras, barnices y pinturas. La Agencia IARC ha determinado que el etilbenceno es posiblemente carcinogénico en seres humanos. La exposición breve a niveles altos de etilbenceno en el aire puede producir irritación en los ojos y garganta. La exposición a niveles más altos puede producir solamente mareo. La OSHA ha establecido un límite promedio de exposición al etilbenceno en el aire en el trabajo de 100 ppm durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas semanales (ATSDR, 2010).

2.1.7 Tipos de fuentes de emisión

En el informe de Inventario de Emisiones de la CDMX 2014 se clasifican los contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero de la siguiente forma.

- Fuentes puntuales: Instalación de ubicación fija, que tiene como propósito ejecutar operaciones o procesos industriales, comerciales, o de servicios, que generen emisiones contaminantes a la atmósfera. Incluyendo a las industrias, los comercios y servicios regulados.
- Fuentes de área: Instalaciones emisoras de contaminantes, que son pequeñas, numerosas y dispersas, pero que, en conjunto, las emisiones pueden ser considerables. Incluyen las emisiones domésticas, de combustibles, de solventes, residuos, agrícolas y ganaderas, entre las principales. En esta misma fuente se incluyen los comercios y servicios no regulados.

Fuentes móviles: Cualquier transporte automotor que circula por las vialidades.

Fuentes naturales: Cualquier fuente o proceso natural en la vegetación y los suelos que genere emisiones, para este inventario, incluye las emisiones biogénicas (COV de vegetación y NO_x de los suelos) y la erosión eólica (SEDEMA, 2014).

2.1.8 Gasolina y composición

La gasolina es un líquido inflamable, volátil, mezcla de hidrocarburos utilizados casi exclusivamente como combustible para motores de

combustión interna. Tiene una densidad típica de alrededor de 0.7-0.8 g/cm³ y tiene una presión de vapor Reid (que es alrededor de 10% menos que la verdadera presión de vapor a 37.8°C) que oscila entre 8 y 15 psi equivalente a 0.4-0.9 atm (Concawe, 1985), dependiendo de la temporada y la ubicación geográfica (IARC, 1989). Presenta una apariencia de color verde, roja o amarillenta. Un galón de gasolina contiene 125,000 Btu (BroatchJacobi, 2002). En la **tabla 2.1** se puede observar los valores aproximados de concentración para gasolina.

Tabla 2.1. Hidrocarburos detectables encontrados en las gasolinas de Estados Unidos de América

Componente químico	% en peso (rangos estimados)
Tolueno	5-22
2-Metilpentano	4-14
n-Butano	3-12
iso-Pentano	5-10
n-Pentano	1-9
Xileno (3 isómeros)	1-10
2,2,4-Trimetilpentano	<1-8
n-Hexano	<1-6
n-Heptano	<1-5
2,3,3-Trimetilpentano	<1-5
2,3,4-Trimetilpentano	<1-5
3-Metilpentano	<1-5
Metilciclohexano	<1-5
Benceno	<1-4
2,2,3-Trimetilpentano	<1-4
Metiliterbutileter	<1-4
Metilciclopentano	<1-3
2,4-Dimetilpentano	<1-3
Ciclohexano	<1-3
1,2,4-Trimetilbenceno	<1-3
2-Metil-2-butano	<1-2
2,3-Dimetilbutano	<1-2
trans-2-Pentano	<1-2
Metilciclohexano	<1-2
3-Etiltolueno	<1-2
2,3-Dimetilpentano	<1-2
2,5-Dimetilpentano	<1-2
2-Metil-1-butano	<1-2
Etilbenceno	<1-2

Fuente: American Petroleum Institute, 1981.

2.1.9 Factores de emisión en repostaje de gasolina.

Una fuente importante de emisiones evaporativas es el llenado de tanques subterráneos de estaciones de servicio. La gasolina se entrega generalmente a las estaciones de servicio en camiones cisterna los cuales abastecen tanques de almacenamiento de alrededor de 33,000 litros o más dependiendo de la demanda de los clientes.

Las emisiones se generan cuando los vapores de gasolina en el tanque subterráneo son desplazados a la atmósfera por la gasolina que se carga en el tanque. La cantidad pérdida en el llenado de tanques de servicio depende de varias variables, incluyendo el método y el llenado, la configuración del tanque, la temperatura de la gasolina, la presión de vapor y la composición.

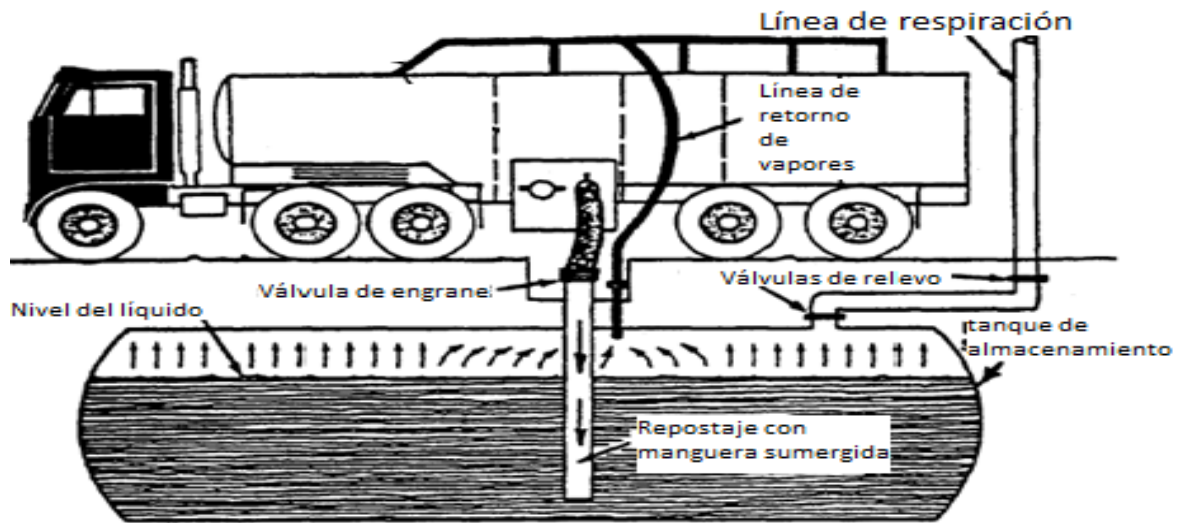
Existen diversos valores de emisión a diferentes condiciones atmosféricas como se muestra en la **tabla 2.2**, donde los valores obtenidos fueron reportados a 16 °C y con un RVP de 10 psia.

Tabla 2.2. Factores de emisión para repostaje de gasolina

Fuente de emisión	Tasa de emisión (mg/L)
Depósito subterráneo o cisterna (Etapa I)	
Llenado de cisterna con manguera sumergida	880
Llenado de cisterna con salpicaduras	1380
Llenado de cisterna con sistema de control	40
Respiración y vaciado del tanque subterráneo	120
Operaciones de repostaje de gasolina en vehículos (Etapa II)	
Pérdidas de desplazamiento (no controladas)	1320
Pérdidas de desplazamiento (controladas)	132
Derrame	80

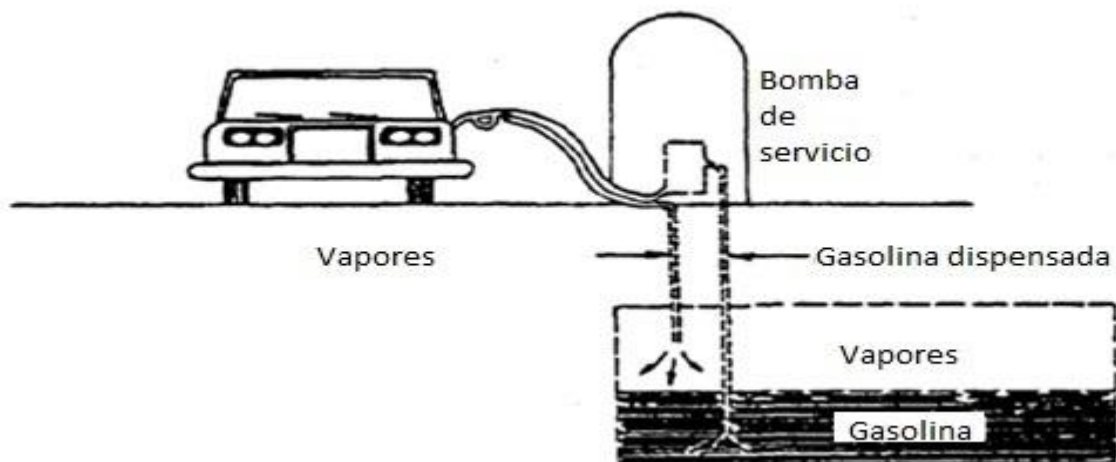
Fuente: U.S. EPA, OAQPS, 2008.

En la **figura 2.2** y **figura 2.3** se pueden observar de manera representativa las dos formas de evaporación por repostaje en gasolineras.



Fuente: U.S. EPA, OAQPS, 2008.

Figura 2.2. Llenado del depósito subterráneo



Fuente: U.S. EPA, OAQPS, 2008.

Figura 2.3. Repostaje de combustible en vehículos

2.2 Características de la ZMVM

La ZMVM es considerada una megaciudad debido a su aglomeración urbana que sobrepasa los 20 millones de personas (45% CDMX y 55% de municipios conurbados). Es una de las 10 ciudades más pobladas del mundo y está conformada por 16 delegaciones y 59 municipios del Estado de México (SEDEMA, 2014). Es una cuenca hidrológica situada en una latitud casi tropical, a 2,240 m sobre el nivel del mar, rodeada por una cadena de montañas con un promedio de altura de 1,000 m. Desde la década de los 40's, con la instalación de industrias, se inició un crecimiento acelerado, una migración gradualmente constante. Así como la creación de nuevos asentamientos poblacionales (Padilla, 2007).

La urbanización produce modificaciones en el clima de las ciudades. En la CDMX la temperatura del aire llega a ser hasta 10° C más elevada que en las zonas que la rodean, esto generado por edificios, pavimento y quema de combustibles. Las construcciones impiden la circulación natural de los vientos, lo que genera una dispersión mala de contaminantes. Otro fenómeno importante es la conocida "isla de lluvia" que son lluvias intensas debido al calor generado por partículas contaminantes (Jauregui, 1991).

Debido a la altitud de la ZMVM, la concentración de oxígeno se ve disminuida en un 23% menor que a nivel del mar, generando una emisión mayor de contaminantes debido a la pérdida en la eficiencia de los motores de combustión interna y a una mayor inhalación de contaminantes en su población debido al aumento de frecuencia respiratoria (SMA-GDF, 2006).

Además, existen zonas de capas de inversión de temperatura en diferentes altitudes lo que atrapa los contaminantes debajo de la capa de inversión y es un factor meteorológico importante.

La cadena montañosa que rodea la ciudad y la localización industrial en la zona norte provocan una acumulación de contaminantes en la zona suroeste ya que la principal entrada de viento se encuentra al noroeste con dirección al suroeste, dificultando la dispersión de los contaminantes (Molina, 2005).

En la ZMVM hay aproximadamente 30,000 fábricas (30% del total en el país) y 12,000 edificios de servicio. Debido a la dispersa ubicación de las fuentes de trabajo, sus habitantes recorren grandes distancias. Lo anterior aunado a los servicios de transporte mal organizados y a la falta de control en la composición de los combustibles, generando una mayor emisión de contaminantes, desgaste físico y derroche de tiempo en los traslados (Bravo, 2006).

2.2.1. Venta de gasolina en la CDMX

De acuerdo a la guía PEMEX se registra un total de 398 gasolineras en la metrópoli, las cuales comercializan la gasolina total que se lleva a cabo en la ciudad. Los datos proporcionados por la Secretaría de Energía en el Sistema de Información Energética mencionan que para el mes de febrero de 2017 se vendieron 349, 675,712 L de gasolina Magna y 83,142,720 L de gasolina Premium (SENER, 2017).

2.3 Monitoreo de la calidad del aire

El monitoreo atmosférico proporciona información acerca del estado del aire en nuestra ciudad y por lo tanto constituye una herramienta en el

desarrollo de programas de gestión de la calidad del aire que aplican los sectores o gobiernos involucrados (INE, 2006).

Una parte importante al estudiar la contaminación del aire es el monitoreo atmosférico de la calidad del aire. Las técnicas empleadas en el monitoreo se basan en Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) para garantizar la validez, con excepción de algunos contaminantes. La Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX, se encarga de vigilar la calidad del aire a través del Sistema de Monitoreo de la Ciudad de México (SIMAT), el cual vigila los niveles de contaminantes atmosféricos en las diferentes zonas de la ciudad (SIMAT, 2017).

2.3.1 Modelos de la calidad del aire (MCA)

Los modelos de la calidad del aire son un sistema de códigos acoplados a un software que representan a los procesos químicos, físicos y dinámicos en la atmósfera, lo que propicia el entendimiento del transporte y emisión de los contaminantes atmosféricos desde sus fuentes, reacciones, transformaciones y depósito (Jacobson, 2006).

De acuerdo a la EPA se clasifican como:

- Modelos de dispersión. -Se utilizan principalmente en procesos de estimación de concentración específica de contaminantes atmosféricos a nivel de suelo y fuentes de emisión.
- Fotoquímicos. - Son utilizados para estimar la concentración de contaminantes atmosféricos y depósito para compuestos reactivos a grandes escalas.
- Receptores. - Son modelos que utilizan técnicas observacionales usando características físicas y químicas de los gases y partículas medidos en la fuente y el receptor para identificar la presencia y

para cuantificar las contribuciones de la fuente a las concentraciones del receptor.

2.3.2 ALOHA® (Versión 5.4.7, sept 2016)

ALOHA® (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) es un modelo de dispersión atmosférica usado para evaluar liberaciones de vapores químicos peligrosos. Este programa permite al usuario estimar la dispersión a favor del viento de una nube química tóxica y peligrosa a partir de las características físicas de la sustancia liberada, condiciones atmosféricas y las circunstancias específicas de la liberación.

ALOHA® estima zonas de riesgo asociadas con varios tipos de liberaciones de productos químicos peligrosos, incluyendo nubes de gas tóxico, incendios y explosiones (NOAA, 2013).

Fue desarrollado por la División de Respuesta de Emergencia (ERD), una división dentro de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), en colaboración con la Oficina de Gestión de Emergencias de la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

2.3.3 ArcGIS® ESRI (Versión 10.2.2)

ArcMap es la herramienta principal de ArcGIS, ArcMap es el lugar donde visualiza y explora los datos del Sistema de Información Geográfico de su área de estudio, donde se asignan símbolos y donde crean los diseños de mapa para imprimir o publicar.

ArcMap representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa. Los elementos de mapa comunes son el marco de datos, que contiene las capas de mapa para una

extensión determinada, más la barra de escala, la flecha de norte, el título, texto descriptivo, una leyenda de símbolos, etc.

ArcMap puede georreferenciar imágenes satelitales y otorgarles la escala adecuada lo que permite visualizar de manera más real algunos sitios de interés (ESRI, 2017).

En general ArcGIS es una plataforma donde se crea, se administra y se comparten mapas, datos y modelos analíticos geográficos. Tiene demasiadas aplicaciones, pero la más destacada es la visualización simplificada.

2.4 Normatividad

Para poder asegurar una evaluación completa de la calidad del aire y de la calidad de los petrolíferos, se deben considerar los límites permisibles establecidos en las NOMs. Los límites están definidos de acuerdo al grado de afectación que tienen en la salud de la población.

2.4.1 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)

La norma ambiental NADF-009-AIRE-2006 establece los lineamientos para la obtención, el uso y la comunicación de riesgos para el IMECA en la CDMX.

El IMECA tiene como propósito informar a la población de manera oportuna la calidad del aire, los probables daños a la salud y las medidas de protección preventivas.

El Índice engloba a los contaminantes criterio como el O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5} expresados a condiciones locales de presión y temperatura. Cuenta con una escala de colores la cual facilita el entendimiento del

calificativo de la calidad del aire. En la **tabla 2.3** se muestra la escala de colores y los rangos límite para cada contaminante criterio.

Tabla 2.3. Intervalos de concentración para asignación de colores

Calidad del Aire IMECA	O₃ (ppm)	NO₂ (ppm)	SO₂ (ppm)	CO (ppm)	PM₁₀ (µgm ⁻³)	PM_{2.5} (µgm ⁻³)
Buena [0-50]	0.000-0.055	0.000-0.105	0.000-0.065	0.00-5.50	0-60	0-15.4
Regular [51-100]	0.056-0.110	0.106-0.210	0.066-0.130	5.51-11.00	61-120	15.5-40.4
Mala [101-150]	0.111-0.165	0.211-0.315	0.131-0.195	11.01-16.50	121-220	40.5-65.4
Muy mala [151-200]	0.166-0.220	0.316-0.420	0.196-0.260	16.51-22.00	221-320	65.5-150.4
Extremadamente mala	>0.220	>0.420	>0.260	>22.00	>320	>150.4

Fuente: SEDEMA, 2006.

En la **tabla 2.4** se muestran las ecuaciones simplificadas para el cálculo del IMECA en cierto rango de concentraciones para cada contaminante criterio.

Tabla 2.4. Ecuaciones simplificadas para cálculo del IMECA.

Contaminante criterio	Intervalo de concentraciones	Ecuación simplificada
Ozono	0.000 - > 0.220	$IO_3 = C[O_3] * 100/0.11$
Dióxido de nitrógeno	0.000 - > 0.420	$I[NO_2] = C[NO_2] * 100/0.21$
Dióxido de azufre	0.000 - 0.260	$I[SO_2] = C[SO_2] * 100/0.13$
Monóxido de carbono	0.00 - > 22.00	$I[CO] = C[CO] * 100/11$
Partículas menores a 10 micrómetros	0 - 120	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/6$
	121 - 320	$I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * 0.5$
	> 320	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * 5/8$
Partículas menores a 2.5 micrómetros	0 - 15.4	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 50/15.4$
	15.5 - 40.4	$I[PM_{2.5}] = 20.50 + C [PM_{2.5}] * 49/24.9$
	40.5 - 65.4	$I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * 49/24.9$
	65.5 - 150.4	$I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * 49/84.9$
	> 150.4	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * 201/150.5$

Fuente: SEDEMA, 2006.

2.4.2 Límites permisibles de emisiones para compuestos orgánicos volátiles en fuentes fijas de la CDMX.

La norma ambiental NADF-011-AMBT-2013 establece los límites máximos permisibles de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en fuentes fijas de jurisdicción de la CDMX que utilizan solventes orgánicos o productos que los contienen.

Esta norma establece los límites permisibles tomando en cuenta la reacción de los diferentes tipos de COV con una mezcla de aire rica en NO_x para formar ozono, también indica la máxima reactividad incremental (MRI) de diferentes COV, y es la máxima cantidad de ozono que puede formarse por la adición de una cantidad de un COV específico a una mezcla de aire rica en NO_x, sus unidades son gramos de ozono por gramo de COV.

En la **tabla 2.5** los límites máximos permisibles para COV en fuentes fijas para los compuestos de interés.

Tabla 2.5. Límites permisibles en fuentes fijas

Solvente orgánico	MRI	CAS	LMP de COV [ton/año]
Xileno	7.70	1330-20-7	6
Tolueno	3.93	108-88-3	13
Etilbenceno	2.96	100-41-4	17
Benceno	0.69	71-43-2	72

Fuente: Gaceta Oficial Distrito Federal, 2015.

2.4.3 Especificaciones de calidad de los petrolíferos

La NOM-016-CRE-2016 rige actualmente la calidad de los combustibles en México. Esta norma fue expedida por la Comisión Reguladora de Energía y es un precedente de la NOM-EM-005-CRE-2015 y principalmente de la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 que estuvo vigente hasta el 2015 dando un gran avance en la calidad de los combustibles comercializados en el país.

Esta norma tiene como objetivo establecer las especificaciones de calidad que deben cumplir distintos combustibles incluyendo las gasolinas procesadas utilizadas en automotores. En esta se establecen los límites en las concentraciones de oxígeno, etanol, aromáticos, aditivos, especificaciones de presión de vapor, índice de octano, temperaturas de destilación, etc.

La NOM-016-CRE-2016 menciona los métodos ASTM permitidos para determinar aromáticos y benceno. Para determinar benceno se consideran los métodos ASTM D5580, ASTM D6277 y ASTM D3606. Y para aromáticos el método ASTM D1319.

Los métodos D5580 y D3606 se consideran el uso de un cromatógrafo de gases, y el método D6277 se basa en el uso de un equipo de infrarrojo. Sin embargo, existe otro método análogo al D3606 que es el método ASTM D5769 que contempla el uso de un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas (GC/MS).

Además, esta norma establece un valor límite de contenido de benceno en las gasolinas que se comercializan en la ZMVM de 1% volumen y para el resto del país de 2% volumen, en el caso del contenido de aromáticos se considera un valor límite de 25% en volumen para la gasolina Premium y Regular, mientras que para el resto del país se

considera un valor límite de 32 por ciento en volumen para la gasolina Premium e informativo para el caso de gasolina regular.

2.4.4 Normas ASTM

La Asociación Americana para Pruebas y Materiales, mejor conocida como ASTM, es líder reconocido a nivel mundial en el desarrollo y suministro de normas de consenso voluntario. Hoy en día, más de 12,000 normas ASTM se utilizan en todo el mundo para mejorar la calidad del producto, mejorar la salud y la seguridad, fortalecer el acceso al mercado y el comercio, así como aumentar y construir la confianza del consumidor. La ASTM crea métodos de prueba, especificaciones, clasificaciones, guías y prácticas que apoyan a las industrias y los gobiernos de todo el mundo (ASTM International, 2001).

Para este trabajo se consideró el método ASTM D5769 que lleva por nombre "Standard Test Method for Determination of Benzene, Toluene, and Total Aromatics in Finished Gasolines by Gas Chromatography/Mass Spectrometry" (Método de prueba estándar para la determinación de benceno, tolueno y aromáticos totales en gasolinas procesadas para ser analizadas por cromatografía de gases / espectrometría de masas).

Este método ha sido probado para las siguientes concentraciones, en porcentaje volumen líquido, para los siguientes compuestos aromáticos: benceno de 0.1 a 4%; tolueno de 1 a 13% y aromáticos totales (C₆ a C₁₂) del 10 al 42%.

Capítulo 3. Metodología

Para describir de manera simplificada la metodología se presenta la **figura 3.1.**

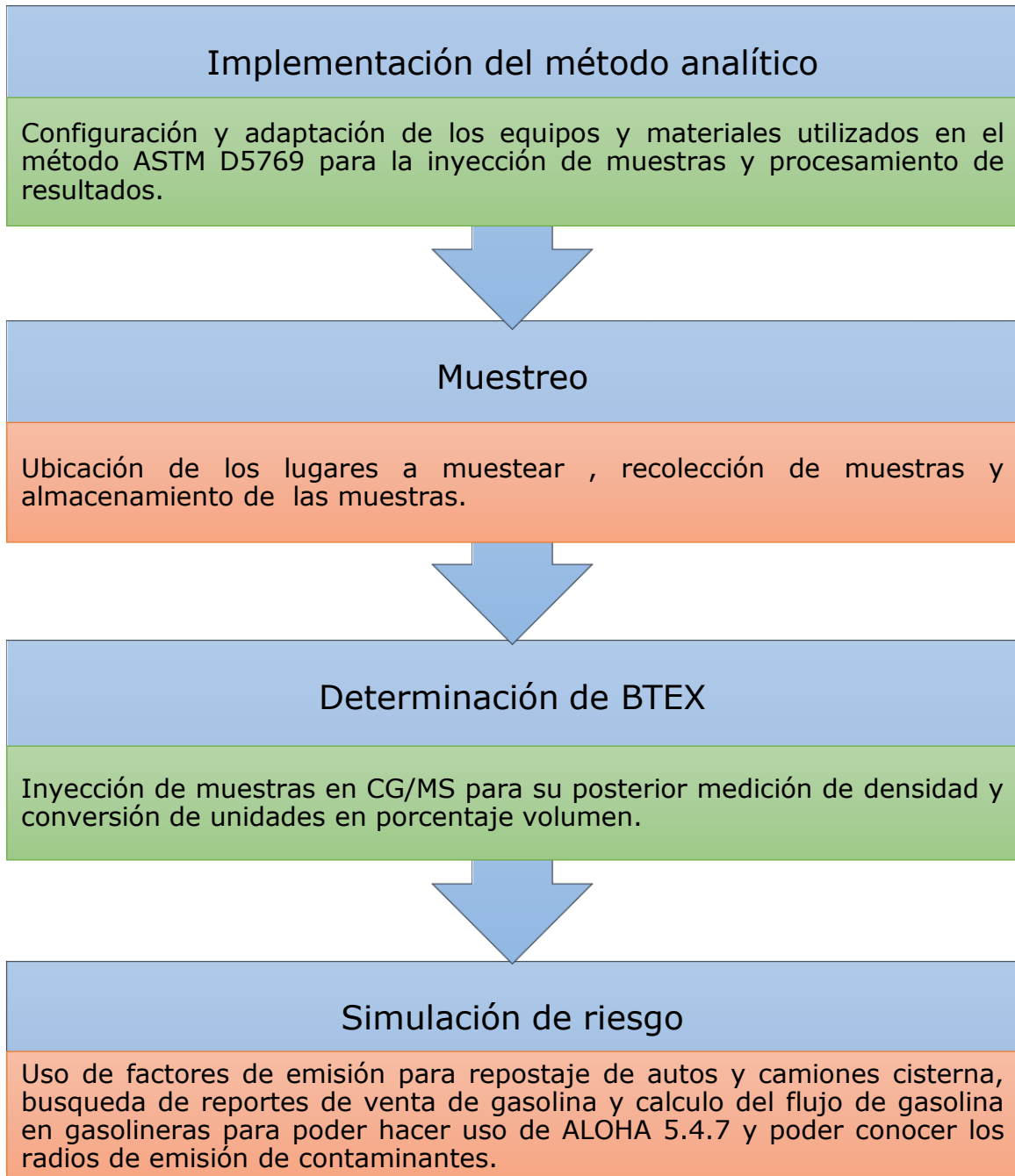


Figura 3.1. Esquema para describir metodología

3.1 Implementación del método ASTM D5769

A continuación, se describe por pasos el método utilizado para la cuantificación de BTEX por medio de un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas.

3.1.1 Cambio de columna y calibración del equipo.

El equipo que se utilizó fue un cromatógrafo de gases con control de temperatura, con inyección dividida y columna con afinidad a hidrocarburos ligeros y acoplado a un espectrómetro de masa (GC/MS) capaz de producir espectros de impacto a 70 o más electron-voltios o equivalentes, y capaz de escanear el rango de interés para la cuantificación. Para el proceso de datos se utilizó el software *Chemstation de Agilent interconectado con los dos equipos mencionados (GC/MS)*.

En la **tabla 3.1** se muestran las condiciones de operación ocupadas en el cromatógrafo de gases.

Tabla 3.1. Condiciones de operación del cromatógrafo de gases

Columna	Dimetil polisiloxano con longitud de 60 metros
Diámetro	0.25 mm
Diámetro de capa	1 μ m
Rango de inyección de muestra	0.1-0.5 μ l
Temperatura de inyección	250 °C
Rampa de temperatura en el horno	60°C inicial, incremento de 3 °C hasta 120 °C, incremento de 10 °C hasta 250 °C.

Gas de carga	Helio
Temperatura de interfaz MS:	280 °C
Tipo de MS	Cuádrupolo

Fuente. (ASTM D5769, 2015)

Para la determinación de BTEX fue necesario realizar la calibración del equipo, para ello se adquirió una columna con afinidad al uso de muestras con hidrocarburos. Una vez instalada la columna se configuro el método utilizado en el (GC/MS) de acuerdo a la norma ASTM D5769.

La curva de calibración se obtuvo a partir de estándares químicos para poder realizar una medición cuantitativa de la cantidad de BTEX en las muestras de gasolina. El cromatógrafo empleado fue un GC/MS marca Agilent modelo GC 7890B acoplado a un espectrómetro de masas MS 5977 (**figura 3.2**).



Figura 3.2. Cromatógrafo de gases

Para la inyección en el cromatógrafo primero se instaló y se configuró el equipo de la siguiente forma: se adquirió una columna para cromatografía de gases de 60 metros con afinidad a hidrocarburos ligeros con base en el método ASTM D5769. Posteriormente, se realizó el cambio de columna en el cromatógrafo de gases, para ello se ventiló,

apagó y purgó el equipo. Una vez purgado el equipo se abrió el horno y se retiró la columna que se encontraba en el equipo (**figura 3.3**).

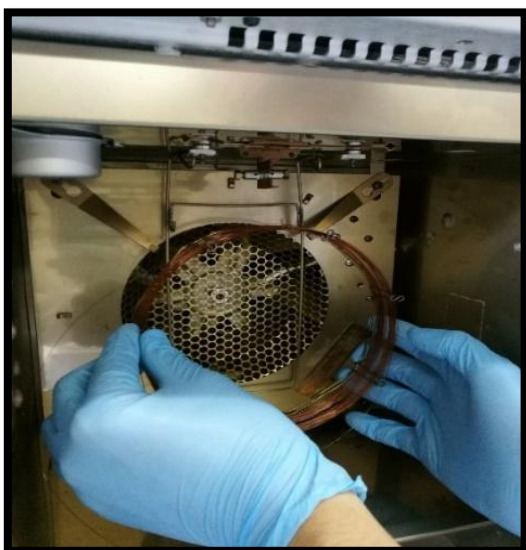


Figura 3.3. Retiro de la columna con afinidad a hidrocarburos ligeros.

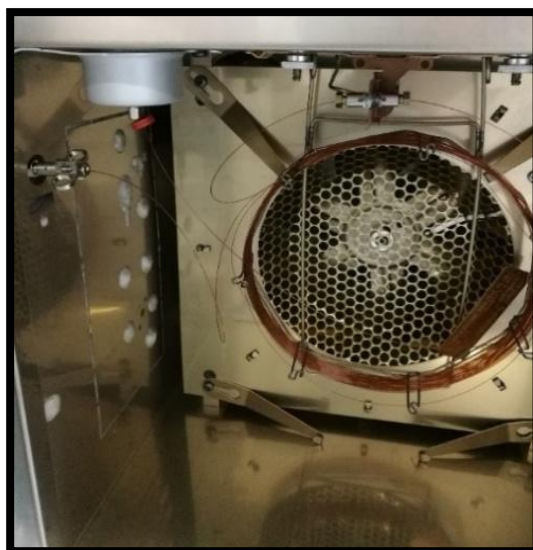


Figura 3.4. Horno del cromatógrafo con la columna

Además, se instaló la columna con afinidad a las gasolinas en el cromatógrafo (**figura 3.4**). Después se fijaron todas las conexiones para evitar fugas en el sistema. Con las conexiones fijas se cerró el horno y se encendió el equipo para hacer un "autotune" para conocer el estado del equipo y revisar que no existieran fugas. Por último, se cargaron los parámetros establecidos de acuerdo al método ASTM D5769 y se procedió a la inyección de las muestras. El resultado de este procedimiento nos permite obtener el porcentaje de la relación de la masa del analito con respecto al total de muestra.

3.1.2 Estándares químicos y cuantificación

Para cuantificar el contenido de BTEX de acuerdo a una curva patrón de calibración se necesitaron estándares químicos conocidos, los cuales se adquirieron y se presentan en la **figura 3.5**.



Figura 3.5. Kit de estándares para la determinación de compuestos aromáticos en las gasolinas

En total se utilizaron 5 ampollitas de 1 mililitro con diferentes concentraciones de los 27 componentes aromáticos las cuales se presentan en la **tabla 3.2.**

Tabla 3.2. Concentraciones del kit de estándares químicos

Catalogo #: D-5769-CAL/IS-SET		% Pureza	STD-01 mg / 100 mL	STD-02 mg / 100 mL	STD-03 mg / 100 mL	STD-04 mg / 100 mL	STD-05 mg / 100 mL
lote # : 215119041	CAS	GC/FID	Lot # 215111025	Lot # 215111028	Lot # 215111030	Lot # 215111031	Lot # 215111032
Benceno	71-43-2	0.999	5217	2934	1565	809	411.8
Tolueno	108-88-3	0.99	19602	11023	5878	3040	1547
Etilbenceno	100-41-4	0.984	5157	2900	1547	799.5	407
m-Xileno	108-38-3	0.999	6182	3476	1854	958.5	487.9
p-Xileno	106-42-3	0.999	6182	3475	1854	958.5	487.9
o-Xileno	95-47-6	0.98	6182	3476	1854	958.5	487.9
Isopropilbenceno	98-82-8	0.996	3106	1747	930.5	481.7	245.1
n-Propilbenceno	103-65-1	1	3076	1730	922.3	477	242.8
m-Etiltolueno	620-14-4	0.989	3076	1730	922.3	477	242.8
p-Etiltolueno	622-96-8	0.962	3106	1747	931.3	481.7	245.1
1,3,5-Trimetilbenceno	108-67-8	0.981	3076	1730	922.5	477	242.8
1-Metil-2-etilbenceno	611-14-3	0.977	3136	1763	940.5	486.3	247.5
1,2,4-Trimetilbenceno	95-63-6	0.982	5217	2933	1565	809	411.8
1,2,3-Trimetilbenceno	526-73-8	0.914	3197	1797	958.7	495.8	252.3
Indan	496-11-7	0.933	3437	1933	1031	533	271.3
1,4-Dietilbenceno	105-05-5	1	3076	1730	922.5	477	242.8

n-Butilbenceno	104-51-8	0.991	3076	1730	922.5	477	242.8
1,2-Dietilbenceno	135-01-3	0.961	3166	1780	949.4	491	249.9
1,2,4,5-Tetrametilbenceno	95-93-2	0.99	2413	1357	723.6	374.2	190.4
1,2,3,5-Tetrametilbenceno	527-53-7	0.975	2081	1170	624.1	322.7	164.3
Naftaleno	91-20-3	0.984	2413	1357	723.6	374.2	190.6
1-Metilnaftaleno	90-12-0	0.984	2413	1357	723.6	374.2	190.6
2-Metilnaftaleno	91-57-6	0.988	2413	1357	723.6	374.2	190.6
Isoctano	540-84-1	0.982	0	43768	70011	84493	92107
Benceno-d6	1076-43-3	0.988	1981	1976	1975	1977	1976
Etilbenceno-d10	25837-05-2	1	1990	1985	1984	1986	1985
Naftaleno-d8	1146-65-2	0.997	1044	1042	1041	1042	1041

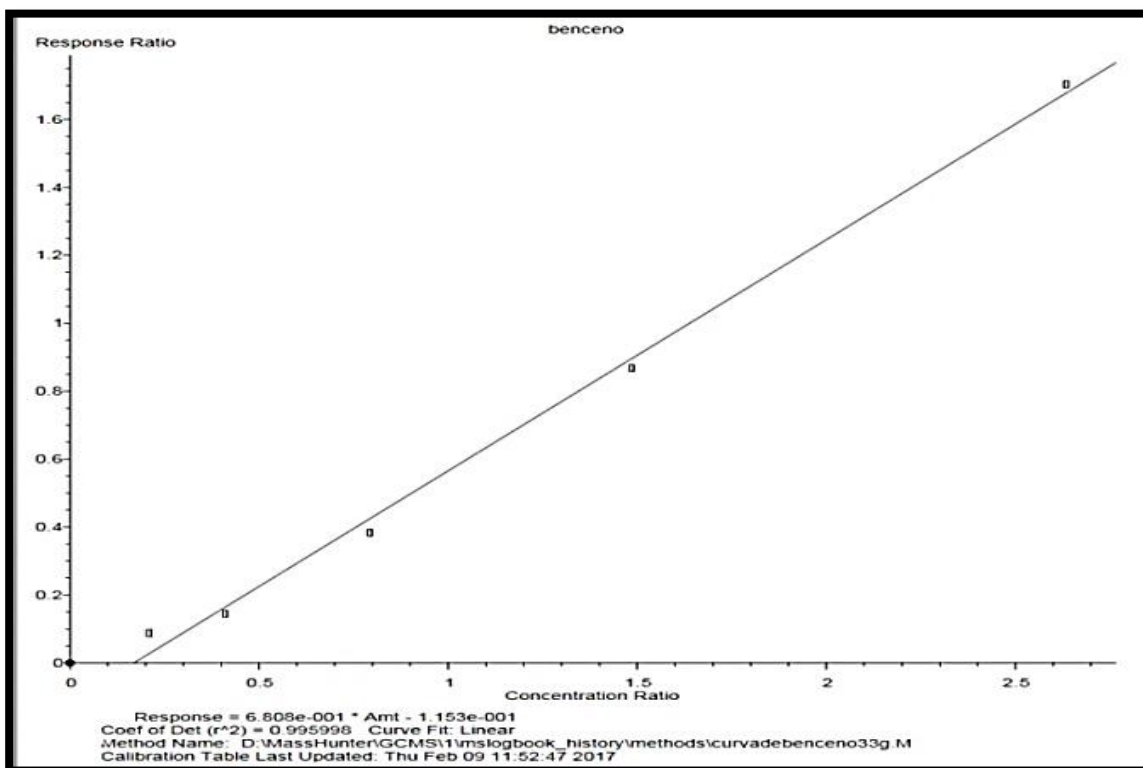
Fuente. (AccuStandard, 2016)

Se generaron distintas curvas de calibración para la cuantificación de BTEX a partir de estos estándares, todo esto se realizó en el software del cromatógrafo de gases (Chemstation Agilent).

Para fines ilustrativos sólo se presenta la metodología para la creación de la curva de calibración de benceno, aunque la metodología es muy parecida en los otros componentes a cuantificar. Para ello se inyecta el kit de estándares empezando por el más diluido ya con el equipo calibrado para generar así su respectivo cromatograma, el cual debemos de identificar con ayuda del espectro de masas tomando en cuenta el tiempo de retención, el área del pico y la librería del software del equipo.

Una vez identificado el estándar más diluido se procede con la identificación del segundo más diluido, y así sucesivamente hasta acabar con el kit de estándares.

Al tener todos los cromatogramas identificados se generó una curva de calibración que se ajuste de la mejor manera a cada uno de los puntos según sea el caso, añadiéndole los valores de concentración conocidos a todos los puntos registrados por el cromatógrafo. Así, se elaboraron las curvas de calibración como se presentan en la **figura 3.6** y en el **anexo B**.



3.2 Muestreo

3.2.1. Estaciones de servicio seleccionadas

Para la ubicación de las diferentes gasolineras se utilizó la plataforma virtual Guía Pemex. De las 398 gasolineras registradas en la CDMX se tomaron en cuenta para realizar el muestreo un total de 100 gasolineras de acuerdo a un muestreo estratificado proporcional por cada delegación, es decir, se tomaron en cuenta la cantidad de gasolineras

por delegación para seleccionar proporcionalmente a las que tienen mayor número de estaciones de servicio contra las de menor número para así realizar un muestreo representativo en toda la CDMX.

En la **tabla 3.3** se indican las gasolineras que hay en cada una de las delegaciones de la CDMX, así como las gasolineras que se seleccionaron para el muestreo.

Tabla 3.3. Muestreo estratificado de asignación proporcional

Delegación	Total de gasolineras	Gasolineras seleccionadas
Álvaro Obregón	28	8
Azcapotzalco	22	8
Benito Juárez	39	8
Coyoacán	29	8
Cuajimalpa de Morelos	7	3
Cuauhtémoc	46	8
Gustavo A. Madero	46	8
Iztacalco	12	8
Iztapalapa	62	8
Magdalena Contreras	2	2
Miguel Hidalgo	31	8
Milpa Alta	2	2
Tláhuac	7	3
Tlalpan	23	7
Venustiano Carranza	33	8
Xochimilco	9	3
Total	398	100

En la **figura 3.7** se puede observar el mapa de la CDMX con todas las estaciones de servicio (puntos verdes) y las gasolineras seleccionadas donde se llevó a cabo el muestreo (cruces rojas).

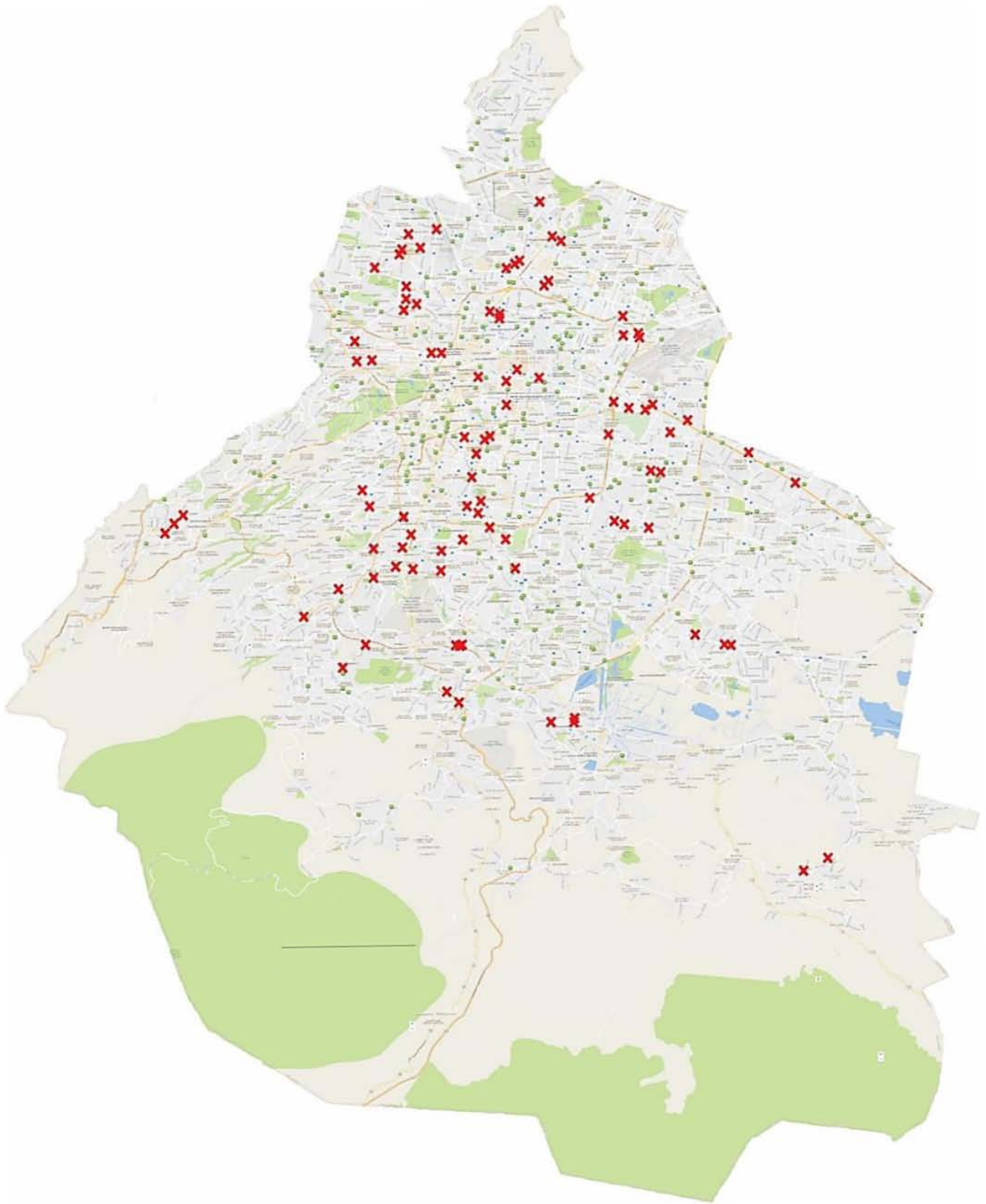


Figura 3.7. Imagen de la CDMX identificando las gasolineras del muestreo

3.2.2 Recolección de muestras

Para generar un cronograma de trabajo se consideró la participación de 3 personas para la recolección de 24 muestras (12 de gasolina Magna y 12 de gasolina Premium), las cuales debían acudir como máximo a 12 gasolineras en total al día, esto debido al tiempo de análisis que tarda por cada muestra, ya que no se debe sobrepasar la capacidad de pruebas que podía analizar el cromatógrafo de gases.

Debido a la volatilidad de los componentes en la gasolina se adquirieron 24 frascos herméticos de 500 mL, considerando una boquilla ancha para que al momento de comprar la gasolina la pistola despachadora no derrame combustible fuera del recipiente. En la **figura 3.8** y en la **figura 3.9** se observa la recolección de gasolina Magna y Premium.



Figura 3.8. Recolección de gasolina Premium



Figura 3.9. Recolección de gasolina Magna

Es importante conocer el origen de la gasolina en cada muestra, por lo que se le asignó una clave de identificación de acuerdo a la delegación de ésta. Para almacenaje se adquirieron 200 frascos herméticos de 50 mL y 200 viales para su análisis en el (GC/MS). En la **figura 3.10** se observa la preparación y almacenado para su análisis posterior.



Figura 3.10. Etiquetado y almacenado de muestras

De acuerdo al plan elaborado el muestreo se llevó a cabo en 10 días, del 13 al 24 de febrero de 2017. El procedimiento para todos los días mencionados fue el siguiente:

- Ir a las gasolineras asignadas y comprar gasolina Magna y Premium.
- Regresar al laboratorio para inyectar y etiquetar las muestras recolectadas para su almacenaje.
- Almacenar las muestras a temperaturas bajas (congelador) para evitar la evaporación de sus componentes y programar el GC/MS para el análisis de acuerdo al método ASTM D5769.
- Preparar los frascos de 500 mL para el muestreo del día siguiente.

A continuación, se presenta la **tabla 3.4** con el plan que se llevó a cabo el muestreo.

Tabla 3.4. Cronograma para la recolección de muestras y su análisis

Muestras	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Coyoacán	■									
Benito Juárez 1	■									
Inyección (9 horas)	■	■								
Benito Juárez 2		■								
Cuauhtémoc		■								
Inyección (9 horas)		■	■							
Miguel Hidalgo			■							
Azcapotzalco 1			■							
Inyección (9 horas)			■	■						
Azcapotzalco 2				■						
Tlalpan				■						
Inyección (9 horas)				■	■					
Gustavo A. Madero					■					
Venustiano Carranza 1					■					
Inyección (9 horas)					■	■				
Venustiano Carranza 2						■				
Iztacalco						■				
Inyección (9 horas)						■	■			
Iztapalapa							■			
Tláhuac							■			
Inyección (9 horas)							■	■		
Magdalena Contreras								■		
Álvaro Obregón								■		
Cuajimalpa								■	■	
Inyección (9 horas)									■	
Milpa Alta									■	
Xochimilco									■	■
Inyección (9 horas)									■	■

3.3 Determinación de BTEX

Para cuantificar el porcentaje de volumen (%V) de la muestra se utilizó la siguiente ecuación que se expone el método de la ASTM D5769.

Ecuación... (1)
$$\%V = \% \frac{m_i}{m_t} * \left(\frac{D_f}{D_b} \right)$$

Donde:

$\% \frac{m_i}{m_t}$ es el porcentaje de la relación de la masa del analito

(benceno) con respecto al total de muestra.

D_f es la densidad del combustible.

D_b es la densidad del analito.

3.3.1 Cálculo de densidad

Para determinar la densidad de las gasolinas y de los analitos se utilizó un picnómetro (**figura 3.11**), tomando en cuenta la temperatura a la que se realizó la medición que fue en un rango 18°C-25°C.



Figura 3.11. Determinación de densidad con picnómetro

Terminado el muestreo se procedió a determinar los porcentajes volumen de todos los analitos y se generó una base de datos de concentraciones de BTEX.

3.4 Simulación de concentración por la emisión de BTEX

Debido al gran número de estaciones de servicio situadas alrededor de Ciudad Universitaria se decidió cuantificar la emisión de BTEX que generan las gasolineras de acuerdo al repostaje de automóviles y del camión cisterna. La emisión se representa con radios de afectación que indican la concentración de acuerdo a la distancia de la fuente.

En la **tabla 3.5** se presenta las gasolineras elegidas, 5 de la delegación Coyoacán (CY-x), 5 de Álvaro Obregón (AO-x) y 5 de Tlalpan (TP-x) haciendo un total de 15 gasolineras alrededor de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Tabla 3.5. Dirección de las gasolineras alrededor de CU

Clave	Dirección de la gasolinera
AO-1	Av. Revolución No 1649, Col. San Ángel, C.P. 1000, Álvaro Obregón, Ciudad de México
AO-5	Bldv L Mateos No.2441 y Desierto de Los Leones, Col. San Ángel Inn, C.P. 1060, Álvaro Obregón, Ciudad de México
AO-6	Av. de las Fuentes y Agua No. 490, Col. Jardines Del Pedregal, C.P. 1800, Álvaro Obregón, Ciudad de México
AO-7	Cerrada de Canoa # 18, Col. La Otra Banda, C.P. 1090, Álvaro Obregón, Ciudad de México
AO-8	Rio de la Magdalena # 10, Col. La Otra Banda, C.P. 1090, Álvaro Obregón, Ciudad de México
CY-1	Miguel a de Quevedo y Europa 23, Col. Atlántida Coyoacán, C.P. 4370, Coyoacán, Ciudad de México
CY-3	Av. Universidad y Copilco, Col. Copilco, C.P. 4360, Coyoacán, Ciudad de México
CY-4	Calle Monserrat N 161, Col. Los Reyes Coyoacán, C.P. 4000, Coyoacán, Ciudad de México
CY-5	M a de Quevedo y Psi, Col. Romero de Terreros, C.P. 4310, Coyoacán, Ciudad de México

CY-7	Av. de las Torres, Eje 10 Sur, Esq. Cerrada Churintz, Col. Pedregal de San Francisco, C.P. 0, Coyoacán, Ciudad de México
TP-2	Periférico Sur No. 5550, Col. Pedregal de Carrasco, C.P. 4700, Tlalpan, Ciudad de México
TP-3	Av. Periférico Sur No. 5550, Col. Pedregal de Carrasco, C.P. 47000, Tlalpan, Ciudad de México
TP-4	Boulevard Adolfo Ruiz Cortines (Periférico Sur) No.5453, Col. Isidro Fabela, C.P. 14030, Tlalpan, Ciudad de México
TP-5	Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 5499, Col. Cantera Puente de Piedra, C.P. 14049, Tlalpan, Ciudad de México
TP-8	Boulevard Picacho Ajusco Núm. 4, Col. Jardines En la Montana, C.P. 14210, Tlalpan, Ciudad de México

El día elegido para la simulación fue el día 24 de febrero de 2017 y se dividió en día y noche debido a que las condiciones meteorológicas eran diferentes.

3.4.1 Radios de afectación en ALOHA ® 5.4.7

Se utilizó el software ALOHA ® 5.4.7 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) para simular el riesgo que existe a la exposición de los BTEX, se consideró la evaporación en el repostaje de automóviles y el llenado de la cisterna que existe en las gasolineras. Para ello se utilizó los factores de emisión proporcionados por el AP 42 (US EPA, 2008). Y los datos de las ventas de gasolina (SENER, 2017). Estos cálculos se pueden ver en el **anexo 1**.

Una vez determinadas las gasolineras y el software instalado (ALOHA ® 5.4.7) se llevó a cabo el siguiente procedimiento para la elaboración de los radios de afectación.

1. El programa requiere una localización con la elevación del lugar, la longitud, la latitud y su zona horaria, todo esto cambia de acuerdo al lugar de la simulación.

2. Después, se necesita indicar la sustancia a simular. El software cuenta con una biblioteca de alrededor de 50 compuestos puros y tiene la opción de agregar más, si se conoce el peso molecular, punto de ebullición, presión de vapor, niveles de riesgo, toxicidad y otras propiedades físicas de la sustancia pura. Cabe mencionar que el programa no tiene la opción de agregar mezclas y solo tiene cuatro predeterminadas.
3. En el paso número tres se deben conocer los datos meteorológicos, éstos fueron proporcionados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México y son la velocidad del viento, la dirección del viento, tipo de suelo, estado del tiempo (nubosidad), temperatura, estabilidad atmosférica y humedad relativa.
4. Para el cuarto paso ALOHA ® solicita datos de la fuente de emisión, para este caso un flujo volumétrico continuo y la altura de la fuente.

Todos los datos organizados hasta el paso cuatro se pueden verificar en el resumen como se muestra en la **figura 3.12**.

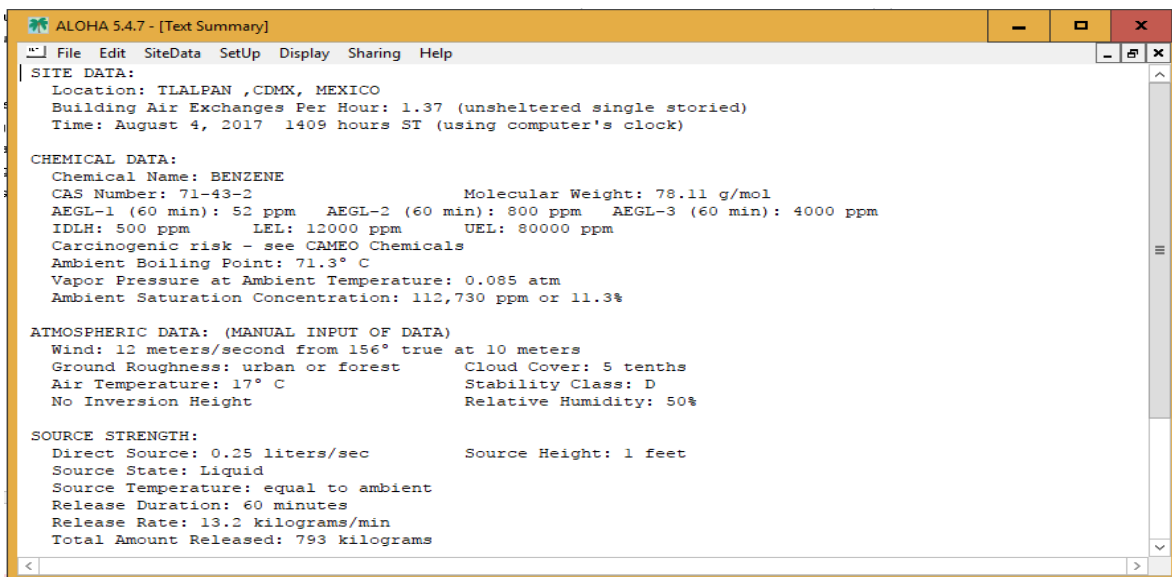


Figura 3.12. Datos requeridos para generar los radios de afectación

5. Por último, el modelo de dispersión recomendado es el modelo Gaussiano, se selecciona en las opciones de cálculo y se elige los niveles de concentración que presentan un riesgo para la salud o cualquier concentración deseada, para que así el programa muestre la distancia máxima a la que puede presentarse la concentración de interés del compuesto químico. En la pestaña de resumen aparece de manera textual la concentración y la distancia o en su defecto aparece una gráfica como se observa en la **figura 3.13**.

De esta manera, se generaron los radios de afectación de BTEX que indican la concentración que se encuentra a cierta distancia de la fuente de emisión con la meteorología que se presentó el día 24 de febrero de 2017 por medio del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México que fue el último día de muestreo.

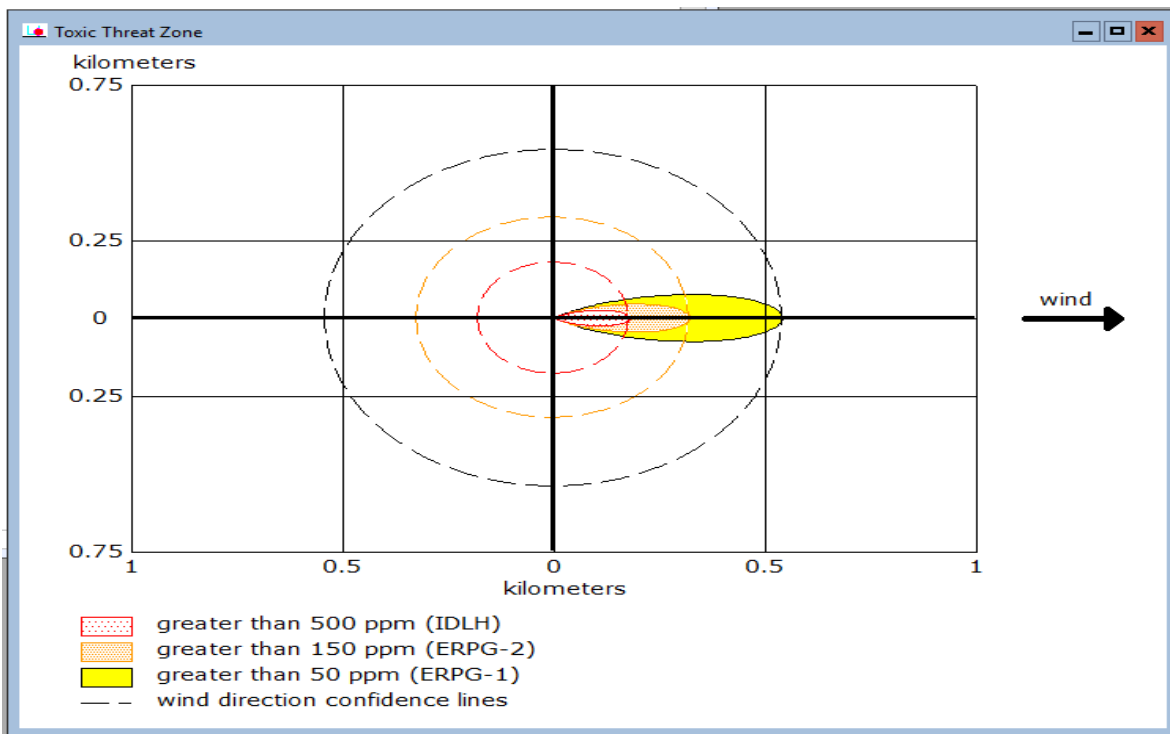


Figura 3.13. Radios de afectación por ALOHA ® 5.4.7

3.4.2 Proyección desde una imagen satelital

El programa Google Earth Pro 7.1.8.3036 se utilizó para conocer las coordenadas geográficas de las gasolineras para así poder marcarlas y obtener una fotografía satelital la cual enmarcara a las 15 gasolineras. Se puede observar en la **figura 3.14** la imagen tomada en el programa.



Figura 3.14. Imagen satelital de Google Earth Pro 7.1.8.3036

Después, se utilizó el programa ArcMap de ArcGIS 10.2.2 para que a partir de la imagen satelital se pudiera editar sin perder las coordenadas geográficas y sobre todo para no perder la escala. Es decir, a la imagen se le hizo una georreferenciación de cuatro puntos y se editó sobre ella los radios de afectación con unidades de metro de acuerdo a las coordenadas proyectadas WGS 1984 UTM Zona 14N. La escala absoluta

fue de 1:50,000 y la imagen abarca un radio de 3 km a la redonda de Ciudad Universitaria.



Figura 3.15. Radios de afectación a escala 1:50,000

Por último, se hicieron otros arreglos en las imágenes con ArcMap y se le agregaron figuras de personalización para presentarlos de manera adecuada.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos después de utilizar el método ASTM D5769 y los resultados que generó la simulación del software ALOHA® 5.4.7.

4.1 Cuantificación de BTEX en gasolinas de la CDMX

Los primeros resultados que se obtuvieron fueron las densidades de las 200 muestras de gasolina como se presenta en la **tabla 4.1**. Además, se presenta la delegación y el número de la gasolinera a la que pertenece.

Tabla 4.1. Densidad de las gasolinas

Identificación			Densidad Premium	Desviación Estándar	Densidad Magna	Desviación Estándar
Delegación	Clave	Número	g/mL	g/mL	g/mL	g/mL
Álvaro Obregón	AO-1	0013	0.725	0.0002	0.719	0.0018
Álvaro Obregón	AO-2	0119	0.726	0.0009	0.721	0.0005
Álvaro Obregón	AO-3	2517	0.725	0.0009	0.720	0.0003
Álvaro Obregón	AO-4	5580	0.728	0.0008	0.719	0.0012
Álvaro Obregón	AO-5	3175	0.727	0.0008	0.721	0.0006
Álvaro Obregón	AO-6	2797	0.727	0.0008	0.724	0.0006
Álvaro Obregón	AO-7	5943	0.728	0.0009	0.720	0.0009
Álvaro Obregón	AO-8	5986	0.726	0.0012	0.720	0.0006
Azcapotzalco	AZ-1	0019	0.728	0.0006	0.725	0.0030
Azcapotzalco	AZ-2	0053	0.736	0.0001	0.715	0.0004
Azcapotzalco	AZ-3	0130	0.726	0.0008	0.721	0.0007
Azcapotzalco	AZ-4	2904	0.727	0.0007	0.725	0.0003
Azcapotzalco	AZ-5	3527	0.728	0.0004	0.725	0.0006
Azcapotzalco	AZ-6	3098	0.726	0.0005	0.721	0.0002
Azcapotzalco	AZ-7	4826	0.724	0.0009	0.717	0.0006
Azcapotzalco	AZ-8	10242	0.725	0.0004	0.721	0.0012
Benito Juárez	BJ-1	0016	0.726	0.0005	0.727	0.0003
Benito Juárez	BJ-2	0061	0.727	0.0007	0.725	0.0005
Benito Juárez	BJ-3	0217	0.729	0.0002	0.725	0.0011

Identificación			Densidad Premium	Desviación Estándar	Densidad Magna	Desviación Estándar
Delegación	Clave	Número	g/mL	g/mL	g/mL	g/mL
Benito Juárez	BJ-4	5155	0.725	0.0020	0.726	0.0012
Benito Juárez	BJ-5	5178	0.729	0.0003	0.729	0.0010
Benito Juárez	BJ-6	5356	0.729	0.0004	0.730	0.0003
Benito Juárez	BJ-7	5956	0.730	0.0008	0.729	0.0002
Benito Juárez	BJ-8	11094	0.731	0.0003	0.729	0.0003
Coyoacán	CY-1	2510	0.729	0.0010	0.730	0.0003
Coyoacán	CY-2	2503	0.729	0.0006	0.727	0.0010
Coyoacán	CY-3	0212	0.728	0.0005	0.728	0.0006
Coyoacán	CY-4	5428	0.729	0.0008	0.728	0.0001
Coyoacán	CY-5	2728	0.730	0.0003	0.728	0.0009
Coyoacán	CY-6	3529	0.730	0.0007	0.727	0.0010
Coyoacán	CY-7	4342	0.729	0.0006	0.725	0.0005
Coyoacán	CY-8	5147	0.730	0.0007	0.724	0.0005
Cuajimalpa De Morelos	CM-1	6057	0.734	0.0005	0.721	0.0015
Cuajimalpa De Morelos	CM-2	3735	-	0.0003	0.721	0.0010
Cuajimalpa De Morelos	CM-3	0172	0.729	0.0008	0.722	0.0008
Cauhtémoc	CU-1	0039	0.728	0.0002	0.722	0.0006
Cauhtémoc	CU-2	0108	0.728	0.0006	0.720	0.0012
Cauhtémoc	CU-3	0112	0.728	0.0005	0.723	0.0008
Cauhtémoc	CU-4	0133	0.733	0.0007	0.718	0.0005
Cauhtémoc	CU-5	0176	0.725	0.0009	0.720	0.0003
Cauhtémoc	CU-6	0185	0.729	0.0004	0.718	0.0008
Cauhtémoc	CU-7	5833	0.729	0.0003	0.718	0.0011
Cauhtémoc	CU-8	9569	0.730	0.0006	0.713	0.0002
Gustavo A. Madero	GM-1	0073	0.729	0.0002	0.724	0.0006
Gustavo A. Madero	GM-2	0094	0.729	0.0009	0.722	0.0008
Gustavo A. Madero	GM-3	0131	0.731	0.0009	0.725	0.0011
Gustavo A. Madero	GM-4	0159	0.730	0.0008	0.725	0.0007
Gustavo A. Madero	GM-5	0199	0.729	0.0008	0.730	0.0005
Gustavo A. Madero	GM-6	2766	0.728	0.0008	0.725	0.0012
Gustavo A. Madero	GM-7	0005	0.729	0.0009	0.725	0.0015
Gustavo A. Madero	GM-8	5959	0.729	0.0012	0.725	0.0009
Iztacalco	IC-1	0059	0.736	0.0006	0.721	0.0018
Iztacalco	IC-2	0218	0.736	0.0001	0.721	0.0005
Iztacalco	IC-3	2513	0.733	0.0008	0.722	0.0003
Iztacalco	IC-4	2515	0.726	0.0007	0.724	0.0012
Iztacalco	IC-5	10446	0.728	0.0004	0.723	0.0006
Iztacalco	IC-6	2996	0.727	0.0005	0.723	0.0006

Identificación			Densidad Premium	Desviación Estándar	Densidad Magna	Desviación Estándar
Delegación	Clave	Número	g/mL	g/mL	g/mL	g/mL
Iztacalco	IC-7	2799	0.726	0.0009	0.720	0.0009
Iztacalco	IC-8	9057	0.727	0.0004	0.723	0.0006
Iztapalapa	IP-1	0128	0.727	0.0005	0.716	0.0030
Iztapalapa	IP-2	2504	0.725	0.0007	0.717	0.0004
Iztapalapa	IP-3	2799	0.727	0.0002	0.723	0.0007
Iztapalapa	IP-4	5349	0.729	0.0020	0.721	0.0003
Iztapalapa	IP-5	2570	0.726	0.0003	0.720	0.0006
Iztapalapa	IP-6	10900	0.726	0.0004	0.719	0.0002
Iztapalapa	IP-7	4737	0.727	0.0008	0.720	0.0006
Iztapalapa	IP-8	9545	0.726	0.0003	0.721	0.0012
La Magdalena Contreras	MC-1	2838	-	0.0010	0.721	0.0003
La Magdalena Contreras	MC-2	3618	0.727	0.0006	0.721	0.0005
Miguel Hidalgo	MH-1	2839	0.728	0.0005	0.721	0.0011
Miguel Hidalgo	MH-2	0027	0.727	0.0008	0.720	0.0012
Miguel Hidalgo	MH-3	3101	0.728	0.0003	0.720	0.0010
Miguel Hidalgo	MH-4	0306	-	0.0007	0.722	0.0003
Miguel Hidalgo	MH-5	2839	0.728	0.0006	0.720	0.0002
Miguel Hidalgo	MH-6	0022	0.727	0.0007	0.724	0.0003
Miguel Hidalgo	MH-7	7267	0.726	0.0002	0.725	0.0003
Miguel Hidalgo	MH-8	8091	0.730	0.0009	0.723	0.0010
Milpa Alta	MA-1	0251	-	0.0009	0.723	0.0006
Milpa Alta	MA-2	6076	0.729	0.0008	0.721	0.0001
Tláhuac	TH-1	12528	0.728	0.0008	0.720	0.0009
Tláhuac	TH-2	5084	0.728	0.0008	0.721	0.0010
Tláhuac	TH-3	8231	0.728	0.0009	0.721	0.0005
Tlalpan	TP-1	0116	0.728	0.0012	0.722	0.0005
Tlalpan	TP-2	8996	0.729	0.0006	0.720	0.0018
Tlalpan	TP-3	10924	0.733	0.0001	0.721	0.0005
Tlalpan	TP-4	10328	0.723	0.0008	0.720	0.0003
Tlalpan	TP-5	10274	0.727	0.0007	0.721	0.0012
Tlalpan	TP-6	10402	0.731	0.0004	0.720	0.0006
Tlalpan	TP-8	9271	0.735	0.0005	0.720	0.0006
Venustiano Carranza	VC-1	0205	0.728	0.0009	0.722	0.0009
Venustiano Carranza	VC-2	2798	0.727	0.0004	0.721	0.0006
Venustiano Carranza	VC-3	2519	0.737	0.0005	0.718	0.0030
Venustiano Carranza	VC-4	5680	0.727	0.0007	0.724	0.0004
Venustiano Carranza	VC-5	7680	0.726	0.0002	0.723	0.0007
Venustiano Carranza	VC-6	5798	0.727	0.0020	0.722	0.0003

Identificación			Densidad Premium	Desviación Estándar	Densidad Magna	Desviación Estándar
Delegación	Clave	Número	g/mL	g/mL	g/mL	g/mL
Venustiano Carranza	VC-7	7664	0.727	0.0003	0.721	0.0006
Venustiano Carranza	VC-8	2506	0.725	0.0004	0.724	0.0002
Xochimilco	XC-1	2873	0.730	0.0008	0.723	0.0006
Xochimilco	XC-2	5450	0.730	0.0003	0.720	0.0012
Xochimilco	XC-3	5679	0.726	0.0010	0.721	0.0003
Promedio CDMX	-	-	0.728	0.0026	0.722	0.0032

Es necesario destacar que, aunque se observaron cambios en la tonalidad de la gasolina al realizar el muestreo por toda la ciudad en las dos últimas semanas de febrero de 2017, esto no afectó la densidad del combustible.

En la **tabla 4.2** se muestran los resultados obtenidos para las 100 gasolineras, especificando la delegación, el número de gasolinera, y la concentración de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos.

Tabla 4.2. Concentración en porcentaje volumen para BTEX

Identificación			Concentración benceno		Concentración tolueno		Concentración etilbenceno		Concentración xilenos	
Delegación	Clave	Estación	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)
Álvaro Obregón	AO-1	0013	0.282	0.248	2.451	2.580	2.367	0.157	7.482	0.641
Álvaro Obregón	AO-2	0119	0.366	0.232	3.088	2.530	4.701	0.157	22.043	0.656
Álvaro Obregón	AO-3	2517	0.293	0.246	2.476	2.802	0.156	0.156	0.699	0.621
Álvaro Obregón	AO-4	5580	0.264	0.247	2.374	2.657	0.155	0.156	0.716	0.447
Álvaro Obregón	AO-5	3175	0.308	0.255	2.640	2.793	0.156	0.157	0.700	0.626
Álvaro Obregón	AO-6	2797	0.473	0.253	3.607	2.769	4.842	0.156	22.503	0.660
Álvaro Obregón	AO-7	5943	0.263	0.442	2.252	4.921	0.156	0.157	0.701	0.662
Álvaro Obregón	AO-8	5986	0.371	0.240	3.126	2.478	3.903	0.156	18.246	0.663
Azcapotzalco	AZ-1	0019	0.650	0.325	5.225	2.454	3.865	0.158	18.358	0.662
Azcapotzalco	AZ-2	0053	0.386	0.452	3.835	11.341	3.558	0.158	7.524	0.383
Azcapotzalco	AZ-3	0130	0.262	0.228	2.200	2.323	4.237	0.156	20.454	0.668
Azcapotzalco	AZ-4	2904	0.332	0.264	3.069	2.769	0.157	0.158	0.715	0.614
Azcapotzalco	AZ-5	3527	1.142	0.290	3.846	1.520	0.155	0.157	0.596	0.557
Azcapotzalco	AZ-6	3098	0.360	0.267	2.931	2.890	0.156	0.157	0.710	0.653
Azcapotzalco	AZ-7	4826	0.360	0.203	3.418	2.140	0.184	0.156	0.671	0.619
Azcapotzalco	AZ-8	10242	0.322	0.199	3.035	2.030	4.690	0.156	21.221	0.634
Benito Juárez	BJ-1	0016	0.360	0.299	3.837	3.575	0.157	0.156	0.847	0.733

Identificación			Concentración benceno		Concentración tolueno		Concentración etilbenceno		Concentración xilenos	
Delegación	Clave	Estación	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)
Benito Juárez	BJ-2	0061	0.286	0.285	2.537	3.385	0.156	0.157	0.773	0.616
Benito Juárez	BJ-3	0217	0.484	0.327	4.015	4.545	0.156	0.157	0.729	0.597
Benito Juárez	BJ-4	5155	0.546	0.239	2.207	3.293	0.158	0.158	0.738	0.639
Benito Juárez	BJ-5	5178	0.433	0.232	4.014	4.163	0.158	0.157	0.563	0.559
Benito Juárez	BJ-6	5356	0.500	0.220	3.402	1.165	0.158	0.157	0.750	0.441
Benito Juárez	BJ-7	5956	0.415	0.549	4.120	7.052	0.157	0.157	0.759	0.594
Benito Juárez	BJ-8	11094	0.313	0.269	4.130	3.641	4.307	0.157	19.914	0.649
Coyoacán	CY-1	2510	0.437	0.262	4.973	3.239	0.157	0.157	0.778	0.617
Coyoacán	CY-2	2503	0.351	0.263	3.191	3.919	0.156	0.157	0.724	0.357
Coyoacán	CY-3	0212	0.455	0.218	3.857	2.180	0.156	0.156	0.725	0.466
Coyoacán	CY-4	5428	0.376	0.263	3.982	3.244	0.156	0.157	0.706	0.629
Coyoacán	CY-5	2728	0.470	0.260	4.719	3.364	0.158	0.158	0.728	0.549
Coyoacán	CY-6	3529	0.326	0.256	3.843	3.218	0.156	0.156	0.524	0.650
Coyoacán	CY-7	4342	0.427	0.251	3.044	2.874	0.157	0.157	1.017	0.665
Coyoacán	CY-8	5147	0.338	0.266	2.772	3.441	0.155	0.158	0.721	0.551
Cuajimalpa De Morelos	CM-1	6057	0.413	0.320	3.853	5.559	2.900	0.158	12.514	0.479
Cuajimalpa De Morelos	CM-2	3735	0.715	-	7.152	-	0.156	-	0.659	-
Cuajimalpa De Morelos	CM-3	0172	0.507	0.296	5.079	4.446	3.447	0.157	15.072	0.537
Cuauhtémoc	CU-1	0039	0.339	0.344	5.829	3.883	4.351	0.157	64.995	0.645
Cuauhtémoc	CU-2	0108	0.334	0.255	5.641	5.350	0.157	0.157	0.695	0.613
Cuauhtémoc	CU-3	0112	0.534	0.301	7.078	6.549	3.721	4.988	15.320	18.668
Cuauhtémoc	CU-4	0133	0.474	0.380	4.019	4.771	0.154	0.158	0.489	0.455
Cuauhtémoc	CU-5	0176	0.366	0.241	6.052	2.935	0.157	0.156	0.804	0.482
Cuauhtémoc	CU-6	0185	0.280	-	2.383	-	0.156	-	0.693	-
Cuauhtémoc	CU-7	5833	0.396	0.283	1.900	5.519	-	0.158	0.564	0.732
Cuauhtémoc	CU-8	9569	0.433	0.293	3.474	3.518	-	0.158	0.523	1.064
Gustavo A. Madero	GM-1	0073	0.367	0.255	3.207	2.877	4.630	0.157	21.762	0.629
Gustavo A. Madero	GM-2	0094	0.371	0.270	3.194	3.019	3.680	0.157	17.124	0.638
Gustavo A. Madero	GM-3	0131	0.283	0.436	3.966	3.675	0.156	4.743	0.539	22.303
Gustavo A. Madero	GM-4	0159	0.402	0.248	3.394	2.696	4.384	0.157	20.737	0.633
Gustavo A. Madero	GM-5	0199	0.548	0.275	4.284	2.945	0.157	0.157	0.726	0.594
Gustavo A. Madero	GM-6	2766	0.437	0.240	3.591	2.655	4.892	0.157	23.260	0.636
Gustavo A. Madero	GM-7	0005	0.401	0.269	3.231	2.910	0.156	0.157	0.705	0.658
Gustavo A. Madero	GM-8	5959	0.403	0.266	3.489	2.961	0.156	0.158	3.413	0.635
Iztacalco	IC-1	0059	0.206	0.394	2.088	8.459	2.431	0.159	7.288	0.403
Iztacalco	IC-2	0218	0.221	0.443	2.056	11.620	0.158	0.159	0.681	0.374
Iztacalco	IC-3	2513	0.267	0.336	2.576	6.235	4.920	0.158	22.924	0.438

Identificación			Concentración benceno		Concentración tolueno		Concentración etilbenceno		Concentración xilenos	
Delegación	Clave	Estación	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)
Iztacalco	IC-4	2515	0.313	0.252	3.124	2.575	2.947	0.157	8.806	0.635
Iztacalco	IC-5	10446	0.308	0.266	2.806	3.322	0.155	0.158	0.704	0.582
Iztacalco	IC-6	2996	0.285	0.291	2.812	3.102	3.285	0.157	16.207	0.633
Iztacalco	IC-7	2799	0.232	0.284	2.261	3.145	0.154	0.157	0.673	0.633
Iztacalco	IC-8	9057	0.303	0.274	2.948	3.021	3.096	0.157	14.041	0.627
Iztapalapa	IP-1	0128	0.268	0.297	2.410	3.316	0.155	0.157	0.691	0.615
Iztapalapa	IP-2	2504	0.285	0.246	2.517	2.651	0.154	0.156	0.713	0.627
Iztapalapa	IP-3	2799	0.320	0.281	3.162	3.197	2.919	0.158	13.411	0.635
Iztapalapa	IP-4	5349	0.292	0.376	2.825	4.337	3.835	0.157	17.493	0.501
Iztapalapa	IP-5	2570	0.241	0.265	2.203	2.883	0.155	0.157	0.704	0.635
Iztapalapa	IP-6	10900	0.260	0.275	2.393	3.117	0.155	0.156	0.700	0.589
Iztapalapa	IP-7	4737	0.253	0.286	2.358	3.096	1.556	0.157	0.693	0.631
Iztapalapa	IP-8	9545	0.288	0.245	2.870	2.449	3.927	0.156	18.435	0.627
La Magdalena Contreras	MC-1	2838	0.312	-	2.844	-	0.156	-	0.699	-
La Magdalena Contreras	MC-2	3618	0.285	0.258	2.645	3.151	2.879	0.157	13.485	0.571
Miguel Hidalgo	MH-1	2839	0.321	0.257	2.658	2.862	3.710	0.158	17.481	0.617
Miguel Hidalgo	MH-2	0027	0.412	0.279	3.647	2.547	4.243	0.156	20.122	0.750
Miguel Hidalgo	MH-3	3101	0.275	0.260	2.400	2.879	0.156	0.157	0.693	0.648
Miguel Hidalgo	MH-4	0306	0.400	-	3.301	-	4.085	-	18.850	-
Miguel Hidalgo	MH-5	2839	0.315	0.257	2.663	2.770	0.156	0.157	0.710	0.654
Miguel Hidalgo	MH-6	0022	0.390	0.215	3.311	2.161	4.018	0.157	19.076	0.634
Miguel Hidalgo	MH-7	7267	0.484	0.217	4.004	2.234	4.135	0.157	20.172	0.640
Miguel Hidalgo	MH-8	8091	0.266	0.355	2.863	2.310	0.156	0.157	0.584	0.682
Milpa Alta	MA-1	0251	0.444	-	4.094	-	0.089	-	0.642	-
Milpa Alta	MA-2	6076	0.307	0.280	2.742	3.773	0.155	0.158	0.706	0.551
Tláhuac	TH-1	12528	0.266	0.263	2.487	2.949	3.284	0.160	15.813	0.616
Tláhuac	TH-2	5084	0.291	0.243	2.676	0.030	0.155	0.156	0.463	0.615
Tláhuac	TH-3	8231	0.295	0.276	2.711	3.101	0.159	0.159	0.706	0.623
Tlalpan	TP-1	0116	0.345	0.241	2.954	2.684	3.928	0.158	18.337	0.460
Tlalpan	TP-2	8996	0.298	0.258	2.865	7.756	4.549	0.159	13.545	0.641
Tlalpan	TP-3	10924	0.389	0.273	3.664	4.540	0.155	0.157	0.642	0.467
Tlalpan	TP-4	10328	0.298	0.266	2.891	0.963	3.280	3.316	14.688	12.075
Tlalpan	TP-5	10274	0.291	0.261	2.745	2.891	3.295	0.159	14.843	0.632
Tlalpan	TP-6	10402	0.288	0.284	2.586	3.945	0.157	0.158	0.690	0.529
Tlalpan	TP-8	9271	0.349	0.313	3.288	6.215	2.702	0.158	11.825	0.431
Venustiano Carranza	VC-1	0205	0.301	0.284	2.886	3.169	0.156	0.157	0.682	0.605
Venustiano Carranza	VC-2	2798	0.308	0.263	3.205	2.951	0.155	0.157	0.673	0.626
Venustiano Carranza	VC-3	2519	0.278	0.475	2.650	13.866	3.068	0.158	14.587	0.358

Identificación			Concentración benceno		Concentración tolueno		Concentración etilbenceno		Concentración xilenos	
Delegación	Clave	Estación	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)	Magna (%v)	Premium (%v)
Venustiano Carranza	VC-4	5680	0.297	0.289	3.104	3.248	5.142	0.156	23.821	0.626
Venustiano Carranza	VC-5	7680	0.276	0.283	2.811	3.274	0.156	0.156	0.677	0.613
Venustiano Carranza	VC-6	5798	0.297	0.288	2.863	3.176	0.329	0.157	15.305	0.600
Venustiano Carranza	VC-7	7664	0.303	0.299	2.688	3.201	0.157	0.157	0.721	0.602
Venustiano Carranza	VC-8	2506	0.327	0.247	3.342	2.807	0.157	0.156	0.687	0.596
Xochimilco	XC-1	2873	0.493	0.286	4.528	4.984	0.156	3.059	0.610	9.328
Xochimilco	XC-2	5450	0.247	0.273	2.272	4.335	2.109	0.157	13.776	0.487
Xochimilco	XC-3	5679	0.338	0.284	3.109	3.103	0.152	0.156	0.652	0.640

Para benceno en los porcentajes para gasolina se presentan en la **Figura 4.1**. En los resultados de Magna, el valor mínimo es de 0.206 %v ubicado en Iztacalco mientras que el valor máximo sobrepasó el 1 %v y estuvo en Azcapotzalco, este punto máximo en la concentración de benceno se eliminó para hacer el promedio debido a que no es representativo para los cien datos disponibles. En la columna de %v para gasolina Premium los valores están en un rango de 0.199 a 0.549 %v y todos los datos cumplen con los límites establecidos.

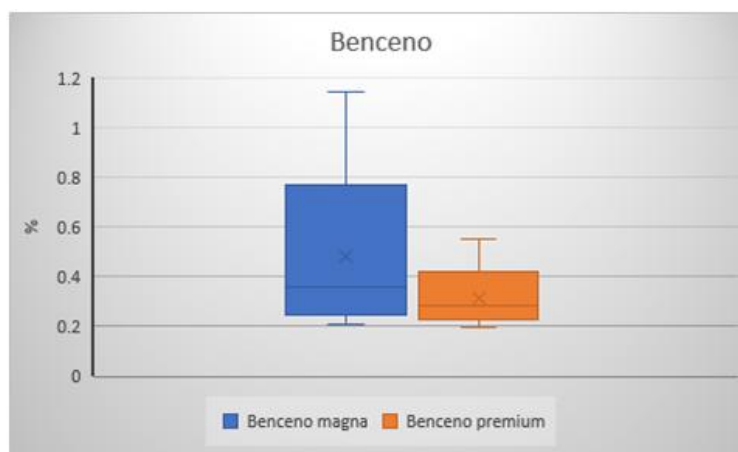


Figura 4.1. Máximos y mínimos de %v de benceno

Para tolueno se presenta la **Figura 4.2** en la parte de %v de gasolina Magna, el valor más alto se encontró en Cuajimalpa con 7.152 %v y el

más bajo se ubica en Cuauhtémoc con 1.9 %v. Para el %v de gasolina Premium el valor más bajo se encuentra en Tláhuac con 0.030% pero se descartó debido a que es un valor muy pequeño y afectaba el promedio de los cien datos en los cuales no existían valores parecidos. Para el valor máximo de gasolina Premium en la columna de tolueno se encontró en Venustiano Carranza con 13.866 %v.

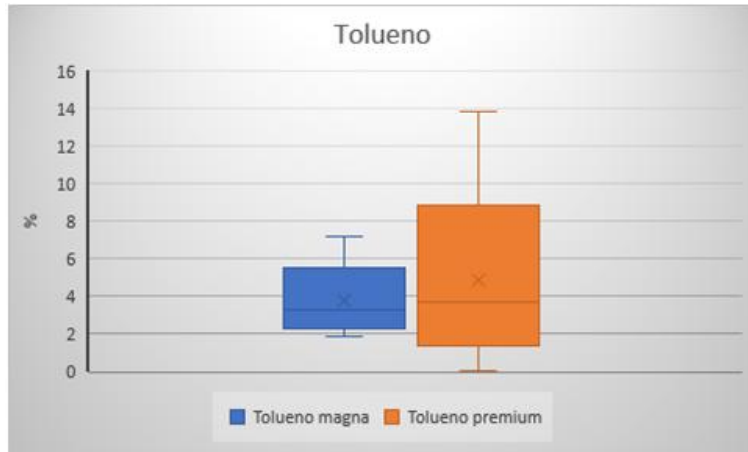


Figura 4.2. Máximos y mínimos de %v de tolueno

El etilbenceno se presenta en la **Figura 4.3**. Para %v de gasolina Magna el valor mínimo es de 0.152 %v y se encontró en Xochimilco, para el valor máximo el valor se encontró en Venustiano Carranza con 5.142 %v. En la línea de Premium se observó que el valor más bajo esta en 0.156%v y se encuentra en varias delegaciones y el valor más alto se obtuvo en la delegación Cuauhtémoc con 4.988 %v. Para la concentración de etilbenceno en la gasolina Premium es importante mencionar que solo cuatro de sus valores difieren de los demás y se encuentran en Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Tlalpan y Xochimilco, por tanto, se decidió hacer el promedio sin incluir estos 4 valores.

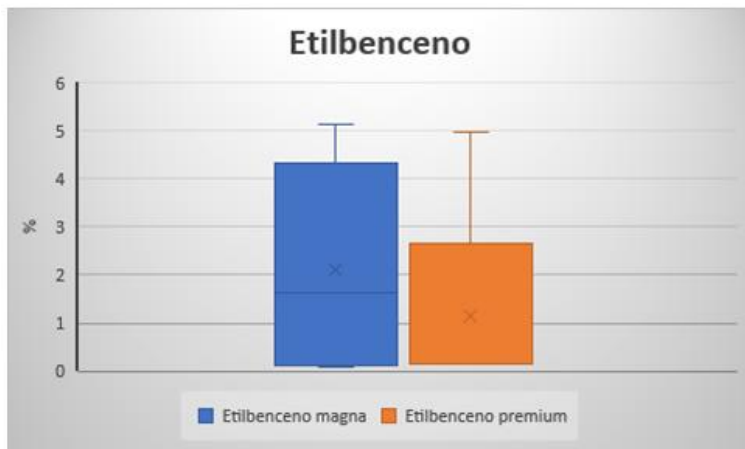


Figura 4.3. Máximos y mínimos de %v de etilbenceno

En xilenos los resultados se plasman en la **Figura 4.4**. En gasolina Magna el valor mínimo fue de 0.463 %v en Tláhuac y el más alto de 64.995 %v en Cuauhtémoc. Para la gasolina Premium el valor mínimo fue de 0.357 %v ubicado en Coyoacán y el máximo en la delegación Gustavo A. Madero con 22.303 %v. Para calcular los promedios de la concentración de xilenos en los dos tipos de gasolinas se decidió no eliminar ningún dato ya que existieron muchas diferencias en los valores y rangos obtenidos por lo que no se pudo determinar qué valor era el correcto.



Figura 4.4. Máximos y mínimos de %v de xilenos

Los valores obtenidos por el método ASTM D5769 están dentro del rango esperado según la norma mexicana oficial, en el caso de la concentración de xilenos se observa un rango distante en los valores de concentración obtenidos. Esto se atribuye a que son isómeros de igual peso molecular lo que dificulta la diferenciación por espectrometría de masas a la hora de cuantificar ya que sus espectros son muy parecidos.

En la **figura 4.5** se presentan los promedios de la concentración de BTEX en la Ciudad de México.

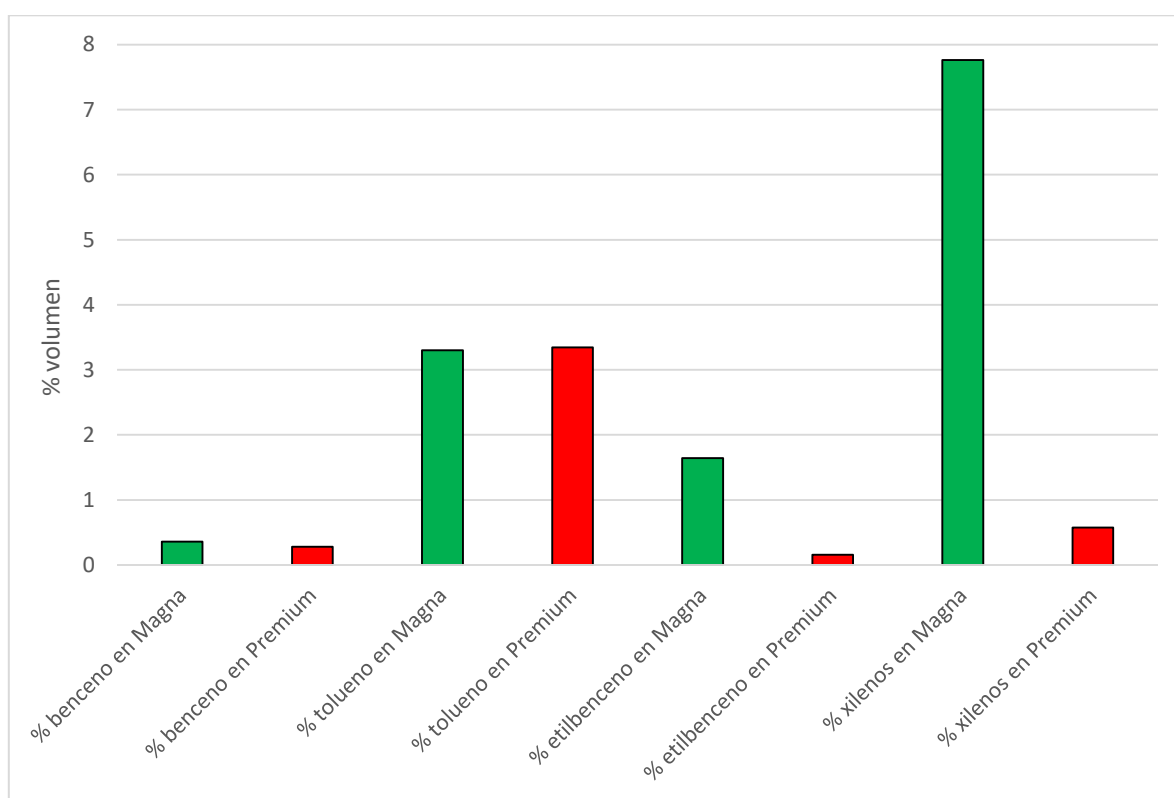


Figura 4.5. Concentraciones promedio de BTEX para CDMX

Como podemos observar en la gráfica la gasolina Magna tiene mayor presencia de xilenos, mientras que la gasolina Premium cuenta con mayor contenido de tolueno.

En la **figura 4.6** se aprecia el cumplimiento de la norma oficial mexicana para benceno en gasolinas. Y en la **figura 4.3** se observa el

posible cumplimiento de la norma respecto a compuestos aromáticos en gasolina en la CDMX.

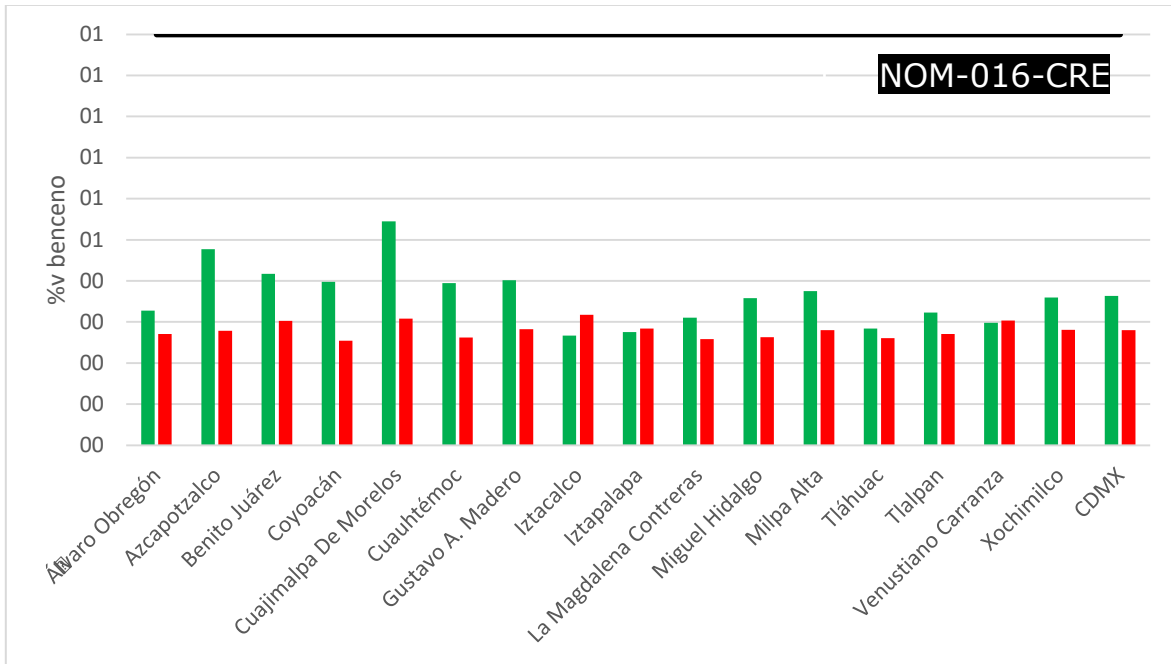


Figura 4.6. Concentración de benceno por delegación vs NOM

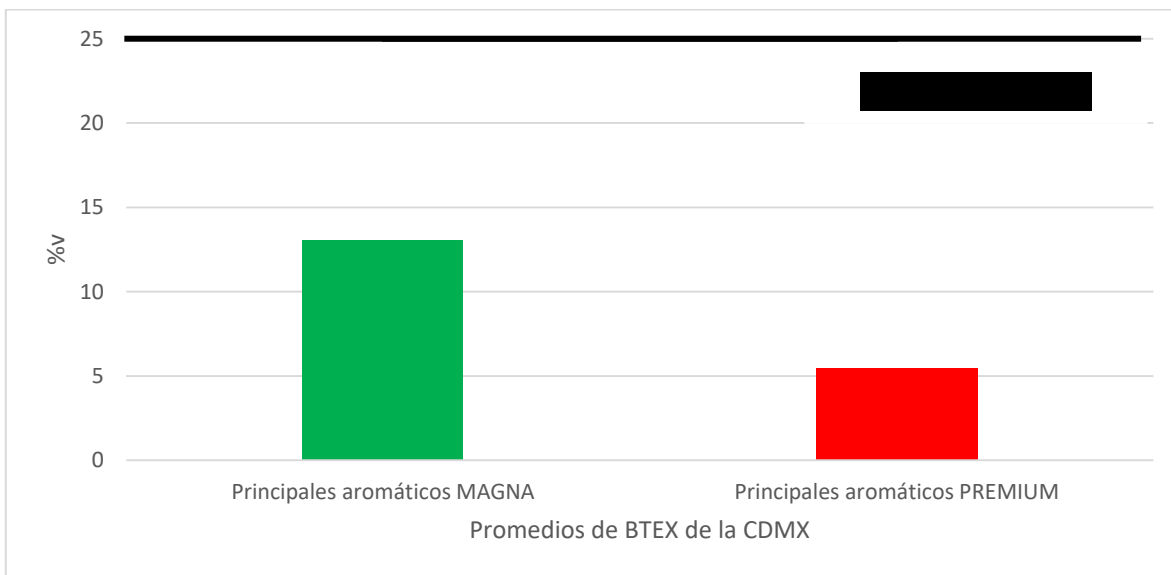


Figura 4.7. Suma de los promedios de BTEX vs NOM

4.2. Estimación de la emisión de BTEX en zonas aledañas a CU

En la **tabla 4.3** se muestran los valores de las emisiones de BTEX en 15 de las gasolineras aledañas a Ciudad Universitaria.

Tabla 4.3. Emisión de BTEX en las gasolineras aledañas CU

Clave gasolinera	Magna	Premium	Magna	Premium	Magna	Premium	Magna	Premium
	Emisión de benceno (kg/año)	Emisión de benceno (kg/año)	Emisión de tolueno (kg/año)	Emisión de tolueno (kg/año)	Emisión de etilbenceno (kg/año)	Emisión de etilbenceno (kg/año)	Emisión de xilenos (kg/año)	Emisión de xilenos (kg/año)
AO-1	150	31	1291	321	1248	19	3946	80
AO-5	164	32	1387	346	82	19	369	78
AO-6	251	32	1889	343	2537	19	11797	82
AO-7	140	55	1186	609	82	19	370	82
AO-8	197	30	1645	307	2055	19	9611	82
CY-1	229	33	2583	400	81	19	405	76
CY-3	239	27	2007	270	81	19	378	58
CY-4	198	33	2073	401	81	19	368	78
CY-5	248	32	2457	415	82	19	380	68
CY-7	226	31	1592	355	82	19	533	82
TP-2	159	32	1508	959	2396	20	7138	79
TP-3	207	34	1926	558	81	19	338	57
TP-5	155	33	1522	120	1733	20	7809	78
TP-6	159	34	1443	358	1728	414	7744	1507
TP-8	186	39	1730	762	1423	19	6231	53

La **tabla 4.3** fue elaborada con los cálculos presentados en el **anexo 1** que indican el cálculo de un flujo para cada gasolinera. Los datos utilizados para calcular el flujo anual fueron los mismos que para calcular el mes de febrero ya que todavía no se tenían los valores de las ventas de gasolina para finales del 2017.

Como se muestra en la **tabla 4.3** los resultados de emisión de BTEX son mínimos para un año comparado con otras fuentes de emisión fijas

(industrias de pinturas o cosméticas) ya que según el reporte de contaminantes criterio y tóxicos del 2014 menciona que este tipo de industrias emiten de 150 a 300 toneladas al año, lo que significa que la emisión de BTEX por repostaje de combustible es mínima.

En el caso de los xilenos se presentan algunas diferencias entre los resultados. Como se puede observar en la **tabla 4.3**, en algunas estaciones las emisiones de xilenos sobresalen. Por ejemplo, las estaciones AO-6 con 11,797 toneladas, AO-8 con 9,611 toneladas, TP-2 con 7,138 toneladas, TP-5 con 7,809 toneladas, TP-6 con 7,714 toneladas y TP-8 con 6,213 toneladas.

4.3 Concentración de BTEX alrededor de Ciudad Universitaria

A continuación, se presentan los mapas con radios de concentración de 1 a 10 ppb alrededor de las gasolineras, los círculos indican la distancia a la que se puede encontrar esta concentración debido a las emisiones de BTEX presentados en la **tabla 4.3**.

Los mapas fueron creados para el día y para la noche debido a los cambios de condiciones atmosféricas (velocidad del viento, humedad, temperatura, nublado o soleado, etc.) y están creados a escala 1:50,000.

La **figura 4.8** y **figura 4.9** representa el mapa de emisión de benceno en las 15 gasolineras aledañas a CU en el día y noche respectivamente y la **tabla 4.4** complementa la información de la emisión de este .

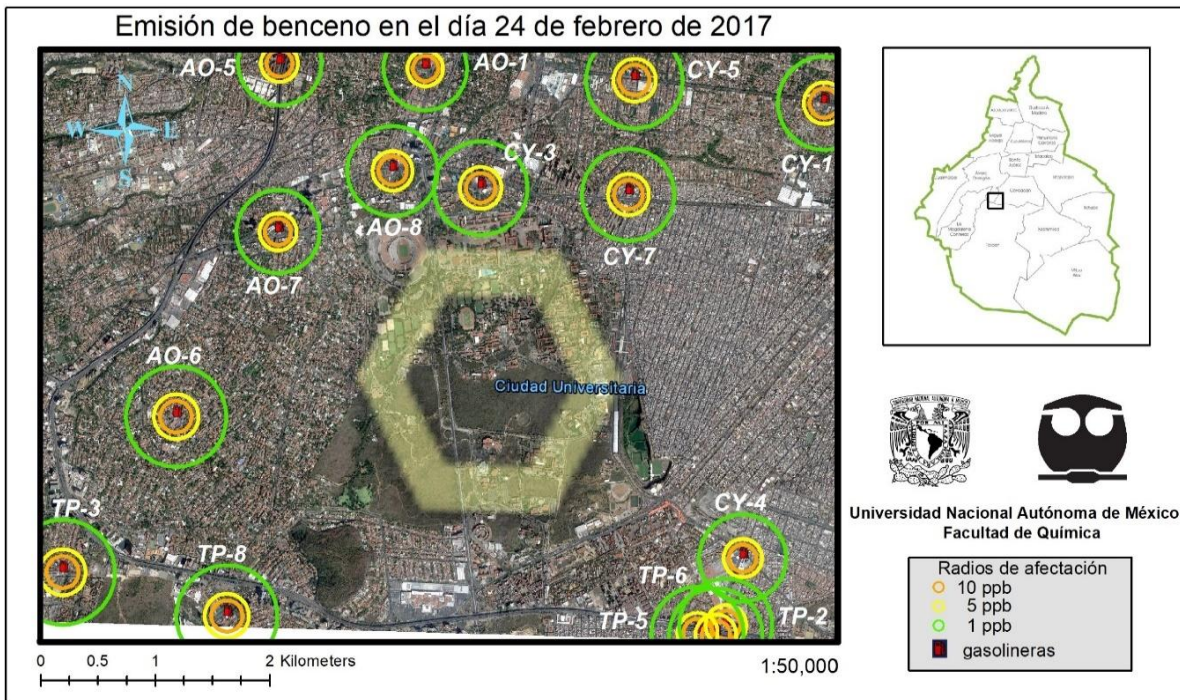


Figura 4.8. Mapa de emisión de benceno (día)

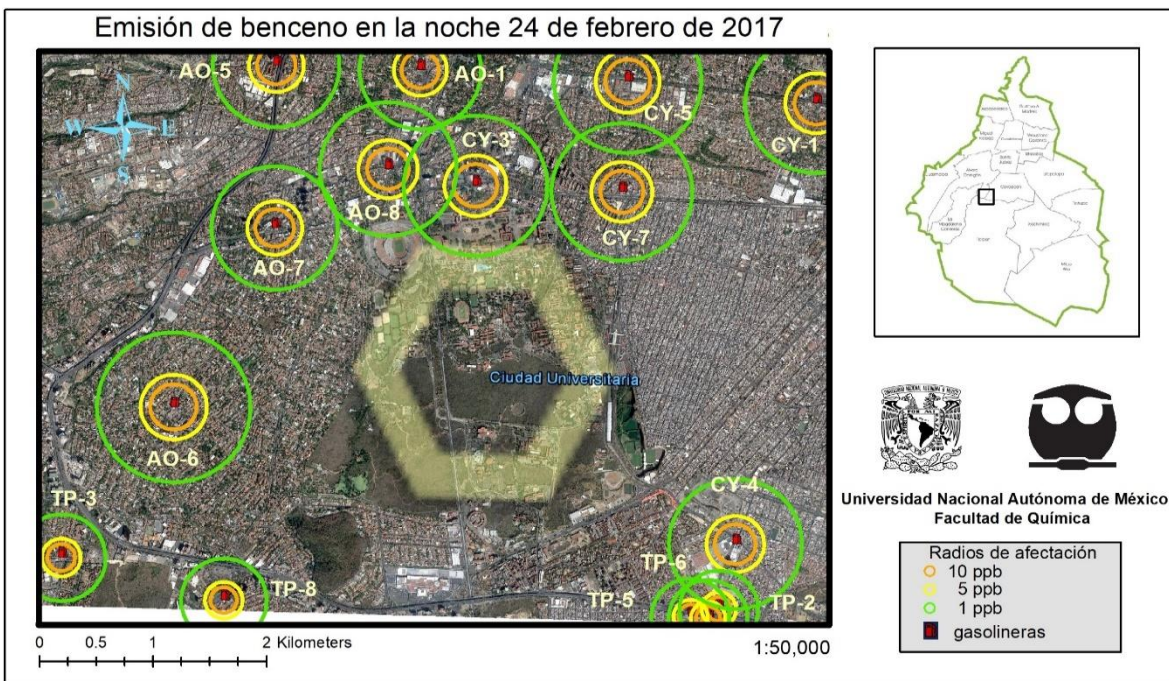


Figura 4.9. Mapa de emisión de benceno (noche)

Tabla 4.4. Radios de concentración de benceno para cada gasolinera

Clave	Radios de concentración (día)			Radios de concentración (noche)		
	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)
AO-1	351	156	110	536	233	164
AO-5	365	162	114	558	242	170
AO-6	439	195	138	676	292	205
AO-7	364	162	114	557	242	170
AO-8	393	175	124	603	262	183
CY-1	406	180	127	627	271	191
CY-3	409	182	128	633	274	192
CY-4	381	169	120	586	254	179
CY-5	420	186	132	649	281	197
CY-7	402	179	126	620	269	189
TP-2	406	178	125	347	152	107
TP-3	459	201	141	391	171	121
TP-4	408	179	125	348	153	108
TP-5	403	176	124	343	151	106
TP-8	442	193	136	377	165	116

La **tabla 4.4** muestra la gasolinera que más propaga el contaminante benceno, siendo esta TP-3 y en la noche AO-6 además de que se observa un aumento en la distancia de las concentraciones en la noche debido a que hubo más velocidad de desplazamiento del viento.

Tabla 4.5. Radios de concentración de tolueno para cada gasolinera

Clave	Radios de concentración (día)			Radios de concentración (noche)		
	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)
AO-1	977	431	304	1600	665	462
AO-5	1000	448	315	1700	691	480
AO-6	1200	509	358	1900	790	547
AO-7	1000	456	321	1700	703	488
AO-8	1100	476	335	1800	736	510
CY-1	1300	566	399	2200	890	615
CY-3	1100	494	348	1900	770	534
CY-4	1200	515	363	2000	805	557
CY-5	1300	555	391	2100	872	603
CY-7	1000	456	321	1700	708	491
TP-2	1500	613	426	1200	521	363
TP-3	1500	615	427	1200	523	364
TP-4	1200	494	345	989	421	294
TP-5	1200	519	362	1000	442	309
TP-8	1500	616	428	1200	524	366

Para tolueno se muestran las **figuras 4.10** y **4.11** y la **tabla 4.5**.

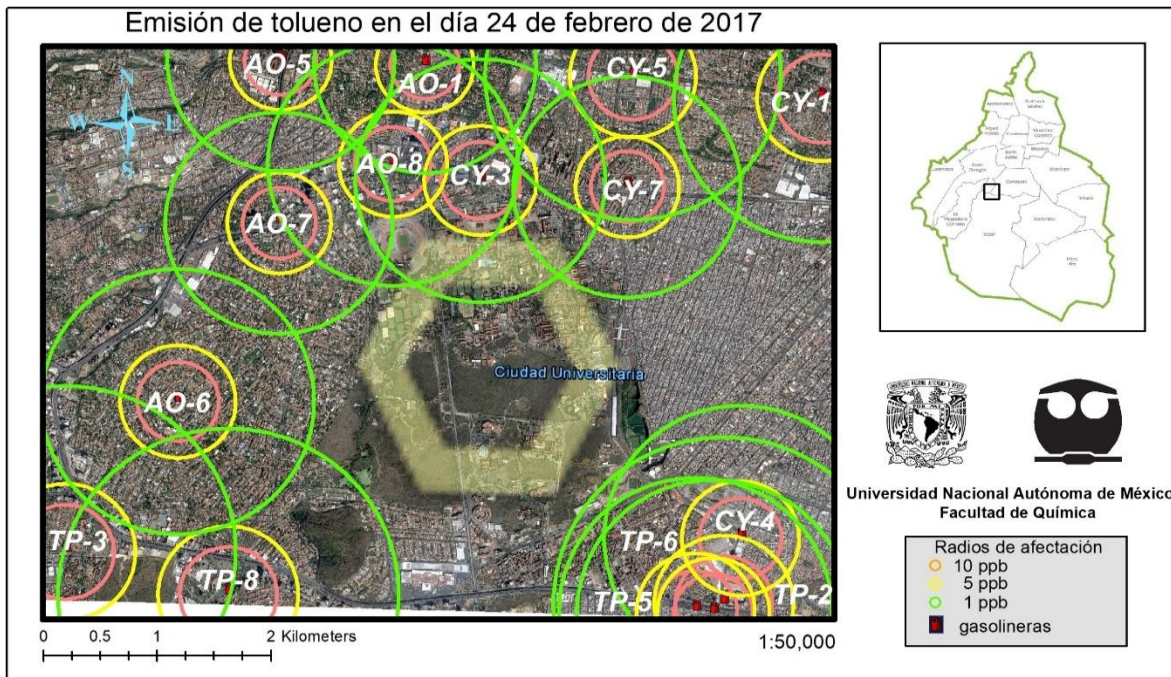


Figura 4.10. Mapa de emisión de tolueno (día)

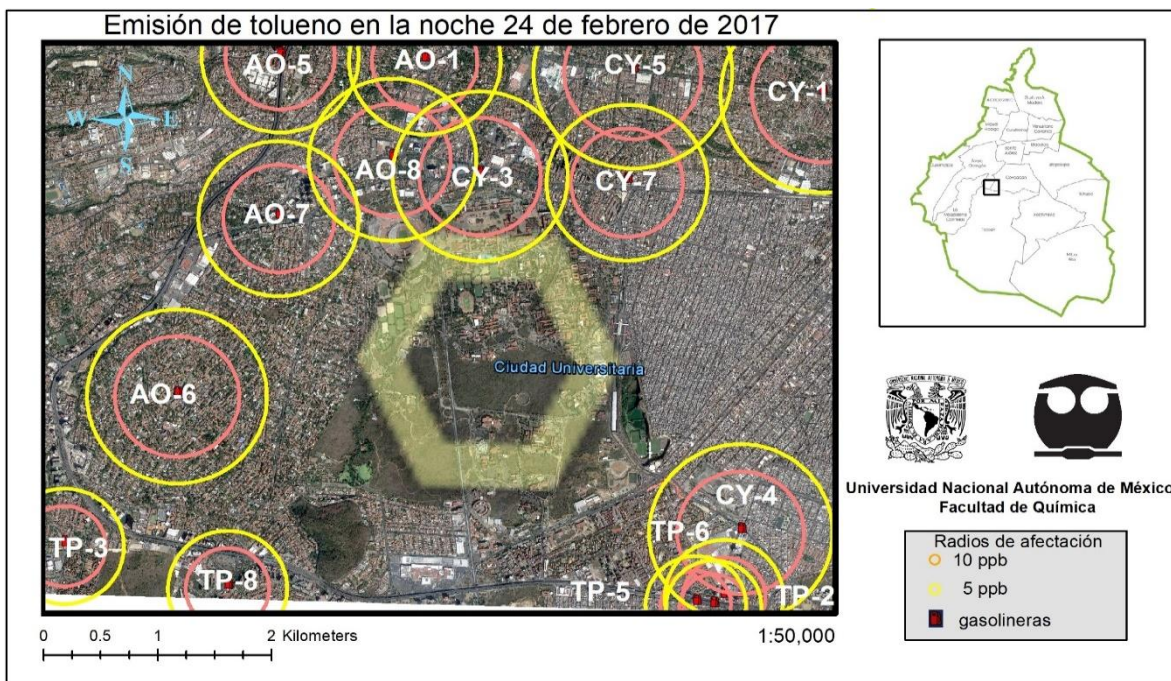


Figura 4.11. Mapa de emisión de tolueno (noche)

En la **tabla 4.5** la gasolinera con radio de concentración más grande es TP-8 en el día y CY-1 en la noche debido a que existe más tolueno que

benceno en la gasolina los radios de afectación sobrepasaron los 1000 metros y quedando fuera del rango de la escala seleccionada.

En el caso de etilbenceno se presentan las **figuras 4.12 y 4.13** además de la **tabla 4.6**.

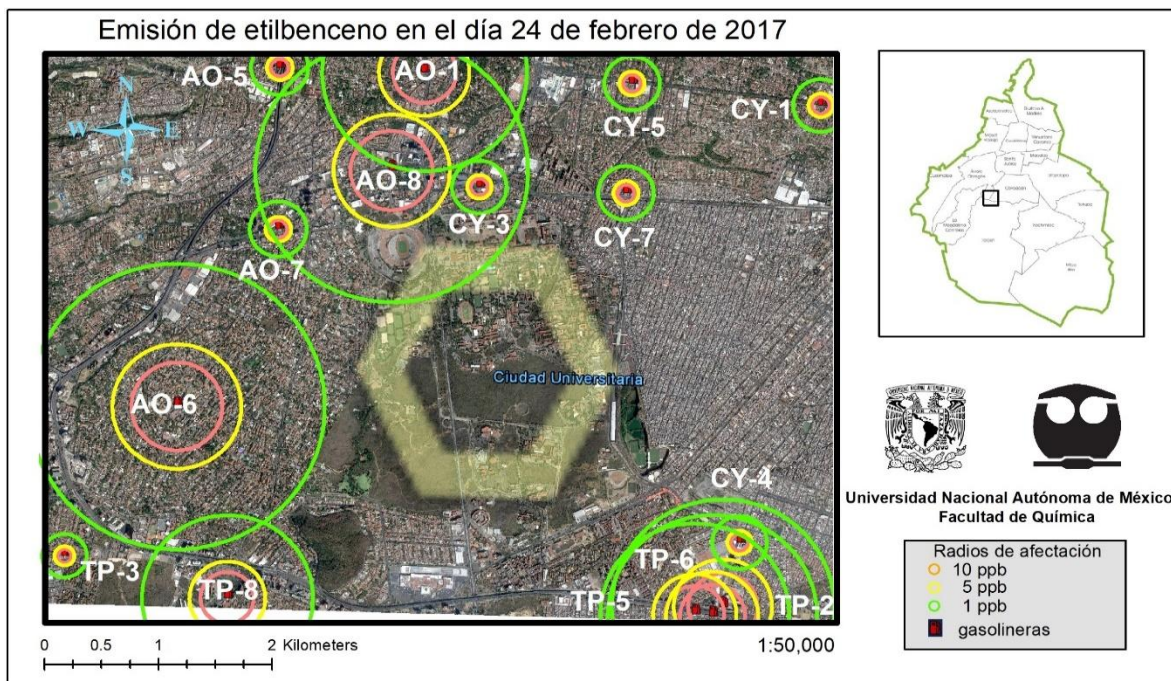


Figura 4.12. Mapa de emisión de etilbenceno (día)

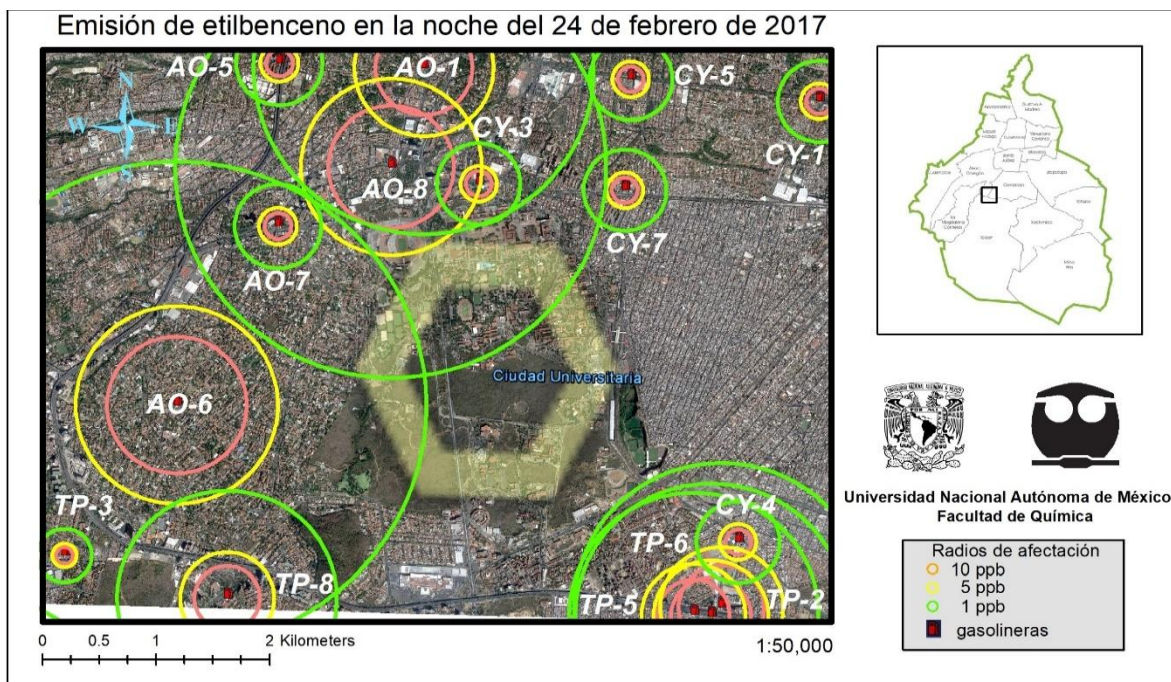


Figura 4.13. Mapa de emisión de etilbenceno (noche)

Tabla 4.6. Radios de concentración de etilbenceno para cada gasolinera

Clave	Radios de concentración (día)			Radios de concentración (noche)		
	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)
AO-1	900	398	280	1500	613	427
AO-5	251	112	79	381	167	117
AO-6	1300	567	400	2200	892	616
AO-7	251	112	79	381	167	117
AO-8	1200	511	360	1900	797	552
CY-1	240	107	76	366	160	113
CY-3	240	107	76	366	160	113
CY-4	240	107	76	366	160	113
CY-5	244	109	77	367	161	114
CY-7	244	109	77	367	161	114
TP-2	978	431	305	1300	540	376
TP-3	196	87	62	240	106	74
TP-4	920	406	286	1200	507	353
TP-5	830	367	259	1100	457	319
TP-8	752	333	234	968	413	288

Para etilbenceno la **tabla 4.6** menciona que AO-8 y AO-6 son las gasolineras que más propagan la concentración de este contaminante.

Por último, las **figuras 4.14** y **4.15** junto con la **tabla 4.7** presentan las emisiones de xileno.

Tabla 4.7. Radios de concentración de xilenos para cada gasolinera

Clave	Radios de concentración (día)			Radios de concentración (noche)		
	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)	1ppb (m)	5 ppb (m)	10 ppb (m)
AO-1	1600	713	502	2900	1100	782
AO-5	529	234	166	827	355	248
AO-6	2900	1200	870	5700	2100	1400
AO-7	532	236	167	832	357	250
AO-8	2600	1100	784	5000	1900	1300
CY-1	528	234	166	830	356	249
CY-3	502	223	157	787	338	237
CY-4	508	225	159	796	342	240
CY-5	509	226	160	796	342	240
CY-7	598	265	187	947	404	283
TP-2	1700	750	528	2400	966	666
TP-3	389	173	122	485	211	149
TP-4	2000	851	598	2800	1100	760
TP-5	1800	785	552	2500	1000	698
TP-8	1600	699	492	2200	896	619

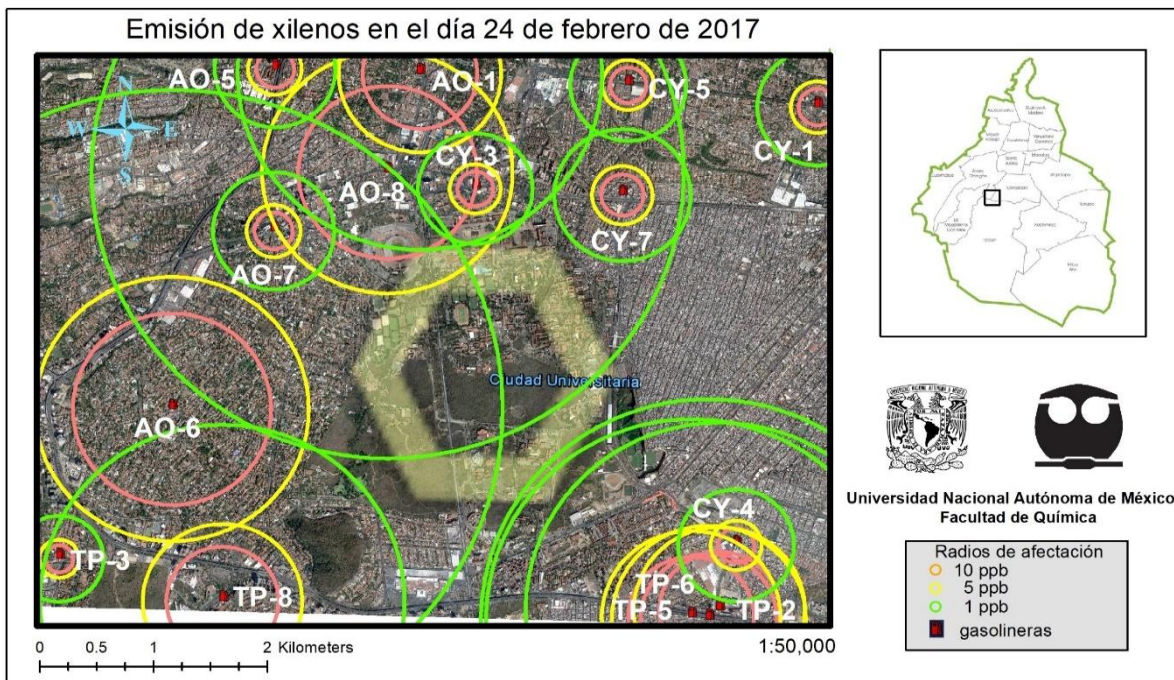


Figura 4.14. Mapa de emisión de xilenos (día)

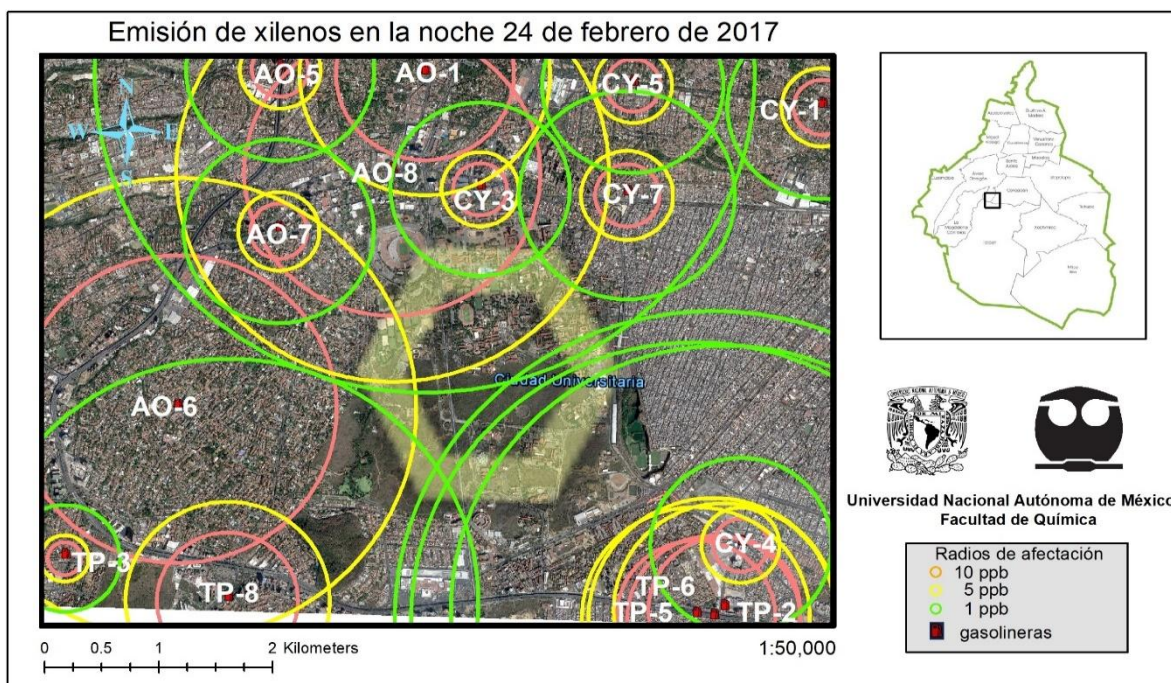


Figura 4.15. Mapa de emisión de xilenos (noche)

Como se aprecia en la **tabla 4.7** la gasolinera que más contamina es AO-6 en el día como en la noche. En cada mapa se puede apreciar los radios y en qué lugar se encuentra tomando como referencia a Ciudad Universitaria.

Los radios de concentración son proporcionales a la concentración que se midió por el método ASTM D5769, es decir , que aunque existen otros factores que afectan la emisión se le trato de dar mayor contribución a la cantidad de BTEX encontrado en las gasolinas de la CDMX.

En general los resultados de concentración de BTEX presentados en las tablas y mapas anteriores no son dañinos ya que no se sobrepasan los niveles mínimos de exposición los cuales se presentan en la **tabla 4.8** .

Tabla 4.8. Niveles mínimos de exposición de BTEX para generar daño

Contaminante	Tiempo de exposición	Concentración mínima	Riesgo mínimo
Benceno	8 horas - jornada laboral	1 ppm	Letargo, mareo, aceleración del latido del corazón, dolor de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento.
Tolueno	8 horas - jornada laboral	20 ppm	Efectos al sistema nervioso pueden ser pasajeros tales como dolor de cabeza, mareo o pérdida del conocimiento.
Etilbenceno	8 horas - jornada laboral	100 ppm	Irritación en los ojos y garganta.
Xilenos	8 horas - jornada laboral	100 ppm	Efectos sobre el sistema nervioso, como por ejemplo dolor de cabeza, falta de coordinación muscular, mareo, confusión y pérdida del sentido del equilibrio.

Por lo tanto, podemos afirmar que para llegar a estos niveles de concentración mínima de exposición para causar daño se necesita mayor repostaje de combustible en las gasolineras.

Conclusiones

Al comparar la cantidad de benceno presente en la gasolina muestreada contra el límite que estipula la NOM-016-CRE-2016 para la Ciudad de México podemos afirmar que no se excedió la concentración permitida en la gasolina Magna como para Premium. Ya que el límite establecido es menor a 1% en volumen y los resultados son de 0.36 %v de benceno en la gasolina Magna y 0.28 % v en la gasolina Premium.

En el caso de tolueno, etilbenceno y xilenos la NOM-016-CRE-2016 menciona que para compuestos aromáticos el máximo permitido en la ZMVM es de 25% v y tomando en cuenta que los principales compuestos aromáticos son el tolueno, los xilenos, el etilbenceno y el benceno se hizo la suma de concentraciones dando un total de 13 %v para la gasolina Magna y de 4 %v para la gasolina Premium. Por lo tanto, se puede decir que no sobrepasó el límite establecido por la norma mexicana, tomando en cuenta que los otros compuestos aromáticos se encuentran en menor concentración y su aportación no es significativa.

Por otra parte, considerando la NADF-011-AMBT-2013 que regula la cantidad de compuestos orgánicos volátiles en fuentes fijas para la CDMX para prevenir la formación de ozono troposférico, en el caso de tolueno, etilbenceno y benceno se determinó que en las 15 gasolineras en donde se simuló la emisión de BTEX si se cumplió con la norma. Aunque, en el caso de los xilenos hubo 6 casos en donde la concentración sobrepasó el límite de 6 toneladas al año las cuales fueron AO-6, AO-8, TP-2, TP-5, TP-6 Y TP-8.

Además, se determinó que la concentración de BTEX emitida por las gasolineras aledañas a Ciudad Universitaria no causa daño en la salud de la población ni medio ambiente, de acuerdo a los flujos simulados en

este trabajo y en comparación a la **Tabla 4.8** que presenta los niveles mínimos de exposición cuyos valores son distantes a las emisiones obtenidas para benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos.

Bibliografía

- AccuStandard. (2016). *Gasoline Refinery Aromatics Calibration Set* . USA.
- American Petroleum Institute. (1981). *Standard Definitions for Petroleum Statistics*. Washington DC: 3rd ed.
- ASTM D5769. (30 de octubre de 2015). *Determination of Benzene, Toluene, and Total Aromatics in Finished Gasolines by Gas Chromatography/Mass Spectrometry*. US.
- ASTM International. (2001). *ASTM International*. Recuperado el 07 de marzo de 2017, de <https://www.astm.org>: https://www.astm.org/ABOUT/full_overview.html
- ASTM International. (s.f.). *ASTM International*. Recuperado el 07 de marzo de 2017, de <https://www.astm.org>: https://www.astm.org/ABOUT/full_overview.html
- ATSDR. (2007). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. *Reseña Toxicológica del Xileno*. Atlanta, G A : Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- ATSDR. (2007). Agency for Toxic Substances and Disease Registry . *Toxicological Profile for Benzene (Update)*. Atlanta, GA:US: Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- ATSDR. (2010). Agency for Toxic Substances and Disease Registry . *Toxicological Profile for Ethylbenzene* . Atlanta,GA: US: Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- ATSDR. (2015). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Tolueno*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios

Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. . Obtenido de Agency for Toxic Substances and Disease Registry: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs56.html

Bravo, H. S. (2006). *The potencial impact of gasoline additives on air quality in developing countries. Clean Technologies and Enviromental Policy.*

BroatchJacobi. (2002). *Proceso y tecnología de máquinas y motores térmicos* (Vol. Capitulo 15). UPV.

BroatchJacobi. (2002). *Proceso y tecnología de máquinas y motores térmicos* (Vol. 15). UPV.

Concawe. (1985). *Health Aspects of Petroleum Fuels.* The Hague.

CONCAWE. (1985). *Health Aspects of Petroleum Fuels.* The Hague.

Contreras, A. M. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida.* CDMX: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Contreras, V. A. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida.* CDMX: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

EPA. (2013). Integrated Science Assessment for Ozone and Related Photochemical Oxidant. *EPA 600/R-10/076F.* National Center for Enviromental Assessment-RTP Division Office of Research and Development: Research Triangle Park.

ESRI. (2017). *ArcGIS DESKTOP.* Obtenido de ArcMap: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>

Gallego Picó Alejandrina, I. G. (2012). *Contaminación atmosférica.* Madrid: UNED.

Gallego, P. A. (2012). *Contaminación atmosférica.* Madrid: UNED.

- Harper, F. O. (1993). Carcinogenic effects of benzene as a major component of gasoline and jet fuels. *Hydrocarbon Contaminated Soils: Volume III*, pp.215-41.
- IARC. (1989). Volume 45 Occupational Exposures in Petroleum Refining. *Crude Oil and Major Petroleum Fuels*.
- INE, I. N. (2006). *Manual 5 Protocolo de manejo de datos de la calidad del aire*. CDMX.
- Jacobson. (2006). *Fundamentals of Atmospheric Modelling* (2nd. Edition ed.). Cambridge University Press.
- Jauregui, E. (1991). *El clima urbano y su relación con los contaminantes del aire*. México.
- Molina, L. y. (2005). *La calidad del aire en la megaciudad de México. Un enfoque integral*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Morales, R. G. (2006). *Contaminación atmosférica urbana . Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*. Santiago de Chile: Universitaria,S.A.
- NOAA. (2013). *ALOHA ® Technical documentation*. Seattle, Washington.
- Padilla, C. (2007). *Transporte y contaminación del aire en la Ciudad de México (1950-2005)*. México: FES Acatlán, UNAM.
- Scheutz, M. H. (2004). Bioremediation and biodegradation. Attenuation of methane and volatile organic compounds in landfill soil covers. *Technical University of Denmark*, 33:61-71.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. (2014). *Inventario de emisiones de la CDMX , contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero*. México.

- Secretaría del Medio Ambiente. (2006). NADF-009-AIRE-2006. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 154-167.
- SEDEMA. (2014). *Inventario de emisiones de la CDMX , contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero*. CDMX.
- SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida*.
- SENER. (2017). *Volumen de ventas internas de Petrolíferos por entidad federativa*. Obtenido de Sistema de Información Energética: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=PMXE2C03>
- SENER. (03 de 08 de 2017). *Volumen de ventas internas de Petrolíferos por entidad federativa*. Obtenido de Sistema de Información Energética: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=PMXE2C03>
- SIMAT. (05 de 05 de 2017). *Información técnica*. Obtenido de Monitoreo de contaminantes: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/pronostico-aire/sobre-modelo.php>
- SIMAT. (2017). *Información técnica*. Obtenido de Monitoreo de contaminantes: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/pronostico-aire/sobre-modelo.php>
- SMA-GDF. (2006). *Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal*. México: GDF.
- UNEP y OMS. (2011). *Integrated Assesment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers*. UK: Bart Ullstein Banson.

US EPA. (2008). Compilation of air pollutant emission factors. *Volume I: Stationary point and area sources*. USA.

Anexo A. Cálculo de la emisión de los BTEX

En este anexo se describe los cálculos detallados realizados para obtener la emisión de BTEX.

Datos:

- Concentración de BTEX en la gasolina (%v).
- Densidad de la gasolina (g/mL).
- Factor de emisión para recarga de tanques por camión cisterna de gasolina (mg/L a 25°C).
- Factor de emisión para repostaje de gasolina en autos (mg/L a 25°C).
- Venta de gasolina en el mes de febrero de 2017 según la SENER para toda la CDMX (L).
- Total de gasolineras en la CDMX.

Ejemplo gasolinera CY-3 para benceno

Datos gasolinera CY-3:

- 0.455 %v para Magna
- 0.218 %v para Premium
- 0.728 g m/L para Magna
- 0.729 g m/L para Premium
- 2,300 mg por litro de gasolina a 25°C según la **Tabla A.1**
- 1,532 mg por litro de gasolina a 25°C según la **Tabla A.1**
- 349,675,712 L de gasolina vendida Magna y 83,142,720 L de gasolina vendida Premium en el mes de febrero de 2017
- Son 398 gasolineras registradas en la Guía Pemex.

Tabla A.1 Factores de emisión de repostaje de gasolina

Fuente de emisión	Tasa de emisión (mg/L)
Depósito subterráneo o cisterna (Etapa I)	
Llenado de cisterna con manguera sumergida	880
Llenado de cisterna con salpicaduras	1380
Llenado de cisterna con sistema de control	40
Respiración y vaciado del tanque subterráneo	120
Total	2,300
Operaciones de repostaje de gasolina en vehículos (Etapa II)	
Pérdidas de desplazamiento (no controladas)	1320
Pérdidas de desplazamiento (controladas)	132
Derrame	80
Total	1,532

El primer paso fue conocer los mililitros de gasolina perdidos por cada litro repostado, para recarga de tanques y para repostaje de autos a partir de la **tabla A.1**.

Recarga de tanque

Magna

$$\begin{aligned} \text{mL de gasolina perdido por litro repostado} &= (2300 \text{ mg}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mL}}{0.728 \text{ g}} \right) \\ &= 3.15 \text{ mL} \end{aligned}$$

Premium

$$\begin{aligned} \text{mL de gasolina perdido por litro repostado} &= (2300 \text{ mg}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mL}}{0.729 \text{ g}} \right) \\ &= 3.15 \text{ mL} \end{aligned}$$

Repostaje de autos

Magna

$$\begin{aligned} \text{mL de gasolina perdido por litro repostado} &= (1532 \text{ mg}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mL}}{0.728 \text{ g}} \right) \\ &= 2.10 \text{ mL} \end{aligned}$$

Premium

$$\begin{aligned} \text{mL de gasolina perdido por litro repostado} &= (1532 \text{ mg}) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \left(\frac{1 \text{ mL}}{0.729 \text{ g}} \right) \\ &= 2.10 \text{ mL} \end{aligned}$$

El segundo paso fue sumar los dos tipos de pérdidas existentes y suponer que todo el benceno contenido en la gasolina que se pierde se evapora.

Magna

$$\text{mL de benceno perdido por litro repostado} = (5.263 \text{ mL}) \left(\frac{0.455 \%}{100} \right) = 0.024 \text{ mL}$$

Premium

$$\text{mL de benceno perdido por litro repostado} = (5.256 \text{ mL}) \left(\frac{0.218 \%}{100} \right) = 0.011 \text{ mL}$$

Tercer paso conocer la cantidad de gasolina vendida en una gasolinera suponiendo que en las 398 gasolineras se vende la misma cantidad de producto.

Magna

$$\begin{aligned} \text{litros vendidos de gasolina en una gasolinera} &= \left(\frac{349,675,712 \text{ L}}{398 \text{ gasolineras}} \right) \\ &= 878,582 \text{ L en febrero de 2017} \end{aligned}$$

Premium

$$\begin{aligned} \text{litros vendidos de gasolina en una gasolinera} &= \left(\frac{83,142,720 \text{ L}}{398 \text{ gasolineras}} \right) \\ &= 208,901 \text{ L en febrero de 2017} \end{aligned}$$

Cuarto paso fue saber la cantidad de benceno perdido por toda la gasolina vendida en febrero de 2017.

Magna

$$\begin{aligned} \text{benceno perdido por litro repostado de gasolina} \\ &= 878,582 \text{ L} \left(\frac{0.024 \text{ mL de benceno perdidos}}{1 \text{ L de gasolina vendido}} \right) \\ &= 21,085 \text{ mL en febrero de 2017} \end{aligned}$$

Premium

$$\begin{aligned} \text{benceno perdido por litro repostado de gasolina} \\ &= 208,901 \text{ L} \left(\frac{0.011 \text{ mL de benceno perdidos}}{1 \text{ L de gasolina vendido}} \right) \\ &= 2,298 \text{ mL en febrero de 2017} \end{aligned}$$

El quinto y último paso fue convertir el flujo de benceno al deseado para la simulación en ALOHA® 5.4.7 ya que puede utilizarse por hora, por minuto o por segundo.

Magna

$$\begin{aligned} \text{litros de benceno perdidos al día 24 de febrero de 2017} &= \left(\frac{21,085 \text{ mL}}{28 \text{ días}} \right) \\ &= 753 \text{ mL en una gasolinera} \end{aligned}$$

Premium

$$\begin{aligned} \text{litros de benceno perdidos al día 24 de febrero de 2017} &= \left(\frac{2,298 \text{ mL}}{28 \text{ días}} \right) \\ &= 82 \text{ mL en una gasolinera} \end{aligned}$$

Anexo B. Curvas de calibración del cromatógrafo

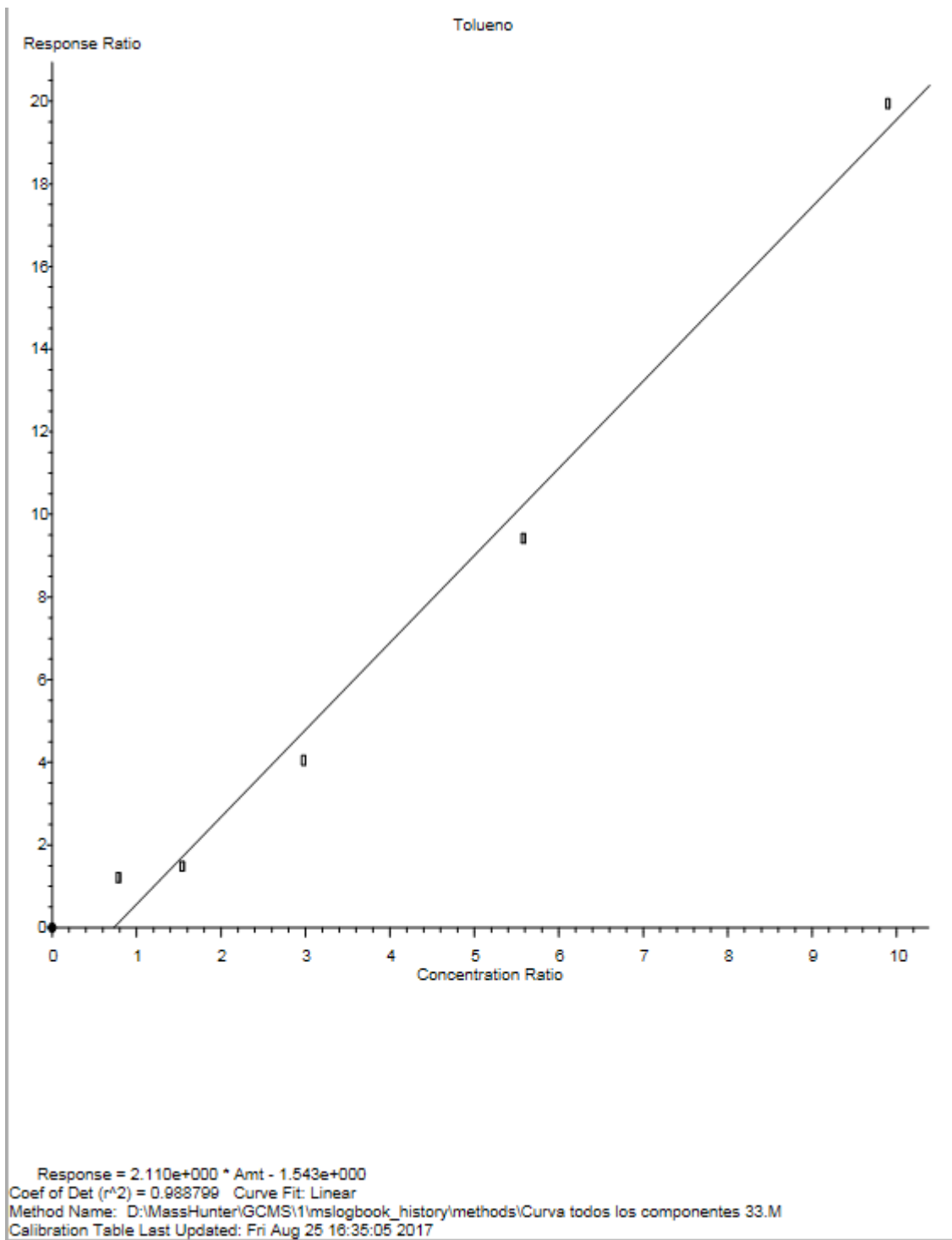


Figura B.1. Curva de calibración de tolueno (regresión lineal)

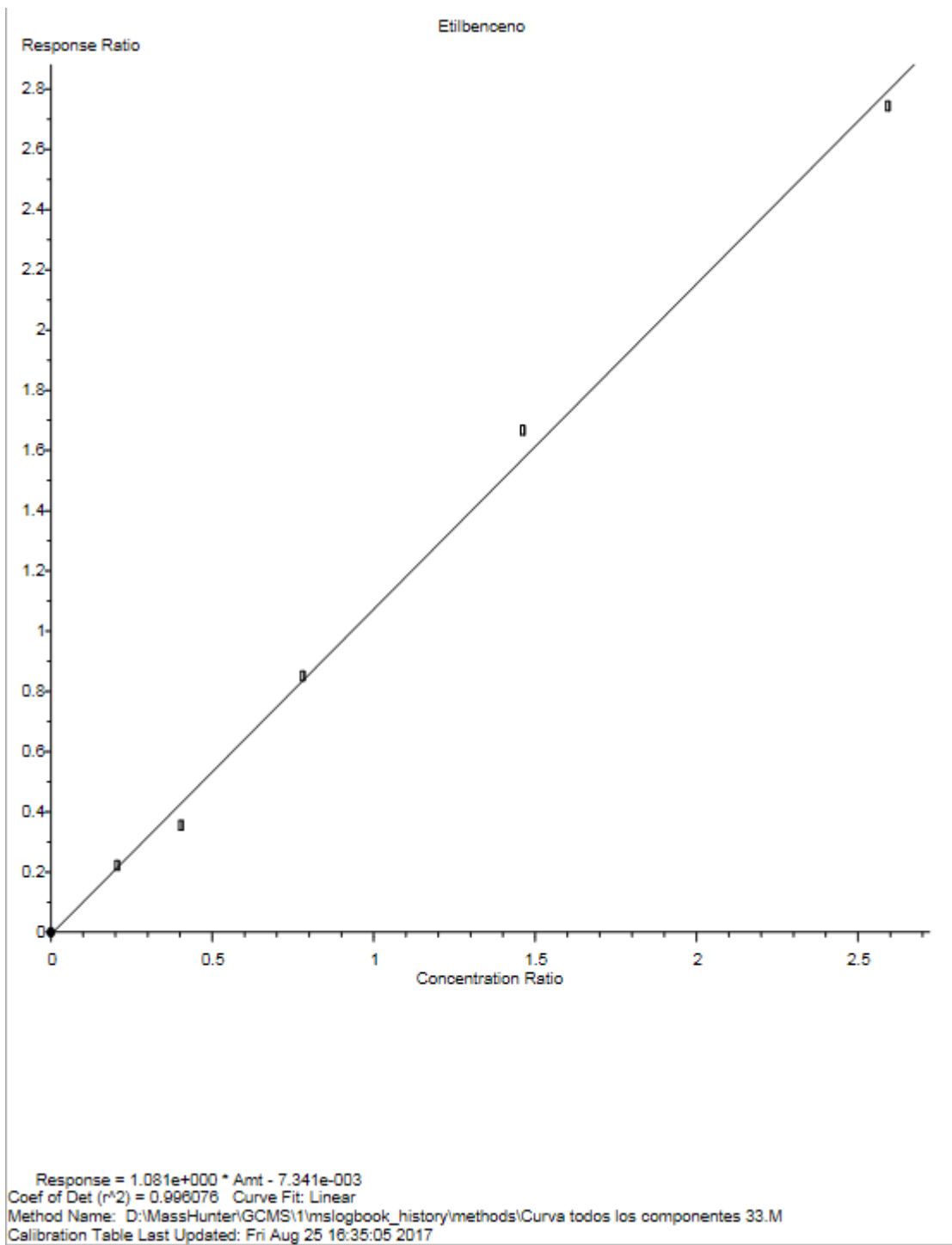


Figura B.2. Curva de calibración de etilbenceno (regresión lineal)

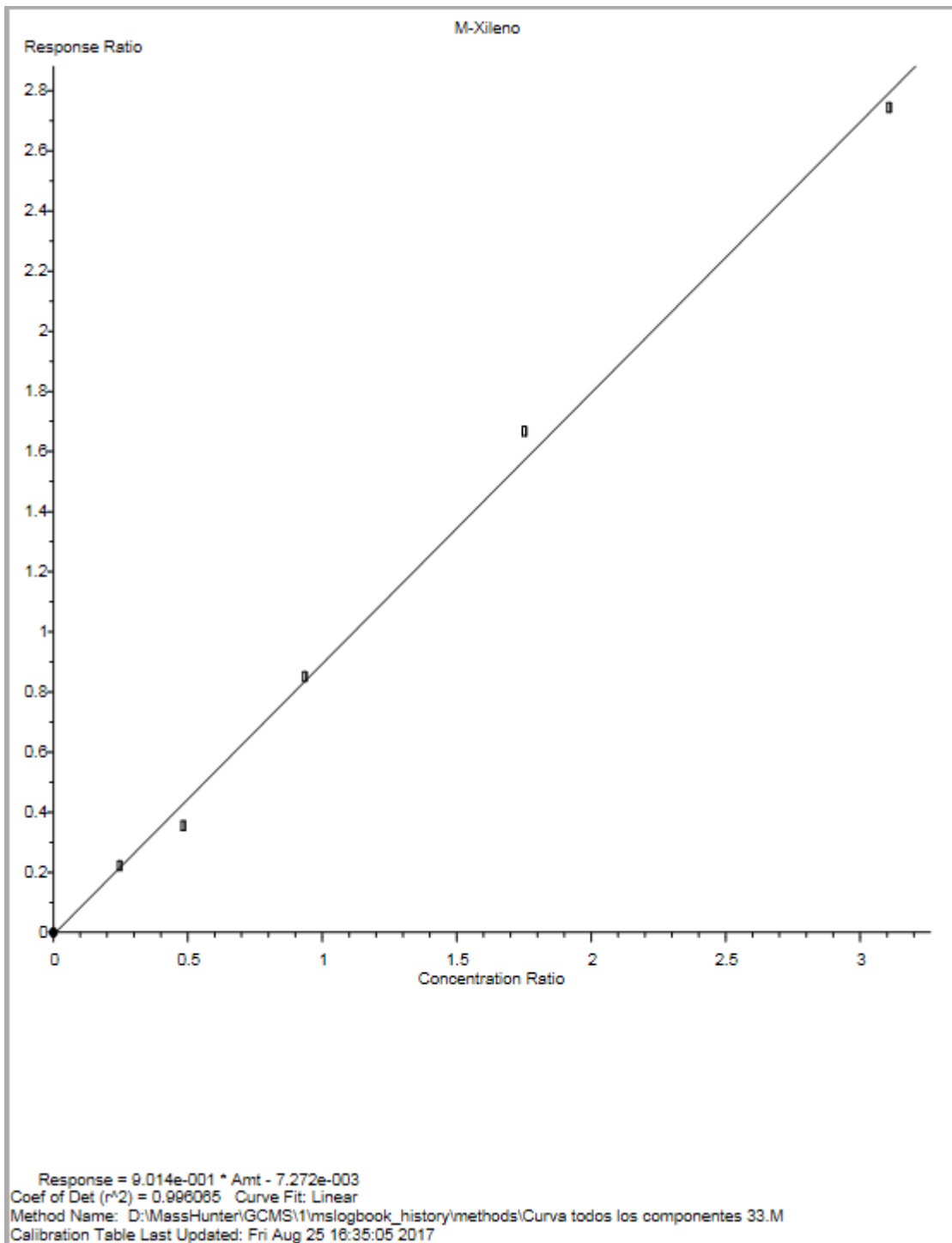


Figura B.3. Curva de calibración de m-xileno (regresión lineal)

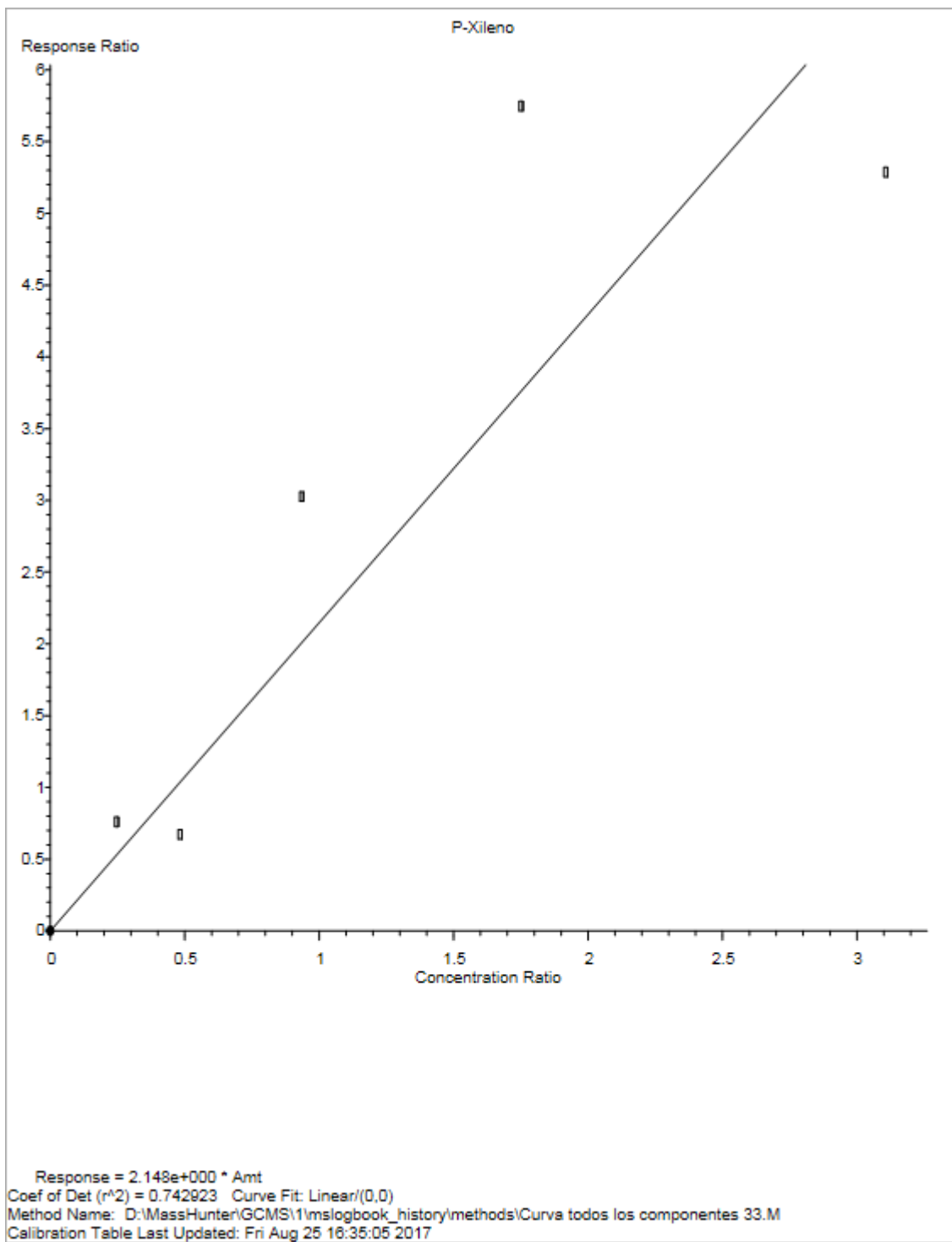


Figura B.4. Curva de calibración de p-xileno (regresión lineal)

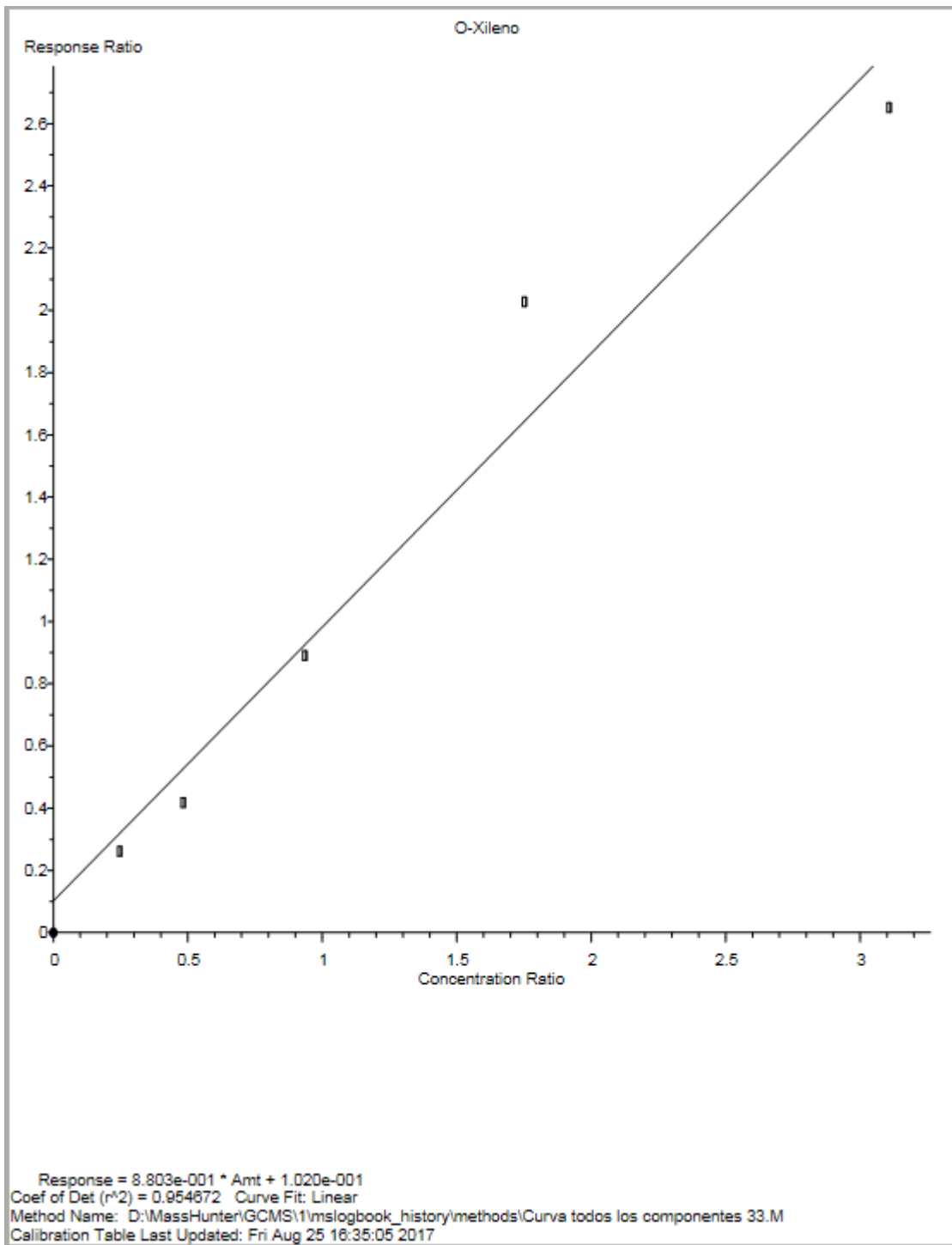


Figura B.5. Curva de calibración de o-xileno (regresión lineal)