



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

## **FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

### **“Evaluación de Riesgo de Tóxicos Atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México”**

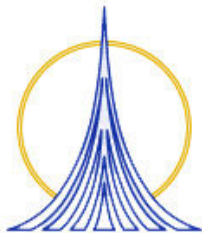
**TRABAJO DE SEMINARIO DE  
TITULACION  
QUE PARA OBTENER TITULO DE:**

**INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTA**

**ALEJANDRA CARMONA VILLAVICENCIO**

**ASESOR: Dr. JOSE AGUSTIN GARCÍA  
REYNOSO**



**México D.F.**

**Mayo 2006**



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.

## *Agradecimientos.*

*Le agradezco a mi madre Angelina Villavicencia Delgadillo por el apoyo e impulso que me ha brindado para lograr mis objetivos. Ella ha dado un ejemplo de lucha y fortaleza sin dejar a un lado la comprensión y amor que solo una madre puede ofrecer, gracias a ella he logrado alcanzar mis metas a pesar de obstáculos que se han presentado.*

*Al Dr. José Agustín García Reynoso por la atención y apoyo que me brindo durante la realización de mi tesis. El me ha guiado, me ha compartido sus conocimientos y su tiempo sin los cuales no se hubiese culminado este trabajo.*

## *Dedicatorias.*

*A mi madre como muestra de que he seguido su ejemplo de no descansar hasta llegar a cumplir nuestros objetivos. Hoy confirmo que después del esfuerzo se disfrutan los triunfos. Te amo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por pertenecer a ella y ofrecerme la oportunidad de recibir una enseñanza integral en sus instalaciones.*

*A mis profesores por compartir su conocimiento y su experiencia conmigo*

*A mis amigos con quienes he compartido momentos de gran felicidad, pero que han estado a mi lado para ofrecerme un consejo, un abrazo, una sonrisa en momentos difíciles*



## Índice

<b>Índice .....</b>	<b>1</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 1. Evaluación de Riesgos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Evaluación de Riesgos.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.1 Riesgo.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.2 Evaluación de riesgos para la salud humana. ER .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.3 Análisis de los datos. ....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.4 Evaluación de la exposición. ....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.5 Evaluación de la toxicidad.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.6 Caracterización de los riesgos.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.7 Blanco.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.8 Ruta de Exposición.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.9 Tiempo de exposición.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.10 Dosis.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Restauración ambiental. ....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Prevención de la contaminación. ....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 2. Contaminación Atmosférica. ....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Contaminantes Criterio .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Monóxido de carbono (CO).....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2 Ozono (O<sub>3</sub>) .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3 Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4 Partículas.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.5 Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.6 Plomo (Pb).....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Contaminantes peligrosos del aire (CPA).....</b>	<b>24</b>

<b>Capítulo 3. Formaldehído</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1 Propiedades Químicas</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2 Propiedades Físicas</b> .....	<b>37</b>
<b>3.3 Almacenamiento y Manejo</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4 Usos del formaldehído</b> .....	<b>39</b>
<b>3.5 Formaldehído como contaminante Primario y Secundario.</b> .....	<b>41</b>
<b>Capítulo 4. Metodología</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1 Metodología para la obtención de los datos.</b> .....	<b>45</b>
<b>4.2 Metodologías utilizadas para el análisis de Riesgos.</b> .....	<b>47</b>
4.2.1 Probabilidad de cáncer en el tiempo de vida (LCP) .....	47
4.2.2 Factor de Riesgo Unitario.....	47
4.2.3 Riesgo Individual máximo a cáncer MIRC. ....	48
4.2.4 HI. Índice de peligrosidad a la salud. (crónico y agudo). ....	48
4.2.5 Pérdida de esperanza de vida (Loss of life expectancy LLE).....	49
4.2.6 Exposición a diferentes ambientes.....	50
4.2.7 Dosis.....	51
<b>Capítulo 5. Resultados</b> .....	<b>52</b>
<b>Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>58</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>59</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>60</b>
<b>Bibliografía.</b> .....	<b>61</b>

# **Introducción**



## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

En este trabajo se hace un estudio del riesgo que representan las concentraciones de formaldehído (HCHO) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), usando una base de datos que se obtuvieron durante las campañas de medición de los años 2002 y 2003, este es el primer estudio en su tipo tanto por la técnica empleada como por el contaminante de interés en la ciudad de México.

La información de las concentraciones ambientales son las primeras en su tipo para la Ciudad de México y provienen de un equipo espectroscópico en el infrarrojo y cuyas mediciones abarcaron la estación seca caliente, época donde se tienen altos niveles de contaminantes. La concentración que en este trabajo se utilizan son las que encontramos en lugares abiertos, cabe mencionar que no se toma en cuenta las concentraciones que se tienen en zonas industriales y laborales donde se maneja el formaldehído como materia prima y/o como producto terminado en donde seguramente tendremos concentraciones más altas.

Estas concentraciones de formaldehído son a consecuencia de emisiones provenientes de fuentes móviles (vehículos) como contaminante primario, además de que el formaldehído también se forma mediante un proceso secundario debido a la Degradación atmosférica del MTBE (Metil Terbutil Éter) compuesto que se le agrega a la gasolina para mejorar la combustión y reducir emisiones de monóxido de carbono y benceno, sin embargo, al descomponerse en la atmósfera este compuesto se genera como contaminantes secundario el formaldehído.

La estimación de riesgo incluyó la evaluación de los parámetros de probabilidad de cáncer en el tiempo de vida, el índice de peligrosidad agudo, el índice de peligrosidad crónico y el tiempo de pérdida de esperanza de vida.

En el Índice de peligrosidad Agudo considera los efectos tales como: Irritación de las membranas mucosas, la piel, los ojos, nariz, garganta y vías respiratorias superiores, reacciones alérgicas respiratorias o epidérmicas, tos, dolores en el pecho, problemas respiratorios, edema pulmonar, desórdenes gastrointestinales.

El Índice de Peligrosidad Crónico considera las enfermedades de cáncer en vías respiratorias, y alteraciones genéticas.

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

El capítulo 1 describe los términos y definiciones. Además se describen las metodologías utilizadas en el análisis de riesgo.

En el capítulo 2 se presenta las características de la atmósfera y de los contaminantes presentes en la misma, se muestra las diferentes clasificaciones de los mismos, así como también se describen sus efectos a la salud y al bienestar. Se presentan los cambios más recientes en el sistema de control de emisiones y de combustibles. Al final de este capítulo se mencionan los tóxicos atmosféricos y se dan ejemplos de los mismos.

En el 3º capítulo expone las características y propiedades físicas, químicas, toxicológicas y usos del formaldehído.

En el capítulo 4 se describe la metodología utilizada en este trabajo.

En el capítulo 5 se presentan los resultados así como también se presenta las gráficas que describen el comportamiento del riesgo por la exposición al formaldehído ambiental.

En el capítulo 6 se exponen las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron al terminar este análisis.

# Capítulo 1 Evaluación de Riesgos

## **1.1 Evaluación de Riesgos**

El análisis de riesgos ambientales es una disciplina relativamente nueva con raíces antiguas, como campo del conocimiento se organizó en las últimas tres décadas y su auge se debe a que varios países han aprobado leyes para proteger, tanto a la salud humana como la biota, de los peligros que puede acarrear la exposición a sustancias peligrosas presentes en el ambiente con base a la prevención y reducción de riesgos.

El interés por los riesgos para la salud ha existido a lo largo de toda la historia, pero durante los últimos decenios ese interés se ha intensificado y además ha comenzado a incluir muchas perspectivas nuevas. El campo del análisis de riesgos ha crecido rápidamente, centrándose en la definición, cuantificación y caracterización de las amenazas para la salud humana y para el ambiente; este conjunto de actividades es lo que en términos generales se conoce como evaluación de riesgos.

Aunque es evidente que desde hace tiempo hay un gran interés por la comparación de los riesgos que plantean distintas amenazas para la salud, hasta hace relativamente poco no se han elaborado marcos formales. El análisis de riesgos tiene su raíz en el sector ambiental, en el que se elaboró como un método sistemático para comparar problemas ambientales que plantean distintos tipos y grados de riesgo para la salud.

El análisis de riesgos es una técnica multidisciplinaria que utiliza conceptos desarrollados en varias ciencias en las que se incluyen a la toxicología, epidemiología, ingeniería, psicología, higiene industrial, seguridad ocupacional, seguridad industrial, evaluación del impacto ambiental, etc.

Los ejercicios de evaluación de riesgos ambientales suelen comprender estos elementos:

- **Determinación del peligro:** determina los tipos de efectos en la salud que pueden producirse, basándose en datos toxicológicos obtenidos en estudios epidemiológicos o de laboratorio.
- **Evaluación de la exposición:** combina datos sobre la distribución y las concentraciones de la contaminación en el medio ambiente con información sobre el comportamiento y la fisiología a fin de estimar la cantidad de contaminantes a que están expuestos los seres humanos.
- **Evaluación de la relación dosis - respuesta:** relaciona la probabilidad de cierto efecto en la salud con la dosis de contaminante o la magnitud de la exposición.

- **Caracterización del riesgo:** combina las evaluaciones de la exposición y de la relación dosis- respuesta para calcular el riesgo sanitario estimado, como el número previsible de personas que contraerán cierta enfermedad en una población determinada. Generalmente incluye la estimación y la comunicación de la incertidumbre.
- Identificar y evaluar los problemas ambientales y de salud producidos por la realización de actividades peligrosas y el manejo de sustancias tóxicas.
- Comparar tecnologías nuevas y tradicionales que se usan en la determinación de la efectividad de los diferentes controles y técnicas de litigación diseñadas para reducir riesgos.
- Localización de instalaciones potencialmente peligrosas.
- Selección de prioridades entre las posibles alternativas de acción para establecer secuencias de ejecución de acciones correctivas y/o de elaboración de reglamentos ambientales.

### **1.1.1 Riesgo.**

El riesgo describe la probabilidad de que, en una situación dada, una sustancia peligrosa produzca un daño a la vida humana, a la salud, a la propiedad y al ambiente.

La estimación del riesgo se basa usualmente en el valor esperado de la concurrencia del evento, las veces de la consecuencia esperada del evento, dado que el evento ha ocurrido.

El término "peligroso" define la capacidad de una sustancia de producir efectos adversos en los organismos además de la velocidad de emisión del toxico.

Se dice que una persona se puso en "riesgo" cuando está "expuesta" a un "peligro" y la magnitud del riesgo es una función de la peligrosidad de la sustancia y de la magnitud de la exposición.

$$\text{RIESGO} = f(\text{EXPOSICIÓN}, \text{PELIGRO})$$

Para que exista un riesgo es necesario que se esté expuesto a una sustancia y que esta exposición represente un peligro para la salud. Se necesita tanto el peligro como la exposición, si alguno de ellos es igual a cero entonces no hay riesgo.

La toxicidad es una medida del peligro inherente de la sustancia.

### **1.1.2 Evaluación de riesgos para la salud humana. ER**

Para estimar el riesgo que significa la presencia de un tóxico en un sitio determinado es necesario conocer su toxicidad, la cantidad de tóxico que entra en contacto con el organismo o población en estudio y las condiciones en las que se da este contacto.

La E.R. consiste en determinar si es tolerable el riesgo que enfrenta una población por estar expuesto a tóxicos en el ambiente de un sitio contaminado.

### **1.1.3 Análisis de los datos.**

El objetivo de esta parte es identificar la información de buena calidad que existe sobre el sitio y determinar la información que se necesita generar o captar para hacer la ER, en esta primera etapa se hace la selección preliminar de la lista de los tóxicos sobre los que se hará la evaluación de riesgos.

### **1.1.4 Evaluación de la exposición.**

Se hace una estimación de la magnitud actual y fuera de las exposiciones humanas, de la frecuencia y duración de estas exposiciones y de las rutas y vías potenciales de exposición.

La exposición es el contacto de una población o individuo con un agente químico o físico. La magnitud de la exposición se determina midiendo o estimando la cantidad (concentración) del agente que está presente en la superficie de contacto (pulmones, intestino, piel, etc.) durante un período especificado. Esta cantidad cuando se expresa por unidad de masa corporal del individuo expuesto se denomina Dosis Suministrada.

La exposición máxima razonable (EMR) se define como la exposición más alta que es razonable esperar que ocurra en un sitio. El propósito de calcular la EMR es hacer una estimación de la exposición que esté dentro de los niveles posibles y que nos permita hacer predicciones conservadoras de los efectos que puede causar el tóxico.

### **1.1.5 Evaluación de la toxicidad.**

Consiste en obtener la información cualitativa y cuantitativa sobre los distintos tipos de efectos adversos a la salud (cáncer, no cáncer y efectos sobre el desarrollo) que producen las sustancias, a las que se ha determinado que la población está expuesta o pudiera llegar a estar expuesta. En esta etapa se localiza la mejor información disponible sobre la magnitud de la respuesta tóxica como una función del nivel de exposición.

### **1.1.6 Caracterización de los riesgos.**

Conociendo la magnitud de las exposiciones que se han determinado como posibles y la toxicidad de las sustancias involucradas, se estiman los riesgos para la salud a los que se enfrentan por cada tóxico en lo individual, bien sea que llegue a los individuos expuestos por una ruta o por varias. Se evalúan también los riesgos que representan las exposiciones a las mezclas de las distintas sustancias presentes.

La caracterización de los riesgos consiste en determinar si estos son tolerables o no son tolerables.

### **1.1.7 Blanco.**

Se usa frecuentemente el término blanco para designar a la parte del organismo que recibe el impacto del tóxico y presenta la respuesta biológica correspondiente a la exposición. Se puede referir a una molécula (ADN, proteína, etc.) o a un órgano (hígado, riñón, cerebro, médula espinal, etc.). También se usa para designar al individuo, subpoblación que quedan expuestos a los tóxicos en un sitio determinado.

### **1.1.8 Ruta de Exposición**

La ruta de exposición es el camino que sigue un agente químico en el ambiente desde el lugar donde se emite hasta que llega a establecer contacto con la población o individuo expuesto. El análisis de la ruta de exposición describe la relación que existe entre las fuentes (localización y tipo de derrames ambientales) y los receptores (localización de las poblaciones, patrones de actividad, etc.).

Se consideran como rutas significativas las que dan lugar a exposición humana.

Las rutas de exposición consisten generalmente de cuatro elementos:

- Fuentes y mecanismos de emisión de tóxicos,
- Medio de retención y transporte (o medios en el caso de que haya transferencias de un medio a otro).
- Punto de contacto potencial entre contaminado y los individuos.
- Vía de ingreso al organismo.

La vía de exposición es el mecanismo por medio del cual el tóxico entra en el organismo. Para el propósito de la toxicología ambiental, se consideran de importancia la ingestión, la respiración y el contacto cutáneo.

### **1.1.9 Tiempo de exposición.**

Para el propósito de la toxicología ambiental, las exposiciones se clasifican de acuerdo a la magnitud del período de exposición en:

- Exposiciones crónicas. Son exposiciones que duran entre 10% y el 100% del periodo de vida. Para el caso del hombre entre 7 y 70 años.
- Exposiciones subcrónicas. Son exposiciones de corta duración, menores que el 10% del periodo vital.
- Exposiciones agudas. Son exposiciones de un día o menos y que sucede en un solo evento.

El periodo transcurrido entre el evento de exposición y las observaciones en el organismo expuesto es una variable muy importante de considerar especialmente en el caso de exposiciones intermitentes.

Se define como efecto tóxico o respuesta tóxica, cualquier desviación del funcionamiento normal del organismo que ha sido producida por la exposición a sustancias tóxicas.

Solo se consideran como desviaciones significativas los cambios irreversibles o los cambios que permanecen por un período prolongado después de que la exposición ha cesado.

El tipo de efecto tóxico que produce una sustancia sirve para hacer una clasificación muy general, pero que es muy útil. Los tóxicos se clasifican en:

- Cancerígenos.
- No cancerígenos.
- Tóxicos para el desarrollo.



### **1.1.10 Dosis.**

Es un concepto con el que la mayoría está más o menos familiarizado. El hombre primitivo sabía como usar los venenos de animales y de extractos de plantas para cazar, para agredir o defenderse y también asoció el uso de preparaciones específicas para controlar determinadas enfermedades.

La dosis de exposición está definida por la cantidad de sustancia a la que se expone el organismo y el tiempo durante el que estuvo expuesto.

El efecto adverso o daño es una función de la dosis y de las condiciones de exposición (vía de ingreso, duración y frecuencia de las exposiciones, tasa de contacto con el medio contaminado, etc.).

### **1.2 Restauración ambiental.**

Si la ER en un sitio determinado caracteriza los riesgos existentes como no tolerables, entonces se tiene que invertir el sitio para reducir los niveles de los tóxicos hasta el punto de que no signifiquen peligro para la salud pública. A este proceso de limpieza ambiental se le da el nombre de restauración, remediación o corrección ambiental. El término restauración se usa cuando los tóxicos que se van a eliminar provienen de contaminación del medio y el término remediación es más amplio, incluye los procesos de eliminación de tóxicos naturales.

La restauración ambiental tiene como propósito eliminar, reducir o controlar los riesgos para la salud humana y para el ambiente en sitios contaminados.

El proceso de restauración ambiental para proteger la salud humana debe de reducir la concentración de los contaminantes por debajo de los niveles normativos, a costos aceptables y la solución debe ser permanente.

### **1.3 Prevención de la contaminación.**

La evaluación de riesgos también se usa para diseñar estrategias de prevención de riesgos para la salud humana. En este caso se determina la cantidad permisible de contaminantes y los medios ambientales que entran en contacto con las poblaciones y, mediante el uso de modelos de transporte se estima cuáles son las concentraciones de los tóxicos que serían permisibles en el punto de emisión. Con esta información, se establecen las metas de concentraciones de tóxicos en la fuente, que no se deben de exceder, para que la población posiblemente receptora no esté

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

expuesta a un peligro intolerable. Este dato es una restricción a considerar en el diseño del proceso.

Cuando se está trabajando en el diseño de procesos o de productos no se ha presentado todavía el problema de la contaminación misma y es necesario simularla. Se necesita predecir la toxicidad y el comportamiento de los desechos en el ambiente. Se necesita simular el transporte y destino de las sustancias, estimando cual podría ser la permanencia de los desechos en el ambiente, a que medios podría emigrar y los peligros potenciales que los pudieran contactar. Orientar los esfuerzos hacia evitar la contaminación, por sentido común, más conveniente que esperar a que esta se produzca y entonces tratar de eliminarla.

# Capítulo

# Nº 2

# Contaminación

# Atmosférica

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

La atmósfera está constituida por varias capas de aire. Las de mayor importancia para el estudio del control de la contaminación del aire se llaman **troposfera** y **estratosfera**.

La troposfera es la capa delgada de aire relativamente denso más cercana a la superficie de la tierra. La troposfera contiene el aire que todos los seres vivos necesitan para respirar.

La estratosfera es la capa protectora de aire que ayuda a absorber y dispersar la energía solar.

Se desconoce la composición del aire no contaminado. Los seres humanos han vivido en el planeta durante miles de años y sus numerosas actividades han influido en la composición del aire antes de que fuese posible medir sus elementos constitutivos. El aire es una mezcla compleja de muchas sustancias. Los principales elementos constitutivos del aire son el nitrógeno, oxígeno y vapor de agua.

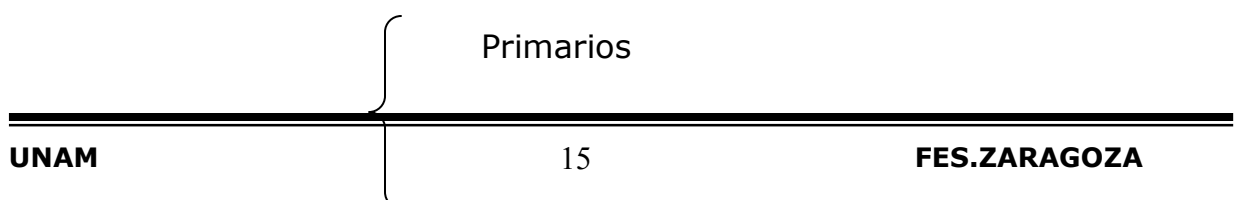
Aproximadamente 78 por ciento del aire es nitrógeno y 21 por ciento oxígeno. El uno por ciento restante incluye pequeñas cantidades de sustancias, como el dióxido de carbono, metano, hidrógeno, argón y helio.

En teoría, el aire siempre ha tenido cierto grado de contaminación. Los fenómenos naturales tales como la erupción de volcanes, tormentas de viento, descomposición de plantas y animales e incluso los aerosoles emitidos por los océanos "contaminan" el aire. Sin embargo, cuando se habla de la contaminación del aire, los contaminantes son aquellos generados por la actividad del hombre (antropogénicos). Se puede considerar como contaminante a la sustancia que produce un efecto perjudicial en el ambiente. Estos efectos pueden alterar tanto la salud como el bienestar de las personas.

Hay cientos de contaminantes en el aire que se presentan en forma de partículas y gases. Las partículas están compuestas por pequeños corpúsculos líquidos o sólidos de polvo, humo, niebla y ceniza volátil. Los gases incluyen sustancias como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles.

### **Contaminantes de aire**

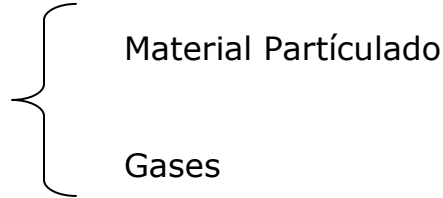
#### **Clasificaciones de los contaminantes:**



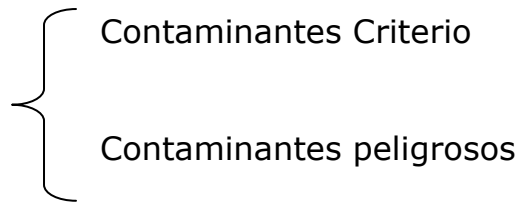
Por su origen

Secundarios

Por su tamaño



Por su regulación



**Contaminantes Primarios:**

Un contaminante primario es aquél que se emite a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química. Para fines de evaluación de la calidad del aire se consideran: óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.

**Contaminantes Secundarios:**

Son los que han estado sujetos a cambios químicos, o bien, son el producto de la reacción de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera. Un ejemplo es el ozono que surge de los vapores orgánicos y óxidos de nitrógeno que emite una estación de gasolina o el escape de los automóviles. Los vapores orgánicos reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar y producen el ozono, componente primario del smog fotoquímico.

## **2.1 Contaminantes Criterio**

Son un conjunto de contaminantes empleados para calificar la calidad del aire. Son seleccionados debido a que pueden provocar daños a la salud, materiales y plantas. A partir de ellos se establecen los niveles permisibles conocidos como estándares primarios. Otro conjunto de límites diseñados para prevenir daños ambientales o a la propiedad se llaman estándares secundarios.

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

Estos contaminantes se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. A nivel internacional los contaminantes criterio son:

1. Monóxido de carbono (CO)
2. Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)
3. Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
4. Ozono (O<sub>3</sub>)
5. Plomo(Pb)
6. Material particulado

Inicialmente, en la lista de contaminantes criterio se incluía a los hidrocarburos. Los hidrocarburos, también denominados compuestos orgánicos volátiles (COV), son precursores en la formación de ozono. Aunque generalmente hay reglamentos que controlan los COV, no hay control específico para los COV en el aire. El control adecuado de los COV se refleja en la reducción de la concentración de ozono en el aire.

Para cada contaminante criterio se han establecido guías y normas. Las guías son recomendaciones para los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos.

Las normas establecen las concentraciones máximas permisibles de los contaminantes atmosféricos durante un período definido. Son los valores límite diseñados con un margen de protección ante los riesgos. La finalidad de las normas es proteger la salud humana (normas primarias) y proteger el bienestar del ser humano y los ecosistemas (normas secundarias). La OMS ha publicado guías sobre la calidad del aire y varios países de América Latina han establecido sus propias normas. En México la Secretaría de Salud mediante las normas oficiales mexicanas establece los valores normados para la concentración de estos contaminantes (NOM-020 a 025 de la SSA).

### **2.1.1 Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que en concentraciones altas puede ser letal. En la naturaleza se forma mediante la oxidación del metano, que es un gas común producido por la descomposición de la materia orgánica. La principal fuente antropogénica de monóxido de carbono es la quema incompleta de combustibles como la gasolina.

Para que se complete el proceso de combustión es necesario que haya cantidad adecuada de oxígeno. Cuando éste es insuficiente, se forma el monóxido de carbono y una manera de reducirlo es exigir que los

automóviles sean afinados debidamente para asegurar la mezcla del combustible con el oxígeno. Por esta razón, los reglamentos de inspección de automóviles han sido útiles para controlar el monóxido de carbono.

El monóxido de carbono es especialmente problemático en zonas urbanas con gran número de automóviles. El volumen del tránsito y la meteorología local influyen sobre su concentración en el aire. Los efectos sobre la salud dependen de la concentración y duración de la exposición. El monóxido de carbono en los seres humanos afecta el suministro de oxígeno en el torrente sanguíneo. Normalmente, los glóbulos rojos transportan el oxígeno por todo el cuerpo. Cuando hay monóxido de carbono, éste atrae más a los glóbulos rojos que al oxígeno, lo que da lugar a la escasez de oxígeno en la sangre. El efecto a corto plazo es similar a la sensación de fatiga que se experimenta en altura o cuando se padece de anemia.

La exposición al monóxido de carbono puede agravar las enfermedades del corazón y del pulmón. El peligro es más evidente en nonatos, neonatos, ancianos y en quienes sufren de enfermedades crónicas.

### **Efectos en la salud humana por exposición a monóxido de carbono**

- Disminución en la capacidad de realizar un ejercicio máximo en un corto tiempo en individuos jóvenes saludables
- Disminución en la duración de ejercicio, debido a dolor en el pecho, en pacientes con enfermedades al corazón.
- Disminución del consumo máximo de oxígeno y tiempo para realizar ejercicio, en individuos jóvenes saludables durante ejercicio fuerte.
- Disminución en la percepción visual y auditiva.
- Pérdida de la capacidad sensorial, motora.
- Disminución en el consumo máximo de oxígeno durante el ejercicio fuerte, en individuos jóvenes saludables.
- Dolor de cabeza, decaimiento, mareo, náusea, debilidad.
- Confusión, colapso durante el ejercicio
- Pérdida de conciencia y muerte si la exposición continúa.

### **2.1.2 Ozono (O<sub>3</sub>)**

El **ozono** es considerado como un contaminante criterio y secundario. Se forma mediante una serie compleja de reacciones en la atmósfera. En términos sencillos, se forma mediante la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar.

La concentración de ozono en una determinada localidad depende de muchos factores, incluida la concentración de NO<sub>2</sub> y COV en el área, la intensidad de la luz solar y las condiciones del clima.

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

El ozono es el principal componente del *esmog fotoquímico* o niebla fotoquímica de color marrón rojiza y causa efectos nocivos en seres humanos y plantas. La población de mayor riesgo a la contaminación por ozono son los enfermos y ancianos, así como los neonatos y nonatos. Además, cuando se le compara con los otros contaminantes criterio, es el que más daña a las plantas.



Una estrategia de control para el ozono es reglamentar las fuentes de COV y óxidos de nitrógeno. Las fuentes principales de estos contaminantes son los productos de combustión incompleta que emiten los escapes de los vehículos, la quema de combustibles fósiles y el uso de compuestos de petróleo y solventes orgánicos en procesos industriales y de limpieza. Por ejemplo, el líquido usado en el proceso de lavado en seco es un solvente que es un COV.

El ozono tiene la singularidad de ser beneficioso para los seres humanos y otros seres vivientes. Es un componente necesario de la estratosfera, (capa del aire que protege la troposfera), porque sirve para proteger a la tierra de la nociva radiación ultravioleta del sol. Sin embargo, cuando se encuentra en concentraciones altas en la troposfera o capa inferior de la atmósfera, se le considera un contaminante.

De esta manera, aunque el ozono es nocivo y debe ser controlado en la troposfera, es un protector necesario en la estratosfera. Las nuevas iniciativas de control de la contaminación del aire que se están llevando a cabo, incluidas la reducción progresiva de halocarburos y clorofluorocarbonos, evitan el agotamiento del ozono en la estratosfera.

### **Efectos en la salud humana por exposición a ozono**

- Tos y dolor de cabeza
- Disminución de la función pulmonar en niños y adultos, durante ejercicio fuerte.
- Incremento en la frecuencia respiratoria, disminución de la resistencia de las vías aéreas
- Disminución de la función pulmonar.

### **2.1.3 Óxidos de azufre (SOx)**



## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

Los óxidos de azufre son gases incoloros que se forman al quemar azufre. El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es el contaminante criterio que indica la concentración de óxidos de azufre en el aire. La fuente primaria de óxidos de azufre es la quema de combustibles fósiles, en particular el carbón. Se ha denominado al dióxido de azufre como un contaminante que "pasa a través de" porque la cantidad de dióxido de azufre emitido al aire es casi la misma cantidad presente en el combustible. Por ejemplo, si se queman cien kilos de carbón que contienen siete kilos de azufre, la emisión producida por la quema contendrá aproximadamente 14 kilos de dióxido de azufre, siete kilos de azufre y siete de oxígeno.

El azufre reacciona con el oxígeno en el proceso de combustión para formar dióxido de azufre.

Se ha encontrado que los óxidos de azufre perjudican el sistema respiratorio, especialmente de las personas que sufren de asma y bronquitis crónica. Los efectos de los óxidos de azufre empeoran cuando el dióxido de azufre se combina con partículas o humedad del aire. Esto se conoce como efecto sinérgico porque la combinación de sustancias produce un efecto mayor que la suma individual del efecto de cada sustancia.

Los óxidos de azufre también son responsables de algunos efectos sobre el bienestar. El de mayor preocupación es la contribución de óxidos de azufre a la formación de lluvia ácida que puede perjudicar lagos, la vida acuática, materiales de construcción y la vida silvestre.

### **Efectos en la salud humana por exposición a dióxido de azufre.**

- Posible incremento de los síntomas respiratorios (tos, irritación de la garganta y silbidos en el pecho) en personas con asma.
- Incremento de síntomas respiratorios en personas con asma y posible agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
  
- Incremento significativo de los síntomas respiratorios en personas con asma y agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
- Síntomas respiratorios severos en personas con asma y riesgo serio de agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas
- Cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios en individuos sanos.

### **2.1.4 Partículas**

Inicialmente, con la denominación de partículas totales en suspensión (PTS) se reconoció a una amplia categoría de material particulado como contaminante criterio. Las PTS son las partículas sólidas o líquidas del aire, se incluyen contaminantes primarios como el polvo y hollín y contaminantes secundarios como partículas líquidas producidas por la condensación de vapores. Desde la segunda mitad de la década de los 80's, varios países incluyeron en sus normas a las partículas con menos de 10 micrómetros de diámetro aerodinámico ( $PM_{10}$ ). En la segunda mitad de la década de los 90's, las normas especificaron considerar no sólo a las partículas  $PM_{10}$  sino también a partículas con menos de 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico ( $PM_{2.5}$ ). El motivo de este cambio, es que las partículas más pequeñas son más peligrosas para el hombre porque tienen mayor probabilidad de ingresar a la parte inferior de los pulmones.

En la naturaleza, las partículas se forman por muchos procesos, tales como el viento, polinización de plantas e incendios forestales. Las principales fuentes antropogénicas de partículas pequeñas incluyen la quema de combustibles sólidos como la madera y el carbón, las actividades agrícolas como la fertilización y almacenamiento de granos y la industria de la construcción.

Las partículas pueden tener efectos en la salud y bienestar del hombre. Pueden contribuir a aumentar las enfermedades respiratorias como la bronquitis y exacerbar los efectos de otras enfermedades cardiovasculares. Asimismo, afecta la visibilidad y velocidad de deterioro de muchos materiales hechos por el hombre.

### **Efectos en la salud humana por exposición a material particulado**

- Disminución de la capacidad respiratoria
- Aumento de enfermedades respiratorias en ancianos y niños
- Aumento de mortalidad en adulto mayor y enfermos

### **2.1.5 Óxidos de nitrógeno (NOx)**

Los óxidos de nitrógeno (comúnmente referidos como NOx) son un grupo de gases conformado por el nitrógeno y oxígeno. El nitrógeno es el elemento más común del aire y representa 78 por ciento del aire que respiramos. Los óxidos de nitrógeno incluyen compuestos como óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). El término NOx se refiere a la combinación de estas dos sustancias.

Los procesos naturales y los realizados por el hombre producen óxidos de nitrógeno. En una escala global, la emisión natural de óxido de nitrógeno es casi 15 veces mayor que la realizada por el hombre. Las fuentes más

comunes de óxidos de nitrógeno en la naturaleza son la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos, y la actividad volcánica. Las fuentes principales de emisión antropogénica son los escapes de los vehículos y la quema de combustibles fósiles.

El óxido nítrico es relativamente inofensivo, pero el dióxido de nitrógeno puede causar efectos en la salud y bienestar. En el proceso de combustión, el nitrógeno en el combustible y aire se oxida para formar óxido nítrico y algo de dióxido de nitrógeno. Los óxidos nítricos emitidos en el aire se convierten en dióxido de nitrógeno mediante reacciones fotoquímicas condicionadas por la luz solar.

### **Efectos en la salud humana por exposición a dióxido de nitrógeno**

- Aumento de la hiperreactividad bronquial.

El dióxido de nitrógeno daña el sistema respiratorio porque es capaz de penetrar las regiones más profundas de los pulmones. Asimismo, contribuye a la formación de lluvia ácida.

### **2.1.6 Plomo (Pb)**

El plomo es una sustancia natural que abunda en el ambiente. Debido a sus propiedades físicas que le permiten formarse y moldearse fácilmente, se emplea en muchas aplicaciones.

El plomo se usaba frecuentemente para fabricar tuberías de agua y recipientes para alimentos. También ha sido un ingrediente importante en la fabricación de pinturas y gasolina.

La fuente primaria de contaminación del aire por plomo ha sido el uso de combustibles con plomo en automóviles. Como un aditivo en la gasolina, el plomo desacelera el proceso de combustión en los motores. Debido a que el plomo no se consume en el proceso de combustión, se emite como partícula. Uno de los más grandes éxitos ambientales de los dos últimos decenios ha sido la reducción de plomo en el aire gracias al mayor uso de la gasolina sin plomo y a la reducción del contenido de plomo en combustibles.

El plomo es un contaminante importante del aire porque es tóxico para los humanos, su difícil remoción del cuerpo hace que se acumule en varios órganos y puede dañar el sistema nervioso central. Un gran número de estudios científicos ha documentado los efectos nocivos de la exposición al plomo.

### **Efectos en la salud de los niños por exposición a plomo**

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

- Edad gestacional reducida (exposición prenatal)
- Bajo peso al nacer (exposición prenatal)
- Retardo en crecimiento
- Interferencia en el metabolismo de la vitamina D
- Alteraciones conductuales, déficit en la atención
- Disminución en la conducción nerviosa periférica
- Reducción en la producción de hemoglobina
- Alteraciones en el aprendizaje
- Síntomas gastrointestinales
- Disminución marcada del cociente de inteligencia
- Anemia franca
- Daño cerebral grave
- Retardo mental grave

### **Progreso en el control de los contaminantes criterio**

Los esfuerzos por controlar los contaminantes criterio en los países desarrollados han dado algunos resultados positivos, aunque queda mucho trabajo por realizar. Desde 1970, los niveles de óxidos de azufre, monóxido de carbono y material particulado en el aire se han reducido, mientras que el plomo se ha eliminado casi completamente. Sin embargo, las emisiones de óxidos de nitrógeno han aumentado ligeramente y el problema del *esmog* sigue siendo difícil de resolver.

Aunque se han controlado muchas de las fuentes que producen *esmog*, el gran número de vehículos y fuentes adicionales ha descompensado los logros alcanzados mediante la reducción.

### **2.2 Contaminantes peligrosos del aire (CPA)**

Los contaminantes peligrosos son compuestos cancerígenos y no cancerígenos que pueden causar efectos serios e irreversibles en la salud. Las revisiones de la Ley del Aire Limpio de 1990 de los Estados Unidos enumeraron 189 compuestos como contaminantes peligrosos del aire (CPA), incluidos el tetracloruro de carbono, cloro, formaldehído, óxido de etileno, cadmio y manganeso. La mayoría de los CPA son compuestos orgánicos volátiles.

Las normas para controlar la emisión de estos contaminantes peligrosos están basadas en la salud. En otras palabras, se establecen límites numéricos que protegen la salud del hombre de cualquier efecto adverso. En México aún no existe normatividad para estos compuestos.

## **Sustancias tóxicas**

Las sustancias tóxicas que se encuentran en el aire son contaminantes que causan efectos adversos en la salud. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha centrado la mayoría de sus esfuerzos destinados a controlar dichas sustancias, en los carcinógenos, esto es, en los compuestos que producen cáncer. Además, la EPA se interesa por los efectos no carcinógenos en la salud, como los problemas del sistema neurológico y reproductivo.

Es difícil determinar que tan peligrosas son las sustancias tóxicas en el aire. Se ha comprobado que algunas sustancias tóxicas son carcinógenas en los seres humanos. Sin embargo, la mayoría de ellas han sido identificadas a través de experimentos de laboratorio con animales que reciben dosis muy altas del compuesto estudiado. Las personas casi nunca respiran tales dosis, pero aun así, una exposición más baja puede suponer riesgos. Lo que sí resulta claro es que los vehículos motorizados están tan integrados a nuestra sociedad que prácticamente todos estamos expuestos a sus emisiones.

## **Sustancias tóxicas en el aire provenientes de vehículos y de los combustibles**

Los vehículos motorizados emiten varios contaminantes que la EPA clasifica como carcinógenos humanos conocidos o probables. Por ejemplo, el benceno es un carcinógeno humano conocido, mientras que el formaldehído, el acetaldehído, el 1,3-butadieno y el material particulado del combustible para motores Diesel son carcinógenos humanos probables. Se están realizando diversos estudios para identificar otras sustancias tóxicas en las emisiones de fuentes móviles. La EPA, conjuntamente con varias industrias, está investigando si los aditivos para combustibles que contienen oxígeno, como el metil-terbutil-éter (MTBE), causan algún efecto adverso en la salud. La EPA

también está trabajando con los fabricantes de vehículos y de combustibles para comprobar la presencia de dioxina en las emisiones de los motores. La EPA estima que las fuentes móviles (automóviles, camiones y autobuses) causan casi la mitad de todos los tipos de cáncer atribuidos a la presencia de sustancias tóxicas en el aire exterior. Este cálculo no se basa en casos reales de cáncer sino en modelos que predicen el máximo número de tipos de cáncer que podría esperarse de los niveles actuales de exposición a emisiones de fuentes móviles. Dichos modelos toman en cuenta los estudios de salud disponibles, datos sobre la calidad del aire e información acerca de los tipos de vehículos y combustibles en uso. Las fuentes móviles que no transitan en carreteras, como los tractores y los vehículos para nieve, también emiten sustancias tóxicas al aire.

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

Algunos compuestos tóxicos se encuentran en la gasolina y se emiten al aire cuando esta se evapora o pasa a través del motor como combustible no quemado. El benceno, por ejemplo, es un componente de la gasolina. Los vehículos emiten pequeñas cantidades de benceno en el combustible no quemado o cuando la gasolina se evapora.

Una cantidad significativa de benceno proviene de la combustión incompleta de compuestos de la gasolina, como el tolueno y el xileno, que son químicamente muy similares al benceno. Al igual que el benceno, estos compuestos se encuentran en forma natural en el petróleo y se concentran más cuando este se refina para producir gasolina de alto octanaje.

El formaldehído, el acetaldehído, el material particulado del combustible para motores Diesel y el 1,3-butadieno no están presentes en el combustible, pero son subproductos de la combustión incompleta. El formaldehído y el acetaldehído se forman también mediante un proceso secundario cuando otros contaminantes de fuentes móviles experimentan reacciones químicas en la atmósfera.

Las emisiones de un vehículo dependen en gran medida del combustible que utiliza. Por esa razón, los programas destinados a controlar la contaminación de sustancias tóxicas en el aire se han concentrado en cambiar la composición del combustible y en mejorar la tecnología o el rendimiento del vehículo. Uno de los primeros programas aplicados -y el más exitoso- ha sido la remoción del plomo de la gasolina. La eliminación gradual del plomo empezó a mediados de los años setenta y concluyó el 1 o de enero de 1996 al prohibirse dicha sustancia en la gasolina. Gracias a ello se ha logrado que las fuentes móviles dejen de emitir esta sustancia, que es sumamente tóxica.

### **Entre los cambios más recientes en el sistema de control de emisiones y combustible están los siguientes:**

- **Límites en la volatilidad de la gasolina**

La volatilidad señala cuán fácilmente se evapora un líquido. Como se describió anteriormente, algunas sustancias tóxicas como el benceno se encuentran en la gasolina y se emiten al aire cuando esta se evapora. Durante los últimos años, se han fijado límites de volatilidad para la gasolina a fin de controlar la emisión de vapor con hidrocarburos y sustancias tóxicas (generalmente, las sustancias tóxicas presentes en el aire son hidrocarburos, de manera que los

programas diseñados para reducir estos últimos también disminuyen las sustancias tóxicas en el aire).

- **Gasolina reformulada**

La Ley del Aire Limpio (Clean Air Act) de 1990 exigió que a partir de 1995 se usara la gasolina reformulada en las ciudades más contaminadas. De 1995 a 1999, ese tipo de gasolina debería proporcionar una reducción mínima de 15% de las emisiones de sustancias tóxicas en el aire respecto a la gasolina de 1990, tasa que se incrementaría por lo menos 20% a inicios del año 2000. Ello se lograría principalmente mediante la reducción de la volatilidad y del benceno de la gasolina.

- **Límites para el azufre en el combustible de motores Diesel**

Los reglamentos que limitan la cantidad de azufre en el combustible para motores Diesel entraron en vigor en 1993. Actualmente, este combustible con menor nivel de azufre es importante para reducir las emisiones de material particulado y otras sustancias tóxicas por parte de autobuses y camiones.

- **Mayor restricción en normas y procedimientos de pruebas**

Hasta la fecha, no existen normas específicas para las sustancias tóxicas emitidas al aire por los vehículos motorizados. Sin embargo, la Ley del Aire Limpio de 1990 sí establece normas específicas de emisión para los

hidrocarburos y para el material particulado proveniente del combustible para motores Diesel porque en ambos hay presencia de sustancias tóxicas. A medida que los fabricantes de vehículos desarrollan

tecnologías para cumplir con las normas relativas a los hidrocarburos y al material particulado (por ejemplo, a través de convertidores catalíticos más eficientes), se reducen las sustancias tóxicas en el aire. Además, los requerimientos que impone la Ley para las pruebas de emisiones de monóxido de carbono en temperaturas frías tendrán un efecto indirecto pero significativo en la reducción de emisiones de

sustancias tóxicas durante los primeros momentos del funcionamiento de los vehículos, que son críticos.

- **Control de las emisiones reales de los vehículos en circulación**

Desde la perspectiva del control de la contaminación, lo más importante no son las normas de emisión para vehículos nuevos sino las emisiones reales de aquellos que están en circulación. La Ley del Aire Limpio establece varios programas para asegurar que el control de esas emisiones funcione adecuadamente. Ello implica la realización de inspecciones periódicas de emisiones y sistemas de diagnóstico computarizado para advertir a los conductores y mecánicos que los sistemas de control de emisiones están funcionando mal.

En resumen, los cambios que se han producido en los combustibles y los vehículos durante los últimos 25 años han reducido enormemente las emisiones de sustancias tóxicas provenientes de los vehículos que circulan en las carreteras. Hoy en día, los vehículos nuevos pueden emitir 90% menos sustancias tóxicas por milla que los modelos no reglamentados de 1970, mientras que los nuevos camiones y autobuses están diseñados para emitir menos de la mitad de sustancias tóxicas en el aire que los de 1970. La reducción de emisiones totales de sustancias tóxicas continuará a medida que los vehículos más viejos salgan de circulación y que los nuevos programas reglamentarios entren en vigor. Sin embargo, el número de vehículos en circulación y el total de millas que recorren sigue aumentando. Si en este nuevo milenio no se realizan controles adicionales, dicho crecimiento entorpecerá el progreso alcanzado en la reducción de emisiones de sustancias tóxicas.

La Ley del Aire Limpio de 1990 encarga a la EPA que reglamente específicamente la emisión de sustancias tóxicas de vehículos motorizados mediante normas para combustibles o para vehículos, o para ambos.

La mayor severidad en el control del material particulado y de los hidrocarburos -visible en la mayor restricción en las normas relativas a los tubos de escape, por ejemplo- reducirá de alguna manera las emisiones de sustancias tóxicas en el aire. Un caso interesante es el de California, que



**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

fija límites más estrictos respecto a los hidrocarburos para los vehículos vendidos en su jurisdicción que los requerimientos establecidos por las autoridades federales. Otros estados pueden decidir adoptar normas como estas, que proporcionan beneficios en cuanto a las sustancias tóxicas en el aire. La ampliación de los programas reglamentarios existentes, como el uso más generalizado de la gasolina reformulada o la fijación de requerimientos de mayor cobertura para la inspección de emisiones, también puede ayudar a reducir sustancias tóxicas en el aire. Otra opción consiste en adoptar normas específicas para la emisión de uno o más compuestos tóxicos.

La emisión de sustancias tóxicas en el aire también puede reducirse mediante cambios en la composición de la gasolina y del combustible para motores Diesel, como la reducción del azufre, el benceno u otros compuestos aromáticos.

La alternativa de usar combustibles más limpios, en vez de los derivados del petróleo, representa otra estrategia que puede reducir los compuestos tóxicos en el aire. Entre las opciones están el alcohol, el gas natural, el gas propano y la electricidad, los cuales son intrínsecamente más limpios que la gasolina y el combustible para motores Diesel porque no contienen sustancias tóxicas como el benceno. Además, están constituidos por compuestos químicos más simples, que producen niveles más bajos de subproductos de la combustión compleja, como el 1,3-butadieno.

**Algunos contaminantes tóxicos (venenosos) emitidos por la gasolina incluyen:**

Arsénico	1,3-Butadieno	Cromo
Dioxinas	Formaldehído	Furanos
Plomo	Metil Terciario-butil-eter (MTBE)	Níquel
Estireno	Tolueno	

Sin embargo, el establecimiento de normas de emisión basadas en la salud es un proceso difícil debido a la incertidumbre en la evaluación de los efectos sobre la salud.

Como resultado, Estados Unidos ha fijado normas de emisión basadas en la salud solo para ocho contaminantes:

- Asbesto
- Cloruro de vinilo
- Benceno
- Arsénico
- Berilio
- Mercurio
- Radón
- Radionucleidos diferentes del radón.

### **Asbesto**

Se sabe que el asbesto produce cáncer en el hombre.

Lamentablemente, su resistencia al fuego favoreció su empleo en numerosos materiales, tales como aislantes, pinturas, recubrimiento de freno de automóviles e incluso ropa.

### **Cloruro de vinilo**

El cloruro de vinilo se usa en la producción de plásticos y cloruro de polivinilo (PVC). La exposición al cloruro de vinilo puede dañar el hígado y otros órganos.

### **Benceno**

El benceno es un compuesto cancerígeno usado en agentes desgrasantes, gasolina y solventes. Se han promulgado varias normas para controlar la emisión de benceno, incluidas las normas para la fuga de benceno en equipos, para contenedores de benceno y operaciones de transporte y disposición de desechos de benceno, y para plantas de recuperación de subproductos del coque.

### **Arsénico**

El arsénico es también un agente cancerígeno. Se emplea en la fabricación de vidrio y en la fundición de metales.

Las normas de emisión se establecieron para controlar la emisión de arsénico de las plantas de fabricación de vidrio, fundiciones de metales e instalaciones para la producción de arsénico.

## **Berilio**

El berilio puede causar enfermedades del pulmón y también tiene efectos adversos sobre el hígado, bazo, riñones y glándulas linfáticas. Las fuentes de berilio incluyen las fundiciones de metal, plantas de cerámica e incineradores que queman desechos con berilio.

## **Mercurio**

El mercurio puede tener efectos adversos sobre el cerebro y riñones. Las fuentes de mercurio incluyen la quema de combustibles fósiles, plantas de fabricación de baterías de mercurio y procesos de minería que emplean mercurio.

## **Radón**

El **radón** es un elemento radiactivo natural. También se encuentra en materiales de construcción que contienen sustancias que emiten radón, como el yeso. Se sabe que el radón causa diversas formas de cáncer y es un contaminante importante del aire de interiores. Hasta ahora, se han establecido normas para controlar la emisión de radón en las minas subterráneas de uranio, canteras de yeso fosfórico y relaves de las minas y procesos del uranio.

## **Radionucleidos**

Los radionucleidos son una categoría de materiales radiactivos diferentes del radón. Así como el radón, estos materiales pueden causar cáncer en los seres humanos.

## **Formaldehído.**

Aunque el formaldehído no este considerado como uno de los principales contaminantes tóxicos es un compuesto cancerígeno, el cual es un subproducto al que estamos expuestos diariamente en la Ciudad de México.

Las fuentes de contaminación del formaldehído no se enfocan solamente a las relacionadas por las emisiones antes mencionadas, sino que también estamos expuestas a las siguientes:

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

- El esmog es una de las principales fuentes de exposición a formaldehído.
- Cigarrillos y otros productos de tabaco, cocinas y hornos a gas y chimeneas abiertas al aire son fuentes de exposición a formaldehído.
- Se usa en muchas industrias, en hospitales y laboratorios.
- El formaldehído es liberado como gas en la manufactura de productos de madera.
- La cantidad de formaldehído en alimentos, aunque, es muy pequeña.
- Fuentes domésticas incluyen fibra de vidrio, alfombras, telas que no requieren planchado, productos de papel y ciertos limpiadores caseros.

En el siguiente capítulo se encuentra una descripción de este tóxico a más detalle.

# Capítulo

## Nº3.

# Formaldehído

## (HCHO)

**SINONIMOS DEL FORMALDEHÍDO.**

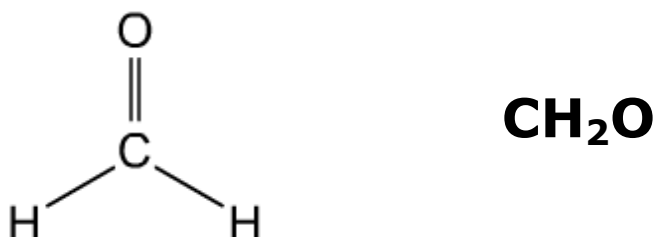
**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

**Nombre común:** Metanal

**Nombre comercial:** Formaldehído anhídrido fórmico, oximetileno, metilaldehído, óxido de metileno, oximetano, formol.

**FORMULA O ESTRUCTURA QUÍMICA:**



Los aldehídos son compuestos orgánicos que contienen el grupo carbonilo, al igual que las cetonas, en los cuales el grupo carbonilo se encuentra en un carbono terminal. Son útiles como intermediarios en síntesis orgánica ya que el grupo carbonilo puede transformarse con facilidad por oxidación o reducción para formar una función ácido o alcohol, respectivamente, o sufrir condensación.

La nomenclatura de los aldehídos se deriva del nombre base de los ácidos relacionados a ellos o utiliza el nombre IUPAC del predecesor acíclico combinado con el sufijo "al".

El formaldehído,  $H_2C=O$ , es el primero de la serie de los aldehídos alifáticos, su peso molecular es de 30.03g/mol. en la actualidad, la capacidad de producción anual en el mundo excede de los 12 millones de toneladas métricas (calculado como solución al 37%). Debido a su costo relativamente bajo, a su alta pureza y a una variedad de reacciones químicas, el formaldehído se ha convertido en una de las sustancias más importantes para la industria y la investigación en el mundo.

El formaldehído se produce y vende en solución acuosa en cantidades variables de metanol. Estas soluciones son mezclas complejas en equilibrio de metilenglicol ( $CH_2(OH)_2$ ), poli (oximetilenglicoles) y hemiformales de estos glicoles. Las soluciones comerciales de formaldehído-alcohol son transparentes y permanecen estables por arriba de los 16° C a los 21°C. se obtienen fácilmente disolviendo formaldehído de alta concentración en el alcohol deseado.

A temperatura ambiente, el formaldehído puro es un gas incoloro de olor picante y sofocante además es un compuesto que probablemente sea cancerígeno, se han hecho estudios en seres humanos, desafortunadamente, dependiendo de la metodología empleada se han

obtenido resultados tanto favorables como verdaderamente funestos, sin embargo estudios con ratones si han demostrado que la mortandad de los animales ha sido verdaderamente drástica y principalmente se ha debido a cáncer en nariz y vías respiratorias.

El formaldehído que realmente nos importa en este trabajo es el que se encuentra en el ambiente y proviene tanto por la combustión de las gasolinas como de su producción en las reacciones fotoquímicas, estas concentraciones causan un problema a nivel ambiental y por lo tanto provoca diversos problemas de salud.

### **3.1 Propiedades Químicas**

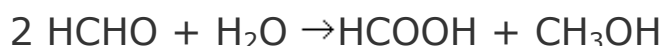
El formaldehído es una molécula muy estable. La descomposición no catalizada es muy lenta por debajo de los 300° C; la extrapolación de los datos cinéticos a 400°C indica que la velocidad de descomposición es de por lo menos 0.44 % a 101 Pa ( 1 atm). Los productos principales son CO e H<sub>2</sub> . los metales como el platino, cobre, oxido de cromo y óxido de aluminio también catalizan la formación de metanol, formato de metilo, ácido fórmico, bióxido de carbono y metano.

A temperatura ambiente, el formaldehído gas es fácilmente soluble en agua, alcoholes y otros disolventes polares. Su calor de solución en agua y en alcoholes alifáticos menores es de alrededor de 63 Kj/mol ( 15 Kcal/mol). La reacción del formaldehído deshidratado con agua es muy rápida; la tasa de velocidad de primer orden a 22 °C es de 9.8 s<sup>-1</sup>.

El formaldehído se reduce con facilidad a metanol por medio de una hidrogenación en presencia de muchos catalizadores metálicos y de óxidos metálicos. Se oxida a ácido fórmico o bióxido de carbono y agua. El formaldehído puede sufrir una condensación aldólica para formar hidroxialdehídos menores, hidroxicetonas y otros hidroxicompuestos.

El formaldehído es sumamente activo y se combina químicamente con casi todos los tipos de compuestos orgánicos, con excepciones de las parafinas. Puede emplearse en forma de monómero anhídrido, solución o polímeros con resultados equivalentes.

Por reducción el formaldehído se convierte en metanol, la oxidación da ácido fórmico o gas carbónico. La reacción de Cannizzaro en solución acuosa da ácido fórmico y metanol en proporciones equimolares:



## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

Esta reacción es acelerada por los álcalis que explica el aumento gradual en la acidez de las soluciones comerciales en almacenamiento prolongado.

El formaldehído reacciona consigo mismo en condensación del tipo de aldol para dar los hidroxialdehídos inferiores, hidroxicetonas y hexosas. Esta reacción es autocatalítica y es favorecida por condiciones alcalinas.

El general, las principales reacciones químicas del formaldehído con otros compuestos implican la formación de derivados del metileno. Las policondensaciones conducen a la formación de resinas de peso molecular elevado en las cuales las moléculas del otro reactivo están enlazadas por los grupos metilenos. Los catalizadores alcalinos favorecen la formación de derivados del metileno mientras que los ácidos suelen favorecer la producción de metileno. Los derivados del metileno son probablemente los productos primarios de la reacción, pero en muchos casos son muy activos y sufren reacciones de condensación para formar derivados metilénicos incluso en condiciones alcalinas.

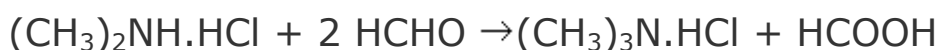
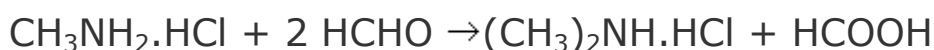
El formaldehído reacciona con los halogenuros de hidrógeno y los alcoholes para dar éteres.

El fenol y muchos sustituidos forman compuestos del metilol (alcoholes fenólicos), que sufren una policondensación para dar resinas de fenol - formaldehído. El grupo metilol entra en las posiciones orto y para sobre el núcleo bencénico; si estas posiciones están bloqueadas no pueden producirse las condensaciones nucleares ordinarias.

El amoníaco y las aminas se condensan fácilmente con el formaldehído para dar derivados de metilenos sencillos o cíclicos, pero las aminas terciarias no reaccionan.

La reacción de Mannich implica la condensación de amoníaco, una amina primaria o una amina secundaria, por lo general en forma de clorohidrato con formaldehído y un compuesto que posee uno o varios átomos activos de hidrógeno.

Cuando se calienta el formaldehído con aminas o sales de amonio en condiciones ácidas, se reducen los productos primarios de metilaminas:





Las amidas dan derivados de metilol relativamente estables en condiciones alcalinas. Las metilureas o ureas por condensación producen resinas de urea-formaldehído. La melamina reacciona de manera análoga a la urea y da derivados de polimetilol y resinas.

Los hidrocarburos no saturados y aromáticos reaccionan con el formaldehído en presencia de ácidos fuertes. La reacción con oleofinas suele dar como resultado la formación de 1,3-glicol o un alcohol no saturado en forma de éster o formal.

Desde 1974, el costo de los productos petroquímicos se ha incrementado rápidamente, de tal manera que ha crecido el interés por los productos de condensación del formaldehído con gases de síntesis ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ), como el etilenglicol.

En la actualidad, todo el formaldehído comercial del mundo se fabrica a partir de metanol y aire, mediante un proceso antiguo que utiliza un catalizador metálico y otro nuevo que usa un catalizador de óxido metálico. En el primero, el reactor se alimenta con la fase rica en metanol de una mezcla inflamable y se obtiene una reacción de oxígeno casi completa, inversamente, la alimentación deficiente o baja de metanol al catalizador de óxido metálico logra una transformación casi completa del metanol.

### **3.2 Propiedades Físicas**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) a $-20^\circ\text{C}$	0.8153
Temperatura de ebullición a 101.3 KPa. $^\circ\text{C}$ .	-19

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

Temperatura de fusión °C	-118
Constantes de Antoine, Pa. A	6.32074
B	970.6
C	244.1
Calor de vaporización. $\Delta H$ a 19°C, KJ/mol	23.3
Calor de formación. $\Delta H_f^\circ$ a 25 °C, KJ/mol	-115.9
Energía libre estándar $\Delta G_f^\circ$ a 01	-109.9
Capacidad calorífica $C_p^\circ$ J/ (mol * K)	35.4
Entropía $S^\circ$ , J/ (mol * K)	218.8
Calor de combustión KJ/mol	561.571
Constantes críticas:	
Temperatura °C	137.2 - 141.2
Presión MPa	6.784 - 6.637
Inflamabilidad en aire	
Limite inferior % molar	7.0
Limite superior % molar	73
Temperatura de autoignición °C	430

### **3.3 Almacenamiento y Manejo**

Las soluciones de formaldehído son inestables. Las concentraciones del ácido fórmico y del paraformaldehído se incrementan con el tiempo y dependen de la temperatura. Los materiales preferidos para la construcción del tanque de almacenamiento son acero inoxidable números 304, 316 y acero al carbón.

## Factores sanitarios y de seguridad para las concentraciones de formaldehído.

FACTORES	VALOR.
Límites de exposición promedio pasado en un tiempo de 8 hrs. Límite superior de exposición	3 ppm. 5 ppm.
Pico máximo por arriba del límite superior	10 ppm en 30 min.
Niveles mínimos de detección sensorial en aire En agua	1 ppm (olor detectable) 20 – 50 mg/l (olor detectable)
Lagrimo abundante.	20 ppm.
Irritación ocular	0.05 – 0.5 ppm.

La EPA recomienda que los adultos no tomen agua que contenga más de 1 miligramo de formaldehído por litro de agua (1 mg/L) para exposición de por vida, y que los niños no tomen agua que contenga más de 10 mg/L por un período de 1 día o 5 mg/L por 10 días.

La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite permisible de 0.75 partes de formaldehído por cada millón de partes de aire (0.75 ppm) durante una jornada diaria de 8 horas o bien durante una jornada semanal de 40 horas.

El Instituto Nacional de Seguridad Ocupacional y Salud (NIOSH) recomienda un límite de exposición de 0.016 ppm. durante una jornada laboral de 8 horas.

Niveles bajos de formaldehído pueden producir irritación a la piel, ojos, nariz y garganta. Gente que sufre de asma es probablemente más susceptible a los efectos de inhalación de formaldehído.

Beber grandes cantidades de formaldehído puede causar profundo dolor, vómitos, coma, y posiblemente la muerte.

### 3.4 Usos del formaldehído

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

El principal uso del formaldehído y sus polímeros es la fabricación de resinas sintéticas.

De estas, las resinas fenólicas son el principal consumidor y le siguen en orden de magnitud las resinas de urea-formaldehído. Otras resinas son las derivadas de la melamina, la anilina, etc. Los plásticos de caseína usados en la fabricación de botones y hebillas, etc., se endurecen con formaldehído acuoso. Se obtienen productos análogos de las proteínas de cacahuete, etc. Las composiciones de corcho con aglutinantes de cola o gelatina insolubilizado con paraformaldehído se emplean como material de empaques y aisladores. Entre las resinas de vinilo modificadas está el formol del alcohol polivinílico, un termoplástico insoluble en agua, producido por la reacción del acetato de polivinilo con formaldehído en presencia de catalizadores ácidos.

En la industria textil, se emplea el formaldehído para mejorar la resistencia a arrugarse y la resistencia a encogerse de los tejidos de rayón por tratamiento en condiciones ácidas. Un tratamiento fuerte de este tipo produce ablandamiento y debe evitarse. Se producen grados elevados de resistencia a arrugarse, con poco reblandecimiento, por tratamiento con condensados de dimetilurea o urea-formaldehído. La exudación de los colorantes se reduce tratando los tejidos teñidos con formaldehído. Se usa mucho formaldehído en la fabricación de hidrosulfito-formaldehído y de sulfoxilatos, que se emplean en el tinte y en el estampado como agentes de agotamiento. Aprovechando la acción insolubilizadora o estabilizadora del formaldehído sobre los filamentos de caseína y de las proteínas derivadas de la soya y del cacahuete, se producen fibras sintéticas.

En la industria papelera, el formaldehído encuentra una aplicación para aumentar la tenacidad bajo la acción de la humedad, la resistencia al agua de los papeles revestidos. La resistencia en estado húmedo y la resistencia a encoger se producen a veces por la reacción directa del formaldehído en presencia de un

catalizador ácido al pasar el tejido por la calandria en caliente. El calentamiento en estado seco es esencial para producir la modificación. Las preparaciones de proteínas como la cola y la caseína, se insolubilizan con formaldehído sobre el papel para proporcionarle resistencia al agua.

Esta misma técnica se emplea para insolubilizar aglutinantes proteínicos en composiciones de revestimiento. También se hace un uso considerable de derivados reactivos como la dimetilourea y la metilomelaminas.

El tratamiento de la madera con formaldehído gaseoso seco en condiciones ácidas proporciona un grado elevado de resistencia al encogimiento, pero la acción del catalizador ácido hace que la madera se vuelva quebradiza.

El cuero y las pieles pueden curtirse por la acción del formaldehído en presencia de sales amortiguadoras, que mantienen una neutralidad aproximada. Se produce cuero blanco lavable por este procedimiento. En la industria peletera, se emplea el formaldehído en las pieles de carnero para obtener las pieles llamadas del tipo de cordero parecidas a las de nutria o

## **Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

castor, que no se rizan al teñirlas. La acción del formaldehído elimina prácticamente el rizado.

La acción del formaldehído sobre las proteínas se utiliza en la industria fotográfica por su acción endurecedora e insolubilizadora sobre las superficies de gelatina de las películas y los papeles sensibilizados. En este campo, es también útil la acción reductora del formaldehído sobre las sales de plata. Las composiciones de formaldehído-bisulfito tienen uso especial en las reveladoras para la fotolitografía.

En la síntesis de derivados, como la hexametenotetramina, el pentaeritritol, la dimetilurea y también de los derivados de hidrosulfito antes mencionados, se emplea gran volumen de formaldehído. Otros derivados son: metilol-melaminas, aceleradores de caucho y el producto de la reacción del formaldehído y el 2-mercaptobenzotiazol. N-fenilglicerina para la fabricación del índigo e innumerables medicamentos, colorantes, compuestos de actividad superficial, insecticidas, etc.

Otro uso industrial para el formaldehído es como intermedio en la fabricación del glicol etilénico. A presiones elevadas (más de 30 atm.), el formaldehído reacciona con el monóxido de carbono y el agua en presencia de catalizadores ácidos para formar ácido hidroxiacético (glicólico). La esterificación de este ácido con metanol y la hidrogenación catalítica del éster conducen al glicol etilénico.

El uso directo del formaldehído como bactericida, desinfectante, fungicida, agente de embalsamamiento, preservativo y desodorante, aunque al principio fueron aplicaciones importantes, sólo consume actualmente un porcentaje pequeño del volumen producido. En agricultura se usa el formaldehído en la desinfección de semillas para prevenir el tizón y el tratamiento de las patatas

para siembra con el fin de evitar roña. El trigo, la avena y la cebada se someten a menudo a un tratamiento con formaldehído.

Debe tenerse cuidado con evitar una explosión excesivamente larga que pudiera perjudicar a la vitalidad de la semilla.

La desinfección de los semilleros con formaldehído líquido impide la podredumbre por el pie de las plantitas.

Se usa también como agente esterilizante en el cultivo de los hongos comestibles. Otro uso agrícola se encuentra en una aplicación patentada para fabricar fertilizante que contiene urea. Por condensación con la urea, el formaldehído reduce la solubilidad de modo que el nitrógeno queda disponible para las plantas más largo tiempo.

Para desinfección puede emplearse el formaldehído en forma gaseosa o en solución diluida (aproximadamente 2%). De los mejores resultados la desinfección gaseosa cuando la humedad del aire es elevada (aproximadamente del 60%). El gas puede producirse calentando

paraformaldehído o vertiendo la solución sobre un agente oxidante, como el permanganato de potasio o el hipoclorito cálcico. La acción bactericida del formaldehído unida a su acción endurecedora sobre las proteínas hace que sea útil como agente de embasamiento.

Es un ingrediente de gran variedad de lípidos de embasamiento, mezclado con sales inorgánicas, alcohol, fenol, etc. El formaldehído se utiliza para conservar el pescado que ha de servir como fertilizante, y en este caso obra también como desodorizante. Soluciones diluidas a las que se mezclan pequeñas cantidades de aceites se emplean para eliminar olores desagradables en los lugares públicos.

El formaldehído es un inhibidor ácido suave y encuentra algún uso como aditivo en la preparación de baños de descapado. Últimamente se ha visto que es un inhibidor eficaz de la corrosión por el ácido sulfhídrico en las instalaciones de los pozos petrolíferos.

### ***3.5 Formaldehído como contaminante Primario y Secundario.***

El formaldehído lo encontramos en la troposfera debido a que en muchos productos que utilizamos en nuestra vida diaria está presente este componente, además que en la combustión incompleta de la gasolina es uno de los materiales que se emiten a la atmósfera, pero además, existe un compuesto Metilo Éter de

Butilo Terciario que se le agrega a las gasolinas para mejorar la calidad del aire reforzando la combustión y reduciendo emisiones de monóxido de carbono y benceno, las sin embargo emisiones de otros contaminantes, como el formaldehído puede aumentar (U.S. EPA 1993c). El potencial de formación de ozono del MTBE se estima más bajo que el de la mayoría de otros componentes no-metanos del aire urbano incluso los alquenos, aldehídos, aromáticos del no-tolueno, y el etano (U.S.EPA 1993a) Según la definición proporcionada en el Registro Federal (1992), MTBE es una sustancia carbono orgánico volátil (VOC). Como VOC, el MTBE reacciona con las emisiones de NOx y en presencia de la luz del sol contribuye a la formación de ozono o lo que algunos llaman el humo el humo fotoquímico. En la ciudad de México se ha observado (García et al 2005)<sup>1</sup> que alrededor del 30% del formaldehído ambiental proviene de fuentes primarias como los son los vehículos y el resto se produce fotoquímicamente.

Efectos en la salud del cuerpo humano del Metil ter butil éter según Informes Médicos.

**Agudo:** Irrita las membranas mucosas y vías respiratorias. Causa náuseas, vomito, diarrea.

**Crónico:** Causa daños en los riñones. La lista de propiedades y efectos toxicológicos no está completa.

Aun se están llevando a cabo estudios médicos para determinar la toxicidad del MTBE, pero se ha llegado a la conclusión de que los metabolitos y componentes de degradación del MTBE es decir TBF, TBA y Formaldehído, son los verdaderos culpables. Existe una lista de los síntomas disponible al público.

## La Degradación atmosférica del MTBE

Expuesto a la luz del sol, MTBE en la presencia de NO<sub>x</sub>, (los Óxidos de Nitrógeno presentes en el aire como componentes del Smog), reacciona con el Hidrógeno y los átomos de Oxígeno de un compuesto radical llamado Hydroxy y forma el Tert-Butyl Formate, el Formaldehído, el Acetato del Metilo, y la Acetona.

## Efectos de Tert-Butyl Formate en el Cuerpo Humano

**Agudo:** Sumamente destructivo para el tejido de las membranas mucosas y vías respiratorias superiores, los ojos y la piel. La inhalación puede ser fatal como

resultado del espasmo, inflamación y edema de la laringe y los bronquios, pulmonía química y edema pulmonar.

**Crónico:** No se han investigado a profundidad las propiedades toxicológicas a largo plazo.

## Los efectos de Formaldehído en el Cuerpo Humano

**Agudo:** Irrita las membranas mucosas, la piel, los ojos, nariz, garganta y vías respiratorias superiores. Puede causar reacciones alérgicas respiratorias o epidérmicas. Provoca tos, dolores en el pecho, problemas respiratorios, edema pulmonar, desórdenes gastrointestinales. Gente que sufre de asma es probablemente más susceptible a los efectos de inhalación de formaldehído.

**Crónico:** Enfermedades del cáncer, y alteraciones genéticas. Ataca los ojos nariz los riñones y vías respiratorias.

## Metabolismo del MTBE en el Cuerpo Humano

Cuando MTBE se introduce en el Cuerpo Humano por inhalación o por absorción a través de la piel, se metaboliza en dos compuestos primarios; el Alcohol de Tert-Butyl, y Formaldehído, ambos clasificados por el EPA como "probables carcinógenos humanos". El Formaldehído es un conocido mutagénico pero estudios médicos recientes demuestran que al Formaldehído no sólo es carcinogénico, pero más que todo suprime el sistema inmunológico permitiendo a las células cancerosas arraigarse y extenderse con poca resistencia y se cree que influye en casos de SIDA químicamente inducidos (Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida).

## Efectos de terbutil alcohol en el Cuerpo Humano

**Agudo:** Dañino o fatal si se ingiere, irrita las membranas mucosas y vias respiratorias superiores, da náuseas, causa vértigo, dolores de cabeza.

**Crónico:** Pueda causar desórdenes en el sistema reproductivo. Ataca el sistema nervioso central.



# **Capítulo**

## **Nº 4**

# **Metodología**

#### **4.1 Metodología para la obtención de los datos.**

Los datos que se analizan en este trabajo se obtuvieron a través de la espectrometría FTIR que utiliza una banda ancha de radiación infrarroja la cual, al atravesar la atmósfera, es parcialmente absorbida al inducir movimientos de vibración y rotación en las moléculas. El patrón de absorción, o "firma espectral", es característico de cada compuesto y depende de sus propiedades físicas y de la estructura de la molécula. Lo que ha hecho de esta técnica una herramienta tan útil es que prácticamente todas las moléculas, poliatómicas y biatómicas heteromoleculares, absorben radiación infrarroja. La mayoría de los compuestos con interés para estudios atmosféricos podrán pues, mediante sus espectros únicos en el infrarrojo, ser identificados y monitoreados con esta técnica siempre y cuando estén arriba del límite de detección específico para cada compuesto.

Otras ventajas del FTIR en esta aplicación es que la medición se realiza a lo largo de una trayectoria larga, usualmente entre 100 y 500m, proporcionando una concentración integrada a lo largo de ésta. Los muestreadores puntuales colectan y analizan la muestra en un punto fijo, mientras que en la medición de trayectoria la muestra es un espacio tridimensional definido por la fuente de radiación y el detector. Por esta razón, una pluma de emisión puede atravesar el haz en cualquier punto y sus componentes podrán ser detectados por el espectrómetro. La medición puntual en la misma situación será más susceptible a efectos locales. El extenso volumen de muestreo del FTIR en trayectoria permite, entonces, localizar y definir una pluma de gases tóxicos dentro de un espacio definido. Además, el FTIR en trayectoria abierta mide in situ y sin llegar a tener contacto con la muestra. Esto disminuye la posibilidad de generar errores causados durante la manipulación de las muestras y la posible contaminación de las mismas en técnicas convencionales de recolección. Finalmente, la característica de medir en tiempo real pone a esta técnica analítica en ventaja en situaciones de alerta, difusión inmediata de niveles de concentración o para el control de procesos industriales.

Las mediciones en trayectoria abierta se realizaron con un espectrómetro FTIR, que se colocó sobre el 4° piso de una escuela secundaria. El instrumento, cuenta con una fuente de infrarrojo cuya radiación es dirigida a un interferómetro. Una vez modulado el haz, este es dirigido mediante óptica de transferencia a un telescopio de aluminio pulido y recubierto de óxido de silicio. El telescopio, con un diámetro de 30 cm. Transmite el haz de forma colimada hacia otro telescopio de las mismas características y cuya función es colectar la radiación dirigiéndola a un detector de HgCdTe (MCT) enfriado a 77°K, el telescopio receptor fue instalado sobre la azotea del hospital Balbuena, logrando de esta manera un paso óptico de 426 m. la distancia entre los telescopios fue determinada por medio de una fotografía georreferenciada, proporcionada por el Instituto de

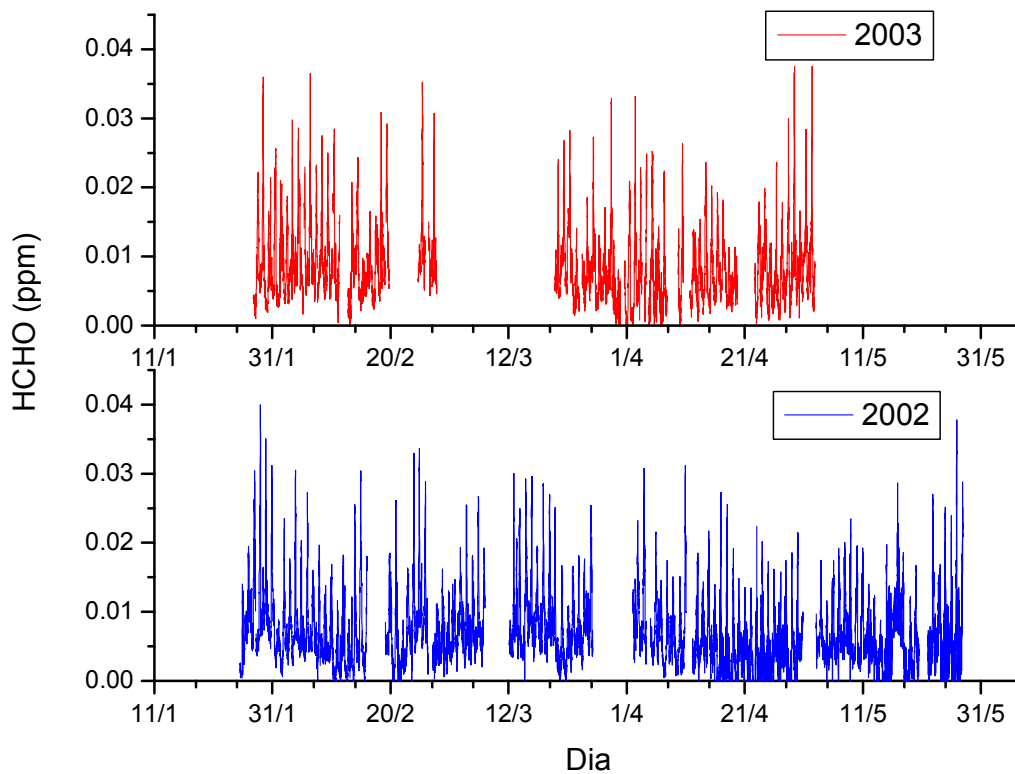
Geografía de la UNAM, la cual cuenta con una resolución de 0.5 m. el haz atraviesa horizontalmente de poniente a oriente a unos 20m. sobre la superficie.

Una vez adquirida la señal por el detector, esta es referida por medio de un cable al sistema de adquisición de datos. Aproximadamente se obtiene un

## Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.

interferograma cada segundo y con motivo de reducir el ruido, se promedian en el orden de 180 interferogramas durante 5 minutos. El sistema entonces desempeña de manera automatizada, una transformada de Fourier rápida (FFT), de donde la técnica obtiene su nombre y con la cual se traduce la señal del dominio de tiempo al dominio de frecuencias. El resultado es un "espectro" de transmisión de esa parcela de aire.

Los datos que se obtuvieron del FTIR se reportaron para cada 5 minutos durante los primeros 5 meses de los años 2002 y 2003 respectivamente, los datos de concentración se encuentran expresados en ppm. Las series de datos utilizadas se presentan en la Figura 4.1 estas no son continuas ya que el equipo se encontraba fuera de operación durante algunos intervalos de tiempo.



**Figura 4.1** Series de tiempo de concentraciones de formaldehído para el 2002 y 2003. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).

Posteriormente se sacaron los promedios de estos datos para compararlos por hora no cada 5 minutos como se obtuvieron inicialmente.

Se separaron los datos por meses, se utilizó una hoja de cálculo que contiene los datos de todas las horas de cada mes y para cada año.

Posteriormente se organizaron los datos de tal forma que en cada hoja de cálculo se tenían todos los datos obtenidos a la hora "X", sin tomar en cuenta en que mes fueron tomados. Esto nos ayudo a identificar las horas en las que la concentración de formaldehído es más alta en la Ciudad de México.

Finalmente y ya que se contaba con los datos organizados por horas se sacaron los promedios y las desviaciones estándar.

Se cambiaron las unidades en que estaban expresados los datos (ppm) a  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para poder hacer los cálculos, ya que algunas constantes que se encontraron en la literatura (Gratt) emplean las concentraciones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## **4.2 Metodologías utilizadas para el análisis de Riesgos.**

### **4.2.1 Probabilidad de cáncer en el tiempo de vida (LCP)**

La probabilidad de cáncer en el tiempo de vida (LCP) por sus siglas en inglés Lifetime Cancer Probability, es el incremento en la probabilidad de un individuo de contraer cáncer debido a la exposición adicional de la sustancia en estudio en este caso al formaldehído (HCHO).

### **4.2.2 Factor de Riesgo Unitario.**

La concentración de una sustancia en el aire, en términos de masa por unidad de volumen, se pueden convertir en la probabilidad de riesgo de cáncer cruda, mediante el uso del factor de conversión llamado "factor de riesgo unitario ( UFR)

El factor de riesgo unitario para el formaldehído, usado en este estudio es el siguiente:

$$\text{URF} = 6 \times 10^{-6} \text{ [LCP / } (\mu\text{g}/\text{m}^3)\text{]}$$

El URF se puede usar para calcular el riesgo a contraer cáncer por inhalación.

El significado de un riesgo de cáncer en el tiempo de vida media mayor que  $10^{-6}$  es materia de juicio. En general, los riesgos a la población mayores a  $1 \times 10^{-6}$  LCP y riesgos en lugares de trabajo mayores a  $1 \times 10^{-4}$  son niveles en que es prudente investigar un poco más. Niveles menores son altamente indicativos de no tener un impacto potencial, debido a la naturaleza conservadora de la revisión del análisis de riesgos a la salud. Riesgos calculados significativamente mayores que los niveles establecidos o de referencia (usualmente asignados por las agencias encargadas o por la

legislación) pueden presentar una preocupación potencial a la salud que justifica una evaluación del riesgo más detallada. Hay muy pocos niveles de referencia que son legislados y/o monitoreados por la ley.

Los niveles de referencia pueden disminuirse con el incremento en deseo por márgenes de seguridad mayores, por lo que la evaluación de riesgos es un proceso, los estimados pueden revisarse y modificarse basándose en una investigación detallada de la emisión, dispersión, exposición y la relación dosis-respuesta.

Los químicos con efectos similares a los órganos de sistema se tratan de forma aditiva. A menudo, con el espíritu conservacionista, todo estimado de cáncer se trata como aditivo. Así, si además del formaldehído se tiene otros compuestos los riesgos de cada uno se sumarian al riesgo total.

#### **4.2.3 Riesgo Individual máximo a cáncer MIRC.**

Es la suma de los riesgos de exceso de la probabilidad de cáncer en el tiempo de vida media para cada sustancia.

El riesgo para cada sustancia se calcula por medio de la multiplicación de la concentración ambiental máxima estimada por el factor de riesgo unitario.

El MIRC se calcula para riesgos que ocurren más allá de la empresa, denominado como  $MIRC_{residente}$

Para los trabajadores, afuera del área el  $MIRC_{empleado}$  se calcula como el 14% del residente.

$$MIRC = R_{HCHO} = X_{HCHO} * URF_{HCHO}$$

#### **4.2.4 HI. Índice de peligrosidad a la salud. (crónico y agudo).**

Los indicadores de efecto a la salud no canceroso en los estudios de riesgo legislado emplean un índice de peligro específico. Esos índices usualmente se comparan a 1.0. Se expresa como un cociente relativo a un nivel de referencia legislado. Arriba de ese nivel de referencia, se requiere de una cuantificación adicional.

Índice de peligrosidad a la salud crónico (  $HI_{CRONICO}$  ):

$$HI = \frac{\chi_{HCHO}}{\chi_{LEGISLADA\_CRÓNICA}}$$

Índice de peligrosidad agudo a la salud (  $HI_{AGUDO}$  )

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

$$HI = \frac{\chi_{HCHO}}{\chi_{LEGISLADA\_AGUDO}}$$

Donde el  $\chi_{HCHO}$  es la concentración de HCHO medida en el ambiente  $\chi_{legislada}$  crónica y  $\chi_{legislada}$  agudo son las concentraciones de referencia a exposiciones crónicas y agudas respectivamente.

**4.2.5 Pérdida de esperanza de vida (Loss of life expectancy LLE)**

Una de las formas de comprender mejor los resultados de los análisis de riesgo es mediante otras formas de medición de riesgo. Existe una medida basada en el tiempo de vida promedio de la población (esperanza de vida). La esperanza de vida ha cambiado dramáticamente durante el siglo XX. Actualmente la esperanza de vida (1990) es de 70 años. Una medición de riesgo se basa en el promedio de disminución de este valor por diferentes acciones o causas que se pueden usar para propósitos de comparación y obtener una idea de las magnitudes relativas de los diferentes riesgos. La pérdida de esperanza de vida (LLE) se puede calcular empleando las tasas de mortalidad (mi) en función de la edad. Así tenemos que una relación empírica para calcularla es:

$$LLE = 1.1 \times 10^6 \times r \text{ (en días) para } r < 10^{-3}/\text{año}$$

La LLE (Pérdida de Esperanza de Vida) para diferentes casos de muertes, desde enfermedades, accidentes y peligros naturales se presentan en la Tabla 4.1.

**Tabla 1 Pérdida de esperanza de vida para diferentes casos**

<b>Fuente</b>	<b>LLE (días)</b>	<b>Fuente</b>	<b>LLE (días)</b>
<b>Enfermedades:</b>			
Tuberculosis	4.7		
Hepatitis viral	3.3		
Cáncer digestivo	269	<b>Accidentes:</b>	
C. Respiratorio	343	Vehículos	207
C. de mama	109	Casa	74

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

Diabetes	82	Trabajo	60
Corazón	2,043	Caídas	28
Úlcera	11.8	Veneno toxinas (animales)	0.4 115
<b>Peligros Naturales:</b>	0.8	Suicidio	93
Tornado	0.9	Homicidio	
Rayo	0.3		
Huracán	0.2		
Temblores			

#### 4.2.6 Exposición a diferentes ambientes.

Las concentraciones ambientales varían en el tiempo y por el lugar, para poder estimar la exposición a cierto contaminante se emplea la siguiente función:

$$E_{ijk} = C_{ij} * t_{jk}$$

La persona K expuesta a la concentración  $C_{ij}$  del químico i, en el microambiente K durante un tiempo  $t_{jk}$ .

La concentración legislada crónica para el formaldehído es la siguiente

$$E_{70añoz} = 3\mu\text{g}/\text{m}^3$$

La exposición a formaldehído para los diferentes micro ambientes se puede calcular de la siguiente forma:

$$E = (C_{\text{trabajo}} * T_{\text{trabajo}}) + (C_{\text{transporte}} * T_{\text{transporte}}) + (C_{\text{otras actividades}} * T_{\text{otras actividades}})$$

Donde  $C_i$  representa la concentración en un sitio en específico  $i$  y  $T_i$  representa el tiempo en que el sujeto de estudio esta en el sitio  $i$ .

La concentración de trabajo considerada es de  $221 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tomada de un estudio en interiores para oficina desarrollado por Baez , la concentración de transporte es de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenida del estudio de riesgo en transporte desarrollado por Naohide Shiohara en 2002

#### **4.2.7 Dosis.**

La dosis de exposición esta definida por la cantidad de sustancia a la que se expone el organismo y el tiempo durante el que estuvo expuesto. Para calcular la dosis a partir de concentraciones ambientales tomamos en cuenta los metros cúbicos promedio que un individuo aspira en un día.



# Capítulo

## Nº 5

# Resultados.

## Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.

---

En la Figura 1 se muestran las concentraciones promedio horarias de formaldehído (HCHO), en la Ciudad de México como se puede observar las concentraciones más bajas del 2003 son mayores que las del año 2002 para las mismas horas (1:00 a 6:00 hrs y de 18:00 a 24:00 hrs) y también se observa un incremento en las concentraciones más altas (10:00 hrs).

Las concentraciones más altas se encuentran a partir de las 7:00 hrs. hasta las 13:00 hrs. del día.

En la calle las concentraciones de fondo superan las concentraciones recomendadas para exposición crónica al formaldehído.



Figura 1. Concentraciones promedio horarias para los años 2002 y 2003.

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

En la Tabla 5.1 se encuentra un comparativo de los resultados obtenidos del análisis de los años 2002 y del 2003 para dos escenarios en los cuales se puede encontrar parte de la población de esta ciudad (en oficinas y en la calle).

Con respecto a los escenarios la exposición es más alta en oficinas que en la calle y con respecto a los años esta aumentó en el año 2003. En los lugares de trabajo se tiene una exposición mayor al formaldehído debido a que no se tiene una ventilación adecuada y a que se tienen infinidad de objetos que contienen y/o liberan formaldehído constantemente. La dosis a la que nos enfrentamos tiene un comportamiento proporcional al de la exposición.

A partir de la evaluación de riesgo se encontró que éste es significativamente más alto estando en oficinas que estando en la calle, además de que se nota un incremento en las concentraciones del año 2003 sobre las concentraciones del 2002 en ambos casos (oficina y calle).

**Tabla N° 5.1 Comparación de exposición, Dosis, Concentración, Riesgo y Perdida de las expectativas de vida.**

	Oficina		Calle	
Año.	2002	2003	2002	2003
Exposición ( $\mu\text{g h/m}^3$ )	25.1E+06	25.8E+06	6.29E+06	7.20E+06
Dosis (g)	20.9	21.5	5.24	6.00E
Concentración( $\mu\text{g/hr}$ )	34.1	35.1	8.6	9.8
Riesgo $\times 10^6$	205	210	51	59
LLE (días)	225	232	56	65

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

En la Figura 2 se muestra el riesgo o la probabilidad de contraer cáncer en el tiempo de vida media a consecuencia de la exposición al formaldehído, expresado en "LCP", se puede observar que los valores para cualquier hora sobrepasan el valor recomendado que es de  $1e-6$  para el caso de concentraciones ambientales y en algunas horas sobrepasa el valor de  $1e-4$  para lugares de trabajo. Observándose que para el 2003 se tienen valores de riesgo mayores que los obtenidos para el 2002.

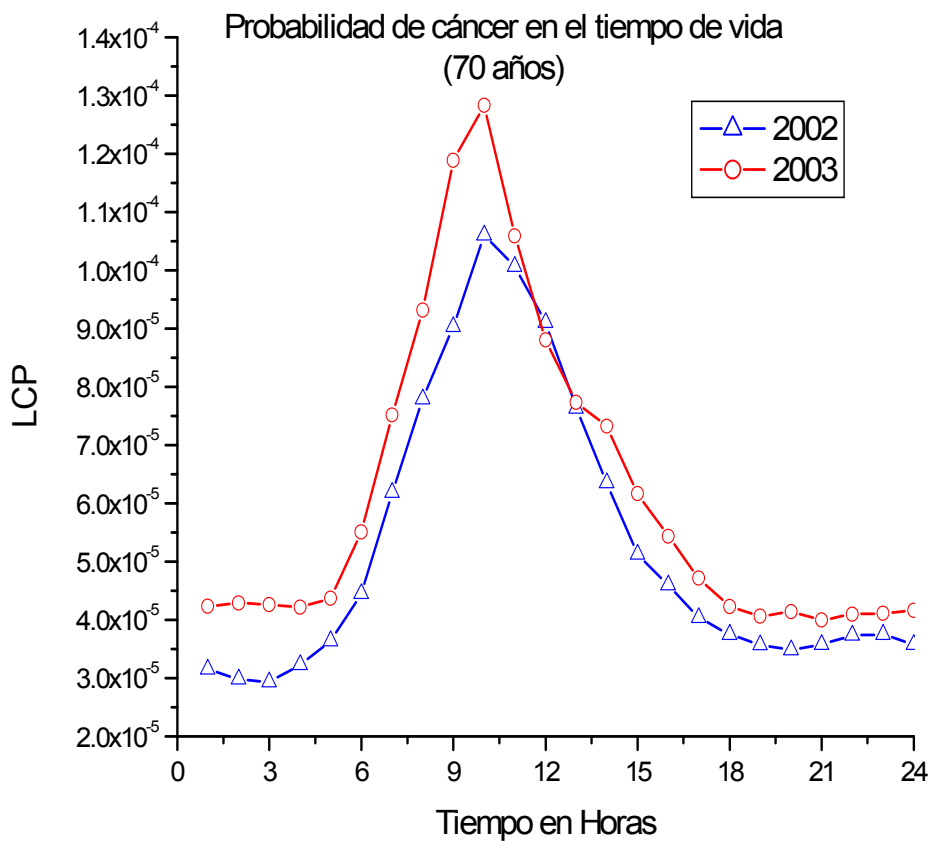


Figura 2. Probabilidad de cáncer en el tiempo de vida distribuido en forma horaria.

### Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos: Formaldehído en la Ciudad de México.

En la figura 3 se encuentra un comparativo de la pérdida de esperanza de vida, a causa de diferentes causas algunas son por enfermedades como la diabetes y el cáncer de mama entre otras, también se encuentran algunas otras causas como los suicidios y por supuesto la exposición al formaldehído en diferentes escenarios.

La pérdida de esperanza de vida a causa de la exposición al formaldehído en la calle es comparable con la que se tiene por accidentes en el trabajo y con diabetes, sin embargo la pérdida de esperanza de vida provocada por la exposición al formaldehído en oficinas es mayor a las antes mencionadas en aproximadamente un 300%.

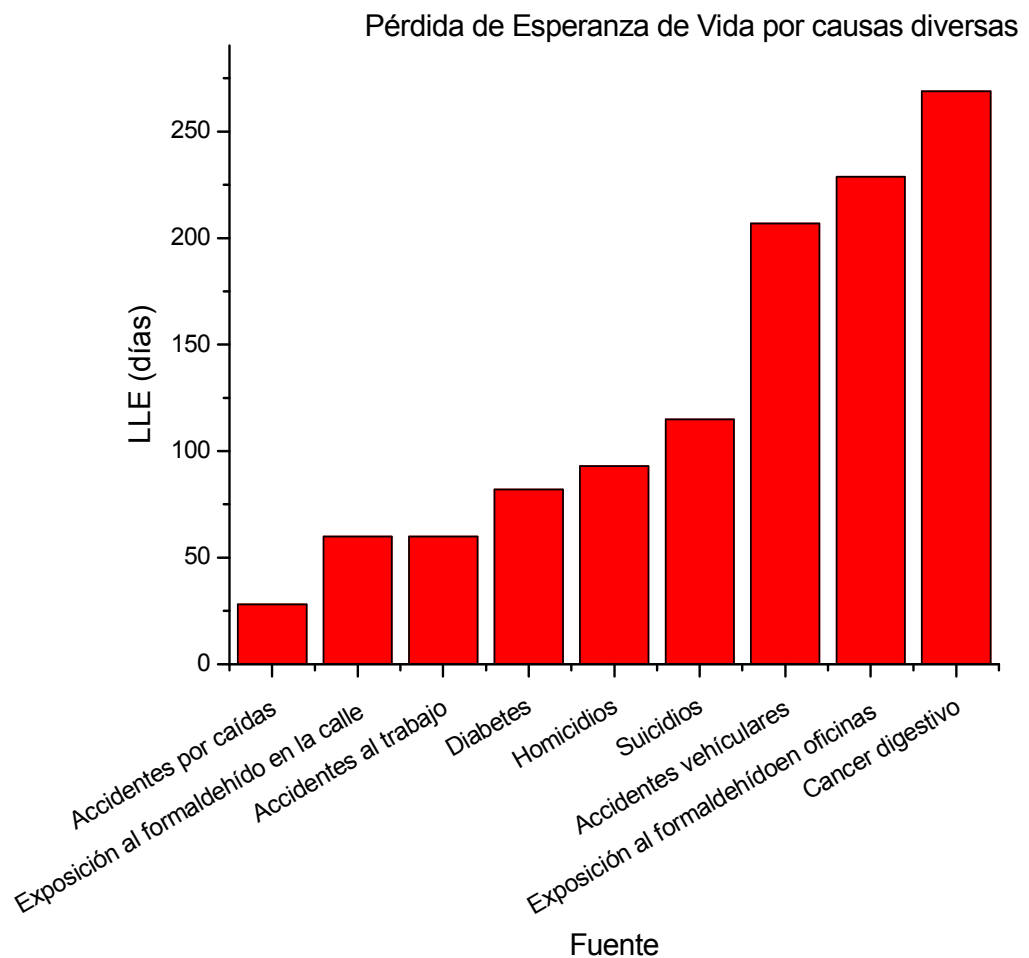


Figura 3 Pérdida de esperanza de vida a causa de diferentes causas

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

En la Tabla 2 se encuentran los índices de peligrosidad por la exposición a este contaminante (HCHO), este valor debe ser menor o igual a 1. Para los índices de peligrosidad agudos no se presentan problemas, sin embargo, para los índices de peligrosidad crónicos los valores son superiores a 1, lo que demuestra que se debe poner mayor atención a este contaminante, ya que los efectos del mismo no se observan en corto plazo pero si para largo plazo.

**Tabla N° 2, Índice de peligrosidad crónico y agudo.**

	2002	2003
Índice peligrosidad crónico	2.923	3.343
Índice peligrosidad agudo	0.093	0.106

# Capítulo 6

# Conclusiones

y

# Recomendaciones.

## **Conclusiones**

Con el presente trabajo se ha mostrado que el formaldehído es un compuesto que se emplea en la elaboración de una gran diversidad de productos que utilizamos a diario y también es un compuesto al que estamos expuestos. Las concentraciones medidas son superiores a las de referencia para exposición crónica tanto en exteriores como en interiores, este contaminante nos puede causar problemas de salud que van desde simples irritaciones en vías respiratorias hasta enfermedades graves como el cáncer y si tomamos en cuenta que nos exponemos a él a todas horas es un contaminante que se debería considerar como contaminante criterio para monitorearlo diariamente, y controlar tanto las emisiones de este contaminante como la de sus precursores.

A partir de los datos con los que se trabajaron que son de los años 2002 y 2003 se nota un incremento en las concentraciones del año 2003 tanto en los máximos como en las concentraciones mínimas esto indica un aumento en la concentración de este contaminante en la ciudad de México.

Las concentraciones medias de formaldehído para el año 2002 es de 8.8 y para el 2003 es de 10.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  las cuales son superiores a las concentraciones de referencia sugeridas para exposición crónica que es de 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la calle las concentraciones de fondo superan las concentraciones recomendadas para exposición crónica al formaldehído

El riesgo al que están expuestas las personas que viven y laboran en la zona de la Merced por concentraciones ambientales es mayor en algunas horas del día al que se sugieren como limite en lugares de trabajo ( $1\text{e-}4$ ), esto es indicativo de que el formaldehído es un contaminante a considerarse en estudios de calidad del aire.

Las horas de menor riesgo son por las tardes y hasta la mañana del siguiente día exactamente de las 18:00 hrs. a las 6:00 hrs.

Las horas de mayor riesgo son por las mañanas desde las 6:00 hrs. hasta las 17:00 hrs. Siendo la de mayor riesgo a las 10:00 hrs.

En el estudio para los dos escenarios de exposición se encontró que los individuos que se encuentran en interiores de oficina poseen un riesgo y una pérdida de esperanza de vida mayor que los que se encuentran en la calle.

El riesgo en oficina por formaldehído se incremento de 205 a 210 casos por millón del 2002 al 2003 y para la calle de 51 a 59 respectivamente.



La pérdida de esperanza de vida mayor se da en el escenario de oficina 2003 con 232 días mientras que la menor se da para calle 2002 con 56 días.

La pérdida de esperanza de vida a causa de la exposición al formaldehído en la calle es comparable con la que se tiene por accidentes en el trabajo y con diabetes, sin embargo la pérdida de esperanza de vida provocada por la exposición al formaldehído en oficinas es mayor a las antes mencionadas en aproximadamente un 300%.

Los índices de riesgo para formaldehído en el caso de exposición crónica es mayor a uno, para el 2002 tiene un valor de 2.9 y para el 2003 de 3.3. Lo que indica que pueden existir afectaciones por este contaminante.

### ***Recomendaciones***

Con la idea de observar su distribución horaria, espacial y las tendencias de este tóxico atmosférico se recomienda realizar mediciones de forma permanente y en diferentes sitios.

A partir de los resultados obtenidos es importante hacer estudios de exposición personal a este compuesto.

Hacer estudios epidemiológicos con este compuesto incluyendo datos de mortalidad, morbilidad e incidencia de enfermedades y síntomas relacionados a este compuesto.

Lo mejor es hacer ejercicio por las noches, debido a que son las horas en que tenemos menores concentraciones de formaldehído en el ambiente, aunque para confirmar esto se tendrían que hacer estudios de otros contaminantes para conocer las exposiciones y sus efectos.

Algunas de las medidas que debemos tomar en cuenta para disminuir las concentraciones a las que estamos expuestos, es tener muy bien ventiladas las áreas de trabajo y hogar para al menos tener un equilibrio con concentraciones que tenemos en la calle, ya que son significativamente menores a las concentraciones en interiores.

## **Bibliografía.**

- Báez, P.A., Torres, Ma C., García, R.M., Padilla H.G., Carbonyls in the Metropolitan area of México City: Calculation of the total photolytic rate constants ( $K_p$ ) S-1) and photolytic lifetime of ambient formaldehyde and acetaldehyde. Environ Sci. & Pollut Res 9 (4) 230-233. 2002.
- Báez, P.A., Torres, Ma C., García, R.M., Padilla H.G.. Measurements of carbonyls in a 13- Store Building. Environ Sci. & Pollut Res 11 (6) 400-4004. 2004.
- Gratt Lawrence B. Air Toxic Risk Assessment and Management. Van Nostrand Reinhold 1996.
- Grutter M., Flores E., Andraca-Ayala G., Baez A. Formaldehyde levels in downtown Mexico City during 2003 ,(2005) Atmospheric Environment, 39 6, Pages 1027-1034.
- McCunney R.J. Asthma, genes, and air pollution ,(2005) Journal of Occupational and Environmental Medicine, 47 12, Pages 1285-1291.
- Naohide S., Fernández-Breamauntz A.A., Blanco J. S., Yanagisawa Y. The commuters exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in México City. Atmospheric Environment. 39 (2005) pag. 3481-3489.
- <http://www.oehha.ca.gov/>  
Approved Acute Reference Exposure Levels and Target Organs. ( tabla 2)
- Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) and the Air Resources Board (ARB) for use in facility health risk assessments conducted for the AB 2588 Air Toxics Hot Spots Program.
- Peña C. E., Carter D.E., Ayala F. F, TOXICOLOGÍA AMBIENTAL "Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental" 2001.

**Evaluación de riesgo de tóxicos atmosféricos:  
Formaldehído en la Ciudad de México.**

---

- Separation of emitted and photochemical formaldehyde in Mexico City using a statistical analysis and a new pair of gas-phase tracers. A. R. García, R. Volkamer,, L. T. Molina, M. J. Molina , J. Samuelson, J. Mellqvist, B. Galle, S. C. Herndon, and C. E. Kolb. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 1–33, 2005  
[www.atmos-chem-phys.org/acpd/5/1/](http://www.atmos-chem-phys.org/acpd/5/1/) SRef-ID: 1680-7375/acpd/2005-5-1  
European Geosciences Union

- SMA <http://www.sma.df.gob.mx/>

NOM-020-SSA1-1993 23/12/1994 Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O<sub>3</sub>). Valor normado para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.

NOM-021-SSA1-1993 23/12/1994 Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono en aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

NOM-022-SSA1-1993 23/12/1994 Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.

NOM-023-SSA1-1993 23/12/1994 Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.

NOM-025-SSA1-1993, 26/09/2005 Salud ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM<sub>10</sub> y partículas menores de 2.5 micrómetros PM<sub>2.5</sub> de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.

- Viskari, E. L., M. Vartiainen, et al., Seasonal and diurnal variation in formaldehyde and acetaldehyde concentrations along a highway in Eastern Finland. Atmos. Environ. 34, 917- 923, 2000