



**DOCUMENTO TÉCNICO SOBRE CRITERIOS A TENER EN CUENTA PARA EL DESARROLLO DE UN  
INVENTARIO DE EMISIONES.**

JUNIO DE 2005

**BORRADOR**

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	2
PREFACIO .....	5
1.0 INTRODUCCIÓN .....	5
2.0 PASOS PARA DESARROLLAR UN INVENTARIO DE EMISIONES .....	6
2.1 Identificar el propósito de un inventario de emisiones. ....	7
2.2 Definir las características necesarias del inventario de emisiones. ....	7
2.3 Determinar las fuentes de datos para el inventario y seleccionar las técnicas y métodos de estimación de las emisiones. ....	8
2.4 Recopilar datos relacionados con las emisiones y datos de actividad. ....	8
2.5 Calcular las estimaciones de emisiones. ....	8
2.6 Aplicar la modelación necesaria. ....	8
2.7 Aseguramiento de la Calidad. ....	8
2.8 Evaluar la racionalidad y la incertidumbre de los resultados del inventario de emisiones. ....	8
2.9 Almacenamiento de la Información. ....	8
2.10 Documentar resultados. ....	8
3.0 PROPÓSITO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES. ....	9
4.0 CARACTERÍSTICAS DE UN INVENTARIO DE EMISIONES. ....	10
4.1 Año Base. ....	10
4.2 Características relacionadas con el tiempo. ....	10
4.3 Características Espaciales. ....	11
4.4 Particularidad del Inventario. ....	11
4.5 Aseguramiento de la Calidad. ....	12
4.6 Manejo de Datos. ....	13
4.7 Proyecciones. ....	13
4.8 Estimación de la Incertidumbre. ....	13
5.0 SELECCIÓN DE CONTAMINANTES PARA UN INVENTARIO. ....	14
5.1 Compuestos Orgánicos Totales / Compuestos Orgánicos volátiles. ....	14
5.2 Monóxido de Carbono. ....	17
5.3 Óxidos de Nitrógeno. ....	17
5.4 Óxidos de Azufre. ....	17
5.5 Partículas. ....	17
5.6 Ozono. ....	18
5.7 Contaminantes que reducen la Visibilidad. ....	19
5.8 Compuestos Tóxicos y Contaminantes Peligrosos del Aire. ....	19
5.9 Gases de Efecto Invernadero (GEI). ....	20
6.0 CATEGORÍAS DE LAS FUENTES DE EMISIÓN. ....	20
6.1 Fuentes Puntuales. ....	21
6.1.1 Delimitación de fuentes puntuales y fuentes de área. ....	21
6.1.2 Nivel de Detalle. ....	22
6.2 Fuentes de Area. ....	22
6.3 Fuentes Móviles. ....	23
6.4 Fuentes Naturales. ....	24
7.0 Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones. ....	24
7.1 introducción. ....	24
7.2 Ecuación fundamental para la estimación de emisiones. ....	25
7.3 Muestreo en la fuente. ....	27
7.3.1 Información General. ....	27
7.4 Factores de Emisión. ....	29
7.4.1 Factores de Emisión Basados en Procesos. ....	29
7.4.2 Factores de Emisión Basados en Encuestas. ....	30
7.4.2.1 Factores de Emisión Por Persona. ....	30
7.4.2.2 Factores de Emisión por Empleado. ....	31
7.5 Balance de Materiales. ....	31
7.6 Extrapolación. ....	34
8.0 CONSIDERACIONES ESPECIALES QUE AFECTAN LAS EMISIONES DE LAS FUENTES FIJAS. ....	36
8.1. Variabilidad por Diseño o Proceso. ....	36
8.1.1. Características de la Combustión. ....	36
8.1.2. Materias Primas. ....	37
8.1.3. Prácticas de Operación. ....	37

8.1.4. Edad del Equipo.....	37
8.1.5. Datos Meteorológicos y Climatológicos.....	38
8.2. Fuentes de Emisión Típicamente Omitidas.....	38
8.2.1. Equipo de Proceso Alimentado con Combustible.....	38
8.2.2. Fuentes de Emisiones Fugitivas.....	38
8.2.3. Equipo de Control.....	39
8.2.4. Uso Misceláneo de Solventes.....	39
8.2.5. Emisiones Vehiculares en Sitio.....	39
8.2.6. Aditivos del Proceso.....	39
8.2.7. Pilas de Almacenamiento.....	39
8.2.8. Manejo de Materiales.....	39
9. ITERACIÓN DEL PROCESO DE INVENTARIO DE EMISIONES.....	39
10. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD.....	40
10.1. Declaración de los Objetivos de Calidad de los Datos.....	41
10.2. Indicadores de Calidad de la Información.....	42
10.3. Procedimientos AC/CC para Métodos Específicos de Estimación de Emisiones.....	42
10.3.1. Pruebas de Fuente.....	42
10.3.1.2. Análisis del Error.....	43
10.3.1.2. Flujo contra Diámetro de la Chimenea.....	44
10.3.1.3. Flujo contra Presión de Velocidad.....	44
10.3.2. Factores de Emisión.....	44
ANEXO.....	47
EJEMPLOS DE LOS CALCULOS PARA LOS MODELOS DE EMISIONES.....	47
Tabla A1.....	48
Tabla A2.....	50

## TABLAS Y FIGURAS

### FIGURAS

Figura 1. Características de un inventario de emisores y emisiones.....	7
Figura 2. Identificación del propósito del inventario.....	10
Figura 3. Distribución Temporal Hipotética de la Actividad de Vehículos Automotores.....	11
Figura 4. Dominio Hipotético de un Inventario y Distribución Espacial de Varios Tipos de Fuentes.....	11
Figura 5. Composición Hipotética de HAPs.....	12
Figura 6. Descripción de las Definiciones de Hidrocarburos.....	16
Figura 7. Partículas primarias y secundarias.....	18
Figura 8. PST, PM10 y PM2.5.....	18
Figura 9. Diferentes Niveles de un Inventario de Fuentes Puntuales.....	22
Figura 10. Procesos de Emisión en Vehículos Automotores.....	24
Figura 11. Jerarquía de las estimaciones de emisiones.....	25
Figura 12. Sistema de muestreo para partículas.....	28
Figura 13. Sistema de monitoreo continuo de emisiones. (MCE).....	29
Figura 14. Factores de emisión basados en procesos.....	29
Figura 15. Ejemplo de balance de materiales.....	32
Figura 16. Ejemplo de balance de materiales resaltando las emisiones fugitivas.....	34
Figura 17. Ejemplos de extrapolación.....	35
Figura 18. Iteraciones de un inventario de emisiones.....	40
Figura 19. Procedimientos de AC/CC para el inventario de fuentes puntuales del INE.....	41

### TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de Emisión para Varias categorías de Fuente de Área.23

Tabla 2. Métodos para Alcanzar los Objetivos de Calidad para los Datos del Inventario de Emisiones.42

Tabla 3. Resumen de los Criterios de Aceptación y Límites de Control para los Métodos de Muestreo Manual  
43

Tabla 4. Sensibilidad de los Resultados de las Pruebas de Emisión a los Errores Hipotéticos en las Mediciones  
Manuales43

## PREFACIO

La contaminación del aire resulta de una compleja mezcla de, literalmente, miles de fuentes, que van desde las chimeneas industriales y los vehículos automotores, hasta el uso individual de productos de aseo, limpiadores domésticos y pinturas; incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en el problema. Debido a la compleja naturaleza de la contaminación del aire se requieren planes regionales detallados para identificar las fuentes de emisión, así como el desarrollo de métodos para reducir el impacto sobre la salud ocasionado por la exposición a los contaminantes. Entre algunos ejemplos de las actividades de gestión de la calidad del aire se encuentran:

La aplicación de modelos de calidad del aire.

El examen de las fuentes emisoras de contaminantes para analizar el control de emisiones, cuando así se requiere.

El desarrollo de proyecciones de las emisiones para examinar posibles cambios en la futura calidad del aire.

El análisis de las tendencias de emisión.

El análisis del transporte de las emisiones de una región a otra.

El desarrollo de inventarios de emisión bien fundamentados es un aspecto clave en cada una de estas funciones de gestión de la calidad del aire.

El cálculo de estimaciones de emisión que cumplan con las necesidades de la gestión de la calidad del aire requiere de un desarrollo y refinamiento continuos; los esfuerzos de inventarios "de un solo paso" no son adecuados para el proceso de gestión de la calidad del aire. Para obtener un beneficio de larga duración debe instrumentarse un *programa de inventarios*, de manera que sea posible el desarrollo de estimaciones exactas de las emisiones para todas las regiones geográficas de importancia, que tengan la capacidad de ser refinadas con el paso del tiempo y que puedan aplicarse efectivamente en el proceso de gestión y monitoreo de la calidad del aire.

### 1.0 INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan los conceptos fundamentales que sostienen el desarrollo de los inventarios de emisiones atmosféricas. En general, estos conceptos se aplican a todos los inventarios, desde las estimaciones de emisiones a nivel planta, hasta los inventarios para modelado regional a gran escala. Ellos representan la información básica antecedente que debe establecerse antes de iniciar la verdadera recopilación de datos y las estimaciones de emisiones. Algunos conceptos se usarán en todos los tipos de inventarios, mientras que otros sólo se usarán en ciertos tipos de manera

limitada. Los detalles específicos variarán tanto para los inventarios individuales como para el nivel de inventario total. Sin embargo, estos conceptos fundamentales deben considerarse en cualquier inventario para asegurar que éste se lleve a cabo exitosamente.

El objetivo de un inventario de fuentes de emisión es evaluar en una base individual la fuente grande (como las plantas eléctricas, las fundiciones de acero, y el agua residual municipal) que espera tener el mayor impacto en el ambiente del área del estudio. Otras fuentes mayores de polución consideradas son las estaciones de servicio, lavanderías etc, que colectivamente tiene un impacto apreciable en el ambiente.

Mientras casi todas las actividades industriales causan un poco de contaminación y producen algunos residuos, relativamente pocas industrias (sin el apropiado control de contaminación de aire y el tratamiento de residuos) son responsables del volumen de residuos al aire que se generaron en una área de estudio dada.

La lista se podría utilizar en las fases iniciales del trabajo del inventario como lista de chequeo para identificar las principales operaciones industriales existentes en el área del estudio. La identificación de las industrias que se incluirán en el examen es muy importante y se debe preparar con gran cuidado puesto que forma la base para el resto del trabajo que se terminará.

El cálculo de las cargas liberadas de una fuente dada está basado en el uso de factores de carga apropiados de desecho, que reflejan la experiencia de la interpretación de fuentes similares. Cada factor de carga de desecho, ejemplo: es definido como la carga normalizada liberada del contaminador  $j$  expresado en kilogramo / (la unidad de la actividad) de la fuente particular en la consideración.

Las secciones presentan el análisis para la selección de la "unidad de la actividad más apropiada" para cada clase de fuente. Básicamente, la "unidad de la actividad seleccionada" debe llevar una relación cercana y proporcional a las cargas generadas del agente contaminador; debe también ofrecer conveniencia durante el trabajo de campo (los datos disponibles de la actividad de campo se deben expresar comúnmente en términos de la unidad seleccionada). Las marcas anteriores del factor de carga de residuo ejemplo, independiente del tamaño de la fuente y del nivel de actividad, es expresado en la siguiente forma, en función de varios parámetros:

tipo de la fuente,  
particularidades del proceso o del diseño,

edad de la fuente y sofisticación tecnológica,  
mantenimiento de la fuente y prácticas de funcionamiento,  
tipo y calidad de la materia prima usada,  
tipo, diseño y edad de los sistemas de control empleados,  
tipo / diseño de los sistemas de control empleados en otros medios,  
condiciones del ambiente,  
otros factores necesarios a considerar.

Una pregunta importante, que se presenta a menudo durante estudios de inventario en la fuente, es cuando uno debe recoger datos de campo y computar las cargas emitidas para cada fuente, y cuando una se justifica para un grupo de fuentes similares. La respuesta es obvia para las relativamente pocas fuentes grandes (ejemplo: una planta de energía eléctrica), para la cual los cálculos sobre una base individual se requieren, así como para los grupos de fuentes pequeñas de tipo similar y con los controles similares (ejemplo: hornos de calefacción de espacio), para los cuales los cálculos comunes son necesarios. En el último caso se computa la actividad total combinada (ejemplo: el aceite de calefacción total consumido por los hornos de calefacción de espacio en 1000 ton/año) se incorpora en las tablas de trabajo y los totales de las cargas de residuos producidas en común de todas las fuentes.

Entre las fuentes individuales muy grandes y los grupos de fuentes numerosas pero muy pequeñas, hay un área gris, para la cual la decisión sobre cómo proceder se debe basar en el juicio cuidadoso de cómo puede afectar perceptiblemente, la cantidad de trabajo implicada y la exactitud de los resultados. Como regla general, cuando las fuentes pequeñas-medias de tamaño existen dentro de un área o subzona del estudio, se debe intentar primero clasificarlas en uno o más grupos, para aplicar primero los factores de descarga y después calcular sus descargas combinadas. Esto tiene algunas ventajas, los datos sobre la actividad global combinada están a menudo fácilmente disponibles de las fuentes gubernamentales y las asociaciones industriales, etc. y estos son fiables. Es más, el procedimiento de valoración completo se simplifica grandemente y se obtiene un cuadro global más claro. La clasificación sin embargo de las fuentes pequeñas en los grupos de tipo similar, y sobre todo la distribución de la actividad global conocida entre los grupos, no siempre es verdadera debido a la poca información pertinente.

Hay sin embargo, ciertas limitaciones asociadas al uso de los factores, que deben ser consideradas:

Para cualquier actividad dada, factores residuales de la carga varían de fuente a fuente, y esta variación es a veces muy significativa. Tales variaciones son a menudo los resultados de

diversas prácticas de funcionamiento, pero pueden también reflejar diferencias en el diseño y la disposición del equipo. Los factores proporcionados se seleccionan para representar tanto como sea posible condiciones, medias o típicas. Consecuentemente se puede esperar que las predicciones residuales de la carga sobre cualquier base individual de la fuente pueden diferenciarse de vez en cuando perceptiblemente de las cargas residuales reales generadas. Las predicciones totales para varias plantas similares, ejemplo las cargas totales de la contaminación en los efluentes de muchas curtiembres que funcionan en un área dada deben sin embargo, ser razonablemente exactas.

La exactitud de los factores proporcionados no es uniforme pues depende de la naturaleza de la fuente, en el agente contaminador que genera mecanismos, y en el grado de la caracterización y de la medida de estudios hechos. Por ejemplo, los factores de emisión del SO<sub>2</sub> de fuentes externas e internas se pueden considerar muy exactos puesto que se relacionan estequiométricamente con el contenido del azufre del combustible. Ningún otro factor de emisión para las fuentes de la combustión lleva tal relación, por lo menos no definido o con parámetros conocidos (contenido del sulfuro) y es así menos exacto. Además, algunas de ellas, se basan en relativamente pocas medidas y exhiben una variación más amplia.

Una pregunta que se presenta a menudo es en cuanto a la validez de factores a través de diversos países, especialmente éstos derivados en países industrializados cuando está aplicada a los países en vías de desarrollo. Por ejemplo, debido a diferencias en la inspección y el mantenimiento de la fuente, o debido a diferencias en el tamaño de una planta "típica", factores más altos podrían ser justificados. Sin embargo, el uso extenso del procedimiento rápido de evaluación (WHO, 1982), por una década en muchas partes del mundo, ha demostrado que esto no es un problema significativo.

La conclusión general es hasta ahora que el uso de los procedimientos rápidos de evaluación generalmente se espera para producir la exactitud aceptable para los propósitos provistos por la toma de decisiones. La exactitud podría ser dada en casos donde está disponible la información sobre factores locales y las evaluaciones se deben derivar de éstos siempre que sean posibles. Se espera que tales refinamientos, junto con el aumento en el número del personal experimentado, mejoren resultados y alternadamente, la calidad del manejo ambiental.

## **2.0 PASOS PARA DESARROLLAR UN INVENTARIO DE EMISIONES**

En la Figura 1, se presentan los pasos técnicos que se siguen durante el desarrollo de un inventario de emisiones. Seguidamente se describen brevemente cada uno de estos pasos.

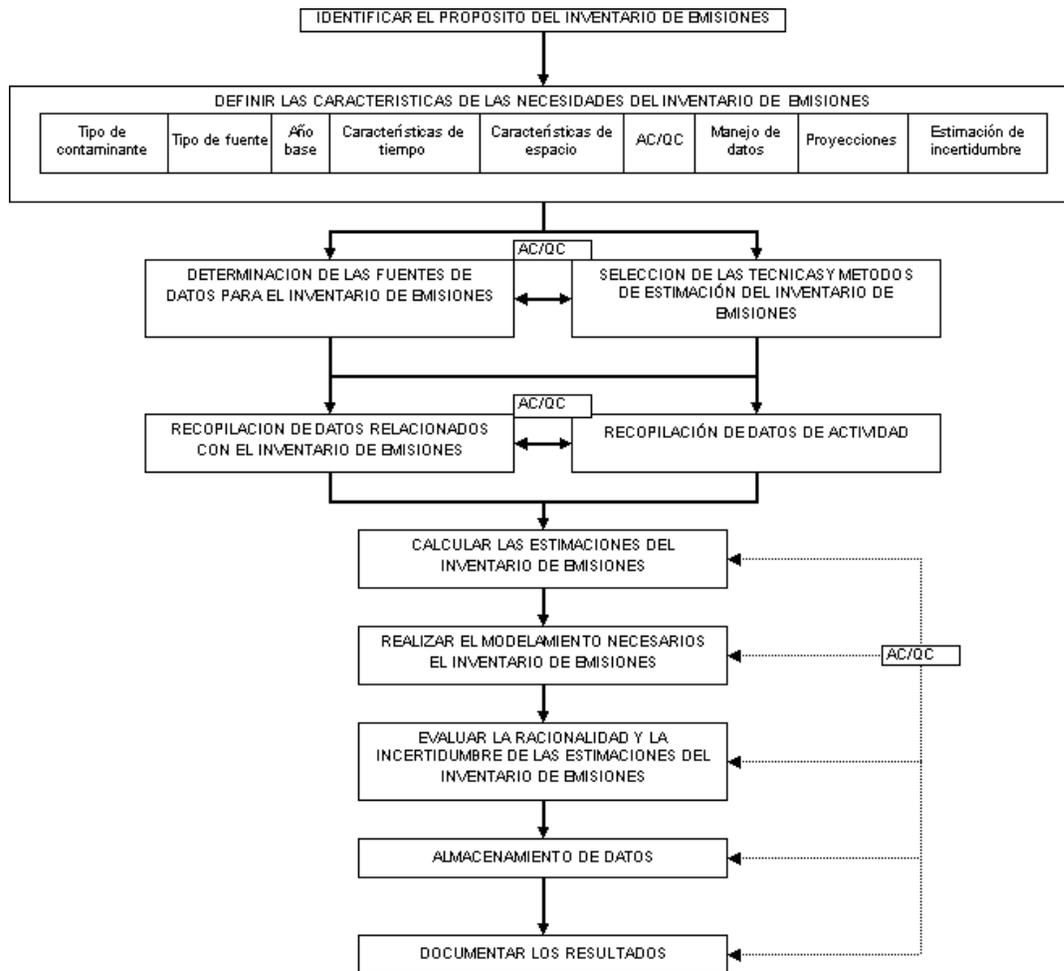
### 2.1 Identificar el propósito de un inventario de emisiones.

Como primer paso técnico en el desarrollo de un inventario resulta fundamental el identificar su propósito o uso final. El propósito global ayudará a determinar muchos de los pasos siguientes. Si el propósito no se identifica con claridad es posible que el inventario terminado no cumpla con las necesidades requeridas. Por ejemplo, los datos necesarios para desarrollar un inventario para modelado son significativamente diferentes de aquellos para otros tipos de inventarios. También deben considerarse los usos futuros del inventario así como su empleo a una mayor escala geográfica.

### 2.2 Definir las características necesarias del inventario de emisiones.

Cada inventario de emisiones tiene varias características que describen su naturaleza fundamental (tipos de contaminantes, tipos de fuentes, año base, etc.). En la Figura 1 se presentan diez características separadas de un inventario. Algunos inventarios pueden requerir el desarrollo de actividades para sólo algunas de estas características, mientras que otros pueden necesitarlas todas. La mayor parte de estas características serán determinadas por el propósito del inventario (Ejemplo: un inventario de ozono deberá incluir a los COT, el CO y los NOx como contaminantes a ser inventariados). Por lo tanto será necesario tomar decisiones para definir cada una de las características del inventario.

Figura 1. Características de un inventario de emisores y emisiones.<sup>1</sup>



<sup>1</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

### **2.3 Determinar las fuentes de datos para el inventario y seleccionar las técnicas y métodos de estimación de las emisiones.**

Una vez que se han establecido las características que se requieren es necesario determinar las fuentes de datos relacionados con las emisiones, así como seleccionar las técnicas y métodos más adecuados para estimar éstas. Por lo general estos dos pasos están interrelacionados. En algunos casos, la disponibilidad de los datos determinará qué métodos de estimación son factibles. En otros casos, una cierta técnica que se desee usar determinará el tipo de datos que deben recopilarse.

### **2.4 Recopilar datos relacionados con las emisiones y datos de actividad.**

Después de identificar las fuentes de emisiones atmosféricas y las metodologías de estimación de emisiones, se deben recopilar los datos relevantes. Los datos relacionados con las emisiones incluyen factores de emisión, datos de muestreos en la fuente y parámetros de los modelos de factores de emisión. Es posible que algunos de los datos relacionados con las emisiones ya existan mientras que otros necesiten desarrollarse para usarlos en un inventario específico. Por lo general los datos de la actividad incluyen información sobre las horas de operación del proceso productivo, el consumo de combustibles y otras medidas de la actividad de los procesos para fuentes identificadas.

Debido a que tanto los datos relacionados con las emisiones atmosféricas como los datos de la actividad industrial son necesarios para estimar las emisiones, con frecuencia estos dos pasos se ejecutan de manera simultánea.

### **2.5 Calcular las estimaciones de emisiones.**

Una vez que se han recopilado todos los datos necesarios se efectúan los cálculos de emisión específicos. Estos cálculos se realizan conforme a la técnica o metodología de estimación de emisiones seleccionada. Por lo general estos cálculos de emisión se llevan a cabo mediante hojas electrónicas, en particular para los inventarios de emisiones en complejos industriales. La eficacia de la regla cuantifica la habilidad de un programa de control ambiental para lograr las reducciones requeridas en las emisiones atmosféricas, mientras que la penetración de la regla mide el grado en el que una normatividad ambiental cubre las emisiones de todas las fuentes dentro de una cierta categoría.

### **2.6 Aplicar la modelación necesaria.**

Después de que se han calculado las emisiones, de ser necesario se aplica la modelación del inventario. Esta modelación puede incluir la distribución espacial y temporal, la resolución de las especies y las proyecciones de las emisiones.

### **2.7 Aseguramiento de la Calidad.**

El aseguramiento de la calidad (AC) no se incluye en un cuadro específico en la Figura 1 debido a que es un elemento integral de todo el proceso de desarrollo de inventarios de emisiones. El aseguramiento de la calidad debe hacerse a lo largo de todo este proceso. En particular, se debe empezar con la recopilación de la información relacionada con las emisiones atmosféricas y con los datos del proceso industrial, continuar durante los cálculos de emisiones y durante el proceso completo de modelado. Este concepto se indica con múltiples "marcas de AC" en la Figura 1.

### **2.8 Evaluar la racionalidad y la incertidumbre de los resultados del inventario de emisiones.**

Después de que se ha terminado el inventario de emisores y emisiones es necesario examinarlo y evaluar la racionalidad y la incertidumbre de los resultados. En este punto, las comparaciones con las expectativas, con la experiencia previa y con los inventarios similares que se hayan hecho con anterioridad para otras regiones geográficas, pueden ser valiosas. Asimismo, al examinar la incertidumbre del inventario se revelarán sus áreas de fortaleza así como aquellas que pudieran ser el punto focal de futuras mejoras.

### **2.9 Almacenamiento de la Información.**

Uno de los pasos finales del desarrollo de un inventario de emisiones es el almacenamiento electrónico del inventario y de los datos relacionados. Se debe mantener la integridad del inventario de emisiones como la base para el desarrollo de inventarios en el futuro.

### **2.10 Documentar resultados.**

El último paso del desarrollo de un inventario de emisiones es la documentación de resultados. Además de los resultados reales del inventario la documentación también debe incluir las metodologías, datos y suposiciones que se usaron en el proceso de desarrollo. En general, se debe proporcionar información suficiente para permitir que otras partes interesadas reproduzcan y analicen los resultados. La documentación del inventario sirve como una referencia importante para los futuros inventarios.

### 3.0 PROPÓSITO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES

Como se muestra en la Figura 1 el primer paso técnico en el desarrollo de un inventario de emisiones es la identificación de su propósito. Este es crucial para el éxito de su desarrollo y es importante que no se pase por alto en la prisa por iniciar las actividades. A la larga, la naturaleza general de un inventario de emisiones así como la mayor parte de sus características son determinadas por su propósito. En muchos casos se calculará un inventario para satisfacer dos o tres propósitos principales.

El propósito a lograr con un inventario de emisiones definirá tanto sus características como los pasos subsecuentes para la recopilación de datos y un modelado potencial. Por esta razón es crítico llegar a un acuerdo sobre todos los usos potenciales del inventario. También es importante identificar el propósito del inventario antes de iniciar cualquier actividad importante. De otra manera, es probable que parte del trabajo realizado carezca de valor para el inventario.

Más aun, es fundamental que el propósito de un inventario de emisiones se identifique *explícitamente*. Este propósito es el "principio rector" del inventario y define todos los pasos apropiados que se deben seguir durante el proceso. Una evaluación completa de los propósitos del inventario asegurará que éste se lleve a cabo siguiendo una ruta consistente con los usos que se le pretenden dar.

Los propósitos de un inventario se describen en un documento de planeación que se prepara al principio de los trabajos. A veces este documento se conoce como plan de trabajo o como protocolo de inventario. Además del propósito del inventario el documento de planeación incluye una descripción de las características más relevantes del inventario así como los pasos técnicos propuestos. Este documento constituye una guía para los responsables del cálculo del inventario y les ayuda a asegurar que su desarrollo sea exitoso.

Existen muchos propósitos diferentes para un inventario los que varían dependiendo de las necesidades y las circunstancias específicas. Por ejemplo, el propósito de un inventario para una sola planta manufacturera es muy diferente al propósito de un inventario regional a gran escala con fines de modelado. El inventario para la planta manufacturera puede usarse para determinar el grado de cumplimiento con regulaciones específicas, mientras que el inventario regional para modelado puede hacerse para soportar una evaluación de la calidad del aire debida al impacto de varias fuentes. Algunas de las razones más comunes para desarrollar inventarios incluyen:

Estimar los impactos en la calidad del aire a través de estudios de modelado.

Determinar la aplicabilidad de las licencias Ambientales y los permisos de emisiones.

Determinar el grado de cumplimiento de una fuente con las condiciones de la licencia.

Estimar los cambios en las emisiones de la fuente para las aplicaciones de la licencia.

Determinar las especificaciones técnicas del equipo de control de emisiones.

Rastrear los niveles de emisión en el tiempo.

Identificar las contribuciones de la emisión por categoría de fuente o por fuente específica.

Identificar las oportunidades potenciales de canje de emisiones.

Cumplir con los requerimientos de reporte de emisiones y Cumplir con las regulaciones que requieren el desarrollo de inventarios de emisiones muy completos.

En el largo plazo, todas las razones anteriores para desarrollar inventarios de emisiones contribuirán con el proceso de gestión de la calidad del aire.

Como se muestra en la Figura 2, la identificación del propósito del inventario requiere de la información y la opinión de muchas personas. En primer lugar, la información de los usuarios finales del inventario es crucial. Con frecuencia, el uso final que se desea así como la facilidad de uso son factores significativos que deben considerarse al desarrollar un inventario de emisiones. Más aun, debido a que los inventarios desempeñan un papel fundamental en la planeación de la calidad del aire se debe solicitar información inicial por parte de las Autoridades Ambientales responsables de la calidad del aire y de las políticas relacionadas con ésta. En muchos casos, las necesidades y objetivos de estas autoridades serán la fuerza motora clave que se encuentra detrás de un inventario específico.

Finalmente, la participación de quienes desarrollarán el inventario de emisiones, incluyendo al gobierno, la industria y los contratistas será importante. Estos individuos deben comprender con claridad los propósitos del inventario para que sus resultados cumplan con todas las necesidades. Al final, la síntesis de las ideas de todos los participantes definirá los propósitos del inventario.

Además, el propósito de un inventario de emisiones debe referirse a las necesidades presentes y futuras de la calidad del aire. Se debe hacer un intento para identificar las necesidades futuras de calidad del aire al determinar el alcance del inventario. Algunas veces puede ser difícil proyectar estas necesidades futuras. En otros casos, sin embargo, estas necesidades serán mas claras y con una pequeña ampliación de los recursos se

puede aumentar de manera significativa la utilidad final del inventario.

La determinación de los propósitos de un inventario de emisiones no tiene que requerir un gran esfuerzo. Una cantidad de tiempo y de esfuerzo razonables invertidos al principio del proceso para identificar los usos y establecer el propósito del inventario, ayudará a asegurar el desarrollo de datos y de información útiles. Una vez que los propósitos han sido identificados de manera explícita, es mucho más probable que el inventario resultante satisfaga cada uno de los usos esperados del conjunto de datos.



Figura 2. Identificación del propósito del inventario.<sup>2</sup>

#### 4.0 CARACTERÍSTICAS DE UN INVENTARIO DE EMISIONES

De las diez características que tiene un inventario de emisiones, dos de ellas (tipos de contaminantes y tipos de fuentes) ya han sido comentadas. Las ocho características restantes se determinan sobre todo por el propósito establecido del inventario.

##### 4.1 Año Base

El año base de un inventario identifica el año para el cual se estiman las emisiones y determina la posición del inventario en el tiempo. Esto da una marca fija para comparar los inventarios previos y los subsecuentes. Es importante establecer un año base de manera que todas las estimaciones de emisiones tengan una base común y representen las actividades que ocurren durante el mismo periodo de tiempo.

Se puede usar cualquier año como base de un inventario pero en general, esto lo determina el propósito establecido del inventario. Por ejemplo, si se desea ver los efectos de las estrategias de control instrumentadas recientemente, el año base será algún año previo a la instrumentación de dichas estrategias. Para haber una comparación de

los niveles actuales de emisión con los niveles históricos se puede usar un año base en el pasado. El año base también podría ser determinado por varios requerimientos de la regulación. La razón principal para esto es que los inventarios de emisiones de diferentes regiones se pueden comparar fácilmente entre sí y con las normas legales vigentes.

En otros casos, la disponibilidad de datos puede determinar cual es el año base de un inventario. Por ejemplo, podría desearse hacer un inventario para 1997 pero si las estadísticas que se van a usar como datos de actividad sólo se han recopilado hasta 1995 es probable que 1995 sea un mejor año base que 1997.

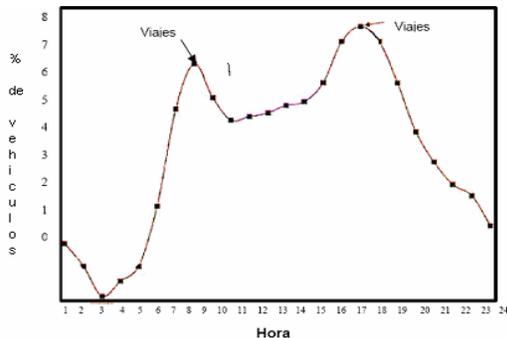
##### 4.2 Características relacionadas con el tiempo

Hay dos características principales relacionadas con el tiempo que deben considerarse para cada inventario: el periodo de tiempo y la variabilidad temporal. Otras características menores pueden ser aplicables para algunos inventarios. El periodo de tiempo se refiere al lapso representado por el inventario. Las emisiones del inventario se presentarán en unidades de masa del contaminante por periodo de tiempo del inventario (kg de CO/año). Para muchos inventarios a gran escala, el periodo de tiempo será, por lo general, de un año. Sin embargo, en algunas aplicaciones especializadas se pueden requerir periodos más cortos (un día, un mes, la estación de ozono del verano, la estación calurosa, etc.).

La variabilidad temporal describe la variabilidad de las emisiones en el tiempo. Si las emisiones son constantes en el tiempo, esta variabilidad no es de gran interés. Sin embargo, la mayor parte de las emisiones cambian con el tiempo. Dependiendo de los requerimientos del inventario asociados con su propósito puede ser necesario describir las variaciones de las emisiones en base estacional, mensual o diaria. Incluso, algunos inventarios especializados pueden requerir emisiones en base horaria (o en periodos más cortos). Por ejemplo, las emisiones de los vehículos automotores que circulan por carreteras varían en diferentes periodos de tiempo debido a los diferentes niveles de actividad. Las emisiones vehiculares entre semana pueden ser mayores que en fines de semana debido a los elevados niveles de actividad vehicular asociados con el traslado hacia y desde el trabajo. Asimismo, como se muestra en la Figura 3, es probable que las emisiones en la mañana y en las primeras horas de la tarde sean más altas que las emisiones al mediodía o a la medianoche, debido a las horas pico caracterizadas por el gran número de viajes. n elevado tráfico de traslado. Debido a que la distribución temporal de la actividad vehicular presentada en la Figura 3 es específica para los

<sup>2</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

EU, la actividad en Colombia puede distribuirse de manera diferente. Dependiendo del propósito del inventario puede ser necesario considerar una o más de estas variabilidades temporales.



**Figura 3. Distribución Temporal Hipotética de la Actividad de Vehículos Automotores.**<sup>3</sup>

### 4.3 Características Espaciales

En cualquier inventario hay dos características espaciales principales: el dominio del inventario y la resolución espacial. El dominio del inventario representa el área para la cual se van a inventariar las fuentes de contaminantes del aire. A veces este dominio se determina por el propósito del inventario. Con frecuencia, el dominio del inventario corresponde a las fronteras políticas, geográficas o las de las autoridades ambientales responsables de la calidad del aire. Dependiendo de la aplicación del inventario, puede ser necesario tratar aquellas fuentes externas al dominio definido del inventario que, debido al transporte meteorológico, tengan influencia sobre la calidad del aire al interior del dominio. En la Figura 4 se presenta un dominio hipotético cuadrado que mide 25 km por lado.

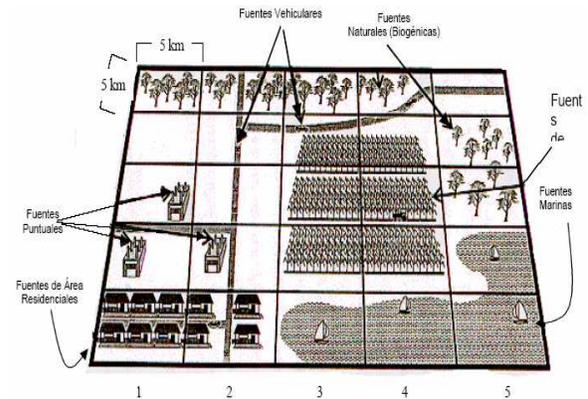
La resolución espacial indica con que especificidad debe definirse la localización geográfica de las fuentes de contaminación. A veces los inventarios básicos dan solamente los totales de contaminantes para todo el dominio del inventario. Los inventarios más complejos, en particular aquellos asociados con modelado de la calidad del aire, requieren con frecuencia una descripción más detallada de la distribución de las emisiones.

En general la resolución de las fuentes de área, naturales y vehiculares dentro del dominio de un inventario se hace usando las celdas de una cuadrícula. El dominio de inventario que se presenta en la Figura 4 contiene 25 celdas de 5 km por lado. A menudo la exactitud deseada para la calidad del aire determina el tamaño de la celda. Sin embargo, en general, el tamaño de celda requerido también está relacionado con el tamaño

del dominio. Los dominios grandes tienen celdas que por lo general miden varios kilómetros por lado, mientras que los dominios de inventario más pequeños pueden tener celdas de sólo unos cuantos cientos de metros por lado. En la Figura 4 se puede ver la siguiente distribución espacial de emisiones:

- Fuentes de Área de Población y Residenciales: Celdas A1 y A2.
- Fuentes de Área Agrícolas: Celdas B3, B4, C3, C4, D3 y D4.
- Fuentes Marinas: Celdas A3, A4, A5 y B5.
- Vehículos Automotores: Celdas A1, A2, B1, B2, C2, D2, D3, D4, E2, E4 y E5.
- Fuentes Naturales Biogénicas: Celdas C5, D5, E1, E2, E3 y E4.

Para la mayor parte de tipos de inventarios, las fuentes puntuales necesitarán localizarse geográficamente ya sea usando coordenadas de longitud y latitud o coordenadas del Mercator Transverso Universal (UTM, por sus siglas en inglés). Para algunos inventarios complejos, la exactitud geográfica requerida para la ubicación de las fuentes puntuales puede ser de hasta  $\pm 10$  metros. En la Figura 4 las tres fuentes puntuales ubicadas en las celdas B1, C1 y C2 requerirán coordenadas de localización detalladas.



**Figura 4. Dominio Hipotético de un Inventario y Distribución Espacial de Varios Tipos de Fuentes.**<sup>4</sup>

### 4.4 Particularidad del Inventario

La resolución de especies se refiere a la división de un contaminante del inventario (e.g., COT, partículas, etc.) en sus componentes químicos individuales [e. g., tolueno, plomo, carbono elemental (CE), carbono orgánico (C org.), etc.] o en grupos específicos (e. g., parafinas, compuestos aromáticos, etc.). La necesidad de una resolución de especies, así como la metodología específica, están determinadas por el propósito del inventario.

<sup>3</sup> LLC. Manuales del programa de inventarios de emisiones de México, VOL2. diciembre 1997

<sup>4</sup> LLC. Manuales del programa de inventarios de emisiones de México, VOL2. diciembre 1997

La resolución de especies se hace sobre todo usando perfiles de caracterización que describen la fracción de cada especie química individual. Muchos inventarios no incluyen una resolución de especies detallada. Otras aplicaciones especializadas sí las requieren. Estas aplicaciones incluyen los inventarios de compuestos tóxicos del aire, el modelado fotoquímico y el modelado del balance químico de masa usado para la atribución de fuentes.

Los inventarios de compuestos tóxicos del aire buscan cuantificar la cantidad de contaminantes peligrosos del aire (HAPs, por sus siglas en inglés) que se emiten. Lo ideal sería usar factores de emisión para cada HAP individual. Aunque hay algunos factores de emisión de HAPs para fuentes de combustión y algunas otras, por lo general no existen. Como resultado es frecuente separar las especies de HAPs individuales de los COT y las partículas usando perfiles de composición. Este no es el enfoque preferido para estimar las emisiones de HAPs. Si se usa, es frecuente que dé como resultado una sobreestimación de los HAPs. El enfoque se ilustra en la Figura 5.

En el modelado fotoquímico la caracterización es necesaria debido a que las especies de hidrocarburos que se emiten tienen reactividades fotoquímicas diferentes. Las emisiones de hidrocarburos totales se calculan y después se clasifican en diferentes grupos de hidrocarburos. A fin de representar de manera adecuada las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera, a cada grupo de especies se le asigna un nivel apropiado de reactividad fotoquímica.

Por último, la atribución de fuentes (o modelos de receptores) usando un balance químico de masa requiere una resolución de especies bastante detallada. La atribución de fuentes puede determinarse partiendo, al revés, de las concentraciones de COT y de partículas medidas en un sitio de monitoreo usando cálculos computarizados de matrices de álgebra lineal. En este caso, la resolución de especies proporciona el contenido químico único (en general, de metales y de hidrocarburos) de las emisiones de cada tipo de fuente. Este contenido químico sirve como "huella digital" de la presencia de material de esa fuente en los datos de muestras ambientales en el receptor. Sin la resolución de especies, es imposible instrumentar esta aplicación. Se puede encontrar más información sobre la atribución de fuentes en algunos estudios recientes sobre el tema (Watson et al., 1984; Chow et al., 1992; Scheff et al., 1984).

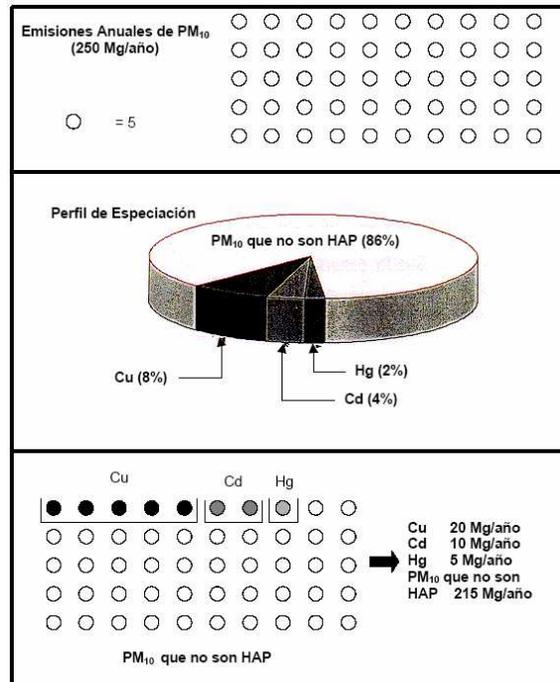


Figura 5. Composición Hipotética de HAPs<sup>5</sup>

#### 4.5 Aseguramiento de la Calidad

El aseguramiento de la calidad (AC) es un elemento indispensable de cualquier inventario de emisiones. Sin importar el tipo de inventario de que se trate se necesita el AC. Sin embargo, la cantidad y enfoque del AC es variable y depende del propósito específico del inventario. Por ejemplo, un inventario detallado para modelado a gran escala por lo general requiere mucho más AC que un inventario de reporte a nivel planta. Además, si un tipo de fuente en particular ya ha sido identificado de manera preliminar como una gran fuente de contaminantes, se podrían dirigir más recursos de AC a este tipo de fuente que a otros que sean menores.

El AC debe llevarse a cabo durante todo el desarrollo del inventario y no como una ocurrencia de última hora. Algunos ejemplos de actividades de AC incluyen:

El uso de una lista de verificación de las categorías de fuente confirma que todas las categorías de fuente necesarias han sido incluidas en el inventario.

Revisar los resultados de los muestreos y los datos de actividad buscando aquellos valores que estén fuera de lugar, antes de calcular las emisiones.

Confirmar que todos los cálculos de emisión se han hecho de manera apropiada y comparar los

<sup>5</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México, VOL2. diciembre 1997

resultados del inventario con los de otros inventarios en regiones similares.

Hay también muchas otras actividades de AC no enlistadas anteriormente que pueden ayudar a garantizar un inventario de emisiones de alta calidad.

Aunque los resultados de un inventario pueden afectar la manera en que se lleve a cabo el AC durante el desarrollo del inventario, los recursos necesarios para el AC deben identificarse desde el principio. En la mayor medida posible, el tipo de AC (e. g., AC detallado línea por línea o AC de alto nivel) y las áreas que requieren mayor concentración de AC deben designarse al comienzo del inventario.

#### **4.6 Manejo de Datos**

Otra característica esencial de un inventario de emisiones es el manejo de datos requerido. Con el uso tan extendido de las computadoras y con el aumento en los requerimientos de datos, en la actualidad virtualmente todos los datos de un inventario se manejan de manera electrónica.

Se debe analizar si el manejo de datos se hace usando una aplicación de tipo hoja de cálculo o una de base de datos. Las primeras tienden a ser más fáciles de usar pero las bases de datos son mucho más poderosas. El método de transferencia de la información relativa al inventario y de cualquier requerimiento de confidencialidad de los datos también debe establecerse al principio del proceso de desarrollo del inventario. El propósito del inventario ayudará a determinar el tipo de manejo de datos requerido. Por ejemplo, un inventario usado alimenta un modelo de calidad del aire que puede requerir un manejo de datos diferente al manejo de datos para un inventario diseñado para el cumplimiento normativo. Por lo demás, los usos esperados para el inventario en el futuro también pueden influir en el tipo de manejo de datos seleccionado.

#### **4.7 Proyecciones**

Las proyecciones predicen un inventario para un año base, hacia delante o hacia atrás en el tiempo. El uso de las proyecciones se determina principalmente por el propósito del inventario. En muchos inventarios no se desarrollan emisiones proyectadas. Las proyecciones se usan sobre todo para rastrear las tendencias pasadas y futuras de las emisiones debido al crecimiento de la actividad y a las estrategias de control instrumentadas. También se usan las proyecciones en los análisis teóricos de diversas estrategias de control propuestas para futura instrumentación. Por ejemplo, las proyecciones podrían usarse para estimar las futuras emisiones de los vehículos automotores con base en el crecimiento esperado

de la población. De manera semejante, las proyecciones se pueden usar para rastrear la reducción estimada en las emisiones debidas a la propuesta de introducción de pinturas reformuladas con menor contenido de solventes. Por lo general, las proyecciones de crecimiento de las emisiones se basan en las proyecciones de crecimiento de otros sustitutos (e. g., población, actividad económica, etc.). Las proyecciones de control, por otro lado, se basan a menudo en las reducciones estimadas por las estrategias de control. Las metodologías de proyección y los datos requeridos deben ser establecidos en las primeras etapas del proceso de desarrollo del inventario. La EPA ha publicado lineamientos relativos a la proyección de emisiones (U.S. EPA, 1991b).

#### **4.8 Estimación de la Incertidumbre**

La característica final de un inventario de emisiones es la estimación de la incertidumbre.

Estas estimaciones constituyen una valiosa herramienta para evaluar la exactitud de un inventario de emisiones. La incertidumbre puede estimarse cuantitativa o cualitativamente. Las estimaciones cuantitativas son poco frecuentes y existen varias razones. En primer lugar, no existe un método acordado para hacer estimaciones cuantitativas de la incertidumbre. Por otra parte, el cálculo de estimaciones cuantitativas de la incertidumbre puede ser un proceso muy complejo desde el punto de vista estadístico. Por último, a menudo se requiere un gran número de suposiciones para hacer estimaciones cuantitativas de la incertidumbre.

En general, cuando se hacen estimaciones de la incertidumbre éstas son de naturaleza más bien cualitativa. Éstas pueden centrarse en las metodologías, en los datos de actividad, en los datos relacionados con las emisiones, en las suposiciones subyacentes o en otros componentes del desarrollo de inventarios. Por ejemplo, la suposición de que las emisiones de las operaciones de recubrimiento de superficies se limitan sólo a los solventes contenidos en el recubrimiento aplicado (sin considerar los solventes de la preparación y/o de la limpieza de la superficie) ciertamente llevará a subestimar las emisiones de COT en el inventario. De manera similar, la suposición de que todas las fuentes puntuales usan el mismo combustible y operan con el mismo calendario va a generar incertidumbre en el inventario, aunque no está claro si ésta resultaría en una sobre o en una subestimación. Aunque en las estimaciones cualitativas no se calcula estadísticamente la incertidumbre de un inventario de emisiones son valiosas debido a que señalan las debilidades potenciales en el inventario.

## 5.0 SELECCIÓN DE CONTAMINANTES PARA UN INVENTARIO

En general, un contaminante del aire puede definirse como cualquier sustancia que al ser liberada en la atmósfera altera la composición natural del aire y puede ocasionar efectos adversos en los seres humanos, los animales, la vegetación o los materiales. Los propósitos que se establezcan para un inventario de emisiones van a determinar los contaminantes que deben ser incluidos. Por ejemplo, un inventario de contaminantes criterio incluiría compuestos orgánicos totales (COT), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) y plomo (Pb). En cambio, un inventario de ozono se enfocaría en sus precursores es decir, COT, CO y NO<sub>x</sub>. Finalmente, un inventario de visibilidad incluiría las emisiones de SO<sub>x</sub>, de NO<sub>x</sub>, de partículas finas ( de diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros - PM<sub>2.5</sub>), de carbono elemental (CE), de carbono orgánico (C<sub>org</sub>) y de amoníaco (NH<sub>3</sub>).

Una vez determinados cuales son los contaminantes a ser incluidos en el inventario es importante definir claramente a cada uno de ellos. Esto es importante para que todos los datos recopilados sean consistentes y den resultados exactos sobre la emisión del contaminante deseado. Aunque existe una "terminología convencional para los contaminantes" se recomienda que todos sean claramente definidos por escrito al inicio del inventario con el fin de reducir confusiones respecto a los contaminantes por inventariar. Por otra parte, muchos contaminantes se definen por sus nombres químicos los que con frecuencia pueden tener sinónimos y nombres comerciales. A menudo los fabricantes dan nombres comerciales a las mezclas buscando así ocultar información protegida por derechos de marca, por lo que los mismos componentes pueden tener varios nombres comerciales. Por ejemplo, Freón 11 es el nombre comercial del triclorofluorometano (CFC-11).

Para garantizar la identificación apropiada de un compuesto químico se debe consultar el número que le corresponde en la clasificación del Chemical Abstract Service (CAS) junto con la lista de sinónimos. Finalmente, supongamos que sólo se dice que un inventario debe incluir emisiones de "partículas". Entonces, varias personas podrían calcular estimaciones de emisiones de partículas totales, de PM<sub>10</sub> ó de PM<sub>2.5</sub>. Para convertir estos diferentes tipos de emisiones de "partículas" a la base común deseada se requeriría de investigación de campo que permita correlacionar tales tamaños granulométricos.

## 5.1 Compuestos Orgánicos Totales / Compuestos Orgánicos volátiles

Existen muchas fuentes que emiten gases orgánicos a la atmósfera. Sin embargo, en general los gases orgánicos son emitidos por fuentes de combustión o de evaporación. De manera colectiva, los compuestos comprendidos en las emisiones de hidrocarburos se conocen como gases orgánicos totales (COT). Este concepto incluye a todos los compuestos carbonáceos excepto carbonatos, carburos metálicos, CO, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y ácido carbónico.

Algunos de los compuestos en esta categoría de contaminantes incluyen algunos aldehídos como el formaldehído y el acetaldehído que son irritantes del tracto respiratorio y compuestos químicos carcinogénicos. El benceno, que también es carcinogénico, puede estar presente. Las exposiciones de corta duración a estos compuestos puede ocasionar irritación del tracto respiratorio. También existe el potencial para un incremento en los casos de cáncer cuando hay exposiciones largas a algunas especies de COT.

Desde una perspectiva de calidad del aire es importante señalar que algunos de los compuestos orgánicos totales que se emiten a la atmósfera o no tienen reactividad fotoquímica o la tienen muy baja. En consecuencia, no participan en la formación de ozono. La EPA ha identificado a los siguientes compuestos como de reactividad fotoquímica nula o despreciable:

- Metano.
- Etano.
- Acetona.
- Percloroetileno (tetracloroetileno).
- Cloruro de metileno (diclorometano).
- Metil cloroformo (1,1,1- tricloroetano).
- Varios clorofluorocarburos (CFCs).
- Varios hidroclorofluorocarburos (HCFCs).
- Varios hidrofluorocarburos (HFCs).
- Varios perfluorocarburos (PFCs).

Se puede encontrar información adicional sobre estos compuestos así como un listado de otros compuestos menos comunes que tampoco son reactivos en *el U.S. Code of Federal Regulations* (CFR, 1997). Este listado de compuestos no reactivos se actualiza periódicamente a medida que la EPA designa nuevos compuestos.

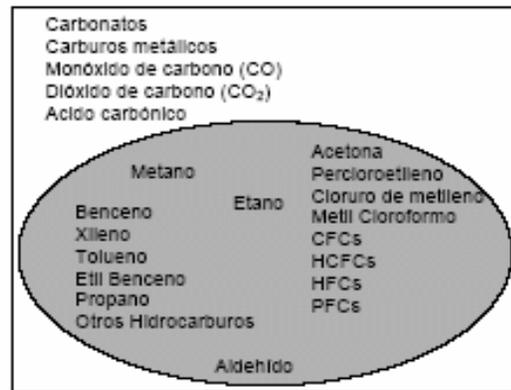
Los compuestos químicos considerados reactivos se conocen como compuestos orgánicos reactivos (COR). Entonces, por definición los COR son un subconjunto de los COT. Los COR son gases fotoquímicamente reactivos compuestos de hidrocarburos que pueden contribuir a la formación de contaminación fotoquímica.

En muchas publicaciones técnicas a los GOR, se les denomina compuestos orgánicos volátiles (COVs). Los factores de emisión publicados en el AP-42 (AP-42, 1995) de la EPA se presentan casi exclusivamente para COVs. Otras definiciones de hidrocarburos que en ocasiones aparecen en la literatura sobre calidad del aire y sobre factores de emisión incluyen la de compuestos orgánicos no metano (NMOG, por sus siglas en inglés), hidrocarburos no metánicos (NMHC, por sus siglas en inglés), hidrocarburos totales (THC, por sus siglas en inglés) e hidrocarburos (HC). La Figura 6 ilustra gráficamente la relación entre estas varias definiciones de hidrocarburos. Las áreas sombreadas indican cuales son los compuestos incluidos en cada definición.

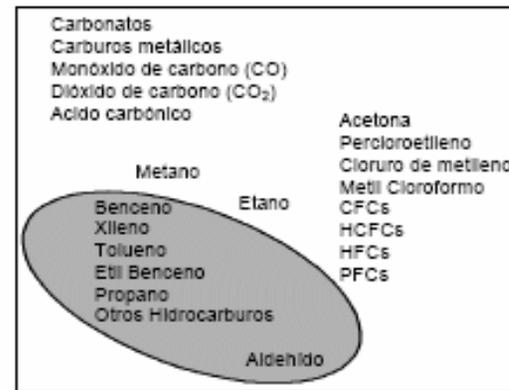
En general, las definiciones para NMOG, NMHC, THC e HC se usan sólo para procesos de combustión. Se recomienda que se hagan estimaciones de emisiones tanto para COT como para VOCs de manera que el usuario pueda tener flexibilidad para escoger el grupo de contaminantes que se necesiten para un inventario con un propósito particular. Si se usan factores de emisión para otros hidrocarburos menos comunes se deben ajustar dichos factores para tener en cuenta la presencia o ausencia de metano, etano y aldehídos como se muestra en la Figura 6.

En un principio podría parecer innecesario inventariar los COT pero el cálculo de sus estimaciones de emisión puede facilitar la presentación de las emisiones como gases con efecto invernadero y como compuestos tóxicos del aire. Además, las emisiones de COT se adaptan mejor para usarse en los modelos tridimensionales de cuadrícula que se emplean para simular la formación de ozono y de aerosoles

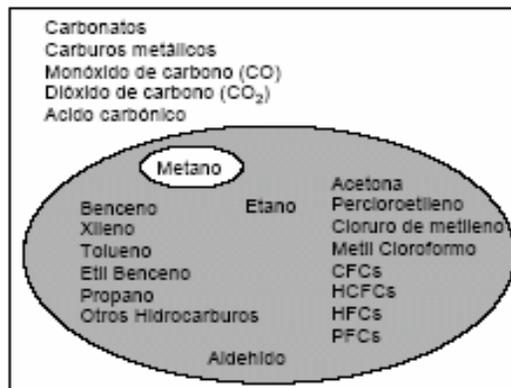
Figura 6. Descripción de las Definiciones de Hidrocarburos.<sup>6</sup>



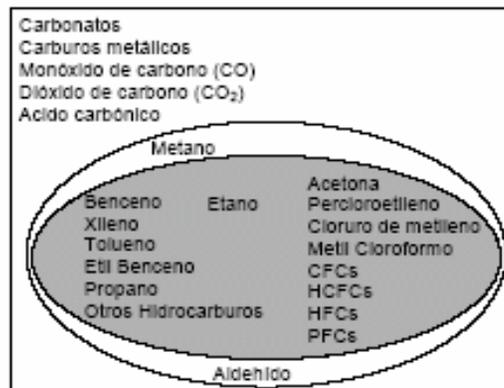
GOT ó COT



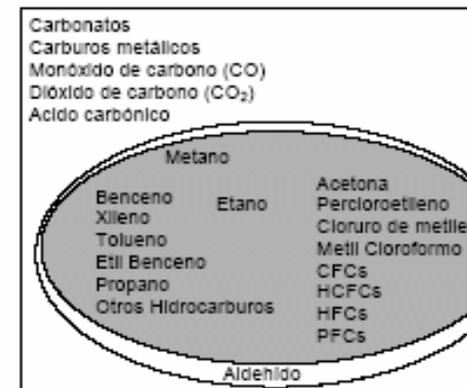
GOR, COR VOC



NMOG ó NMOC



NMHC



THC ó HC

<sup>6</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

## 5.2 Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro que resulta de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Una cantidad significativa del CO emitido en áreas urbanas es producida por los vehículos. Parece que cuando no fumadores o fumadores pasivos, se exponen a niveles de CO inferiores 20 ppm, no se producen efectos adversos sobre la salud. A niveles superiores a éstos, la carboxihemoglobina en la sangre se eleva causando efectos adversos en el sistema nervioso y en el cardiovascular. Por otro lado, los fumadores tienen un nivel más alto de carboxihemoglobina por lo que pueden experimentar efectos adversos aun a niveles ambientales inferiores de CO.

## 5.3 Óxidos de Nitrógeno

El término óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) es un concepto amplio que incluye al ácido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y otros óxidos de nitrógeno menos comunes. En general estos compuestos son formados durante los procesos de combustión, son precursores del ozono, y normalmente son eliminados de la atmósfera por deposición seca y húmeda. No se considera que el NO cause efectos adversos sobre la salud en concentraciones ambientales; sin embargo, la exposición al NO<sub>2</sub> puede ocasionar irritación del tracto respiratorio y, si la exposición se prolonga, puede causar disminución de la función pulmonar.

El NO<sub>x</sub> más importante que se produce en la combustión es el NO. Sin embargo, al mismo tiempo es común que se emitan NO<sub>2</sub> y otros óxidos de nitrógeno los que pueden o no distinguirse en los datos disponibles de muestreos. En general, estos compuestos evolucionan constantemente siendo el NO<sub>2</sub> el último producto de oxidación emitido o formado corriente abajo del proceso de combustión. La convención general que se sigue consiste en reportar las distinciones de estos contaminantes con base al peso molecular del NO<sub>2</sub>.

Los NO<sub>x</sub> se forman en la combustión externa de dos maneras principales: los NO<sub>x</sub> térmicos y los NO<sub>x</sub> provenientes del combustible. Los NO<sub>x</sub> térmicos se forman cuando el nitrógeno y el oxígeno en el aire de combustión reaccionan a altas temperaturas en la llama. Los NO<sub>x</sub> del combustible se forman por la reacción de cualquier nitrógeno contenido en el combustible con el aire de combustión.

Los NO<sub>x</sub> térmicos son la fuente principal de NO<sub>x</sub> en la combustión de gas natural y de aceites ligeros y el factor más significativo que afecta su formación es la temperatura de la llama. Un nivel excesivo de aire y la temperatura del aire de combustión también son factores que influyen en la formación de los NO<sub>x</sub> térmicos. La formación de los NO<sub>x</sub> del combustible depende de su contenido de nitrógeno y puede

constituir hasta el 50 por ciento de las emisiones de NO<sub>x</sub> de la combustión de productos ricos en nitrógeno, sobre todo carbón y aceites pesados.

## 5.4 Óxidos de Azufre

Los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) son un término general que se refiere al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y otros óxidos de este elemento. El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro de olor fuerte que se forma en la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre. Los óxidos de azufre son compuestos irritantes del sistema respiratorio que pueden ocasionar una respuesta similar al asma o bien agravar una condición asmática preexistente. Los síntomas de una exposición a altas concentraciones ambientales pueden incluir tos, goteo de la nariz y falta de aliento. Estas respuestas pueden ser más severas en fumadores.

Las plantas termoeléctricas que usan carbón o combustóleo con alto contenido de azufre pueden ser fuentes importantes de SO<sub>2</sub>. Algunas veces el SO<sub>2</sub> emitido se oxida a trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y después a ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o a sulfatos (SO<sub>4</sub>) como aerosoles. La convención general consiste en reportar las distinciones de los contaminantes siempre que esto sea posible pero reportar los SO<sub>x</sub> totales con base en el peso molecular del SO<sub>2</sub>.

La cantidad de emisiones de SO<sub>x</sub> de fuentes de combustión depende del contenido de azufre del combustible usado. Los óxidos de azufre contribuyen al problema de la deposición ácida. Este es un término muy amplio que se refiere a las formas en las que los compuestos ácidos de la atmósfera se depositan en la superficie de la tierra. Puede incluir la deposición húmeda a través de la lluvia ácida, y la niebla, así como la deposición seca de partículas ácidas.

## 5.5 Partículas

El término partículas se refiere a cualquier sustancia en fase sólida o líquida que se encuentre en el aire. Pueden ser hollín, polvos, aerosoles, humos o neblinas. Algunas clasificaciones de las partículas incluyen a las partículas totales; partículas primarias y partículas secundarias; partículas suspendidas totales (PST), partículas suspendidas (PS), partículas menores de diez micras (PM<sub>10</sub>) y partículas menores de cinco micras (PM<sub>2.5</sub>) así como partículas filtrables y partículas condensables.

Las partículas primarias incluyen a los materiales sólidos o líquidos emitidos directamente del proceso de producción (o de la chimenea) que se espera que se conviertan en partículas a la temperatura y presión ambiente. Las partículas secundarias son aerosoles que se forman en el aire a partir de gases por medio de reacciones químicas atmosféricas. La Figura 7 ilustra los conceptos de partículas primarias

y partículas secundarias. Todas las referencias sobre factores de emisión de partículas, en el documento AP-42, contienen factores de emisión de partículas primarias por lo que el término "partículas totales" se usa para describir las emisiones que representan sólo a las partículas primarias.

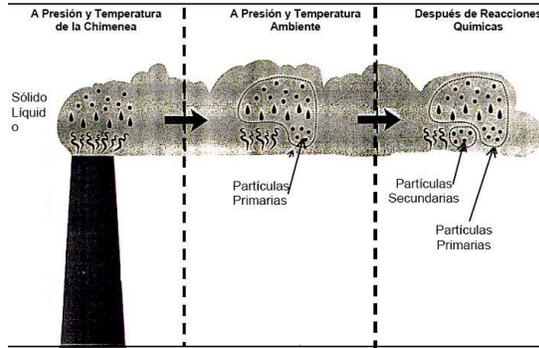


Figura 7. Partículas primarias y secundarias<sup>7</sup>.

Las PST consisten de toda la materia emitida como sólidos, líquidos y vapores que están "suspendidas" en el aire como partículas sólidas o líquidas. Las PST incluyen a todas las partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a 100  $\mu\text{m}$ . Las partículas con más de 100  $\mu\text{m}$  tienden a depositarse rápidamente y no deben considerarse como emisiones al aire. En general, las partículas de diámetro entre 30 y 100  $\mu\text{m}$  también se sedimentan con dificultad. Las partículas suspendidas se definen a menudo como todas las partículas de diámetro inferior a 30  $\mu\text{m}$  y con frecuencia se usa el término como equivalente de PST. El término  $\text{PM}_{10}$  se refiere a las emisiones de partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a 10  $\mu\text{m}$ . De manera similar,  $\text{PM}_{2.5}$  se refiere a las partículas de diámetro aerodinámico igual o inferior a 2.5  $\mu\text{m}$ . La Figura 8 ilustra las PST,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ .

El pequeño tamaño de las  $\text{PM}_{10}$  ó las  $\text{PM}_{2.5}$  les permite entrar fácilmente en los alvéolos pulmonares donde se pueden depositar causando efectos adversos sobre la salud. Las partículas pueden causar tos, jadeos y cambios, tanto en la función respiratoria, como en el pulmón mismo. Se cree que el aumento en los niveles de partículas es responsable del incremento en las tasas de mortalidad y de morbilidad en individuos con condiciones cardiovasculares y/o respiratorias preexistentes. Sin embargo, ha sido difícil establecer los niveles en los que se presentan efectos adversos debido a la presencia de otros compuestos químicos que podrían ser responsables de algunos de los efectos observados. Además, las emisiones de  $\text{PM}_{2.5}$  también son un problema para la visibilidad.

<sup>7</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

En el AP-42, los factores de emisiones de partículas totales se pueden dividir en factores de emisión de partículas filtrables y de partículas condensables. Las primeras incluyen material de tamaño menor al establecido y que se colecta en el filtro del tren de muestreo de partículas. A menos que se indique, es razonable suponer que los factores de emisión en el AP-42 para los procesos que operan a temperaturas superiores a la ambiente son para partículas filtrables, de acuerdo con la definición del Método 5 de la EPA o su equivalente (temperatura de filtro de 121°C [250°F]). Las porciones condensables de las partículas consisten de vapores a la temperatura del filtro que se colectan en los burbujeadores del tren de muestreo y se analizan por el Método 202 de la EPA o su equivalente. Los factores de emisión de partículas totales son la suma de los factores de emisión de partículas filtrables y de partículas condensables.

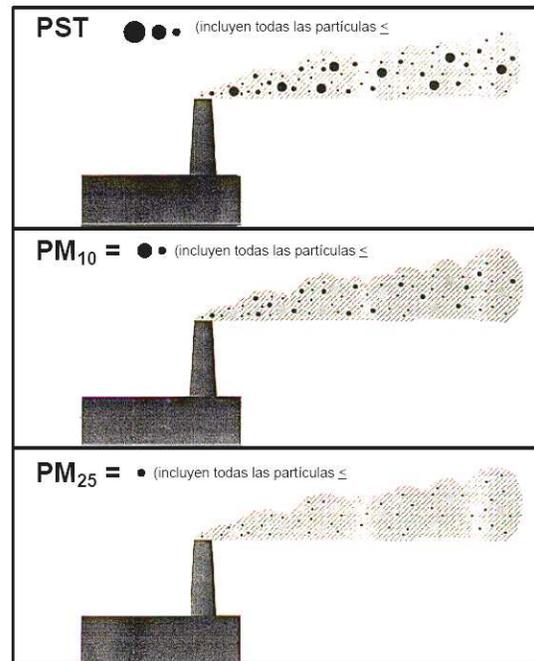


Figura 8. PST,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ <sup>8</sup>

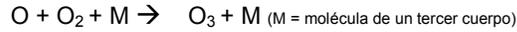
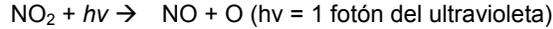
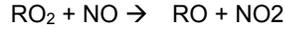
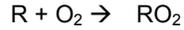
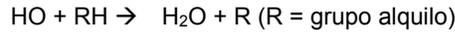
## 5.6 Ozono

El ozono ( $\text{O}_3$ ) es un gas tóxico y reactivo, de olor fuerte y color azul pálido formado por tres átomos de oxígeno. Es el oxidante fotoquímico más abundante. El ozono y los otros oxidantes fotoquímicos no se emiten directamente a la atmósfera si no que se forman por las reacciones químicas entre los hidrocarburos y los  $\text{NO}_x$  en presencia de luz solar. Por lo tanto no se estima en los inventarios de emisiones. En cambio, se estiman sus precursores.

A continuación se presentan las ecuaciones químicas generales que describen la

<sup>8</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

formación del ozono:



El ozono y otros oxidantes fotoquímicos son irritantes que pueden tener efectos adversos en los pulmones. La exposición a altos niveles ambientales puede ocasionar disminución en la función pulmonar. Entre los efectos adversos a la salud que pueden presentarse como resultado de la exposición al ozono están la respiración rápida y poco profunda, la bronquitis y el enfisema. Además, el ozono deteriora con facilidad al hule y otros materiales.

### 5.7 Contaminantes que reducen la Visibilidad

La degradación de la visibilidad es ocasionada por partículas finas que absorben o que dispersan la luz en una dirección diferente a la de la luz incidente. Algunas de estas partículas (partículas primarias) se emiten directamente a la atmósfera; otras (partículas secundarias) se forman en la atmósfera a partir de precursores gaseosos.

En las mediciones de visibilidad se utiliza el coeficiente de extinción, que es la fracción de luz atenuada por dispersión o por absorción cuando un haz de luz atraviesa una unidad de atmósfera.

El coeficiente de extinción indica la tasa a la que se pierde la energía debido a las interacciones con los gases y las partículas suspendidas en la atmósfera. Las partículas con más altos coeficientes de extinción causarán mayor degradación de la visibilidad.

La magnitud de estos efectos de degradación de la visibilidad depende de varios factores tales como el tamaño y composición de las partículas, y la longitud de onda de la luz incidente. Por lo tanto, no todas las especies tienen el mismo impacto sobre la visibilidad. Las mayores fuentes de deterioro de la visibilidad son el carbono orgánico ( $C_{org}$ ), el carbono elemental (CE) u hollín, los sulfatos y los nitratos. El carbono orgánico y el carbono elemental son fuentes significativas de degradación de la visibilidad debido a que ambas dispersan y absorben la luz. Las dos formas de carbono se emiten como partículas primarias. Todas las demás especies que reducen la visibilidad sobre todo dispersan la luz y en general son partículas secundarias formadas a partir de precursores gaseosos. Los sulfatos y los nitratos resultan, sobre todo, de varias reacciones químicas con las emisiones de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ . Los precursores de ozono también pueden ser importantes debido a que los aerosoles secundarios son algunos de los productos finales del ciclo fotoquímico del llamado smog. Por último, el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) es considerado

con frecuencia como una especie que reduce la visibilidad debido a su interacción con los  $\text{SO}_x$  y los  $\text{NO}_x$  para formar sulfato de amonio,  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$  y nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ).

Las partículas y sus precursores pueden permanecer en la atmósfera varios días y transportarse a grandes distancias desde sus fuentes de emisión, afectando la visibilidad en áreas remotas. Las emisiones de muchas fuentes pueden mezclarse durante el transporte para formar una neblina uniforme y extensa conocida como neblina regional. Los cambios en las condiciones meteorológicas, la luz solar y el tamaño y la proximidad de las fuentes son algunos de los factores que modifican el grado de deterioro de la visibilidad en el tiempo y de un lugar a otro.

### 5.8 Compuestos Tóxicos y Contaminantes Peligrosos del Aire

El término general compuestos tóxicos del aire se usa para referirse a un compuesto o grupo de compuestos químicos nocivos que se encuentran en el aire. A veces se le llama contaminantes peligrosos del aire (HAPs, por sus siglas en inglés). Son considerados tóxicos porque pueden tener efectos en el corto plazo (agudos) o en el largo plazo (crónicos). Esta categoría de contaminantes agrupa a muchas sustancias con efectos variados, a diferentes concentraciones a las que dichos efectos pueden presentarse. Los compuestos van desde los que son carcinógenos, como el 1,3-butadieno y el cloruro de vinilo, hasta los solventes químicos como el tolueno y el etilbenceno que a las concentraciones que se hallan en el aire ambiente pueden limitarse a tener efectos irritantes.

Los compuestos tóxicos del aire pueden existir en forma gaseosa o como partículas. Como ejemplos de compuestos tóxicos están el benceno, tolueno, xileno y etilbenceno. También existe un cierto número de compuestos tóxicos gaseosos que pueden no ser COT, como el amoníaco y el cloro. Muchos de los compuestos tóxicos como partículas son metales pesados como el plomo, el cromo y el cadmio. La EPA, tiene un listado de 189 Contaminantes Peligrosos del Aire. Éste no es una lista exhaustiva de los compuestos tóxicos del aire. Para algunas aplicaciones de inventarios puede ser necesario considerar a otras sustancias como HAPs. Lo ideal sería estimar las emisiones de estos compuestos usando datos de muestreos en la fuente o factores de emisión. Cuando los factores de emisión de tóxicos no están disponibles, es necesario combinar las estimaciones de emisión de COT o de partículas totales con los perfiles de composición para estimar las emisiones de compuestos tóxicos individuales. Sin embargo, por lo general no se recomienda este enfoque debido a que los perfiles de composición no se hacen con el

fin de estimar las emisiones de compuestos individuales.

## 5.9 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

El efecto invernadero se presenta cuando la radiación de luz solar que entra queda atrapada por una combinación de gases activos respecto a la radiación (i. e., gases con efecto invernadero o simplemente, gases de invernadero). La energía luminosa del sol (radiación de longitud de onda corta) que pasa a través de la atmósfera de la tierra es absorbida por la superficie de la tierra y reflejada a la atmósfera como energía calorífica (radiación de longitud de onda larga). Entonces la energía calorífica es atrapada por la atmósfera creando una situación semejante a la que se presenta en un invernadero o en un automóvil cuando se suben las ventanilla. Muchos científicos creen que la emisión de estos gases (dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>], metano [CH<sub>4</sub>], óxido nitroso [N<sub>2</sub>O], clorofluorocarburos [CFCs] y otros) hacia la atmósfera puede aumentar el efecto invernadero y contribuir al calentamiento global. A continuación se describe cada uno de estos gases.

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un gas incoloro e inodoro que existe naturalmente en la atmósfera de la tierra. También se emiten cantidades significativas por la combustión de combustibles fósiles. La segunda fuente más importante de emisiones globales de CO<sub>2</sub> ocurre por cambios en el uso del suelo y de los bosques. Los bosques y otra vegetación absorben CO<sub>2</sub> durante su crecimiento. Por lo tanto, la pérdida de área forestal (i. e., deforestación) está llevando a una reducción de la incorporación del CO<sub>2</sub> en años futuros. En otras palabras, a un aumento neto del CO<sub>2</sub> atmosférico. Los cultivos o las quemadas y/o los desmontes con fines agrícolas también pueden aumentar la liberación o el almacenamiento natural de CO<sub>2</sub> de los suelos (IPCC, 1993).

El metano (CH<sub>4</sub>) es el hidrocarburo gaseoso más abundante y estable en la atmósfera. La estimación más reciente de su tiempo de vida en la atmósfera es de 11 años (IPCC, 1993). Las reacciones químicas en las que participa dentro de la tropósfera pueden llevar a la producción de ozono y la reacción con radicales hidroxilo (OH) en la estratosfera produce vapor de agua. Esto es importante debido a que tanto el ozono como el vapor de agua son gases de invernadero, al igual que el CO<sub>2</sub> que es el producto final de la oxidación del metano. Algunas fuentes antropogénicas de metano importantes son las operaciones en las minas de carbón, la producción de gas natural, los arrozales, la ganadería y la quema de biomasa. También se forma metano por la descomposición bacteriana de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas (e.g., residuos animales, tratamiento de aguas negras domésticas y rellenos sanitarios).

El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) es un importante gas de invernadero con una vida atmosférica de 110 - 168 años (WMO, 1992). Después de ser liberado es prácticamente inerte y rara vez participa en reacciones químicas en la tropósfera. También es la fuente principal de NO<sub>x</sub> en la estratosfera, lo que está contribuyendo al agotamiento del ozono estratosférico. Más del 20 por ciento de las emisiones globales totales de N<sub>2</sub>O y el 50 por ciento de las emisiones totales de N<sub>2</sub> pueden deberse a emisiones terrestres naturales (IPCC, 1993). La fuente antropogénica más importante de N<sub>2</sub>O es el aumento del uso de fertilizantes nitrogenados. También se produce óxido nitroso en los suelos de manera natural por desnitrificación (i. e., la reducción del nitrito o del nitrato a nitrógeno gaseoso como N<sub>2</sub> o como óxido de nitrógeno) y por nitrificación (i. e., la oxidación del amoníaco a nitrato). Los fertilizantes nitrogenados comerciales constituyen una fuente adicional de nitrógeno aumentando así las emisiones de N<sub>2</sub>O del suelo. Otras fuentes potencialmente significativas de óxido nitroso incluyen la combustión de combustibles fósiles, la quema de biomasa y la producción de ácido adípico para la industria del nylon.

Recientemente ha estado aumentando la importancia de la combustión en fuentes móviles como fuente de emisiones de N<sub>2</sub>O debido al uso de catalizadores de tres vías para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> (De Soete, 1989).

Los clorofluorocarburos (CFCs) cubren un amplio número de sustancias artificiales compuestas por cloro, flúor y carbono. Entre algunos ejemplos están el diclorodifluorometano (CFC-12) y el triclorotrifluoroetano (CFC-113). Los CFCs son sumamente estables debido a su halogenación completa. Tampoco son inflamables y por lo general tampoco son tóxicos en dosis bajas. Sin embargo, han sido identificado como gases con efecto invernadero y también como sustancias agotadoras del ozono (ODS, por sus siglas en inglés). Debido a su potencial para agotar el ozono se ha detenido virtualmente toda la producción mundial de CFCs como se indica en el Protocolo de Montreal.

Los CFCs tienen puntos de ebullición apropiados para ser excelentes refrigerantes. Su baja tensión superficial y su baja viscosidad los hace ideales como solventes limpiadores. También tienen altas tasas de evaporación y no dejan residuos. También se usan como acarreadores inertes en los esterilizadores de óxido de etileno (EtO).

## 6.0 CATEGORÍAS DE LAS FUENTES DE EMISIÓN

La contaminación del aire proviene de una compleja mezcla de, literalmente, miles de fuentes que van desde las chimeneas industriales y vehículos de motor hasta el uso individual de limpiadores y

pinturas domésticos. Incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. En general, para los propósitos de un inventario de emisiones las fuentes de emisión se agrupan en cuatro tipos diferentes:

- Fuentes puntuales
- Fuentes de área
- Vehículos automotores
- Fuentes naturales.

Esta sección presenta una descripción general de estos diferentes tipos de fuentes de emisión, explica el concepto de ajuste de fuentes puntuales y fuentes de área y presenta una lista de verificación de las categorías de fuente que deben ser incluidas (o cuando menos, consideradas) en cualquier inventario de emisiones.

## 6.1 Fuentes Puntuales

Antes de comenzar a desarrollar un inventario de fuentes puntuales, deben tomarse dos importantes decisiones. Primero, se debe definir claramente lo que es una "fuente puntual" (i. e., debe establecerse una delimitación entre fuentes puntuales y de área). Segundo, se debe determinar el nivel de detalle deseado.

### 6.1.1 Delimitación de fuentes puntuales y fuentes de área

La división de fuentes emisoras en puntuales y de área es arbitraria pero necesaria para permitir la recopilación eficiente de la información que se requiere para apoyar los programas de calidad del aire. Esta división tiene implicaciones importantes, tanto para el desarrollo de los programas regulatorios, como para el tipo de información necesaria para apoyarlos.

Es deseable contar con información detallada sobre cada "punto" en el que se descargan emisiones a la atmósfera. Aunque esto permitiría entender de forma detallada las características de cada fuente emisora, no existe manera práctica de recopilar dicha información. Si se tratan todas las plantas como fuentes puntuales se puede aumentar la exactitud del inventario pero se requerirán muchos más recursos para recopilar y mantener el inventario de fuentes puntuales. Un enfoque alternativo consiste en recopilar información en una base más simple agregando todas las fuentes que estén relacionadas (e. g., todos los automóviles, todas las panaderías) dentro de una sola "fuente de área".

Las fuentes puntuales se definen como toda instalación establecida en un solo lugar que tenga como propósito desarrollar procesos industriales o comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

Las fuentes puntuales incluyen a:

Los siguientes sectores industriales: químico, petrolero y petroquímico, de pinturas y tintas, de automóviles, de la celulosa y el papel, del hierro y el acero, del vidrio, de la generación de electricidad, del asbesto, del cemento y la cal así como del tratamiento de residuos peligrosos.

Todas las plantas, proyectos o actividades (industriales, comerciales o de servicios) realizados por entidades de la Administración Pública.

Las plantas localizadas en zonas industriales y las fuentes que afecten el equilibrio ecológico de un estado o país adyacente. Además, anualmente deben presentar estimaciones de sus emisiones y/o las mediciones en chimenea para la planta.

Las fuentes puntuales también pueden ser especificadas de muchas otras maneras. Entre éstas se incluye la siguiente definición de fuentes puntuales (considerando a todas las otras fuentes como fuentes de área):

Fuentes de un tipo dado (e. g., unidad de reformación catalítica fluidizada) o tanto por tipo como por tamaño (e. g., caldera con un consumo de calor >10,000 Btu/hr);

Fuentes que emiten más de una cantidad especificada de emisiones determinada en alguna base consistente (e. g., calderas que emiten más de 100 toneladas anuales de NO<sub>x</sub>);

Cualquier fuente (independientemente del tipo, tamaño o emisiones) que se localice en una planta de un tipo dado (e. g., refinería de petróleo) o de un tipo y tamaño dados (e. g., fundición de acero con producción de acero superior a las 1,000 toneladas anuales) y cualquier fuente (independientemente del tipo, tamaño o emisiones) que se localice en una planta con una cantidad de emisiones más grande que la especificada determinada en alguna base consistente.

Algunos ejemplos de bases consistentes para determinar la cantidad de las emisiones son:

Emisiones reales (lo que realmente se emitió en un periodo de tiempo anterior).

Emisiones permisibles (el máximo que puede ser emitido conforme a los límites regulatorios).

Emisiones potenciales (lo que se emitiría si se operara tiempo completo sin equipo de control).

Además estas definiciones pueden variar según la región regulatoria para tomar en cuenta los diferentes niveles de severidad del problema de la calidad del aire y/o lo estricto que sea el programa regulatorio.

Por ejemplo, en los EU se ha establecido una base específica para las áreas que exceden varias normas de calidad del aire ambiente. Dependiendo de la severidad de las excedencias el corte de las

emisiones de fuentes puntuales se coloca a un nivel diferente. Como resultado, las áreas con peor calidad del aire tienen el corte de emisiones de fuentes puntuales más bajo. Más aún, se ha estimulado el que cada estado inventaríe las fuentes por debajo de estos cortes en base individual. La decisión de establecer un corte más bajo depende de varios factores locales, por lo general, de los recursos disponibles para obtener y manejar los datos. A menudo, en los programas ambientales de los EU se ha usado la última definición (i. e., umbrales de emisión a nivel de planta) basados en emisiones reales. Estas fuentes se han designado como “fuentes estacionarias” y están sujetas a regulaciones más estrictas que las fuentes que emiten menos. La Agencia de Protección Ambiental de los EU (USEPA) ha extendido esta definición regulatoria al terreno del manejo de datos. La USEPA requiere que las agencias estatales presenten los datos sobre las fuentes definidas desde el punto de vista regulatorio como fuentes estacionarias, como “fuentes puntuales”. Todos los datos sobre las plantas remanentes deben presentarse en forma agregada como “fuentes de área”.

A medida que el programa de inventarios de emisiones de Colombia evolucione la definición establecida de fuente puntual puede modificarse para añadir las nuevas fuentes significativas que se vayan identificando o para eliminar las fuentes insignificantes. Una vez más, la meta es aumentar al máximo la exactitud global del inventario de emisiones completo (i. e., fuentes puntuales, de área, vehículos automotores y fuentes naturales) dentro de las limitaciones de los recursos disponible.

### 6.1.2 Nivel de Detalle

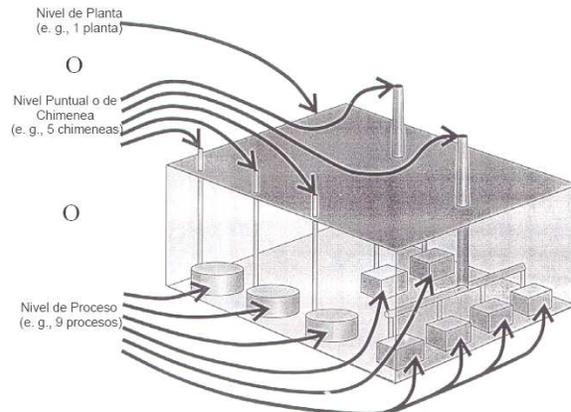
Por lo general, la información sobre fuentes puntuales se recopila por medio de encuestas. Las fuentes puntuales se pueden inventariar a los siguientes tres niveles de detalle (que se ilustran en la Figura 9):

Nivel de planta, que se refiere a una planta o una instalación que podría contener varias actividades emisoras de contaminantes.

Nivel puntual o de chimenea en donde ocurren las emisiones al aire ambiente y nivel de proceso, que representa las operaciones de la unidad de emisión en una categoría de fuente.

Siempre que sea posible, las emisiones deben inventariarse a nivel de proceso a fin de apoyar las actividades de calidad del aire tales como el desarrollo de regulaciones, el cumplimiento, rastreo y otorgamiento de permisos. Por ejemplo, para identificar los procesos o los dispositivos a los que podrían aplicarse las futuras regulaciones y luego estimar el impacto (i. e., costos y beneficios) de dichas regulaciones se tendrían que estimar las

emisiones para cada proceso o dispositivo. Otra razón igualmente importante para recopilar datos a este nivel de detalle es que le da a la agencia la información requerida para verificar las estimaciones de las emisiones en toda la planta que fueron proporcionadas por los operadores de la instalación. Sin embargo, las limitaciones en los recursos pueden hacer que las emisiones se inventaríen a nivel de planta o a nivel puntual o de chimenea.



**Figura 9. Diferentes Niveles de un Inventario de Fuentes Puntuales<sup>9</sup>.**

### 6.2 Fuentes de Área

Las fuentes de área representan las emisiones de las fuentes que son demasiado numerosas y dispersas como para ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales. En conjunto, sin embargo, las fuentes de área son emisoras significativas de contaminantes del aire los que deben incluirse en un inventario de emisiones para asegurar que esté completo. Por ejemplo, con frecuencia las estaciones de servicio y las tintorerías se tratan como fuentes de área. Por lo general estas instalaciones no se incluyen en los inventarios de fuentes puntuales debido al enorme esfuerzo que se requeriría para recopilar los datos y estimar las emisiones de cada planta individual. Las fuentes móviles que no circulan por carreteras (e. g., equipo industrial, equipo de construcción, etc.) a menudo se incluyen en las fuentes de área estacionarias sobre todo debido a que los métodos usados para estimar las emisiones de fuentes de área y fuentes móviles que no circulan por carreteras son muy similares. En contraste, la metodología de inventario aplicada a los vehículos automotores es muy diferente. En lugar de hacer distinción entre plantas individuales y dispositivos emisores como se hace en los inventarios de fuentes puntuales, los inventarios de fuentes de área agrupan a las emisiones de fuentes similares en *categorías*. Un inventario de fuentes de área generalmente consiste de las siguientes grandes categorías:

<sup>9</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

Combustión en fuentes estacionarias.  
 Fuentes móviles que no circulan por carreteras.  
 Uso de solventes.  
 Almacenamiento y transporte de productos del petróleo.  
 Fuentes industriales y comerciales ligeras.  
 Fuentes agrícolas.  
 Fuentes de manejo de residuos y fuentes de área diversas.

Cada una de estas categorías está comprendida en otras categorías de fuentes más específicas (i. e., el uso de solventes orgánicos incluye el uso comercial o doméstico de solventes, el lavado en seco y la limpieza de superficies) que se definen por procesos de emisión semejantes o por una similitud en los métodos para la mejor estimación de las emisiones. Un inventario de área completo puede contener 150 o más categorías de fuente individuales. En general, el lavado en seco está representado por dos o mas categorías de fuentes para tomar en cuenta los diferentes solventes que se usan (i. e., percloroetileno vs. solventes con base petróleo). De manera similar, el recubrimiento de superficies puede tener muchas categorías de fuente para tomar en cuenta las diferentes aplicaciones que existen (e. g., latas metálicas, monedas, maquinaria, muebles de madera, etc.). Las emisiones de las categorías de fuente más grandes se producen por diversos mecanismos. La Tabla 1 presenta los diferentes mecanismos asociados con cada una de las grandes categorías de fuentes de área. También se incluyen ejemplos de categorías de fuentes específicas.

**Tabla 1. Mecanismos de Emisión para Varias categorías de Fuente de Área.**

Categoría de fuente	Combustión	Evaporación	Perturbación Mecánica	Procesos Biológicos
Uso de combustible en fuentes estacionarias	Combustión residencial			
Fuentes móviles que no circulan por carreteras.	Equipo de construcción	Equipo recreativo.		
Uso de solventes		Desengrasado		
Almacenamiento y transporte de productos de		Distribución de gasolina, fugas de gas LP		

Categoría de fuente	Combustión	Evaporación	Perturbación Mecánica	Procesos Biológicos
petróleo.				
Fuentes industriales y comerciales ligeras.	Fabricación de ladrillos.		Construcción de edificios.	Panaderías.
Fuentes agrícolas.	Quemas agrícolas	Aplicación de plaguicidas.	Cultivo agrícola	Desechos animales.
Fuente de manejo de residuos.	Incineración	Plantas públicas de tratamiento.		
Fuentes de áreas diversas.	Incendios silvestres.		Polvo de caminos	Amonia co de ganado.

Fuente: EIIP, Volumen II, Tabla 5-1.

### 6.3 Fuentes Móviles

Los vehículos automotores que circulan por carreteras son aquellos como los automóviles, los camiones y autobuses diseñados para operar en carreteras públicas. En la mayor parte de las áreas urbanas los vehículos automotores contribuyen en gran medida a las emisiones de COT, CO, NOx, SOx, partículas, compuestos tóxicos del aire y especies que reducen la visibilidad. Debido a la gran magnitud de sus emisiones y a las consideraciones especiales que se requieren para hacer estimaciones de dichas emisiones, los vehículos automotores se tratan separadamente de otras fuentes de área.

Las emisiones de vehículos automotores consisten de un gran número de contaminantes resultantes de varios procesos diferentes (ver Figura 10). Las emisiones más comúnmente consideradas son las del escape, que resultan de la combustión y se emiten por el tubo de escape del vehículo y las que provienen de varios procesos de emisión evaporativa. Estos procesos, que generan sólo emisiones de COT, incluyen:

*Emisiones por remojo en caliente (hot soak)* : Emisiones que ocurren debido a la volatilización del combustible en el sistema de distribución después de apagar el motor. El calor residual de éste volatiliza el combustible.

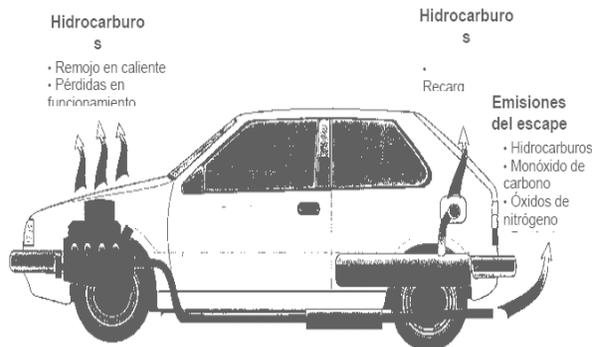
*Emisiones evaporativas durante la marcha:* Emisiones evaporativas provenientes de fugas del combustible, líquido o vapor, que ocurren cuando está operando el motor.

Emisiones diurnas: Emisiones del tanque de combustible del vehículo debido a la mayor temperatura de la masa de líquido y a la presión de vapor. Estas emisiones resultan del aumento de la

temperatura ambiente, de la entrada de calor desde el sistema de escape del vehículo o del calor reflejado desde la superficie de la carretera.

**Emisiones evaporativas en reposo:** Emisiones evaporativas que no son las de remojo en caliente, las diurnas ni las debidas a la recarga del tanque. Estas emisiones se presentan cuando el motor no está en operación y se deben sobre todo a fugas de combustible y a la permeación de vapor a través de las líneas del combustible.

**Emisiones evaporativas durante la recarga de combustible:** Emisiones evaporativas desplazadas desde el tanque de combustible durante la recarga. Aunque el vehículo es la fuente de las emisiones, éstas ocurren mientras el vehículo está en reposo y en lugares conocidos, como las estaciones de servicio. Por lo tanto, estas emisiones se tratan por lo general como una fuente de área. Los factores de emisión de la recarga pueden estimarse usando el modelo MOBILE o bien obtenerse de otras fuentes, como el AP-42.



**Figura 10. Procesos de Emisión en Vehículos Automotores<sup>10</sup>**

El interés por obtener estimaciones de la contribución de los vehículos automotores que circulan por carreteras a los inventarios regionales de emisiones en Colombia ha ido en aumento. Por ejemplo, en las regiones fronterizas, el parque automotor puede consumir gasolina con plomo y se pueden usar mayores cantidades de combustibles. Otro ejemplo es el tránsito en las ciudades de gran altitud como Bogotá, aspecto este que afecta el proceso de combustión y, por lo tanto, también las emisiones de los vehículos.

## 6.4 Fuentes Naturales

Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida, tanto animal como vegetal pueden desempeñar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. En algunas áreas en las que las emisiones de fuentes naturales pueden ser significativas para el inventario global es importante comprender cual es su contribución dado

que, por lo general, la instrumentación de estrategias de control no puede reducirlas con facilidad. A continuación se describen dos fuentes naturales de importancia que a menudo se consideran en los inventarios de emisiones del aire.

**Emisiones Biogénicas.** Un gran número de investigadores han establecido que la vegetación (e. g., hierba, cultivos, arbustos, bosques, etc.) emiten cantidades significativas de hidrocarburos a la atmósfera. Varios estudios (Pierce et al., 1990; Robinson y Robbins, 1968) han demostrado que las emisiones biogénicas pueden compararse, o rebasar, las emisiones de hidrocarburos no metano (NMHC, por sus siglas en inglés) de fuentes antropogénicas en ciertas áreas.

**Emisiones de Suelos.** Como se mencionó antes en la exposición sobre gases con efecto invernadero el óxido nitroso ( $N_2O$ ) es producido de manera natural en los suelos por desnitrificación (i. e., la reducción de nitritos o nitratos a nitrógeno gaseoso como  $N_2$  ó  $NO_x$ ) y por nitrificación (i. e., la oxidación de amoníaco a nitrato). Los fertilizantes nitrogenados comerciales constituyen una fuente adicional de nitrógeno, incrementando así las emisiones de  $N_2O$  del suelo. La tasa de emisiones de  $NO_x$  de los suelos también dependen de otras variables como el tipo de suelo, la humedad, la temperatura, la estación, el tipo de cultivo y otras prácticas agrícolas. Se estima que las emisiones de  $NO_x$  de los suelos representan hasta el 16 por ciento de la cantidad global de  $NO_x$  en la tropósfera y hasta el 8 por ciento de  $NO_x$  en América del Norte (U.S. EPA, 1993).

La erosión del viento es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones se asocian por lo general con tierras alteradas a veces se les trata como fuentes de área. Otras categorías más pequeñas de fuentes naturales incluyen a las termitas ( $CH_4$ ), los relámpagos ( $NO_x$ ) y los volcanes y alguna otra actividad geotérmica ( $SO_x$ ).

## 7.0 Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones.

### 7.1 introducción

En este documento, se presentan las técnicas básicas de estimación de emisiones (TEEs) que se usan para hacer estimaciones de emisiones de fuentes puntuales y de área (incluyendo las fuentes móviles que no circulan por carreteras). Estas técnicas han sido tomadas de los métodos para hacer inventarios que actualmente se emplean en Estados Unidos, Europa, Asia y América Latina. También se revisaron las técnicas desarrolladas por la Organización Mundial de la

<sup>10</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL2. diciembre 1997

Salud (OMS), la CORINAIR y aquellas propuestas por el panel intergubernamental de cambio climático (IPCC), que se emplean para calcular inventarios de emisiones de gases con efecto invernadero a escala global. Las seis diferentes técnicas básicas identificadas son:

**Muestreo en la Fuente:** son mediciones directas de la concentración de contaminantes en un volumen conocido de gas y de la tasa de flujo del gas en la chimenea. Son utilizadas con mayor frecuencia para fuentes de emisiones de combustión.

**Factores de Emisión:** son relaciones entre la cantidad de un contaminante emitido y una sola unidad de actividad. La actividad puede, consistir en datos basados en procesos (e. g., producción, horas de operación, área superficial) o en datos basados en censos (e. g., población, número de empleados).

**Balance de Materiales:** se usan mediciones de todos los componentes, de un proceso, excepto el aire para determinar las emisiones al aire. Es utilizado con mayor frecuencia para fuentes de evaporación de solventes cuando no hay datos disponibles para apoyar los otros enfoques.

**Modelos de Emisión:** son ecuaciones desarrolladas cuando las emisiones no se relacionan directamente con un solo parámetro. Se pueden usar computadoras en el caso de que se tenga un gran número de cálculos complejos. Por ejemplo, el programa TANKS de la U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) es un modelo de emisiones computarizado que se usa para estimar emisiones de tanques de almacenamiento.

**Encuestas:** son cuestionarios diseñados para recopilar datos de emisiones. A menudo son utilizados para recopilar datos de fuentes puntuales desarrollados a nivel de establecimiento o bien datos de fuentes de área de un muestreo representativo de fuentes dentro de una categoría dada.

**Extrapolación:** consiste en el escalamiento de las emisiones de una fuente dada a otra con base en un parámetro de escalamiento conocido para ambas fuentes (e. g., cantidad de producción, área del terreno, número de empleados).

## 7.2 Ecuación fundamental para la estimación de emisiones

El desarrollo de un programa de inventario de emisiones requerirá de una combinación de enfoques, no existe ningún método único que pueda usarse para estimar las emisiones de todas las categorías de fuente. La Figura 11 ilustra varios enfoques que deberían tomarse en cuenta para estimar emisiones cuando se analizan los costos en relación con la calidad de los resultados. En regiones con serios impactos ambientales ocasionados por la contaminación del aire se pueden asegurar métodos más elaborados y

costosos, por ejemplo muestreo en la fuente para determinar las emisiones.



Figura 11. Jerarquía de las estimaciones de emisiones<sup>11</sup>.

Por el contrario, en aquellas regiones que tienen problemas ambientales mínimos, el uso de métodos de estimación menos costosos, como el de los factores de emisión, puede ser aceptable.

La ecuación fundamental para estimar emisiones es:

$$E = A \times EF \times \left[ 1 - \left( \frac{CE}{100} \times RE \times RP \right) \right] \times T \times M\%$$

donde:

- E = Tasa de Emisión
- A = Tasa de Actividad (e.g., producción, población, etc.)
- EF = Factor de Emisión (lb/unidad de tasa de actividad)
- CE = Eficiencia de Control (%)
- RE = Efectividad de la Regla
- RP = Penetración de la Regla
- T = Ajuste Temporal
- M% = Masa porcentual de Contaminante

La exactitud de la estimación de emisiones depende de la exactitud relativa de cada uno de estos componentes individuales. Si se introducen errores en cualquiera de ellos se afectará la estimación final de las emisiones.

**Tasas de Actividad.** En general, los datos de actividad se relacionan con los procesos emisores. En los procesos industriales, los datos de actividad por lo general están dados como tasas del proceso en peso (e. g., kg, ton ó L mensuales de material utilizado o manufacturado). De manera semejante, para el equipo en que se quema combustible, los datos se dan como tasas de consumo de

<sup>11</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México,. VOL2. diciembre 1997

combustible (e. g., tons, L ó m3, ó MJ por hora o por mes). En muchos casos se deben aplicar factores de conversión para transformar los valores de consumo o de producción reportados en unidades que correspondan a las unidades de producción del factor de emisión (e.g., tons, barriles, etc.). Además, si se utilizan factores de emisión de Estados Unidos, también puede necesitarse hacer conversiones de unidades estándar a métricas. Por lo general, los datos de actividad para fuentes puntuales se basan en procesos, y es muy probable que sean recopilados por el personal de la planta y se reporten a la Autoridad Ambiental en un formato resumido (e. g., el cuestionario industrial). Con frecuencia, los datos de actividad para fuentes de área a menudo son sustitutos que se demuestra o se asume que están correlacionados con el proceso emisor (e. g., número de empleados). Los datos de actividad para fuentes de área son recopilados, en general, por la Autoridad a partir de los datos disponibles de censos del DANE, IGAC, o haciendo encuestas en plantas pequeñas.

**Eficiencia de Control.** La eficiencia global de control es el producto de la eficiencia del sistema de captura por la eficiencia del sistema de control. La eficiencia del sistema de captura indica el porcentaje de la corriente de emisión que es llevado al sistema de control y la eficiencia del sistema de control indica el porcentaje de contaminante atmosférico que es removido de la corriente de emisión antes de emitirlo a la atmósfera. Los datos de la eficiencia del sistema de control pueden ser determinados para un equipo específico a partir de muestreos en la fuente midiendo las concentraciones del contaminante antes y después de su aplicación; a partir de reportes bibliográficos o a partir de las especificaciones de diseño del fabricante. La eficiencia global de control también puede requerir de ajustes para reflejar el tiempo que permanece fuera de operación el equipo de control durante las operaciones de mantenimiento o cuando se presentan fallas en los procesos involucrados.

**Efectividad de la Regla.** La experiencia con los inventarios de emisión ha revelado que los programas de control de las autoridades ambientales, tienen una efectividad menor al 100 por ciento para la mayor parte de los tipos de fuente. La efectividad de la regla refleja la capacidad de un programa de control para lograr las reducciones requeridas en las emisiones. El propósito de este factor es tomar en cuenta el hecho de que la mayor parte de los equipos o sistemas de control no logran reducir las emisiones de contaminantes hasta los niveles planeados en todo momento y en todas las condiciones. Las perturbaciones en el proceso, las fallas en el funcionamiento del equipo de control, los errores en su operación, el mantenimiento deficiente del equipo y otras actividades no rutinarias, son razones válidas para esperar que el desempeño del sistema de control sea inferior al óptimo. Ante la

carencia de información para este componente de la ecuación, se opta por emplear una fracción por omisión del 0.80 (igual a una efectividad del 80 por ciento), la cual fue establecida por la USEPA para estimar la efectividad de la regla requerida en algunas regiones de los Estados Unidos; sin embargo, la limitada exactitud de utilizar un solo valor por omisión para todas las categorías de fuente ha sido cuestionada y se sigue trabajando para definir los lineamientos para desarrollar factores de efectividad de la regla para cada tipo específico de fuente de emisión.

**Penetración de la Regla.** La penetración de la regla es el grado en el que una regulación abarca las emisiones de todas las fuentes dentro de una categoría. Por ejemplo, se puede hacer una regla que indique que sólo las fábricas de pinturas más grandes deben cumplir con los nuevos reglamentos de control. Si las emisiones de fuentes de área de todas las fábricas de pinturas se estiman en conjunto como una sola categoría de fuente, entonces se debe desarrollar un factor de penetración de la regla, ya que las fábricas medianas y pequeñas no estarán sujetas a la reglamentación.

**Ajuste Temporal.** Tradicionalmente, la mayor parte de los inventarios estiman emisiones anuales. Por lo tanto, todos los procedimientos, factores de emisión y de corrección, así como los niveles de actividad utilizados en el inventario de emisores, han sido desarrollados para representar condiciones anuales promedio. Para determinadas actividades de planeación de la calidad del aire deben hacerse ajustes temporales a las estimaciones anuales de emisiones, empleando la información correspondiente a los meses o periodos críticos de emisión.

La modelación de la calidad del aire a nivel regional pueden requerir de niveles de emisión horarios. Los perfiles temporales por omisión (horas / día, días / semana, semanas / año) se utilizan con frecuencia para desarrollar estimaciones horarias a partir de estimaciones anuales.

**Porcentaje de Masa del Contaminante.** En algunos casos, el contaminante o grupo de contaminantes definido por un factor de emisión no es el mismo que el definido para el inventario de emisiones. Por ejemplo, varios compuestos orgánicos volátiles (COVs) son considerados fotoquímicamente no reactivos por la EPA y no se incluyen en los inventarios de emisiones de COVs. Muchos de los compuestos no reactivos son COVs halogenados que tienen sus principales aplicaciones como limpiadores de metales y de telas, refrigerantes y propelentes de productos en aerosol. Una importante categoría industrial que utiliza estos compuestos halogenados es la de desengrasado. En otro ejemplo, la gran mayoría de las emisiones de rellenos sanitarios son de metano, que no se

considera un COV. Dado que, hasta donde se conoce, las emisiones de estos diversos procesos están constituidas por COVs no reactivos, podrían ser excluidas de los inventarios de emisiones de hidrocarburos totales (HCT). De igual manera, los perfiles de material particulado (MP) que muestran datos sobre la distribución del tamaño de partícula, pueden ser utilizados para determinar el porcentaje de masa de las emisiones de partículas suspendidas totales (PST) que deberían incluirse en un inventario de partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros (PM10). El porcentaje de masa del contaminante también puede utilizarse para estimar las emisiones de una especie química determinada. Por ejemplo el porcentaje de berilio en las emisiones de partículas totales de las operaciones de extracción, o el porcentaje de benceno en las emisiones de COVs totales de un tanque de almacenamiento.

### 7.3 Muestreo en la fuente

Debido a la complejidad técnica del muestreo en la fuente se requiere de tiempo y equipo adecuado para obtener datos de emisiones que sean exactos y válidos para numerosos contaminantes de una fuente. En consecuencia, el costo de realizar un muestreo de este tipo en una planta puede ser muy alto. Sin embargo, si se aplica correctamente, este método puede proporcionar una mejor estimación de las emisiones de una fuente que los factores de emisión o los balances de materiales. El uso de datos de muestreo en la fuente reduce el número de suposiciones relacionadas con la aplicabilidad de factores de emisión generalizados, las eficiencias del equipo de control de contaminación del aire, las variaciones del equipo, o las características del combustible que son aplicadas a tipos similares de fuentes de emisión para estimar las tasas de emisión de los contaminantes.

#### 7.3.1 Información General

El propósito de cualquier programa de muestreo en la fuente es determinar la concentración del contaminante en una corriente de gas ó la tasa de emisión del contaminante de una chimenea o punto de descarga de un proceso industrial. Midiendo la concentración del contaminante en un volumen conocido de gas y determinando la tasa de flujo del gas en una chimenea es posible calcular la tasa de emisión en masa del contaminante.

Los muestreos en la fuente de emisión, se integran con mediciones de corto plazo que, por lo general, se realizan tiempos de una a cuatro horas. Para

recolectar una muestra representativa deben hacerse al menos dos muestreos en la chimenea o en el punto de descarga para cada contaminante de interés bajo condiciones de operación definidas. Las variaciones en la operación del proceso durante el muestreo pueden incorporar un alto grado de variabilidad en los resultados del muestreo. Por lo tanto, los parámetros claves de la operación de un proceso que pueden afectar las emisiones de contaminantes de la fuente deben ser recopilados, a fin de correlacionar los resultados del muestreo con la operación del proceso.

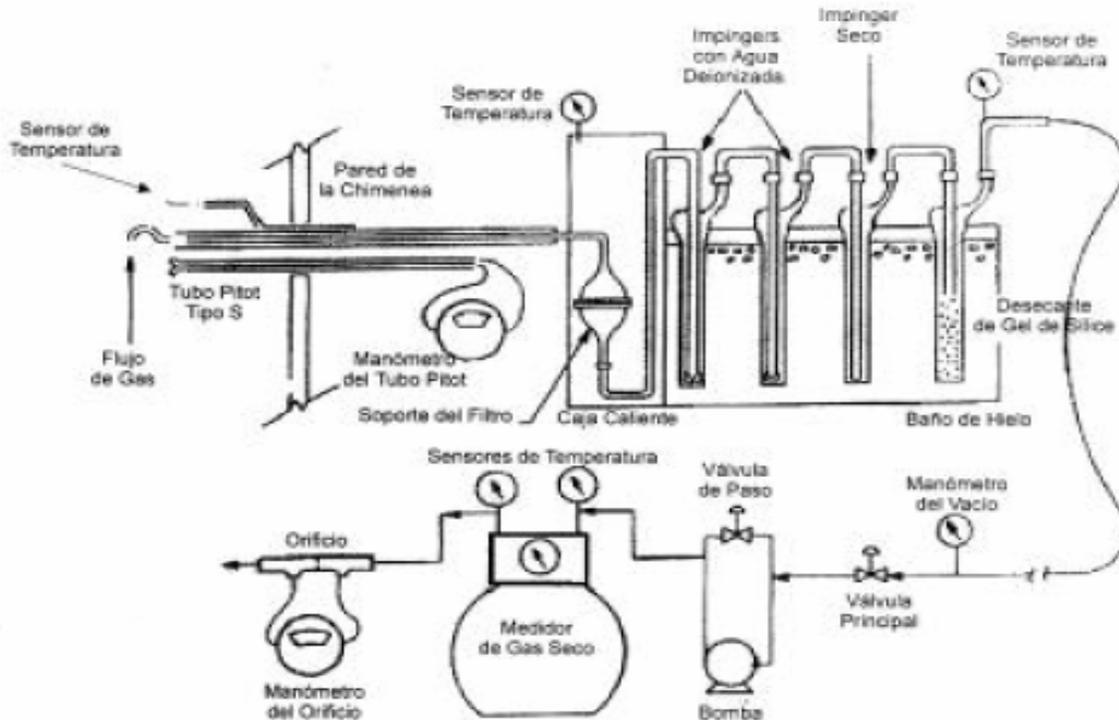
La recopilación de datos específicos del proceso también es importante para correlacionar las emisiones con la actividad del proceso y para desarrollar factores de emisión. Por ejemplo, si se emiten 0.5 kg/hr de NO<sub>x</sub> durante un muestreo en la fuente de cuatro horas en el cual se quemaron 400 litros de combustible, es posible determinar un factor de emisión de 0.005 kg de NO<sub>x</sub> por litro de combustible. Entonces este factor de emisión específico puede ser usado para estimar las emisiones de NO<sub>x</sub> de esta fuente, basándose en la cantidad de combustible quemado.

Los datos de muestreo en fuente deben usarse para estimar emisiones sólo si los datos se obtuvieron en condiciones representativas de la operación normal del proceso. Los datos de emisión determinados a partir de un muestreo en la fuente pueden extrapolarse para estimar las emisiones anuales de una fuente si la operación del proceso no varía de manera significativa. Si el proceso tiene variaciones considerables será necesario hacer varios muestreos para obtener resultados representativos. Si la operación de la planta no puede ser caracterizada de manera adecuada los datos del muestreo en la fuente no deben usarse para estimar las emisiones.

Los procedimientos para hacer los muestreos en la fuente se encuentran en diversos métodos de referencia (métodos de la EPA, 40 CFR 60). Los métodos de muestreo que describen procedimientos para tomas de muestra en períodos entre 1 y 4 horas se conocen como métodos manuales. Estos, en general, son específicos para un tipo de fuente (fuentes de combustión con combustibles fósiles, corrientes de gas combustible en refinerías de petróleo y generadores eléctricos de vapor) y para un contaminante específico (material particulado, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ácido sulfhídrico, plomo) o para una clase de compuestos (dioxinas, COVs). Los sistemas de muestreos por extracción para estos contaminantes consisten, por lo general, de una solución o un medio absorbente para capturar el contaminante, una bomba de vacío para extraer la muestra de gas a través de la solución o del medio filtrante y un medidor de gas

seco para medir el volumen de la muestra gaseosa. Debido a que se utilizan diferentes tipos de solución o de medio para absorber los diferentes contaminantes, el muestreo en la fuente para varios contaminantes (e. g., metales, partículas, dioxinas) es complejo, de mucho trabajo y costoso. En la

Figura 12, se muestra esquema de un sistema manual de muestreo utilizado para determinar las emisiones de partículas de una fuente estacionaria, conocido como tren de muestreo del Método 5.

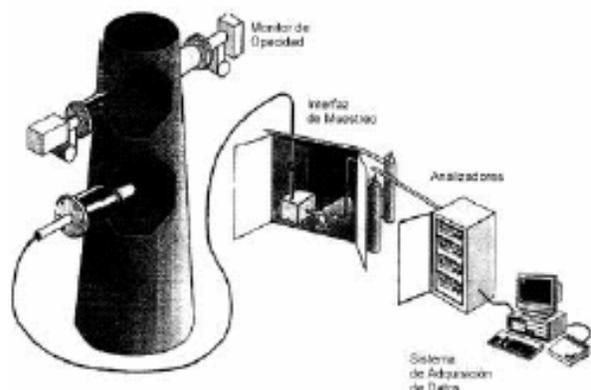


**Figura 12. Sistema de muestreo para partículas<sup>12</sup>.**

muestreo en la fuente (de 1 a 4 horas). Un sistema MCE consiste de una bomba para extraer la muestra gaseosa de la fuente, de una serie de instrumentos o de analizadores para analizar un contaminante específico en el gas y de un sistema de adquisición de datos para registrar la información con el tiempo. En la Figura 13 se muestra el esquema de un sistema MCE.

Una alternativa para el muestreo manual en la fuente es el monitoreo continuo de emisiones (MCE), que permite evaluar la variación del proceso con el tiempo. Mediante este sistema se utilizan instrumentos o monitores continuos de emisiones (MCEs), que permiten determinar en tiempo real, las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) e hidrocarburos totales (HCT), opacidad, ácido clorhídrico (HCl) y amoníaco (NH<sub>3</sub>).

Los MCEs pueden instalarse en la fuente de manera permanente para generar datos las 24 horas del día, o pueden usarse para el monitoreo de las emisiones durante un periodo definido de



<sup>12</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL3. diciembre 1996

**Figura 13. Sistema de monitoreo continuo de emisiones. (MCE)<sup>13</sup>**

**7.4 Factores de Emisión**

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una unidad de actividad industrial. Los factores de emisión se usan a menudo para calcular las emisiones cuando los datos de monitoreo de chimeneas específicos del sitio no están disponibles. Los factores de emisión, en general, se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en encuestas. Por lo general, los primeros se usan para desarrollar estimaciones de emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados de una encuesta o de un balance de materiales. Los factores de emisión basados en censos, por otro lado, se usan mucho para hacer estimaciones de emisiones de fuentes de área.

**7.4.1 Factores de Emisión Basados en Procesos**

Se han realizado varios programas de muestreo de fuentes para medir las tasas de emisión de ciertos dispositivos o procesos que se sabe que son fuentes de emisiones al aire. Puesto que con frecuencia no se requiere ni es económicamente factible hacer un muestreo en cada fuente de emisión, los resultados de muestreos de “fuentes representativas” se usan para desarrollar factores de emisión basados en procesos, para dispositivos o procesos similares. Estos factores se expresan en la forma general de masa de contaminante emitido por unidad de proceso. Entre las unidades de proceso más comunes se encuentran el consumo de energía, el rendimiento de materiales, las unidades de producción, el calendario de operación, o el número de dispositivos ó las características de éstos. (lb/MMBtu, lb/gal, lb/lote, lb/hr ó lb/pie<sup>2</sup> [área superficial]).

La fuente de consulta más empleada para factores de emisión basados en procesos, específicos para los Estados Unidos, es el documento “AP-42 *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (U.S. EPA, January 1995a)”. La referencia principal para factores de emisión de contaminantes tóxicos del aire es el sistema de datos “FIRE (U.S. EPA, 1995b)”.

<sup>13</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México,. VOL3. diciembre 1996

En el documento de guía “Rapid Source Inventory Technique” preparado para la OMS (WHO) (Economopoulos, 1993) se encuentran factores de emisión no específicos para los Estados Unidos para diversos conjuntos de fuentes. Este tipo de factores también se hallan en documentos de guía para inventarios de gases de invernadero “(Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 1993a y b)”.

A continuación se presentan algunos ejemplos de cálculos para estimaciones de emisiones utilizando factores de emisión basados en procesos.

Ejemplo 1:

Calcular las emisiones anuales de NO<sub>x</sub> de una caldera sin control en una planta termoeléctrica de (consumo de calor>100 millones de Btu/hr) que quema gas natural. El consumo anual de gas natural es de 50 millones de metros cúbicos.

FENO<sub>x</sub> = Factor de emisión para NO<sub>x</sub>.

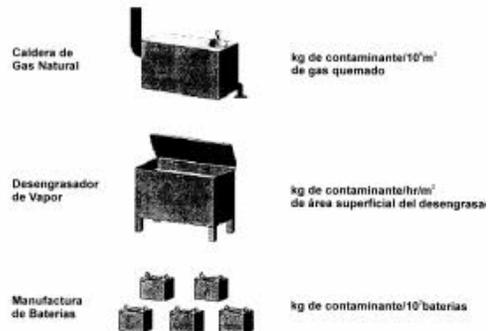
FENO<sub>x</sub> = 8800 kg/10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (valor tomado del AP-42, Tabla 1.4-2)

Qcomb. = 50x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/año.

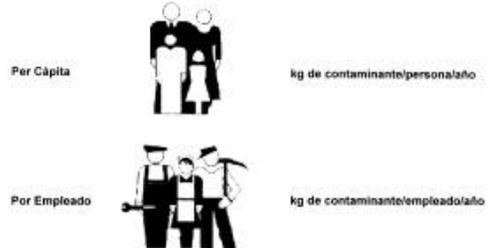
ENO<sub>x</sub> = FENO<sub>x</sub> x Qcomb.

= 8800 x 50 = 440,000 kg/año

**Factores de Emisión Basados en Procesos**



**Factores de Emisión Basados en Censos**



**Figura 14. Factores de emisión basados en procesos<sup>14</sup>.**

<sup>14</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México,. VOL3. diciembre 1996

Ejemplo 2:

Calcular las emisiones anuales de COVs de un desengrasador de vapor sin tapa y sin control. El solvente usado es 100% COV. El desengrasador tiene un área superficial de 5 metros cuadrados y opera 8 horas/día, 5 días/semana, 52 semanas/año.

FECOV = Factor de Emisión para COV's

FECOV = 0.7 kg/hr/m<sup>2</sup> (valor tomado del AP-42, Tabla 4.6-2)

A = 5 m<sup>2</sup>

Total de horas = 8 hrs/día x 5 días/sem x 52 sem/año = 2080 hrs/año

ECOV = FEcov x A x Total de horas

ECOV = 0.7 x 5 x 2080

ECOV = 7,280 kg/año

Ejemplo 3:

Calcular las emisiones de partículas del proceso de fundición de rejillas en la producción de baterías de plomo ácidas. Cada mes se producen veinte mil baterías.

Fepart = Factor de Emisión de Partículas.

Fepart. = 1.42 kg/10<sup>3</sup> baterías (valor tomado del AP-42, Tabla 7.15-1)

Qproduct = 20,000 baterías/mes x 12 meses/año

Qproduct = 240,000 baterías/ año

Epart. = Emisión de Partículas = FEpart. x Qproducto

Epart = 1.42 x 240

Epart = 341 kg/año

## 7.4.2 Factores de Emisión Basados en Encuestas

Las fuentes de área en ciertas categorías son difíciles de inventariar usando cualquiera de las metodologías antes presentadas. El uso de factores de emisión basados en censos es un método eficiente para tipos de fuentes emisoras dispersas y numerosas que no se pueden caracterizar rápidamente conociendo las tasas de proceso, de consumo de combustible y/o de alimentación de materiales. Comparadas con otras técnicas de estimación de emisiones el uso de factores de emisión basados en encuestas es la opción más "amigable" y más costo-efectiva dado que los datos de censos ya están disponibles en la mayor parte

de las regiones donde se hacen inventarios de emisiones. En Colombia, los datos de población y vivienda y los datos de empleo por sector económico y municipio están disponibles, en formato impreso y electrónico, a través del DANE o la DIAN.

La desventaja de usar factores de emisión existentes basados en encuestas es que la mayor parte de ellos fueron desarrollados en Estados Unidos o en Europa y es posible que no representen de manera adecuada las condiciones socioeconómicas y nuestras prácticas de control.

Asimismo, es importante recordar que los factores de emisión basados en encuestas son más exactos cuando se aplican a toda la región para la que el factor de emisión fue desarrollado que cuando se aplica a regiones más pequeñas. Por ejemplo, el factor específico de emisión de aerosoles por persona desarrollado para Bogotá D.C, es un factor de emisión "promedio" para todo el país.

En general, los factores de emisión por empleado son más exactos que los factores de emisión por persona dado que los niveles de empleo más altos reflejan un crecimiento económico y más específicamente, tienden a reflejar aumentos en los niveles de la actividad generadora de contaminación. Sin embargo, se debe tener cuidado de eliminar los datos de empleo asociados con trabajos que no son de manufactura, dado que no es probable que contribuyan de manera significativa a los niveles de actividades generadoras de contaminación. Como mínimo, se debe hacer un esfuerzo para eliminar los datos de empleo asociados con los locales de la empresa que sean oficinas administrativas más que plantas de producción.

### 7.4.2.1 Factores de Emisión Por Persona

La evaporación de solventes de los productos comerciales y de consumo tales como ceras, productos en aerosol y limpiadores de ventanas no puede ser determinada de manera rutinaria para muchas fuentes locales por la Autoridad ambiental local. Además, probablemente sería imposible hacer una encuesta que arrojara este tipo de información. Al utilizar factores por persona se supone que las emisiones en un área dada pueden asociarse con la población de manera razonable. Esta suposición es válida en áreas extensas para ciertas actividades como tintorerías, pintura de superficies arquitectónicas, pequeñas operaciones de desengrasado y evaporación de solventes de productos domésticos y comerciales.

Los factores de emisión por persona no se deben desarrollar ni utilizar de manera indiscriminada para aquellas fuentes cuyas emisiones no se correlacionan bien con la población. Por ejemplo,

las industrias grandes y concentradas como son las plantas petroquímicas, no deben inventariarse usando factores de emisión por persona.

A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de una estimación de emisiones desarrollada utilizando factores de emisión por persona.

Ejemplo 4:

Calcular las emisiones de COVs en el año 2000 causadas por el uso doméstico de aerosoles en el sector de Fontibón. Suponer que el contenido de COVs en los aerosoles es del 69%. En el 2000 la población se estimó en 642,753 habitantes.

$$FE_{COV} = 0.046 \text{ kg/persona/año} \times 69\% \text{ VOC.}$$

$$FE_{COV} = 0.032 \text{ kg/persona/año}$$

$$PFONTIBÓN = 642,753 \text{ habitantes}$$

$$ECOV = EFVOC \times PFONTIBÓN$$

$$ECOV = 0.032 \times 642,753$$

$$ECOV = 20,568 \text{ kg/año}$$

#### 7.4.2.2 Factores de Emisión por Empleado

Este enfoque utiliza los datos de empleo más que los de población como indicador del nivel de la actividad sustituta. En general, los factores de emisión por empleado se usan para estimar las emisiones de aquellas categorías de fuente a las que se ha asignado una clave CMAP y para las que existen datos de empleo disponibles a nivel local (en general, por CMAP). Con frecuencia, esto representa el desarrollo de las categorías CMAP apropiadas. En la mayor parte de los casos, una gran fracción de las emisiones de COVs dentro de un CMAP se calculan usando los procedimientos de fuentes puntuales, por lo que, el enfoque de factores de emisión por empleado puede ser considerado como un procedimiento secundario para cubrir las emisiones de fuentes que están por debajo del límite inferior de corte para fuentes puntuales.

El siguiente ejemplo de cálculo presenta una estimación de emisiones desarrollada usando factores de emisión per cápita.

Ejemplo 5:

Calcular las emisiones anuales de COVs de lavanderías y tintorerías comerciales en la Ciudad de Bogotá D.C. el inventario de fuentes de área. Suponer que los solventes para el lavado en seco son 100% COVs. Suponer que los registros de empleo para la Ciudad de Bogotá D.C muestran que existen 3,000 empleados en el código CMAP

apropiado. Suponer que 1,000 de estos empleados trabajan en establecimientos que están incluidos en el inventario de emisiones de fuentes puntuales

$$FE_{COVs} = 2,937 \text{ kg/empleado/año (EPA-450/4-91-016)}$$

$$Etintorerías = 3,000 \text{ empleados totales} - 1,000 \text{ empleados de fuentes puntuales}$$

$$= 2,000 \text{ empleados de fuente de área}$$

$$ECOV = FE_{COV} \times Etintorerías$$

$$= 2,937 \times 2,000$$

$$= 5,874,000 \text{ kg/año}$$

### 7.5 Balance de Materiales

El balance de materiales (también conocido como balance de masa), es un método muy utilizado para estimar las emisiones de muchas categorías de fuentes. El método de balance de materiales puede usarse en los casos en que no hay datos disponibles de muestreos en la fuente, factores de emisión u otros métodos desarrollados.

Para algunos tipos de fuentes de emisión, un balance de materiales es el único método práctico para estimar las emisiones con exactitud. Por ejemplo, en muchos casos el muestreo en la fuente de emisiones de COVs de bajo nivel, intermitentes o fugitivas puede ser muy difícil y costoso.

El uso de un balance de materiales implica el análisis de un proceso para determinar si las emisiones pueden ser estimadas solamente con el conocimiento de los parámetros específicos de operación y de las composiciones de los materiales. Si bien el balance de materiales es una herramienta valiosa para estimar las emisiones de muchas fuentes, su aplicación requiere que se conozca en buena medida el material que está siendo "balanceado" en cada punto a lo largo del proceso. El uso del balance de materiales es muy adecuado en los casos en que pueden hacerse mediciones exactas de todos los componentes, excepto las emisiones al aire. Si no se cuenta con esta información y, por lo tanto debe suponerse, se podrían generar serios errores.

En el inventario de emisiones de COVs, se usa por lo general un balance de materiales generalmente para estimar las emisiones de las fuentes de emisión de evaporación de solventes. Esta técnica es aplicable de igual manera tanto para las fuentes puntuales como para las de área. En las fuentes puntuales se puede usar a nivel de dispositivo o de planta, mientras que en el caso de las fuentes de área el balance de materiales podría aplicarse a nivel regional o nacional. La Figura 15 ilustra algunos ejemplos del uso de balance de materiales

para fuentes puntuales. El método más simple de balance de materiales es suponer que todo el solvente consumido por un proceso se evapora durante éste. Por ejemplo, es razonable suponer que durante muchas operaciones de pintura de superficies todo el solvente en la pintura se evapora a la atmósfera durante el proceso de secado. En tales casos, las emisiones simplemente son iguales a la cantidad de solvente aplicado en la pintura (y en los adelgazadores añadidos) como una función del tiempo.

En otro ejemplo, se puede considerar una lavandería que usa solvente Stoddard como agente para lavar. Para estimar las emisiones, la agencia sólo necesita deducir la cantidad de solvente adquirido en cada planta durante el intervalo de interés, porque se supone que las emisiones son iguales a la cantidad de solvente comprado. La suposición de que el solvente de reemplazo es igual a las emisiones también se mantiene en algunas situaciones más complicadas. Si se emplea un sistema de control no destructivo como un condensador o un absorbedor, esta suposición es válida en la medida que el solvente captado sea reincorporado al proceso de producción.

De manera similar, esta suposición será aplicable si en la planta se practica la recuperación de solvente residual ya sea por destilación o por reducción o sequedad. Ambas prácticas reducen los requerimientos de solvente de reemplazo en una operación y, por lo tanto, la cantidad de solvente que se pierde hacia la atmósfera.

Los métodos de prueba que están disponibles son publicados a través de la "American Society for Testing and Materials (ASTM)" (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) y se han enfocado en proporcionar información sobre balance de materiales y determinaciones gravimétricas para varios procesos industriales (ASTM, Volúmenes 06.01 y 15.05). En general, el uso de un balance de masa o de materiales para determinar las emisiones totales de un proceso es sencillo y de costo razonable.

COV que entra (lb/gal) - COVpintura mezclada (lb/gal) = COVemitidos (lb/gal)

En otro ejemplo, el análisis del combustible puede usarse para estimar las emisiones de contaminantes con base en la aplicación de las leyes de conservación. La presencia de ciertos elementos en los combustibles puede usarse para predecir su presencia en las corrientes de emisión. Esto incluye elementos tóxicos tales como los metales que se encuentran en el carbón así como otros elementos como el azufre que puede ser convertido en otros compuestos durante el proceso de combustión. La ecuación básica que se usa en

los cálculos de emisiones a partir del análisis de combustible es:

$$E = Q_{comb} \times C_{cc} \times \frac{MW_{ce}}{MW_{cc}}$$

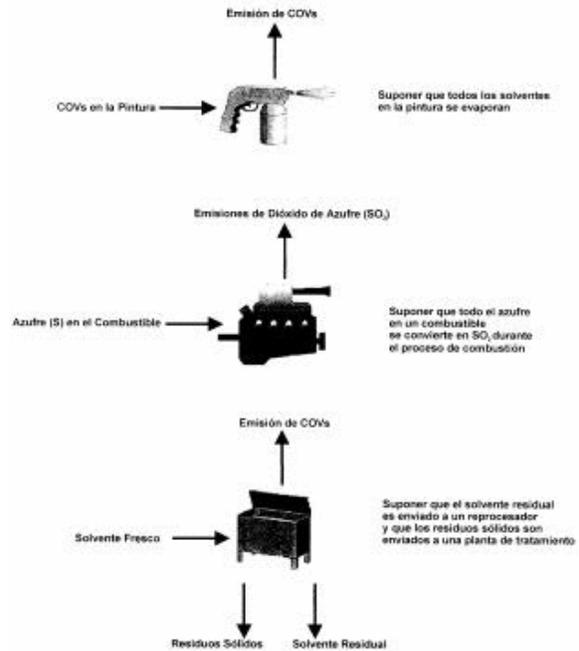


Figura 15. Ejemplo de balance de materiales<sup>15</sup>.

Donde:

**Q<sub>comb</sub>** = Consumo de combustible, tasa de masa (kg/hr).

**C<sub>cc</sub>** = Concentración del contaminante en el combustible.

**MW<sub>ce</sub>** = Peso molecular del contaminante emitido (lb/lb-mole)

**MW<sub>cc</sub>** = Peso molecular del contaminante en el combustible (lb/lbmole)

Por ejemplo, las emisiones de SO<sub>2</sub> de la combustión de un combustible líquido, pueden calcularse basándose en la concentración de azufre en el combustible.

En este enfoque se supone una conversión completa del azufre a SO<sub>2</sub>. Por lo tanto, por cada libra de azufre (PM = 32 g) quemado se emiten dos libras de SO<sub>2</sub> (PM= 64 g).

En los ejemplos anteriores el balance de materiales se simplifica porque se supone que todo el material que se está balanceando es emitido a la atmósfera.

<sup>15</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México,. VOL3. diciembre 1996

Existen situaciones en las que esta suposición no siempre es razonable. Por ejemplo, si se usa un sistema de control destructivo, como un postquemador, un incinerador o una unidad de oxidación catalítica en el escape del proceso, cualquier emisión de COVs será destruida o alterada de modo que no sería posible suponer las características y cantidades de COVs que queden, sin analizar en la corriente gaseosa que sale del proceso.

Como ejemplo tenemos, las emisiones del desengrasado no son iguales al consumo de solvente, si el solvente residual es vendido a un reciclador comercial. En esta situación las emisiones serán la diferencia entre el solvente consumido y el solvente enviado a reprocesamiento. En un ejemplo más, se cree que alguna fracción del diluyente usado para licuar asfalto rebajado es retenida en el pavimento y no se evapora después de la aplicación.

Ejemplo 6:

Calcular las emisiones de SO<sub>x</sub> por hora (reportado como SO<sub>2</sub>) de una máquina de combustión interna que quema combustible diesel, con base en los datos del análisis del combustible (el contenido de azufre). El consumo estimado de combustible es de 150 litros/hr. La densidad del diesel es de 0.85 kg/litro (7.1 lb/gal). El contenido de azufre en el diesel es 0.05% en masa.

$$Q_{\text{comb.}} = 150 \text{ litros/hr} \times 0.85 \text{ kg/litro} = 127.5 \text{ kg/hr}$$

$$CS = 0.05/100$$

$$= 0.0005$$

$$E_{\text{SO}_2} = Q_{\text{comb.}} \times CS \times (\text{MW}_p / \text{MW}_f)$$

$$E_{\text{SO}_2} = 127.5 \times 0.0005 \times (64/32)$$

$$E_{\text{SO}_2} = 0.13 \text{ kg/hr}$$

El ejemplo anterior muestra que, en algunos casos el suponer la evaporación total de todo el solvente consumido resultaría en una sobreestimación de las emisiones. Por lo tanto, los balances de materiales también pueden usarse junto con

factores de emisión basados en el proceso para estimar las emisiones. Estos balances serían como aquellos que se basan en la diferencia entre la materia prima y el producto cuando el factor de emisión para un proceso está dado por unidad de material consumido.

Por ejemplo, se puede hacer balances de materiales para calcular las emisiones de fuentes de área que incluyan la manufactura, distribución y consumo de combustibles (ver Figura 16). Recientemente se aplicó en EU un balance de materiales para la distribución y consumo de combustibles (De Luchi, 1993). Un balance de materiales a nivel nacional para solventes en pinturas podría ser también el mejor método para estimar las emisiones de COVs de esta categoría de fuentes o de la aplicación de plaguicidas.

Ejemplo 7:

Calcular las emisiones mensuales de COVs de un desengrasador de vapor. Cada mes, se añaden 100 litros de solvente al inicio del mes. A principios de mes, se añaden otros 20 litros para rellenar las pérdidas. A fin de mes, se envían 100 litros de solvente residual a un reciclador y 0.2 kg de residuos sólidos son recolectados para disposición final. El solvente es 100% COVs. El solvente residual es 98% COVs. El residuo sólido es 5% COVs. La densidad del solvente es de 1.5 kg/litro.

$$Q_{\text{solvente}} = (100 \text{ litros/mes} + 20 \text{ litros/mes}) \times 1.5 \text{ kg/litro}$$

$$Q_{\text{solvente}} = 180 \text{ kg/mes}$$

$$Q_{\text{residual}} = (100 \text{ litros/mes} \times 1.5 \text{ kg/litro} \times 98\% \text{ VOC}) + (0.2 \text{ kg/mes} \times 5\% \text{ VOC})$$

$$Q_{\text{residual}} = 147 \text{ kg/mes} + 0.01 \text{ kg/mes}$$

$$Q_{\text{residual}} = 147 \text{ kg/mes}$$

$$E_{\text{COV}} = Q_{\text{solvente}} - Q_{\text{residual}}$$

$$E_{\text{COV}} = 180 - 147$$

$$E_{\text{COV}} = 33 \text{ kg/mes}$$

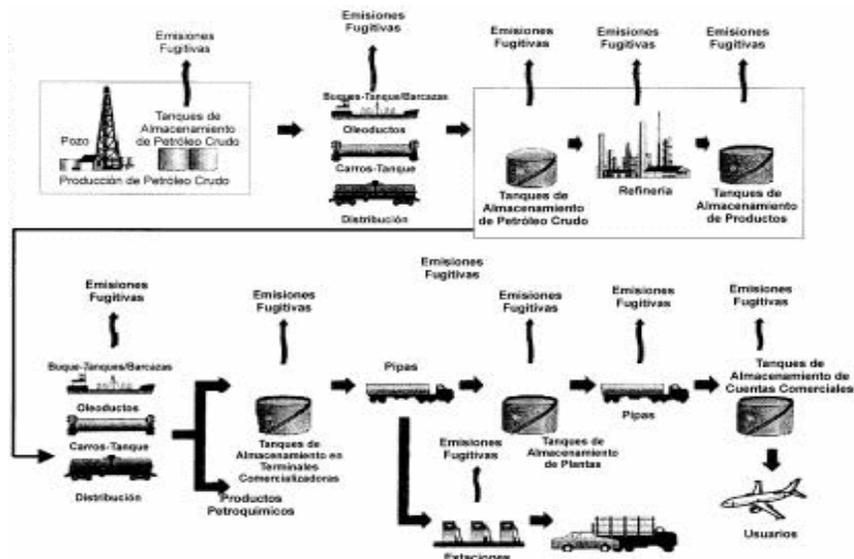


Figura 16. Ejemplo de balance de materiales resaltando las emisiones fugitivas<sup>16</sup>.

Hay otras situaciones que pueden complicar el balance de materiales. En primer lugar, no todas las pérdidas de solventes de ciertas operaciones como el lavado en seco o el desengrasado, se dan en el sitio de la planta. En cambio se pueden evaporar, cantidades significativas de solventes en el sitio de disposición del solvente residual, a menos que sea incinerado o dispuesto en una manera que impida la subsecuente evaporación a la atmósfera. En general, se puede suponer que gran parte del solvente enviado a sitios de disposición se evaporará. La Autoridad ambiental debe determinar si una parte del solvente asociado con varias operaciones se evapora en el punto de disposición más que en el punto de uso, ya que estas pérdidas pueden presentarse fuera del área cubierta por el inventario.

No se pueden emplear balances de materiales en algunos procesos de evaporación debido a que la cantidad de material perdido es demasiado pequeña para ser determinada con exactitud usando los procedimientos de medición convencionales. Por ejemplo, la aplicación de balances de materiales a los tanques de almacenamiento de productos del petróleo no es factible, por lo general debido a que las pérdidas por respiración y por operación son demasiado pequeñas con respecto a la capacidad total promedio o a la producción para ser determinadas a partir de los cambios en la cantidad de material almacenado en cada tanque. En estos casos, deben aplicarse las ecuaciones de emisión del AP-42, desarrolladas por procedimientos especiales. En resumen, con excepción de algunos tipos de fuente tales como los ejemplos de uso de

combustibles y de solventes presentados anteriormente, no se recomienda un enfoque de balance de materiales como el método principal para la estimación de emisiones. El balance de materiales debe ser utilizado más bien como un método de "arriba hacia abajo" para evaluar qué tan razonables son las estimaciones de emisión generados al usar otras técnicas.

## 7.6 Extrapolación

Las técnicas de extrapolación pueden usarse para calcular emisiones directamente y para verificar las estimaciones de emisiones calculadas con otros métodos. La Figura 17 ilustra el concepto general de la extrapolación de emisiones. En general, la extrapolación de emisiones de una región geográfica a otra se considera como el enfoque menos deseable para la estimación de emisiones.

Este enfoque puede no tomar en cuenta de manera apropiada algunas diferencias importantes entre dos regiones y puede propagar los sesgos de un inventario a otro. Sin embargo, cuando se combina con un marco de modelado, la extrapolación es un enfoque práctico y costo-efectivo para desarrollar estimaciones de emisiones para aquellas regiones en las que la información no es suficiente para soportar metodologías de estimación más rigurosas. El resto de esta sección presenta algunos ejemplos sobre la manera en que la extrapolación puede usarse para desarrollar estimaciones de emisiones.

En primer lugar, los datos de emisiones de un tipo de proceso o de planta, pueden ser extrapolados a

<sup>16</sup>LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL3. diciembre 1996

tipos de fuente o de planta similares. Este tipo de extrapolación se usaría para hacer estimaciones de emisiones de fuentes puntuales. En otros casos si se puede argumentar que las condiciones socioeconómicas entre dos o más regiones geográficas son comparables los datos disponibles de emisiones de fuentes de área para una región pueden ser extrapolados a las demás regiones basándose en datos de población y de empleo.

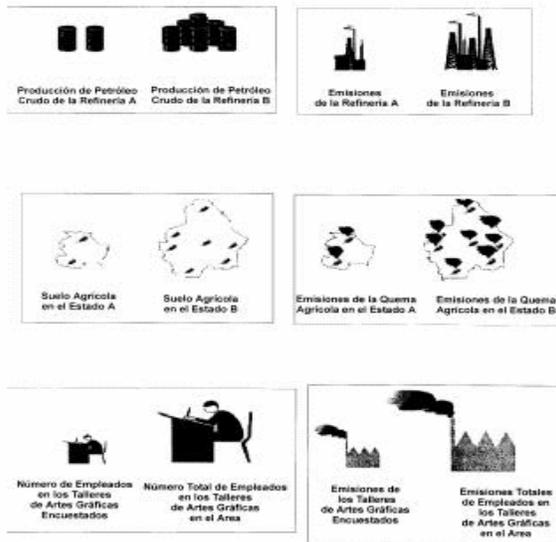


Figura 17. Ejemplos de extrapolación<sup>17</sup>.

Los inventarios de emisiones generados en EU y en Europa pueden usarse de esta manera. En Colombia, los inventarios de emisiones que se están desarrollando para zonas como Bogotá D.C se pueden usar como base para el aseguramiento de calidad y/o para desarrollar partes de los inventarios de emisiones de otras regiones.

**Ejemplo 8:**

Con base en los cálculos detallados de emisiones para la Refinería A se estima que las emisiones anuales totales de COVs son de 100 toneladas (métricas). La compañía acaba de adquirir una planta más pequeña, la Refinería B, que procesa el equivalente a la mitad del petróleo crudo de la Refinería A. Para la reunión de mañana, el presidente de la compañía desea una estimación del costo total asociado con las emisiones permitidas de COVs. Puesto que no hay tiempo para hacer cálculos detallados de emisiones para la Refinería B, estimar las emisiones de COVs extrapolando los datos de la Refinería A con base en las capacidades de las refinerías (i. e., la cantidad de petróleo crudo procesado).

$$ECOV_b = \frac{ECOV_a \times PCRUDOb}{PCRUDOa}$$

$$= 100 \text{ toneladas/año} \times \frac{1}{2}$$

$$= 50 \text{ toneladas/año}$$

**Ejemplo 9:**

Basándose en una encuesta se estima que las emisiones totales anuales de COVs de la quema agrícola en el departamento A, son de 50 toneladas (métricas). No hay recursos para financiar una encuesta similar en el departamento B. Puesto que las condiciones agrícolas son muy semejantes en el Departamento B (similares cultivos, métodos agrícolas, etc.), estimar las emisiones de COVs extrapolando los datos del departamento A, con base en la superficie del suelo agrícola en cada departamento. Los mapas de uso de suelo muestran 400,000 m<sup>2</sup> de suelos agrícolas en el Estado A, y 50,000 m<sup>2</sup> en el departamento B.

$$ECOV_b = \frac{ECOV_a \times ASAb}{PSAa}$$

$$= 50 \text{ toneladas/año} \times \frac{50,000}{400,000}$$

$$= 6.25 \text{ toneladas/año}$$

Este enfoque también puede usarse cuando la agencia encuesta solamente una fracción de las fuentes de área dentro de una categoría dada. En este caso se usa el empleo como indicador para "escalar" el inventario para contabilizar de manera colectiva las fuentes de emisión y las emisiones en el inventario de fuentes de área. Para calcular estimaciones de emisiones se pueden usar otros parámetros distintos al empleo, tales como los datos de ventas o el número de plantas. Sin embargo, el empleo es por lo general el parámetro más fácilmente disponible.

**Ejemplo 10:**

Se está realizando una encuesta para recopilar las estimaciones de emisiones de COVs de pequeños talleres de artes gráficas de Rionegro para usarlos en el inventario de fuentes de área de la Ciudad de Bogotá D.C. Debido a las limitaciones en los recursos, el cuestionario fue enviado solamente a algunos de los talleres en Rionegro y no todos los que están incluidos en la lista de distribución devolvieron el cuestionario. Las emisiones totales anuales de COVs reportadas en los cuestionarios son de 100 toneladas (métricas). Dado que no existen recursos para encuestar a cada pequeño taller de artes gráficas, estimar las emisiones de COVs en Rionegro extrapolando (i. e., escalando) las emisiones de COVs recopiladas con base en el empleo. Los registros de empleo disponibles muestran que 500 personas en Rionegro trabajan en la industria de las artes gráficas y los cuestionarios muestran que un total de 125 personas trabajan en los talleres que llenaron las formas de la encuesta.

<sup>17</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL3. diciembre 1996

$$ECOV_{cov} = \frac{ECOV_{SUR} \times PCOV}{P_{sur}}$$

$$= 100 \text{ toneladas/año} \times 500/125$$

$$= 400 \text{ toneladas/año}$$

Ejemplo 11:

Con base en una encuesta de un subconjunto de casas que utilizan gas LP el uso anual promedio de gas LP es de 1,000 litros/año. Datos disponibles de censos indican que hay 500,000 casas en la región y que el 90% de ellas usan gas LP como combustible doméstico. Estimar las emisiones totales de NOx provenientes del uso doméstico de gas LP en la región.

$$QLPG = 1,000 \text{ litros/casa/año} \times 500,000 \text{ casas} \times 90\%$$

$$= 450 \text{ millones de litros/año}$$

(AP-42, Sección 1.5)

$$FENox = 1.7 \text{ kg}/1,000 \text{ litros}$$

$$ENox = QLPG \times FENox$$

$$= (450 \times 10^6 \text{ litros/año}) \times (1.7 \text{ kg}/1,000 \text{ litros})$$

$$= 765,000 \text{ kg NOx/año.}$$

Ejemplo 12:

Con base en la encuesta de un subconjunto de plantas en que se fabrican productos de madera, el uso promedio de pintura por empleado es de 30 litros/año. El número total de empleados relacionados con la manufactura de productos de madera en la región es de 1,050, con base en datos de ACOPI. Adicionalmente, los resultados de la encuesta indican que la pintura promedio tiene una densidad de 1.4 kg/litro y un contenido de COVs del 45%, por peso. Estimar las emisiones de COVs totales de la manufactura de productos de madera en la región.

$$Q = 30 \text{ litros/empleado/año} \times 1,050 \text{ empleados}$$

$$= 31,500 \text{ litros/año}$$

$$FEcov = 1.4 \text{ kg/litro} \times 45\%$$

$$= 0.63 \text{ kg/litro}$$

$$Ecov = Q \times Efcov$$

$$= 31,500 \text{ litros/año} \times 0.63 \text{ kg/litro}$$

$$= 19,845 \text{ kg COV/año}$$

## 8.0. CONSIDERACIONES ESPECIALES QUE AFECTAN LAS EMISIONES DE LAS FUENTES FIJAS

Los factores tales como la variabilidad en los procesos, equipo y materias primas utilizadas dentro de la región donde el inventario es realizado, pueden conducir a variaciones en las emisiones. Por otro lado, algunas fuentes de emisión normalmente son pasadas por alto y omitidas sin quererlo de los inventarios. Estas dos situaciones especiales, que afectan el desarrollo de inventarios para fuentes puntuales, son discutidas a continuación.

### 8.1. Variabilidad por Diseño o Proceso

Muchos factores pueden influenciar las emisiones. Esta sección presenta algunos de los factores que pueden variar de un equipo a otro o de una región a otra. *El responsable del desarrollo del inventario debe estar al pendiente de estos factores y debe, en lo posible, recopilar información específica para el equipo o para la región.*

#### 8.1.1. Características de la Combustión

Los productos de la combustión derivados del consumo de combustibles pueden incluir hidrocarburos parcialmente oxidados, monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), óxidos de nitrógeno (NOx), ácidos como el ácido hidroclórico, organohálidos y partículas. La generación de los productos de la combustión está fuertemente influenciada por tipo de combustible y de horno, la configuración del incinerador y las condiciones de operación de la caldera. Si bien aquí no se presenta una descripción detallada de las operaciones de una caldera, sí se incluyen algunas observaciones generales para ayudar en el entendimiento de los impactos relativos de varios tipos de calderas y combustibles.

**Propiedades de los Combustibles:** Las cuatro clasificaciones primarias del carbón son: lignito, antracita, bituminoso y sub-bituminoso. El combustible está clasificado con base en métodos estándar referidos como análisis "aproximado" y "último". El primero revela la composición del combustible para ciertos parámetros tales como el contenido de humedad y de ceniza. El análisis último proporciona un estimado del contenido de carbón, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y agua en un combustible. Este análisis se utiliza para medir los requerimientos de combustión en términos de aire, y puede ser aplicado para calcular factores de combustible (F<sub>d</sub>) para determinar las tasas de flujo del escape. En general, el tamaño de la caldera, la configuración del incinerador y la

operación, tienen muy poco efecto sobre el porcentaje de conversión de azufre del combustible en óxidos de azufre, por lo que es relativamente fácil proyectar las emisiones de óxidos de azufre mediante el análisis del combustible.

El ejemplo 13 muestra la manera en que el análisis de combustibles puede ser utilizado para estimar emisiones de SO<sub>2</sub>.

Ejemplo 13:

Este ejemplo muestra cómo pueden calcularse las emisiones de SO<sub>2</sub> partiendo de la combustión de aceite basada en los datos del análisis de combustibles. Las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden ser calculadas utilizando la siguiente ecuación:

$$E = Qf \times C_{cc} \times \frac{MWp}{MWf}$$

Donde:

**E** = Emisiones.

**Qf** = Tasa de Flujo de Combustible.

**C<sub>cc</sub>** = Concentraciones de contaminantes en combustibles.

**MWp** = Peso molecular del contaminante emitido (g/gmole)

**MWf** = Peso molecular del combustible contaminante (g/gmole)

Para este ejemplo:

$$Qf = 2.09 \times 10^4 \text{ kg/hr}$$

$$\text{Porcentaje de azufre en combustible (\%S)} = 1.17$$

$$\text{MW del SO}_2 = 64$$

$$\text{MW del Azufre (S)} = 32$$

$$\text{ESO}_2 = Qf \times C_{cc} \times (MWp / MWf)$$

$$= (2.09 \times 10^4)(1.17 / 100)(64/32)$$

$$= 489.3 \text{ kg/hr}$$

**Condiciones de Operación:** En contraste, la formación de NO<sub>x</sub> depende en gran medida de las condiciones de la caldera, especialmente de la temperatura y la relación aire/combustible cerca de los quemadores. Los NO<sub>x</sub> son producidos por dos mecanismos: 1) la conversión del nitrógeno que salta del combustible; y 2) la oxidación del nitrógeno molecular del aire en combustión, referido como formación termal de NO<sub>x</sub>, que es altamente dependiente de la temperatura, y se incrementa si la temperatura excede 1,649°C (Buonicore, 1992). Si la temperatura de operación es menor, también lo es producción termal de NO<sub>x</sub>. Un tiempo de residencia menor también reduce el NO<sub>x</sub> termal

generado por calderas de aceite o carbón. Las emisiones de óxido de nitrógeno de una caldera de aceite tangencial son típicamente menores de las que resultan de unidades horizontalmente opuestas. Muchas calderas tienen modificaciones de combustión para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>, entre las que se incluye la combustión de etapa (stage combustion), calentamiento *off-stoichiometric*, recirculación de gases de combustión (FRG, por sus siglas en inglés), y quemadores de bajo NO<sub>x</sub> con aire de sobrecalentamiento (OFA). Estas estrategias de control pueden reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> entre el 5 y 50 por ciento (Buonicore, 1992).

### 8.1.2. Materias Primas

Además de los efectos que las propiedades de los combustibles pueden tener en los estimados de emisión, las propiedades físicas y químicas de otras materias primas usadas por una fuente puntual también pueden influenciar las emisiones. Por ejemplo, la densidad del material es aplicada con frecuencia para convertir el volumen de material usado en la masa de material usado.

Como ejemplo adicional, el contenido material de compuestos orgánicos volátiles (COVs) (i. e., g/L) es a menudo utilizado para estimar las emisiones de una operación de recubrimiento de superficies. Las propiedades físicas y químicas de algunas materias primas pueden variar a lo largo del país.

### 8.1.3. Prácticas de Operación

Las prácticas de operación pueden variar en diferentes regiones de Colombia y tener un impacto potencial en el desarrollo de las estimaciones de emisión. Muchas de las tecnologías, estándares de producción y prácticas de operación de las maquiladoras, por ejemplo, son importadas y reflejan prácticas industriales extranjeras. En general, las plantas industriales extranjeras están más automatizadas, mientras que las nacionales tienden a aplicar procesos manuales en mayor medida y, con frecuencia, está más basada los aspectos artesanales. Estas diferencias pueden provocar cambios en los estimados de emisión. Por ejemplo, el equipo automatizado para recubrimiento de superficies normalmente aplica una capa de recubrimiento más delgada que cuando se usa equipo manual.

### 8.1.4. Edad del Equipo

En Colombia, el sector manufacturero está compuesto por un número pequeño de grandes consorcios nacionales y compañías extranjeras, y un gran número de grandes medianas y microempresas. En general, las grandes instalaciones manufactureras han instrumentado procesos de producción limpios y competitivos, y usan equipo moderno. Por otra parte, las empresas

más pequeñas operan con equipo y tecnología más antiguos, y están consideradas como grandes consumidoras de energía y contaminadoras potenciales, a pesar de su menor tamaño.

La edad del equipo puede influenciar el desarrollo de estimados de emisiones de dos maneras. Primero, los equipos más modernos tienden a aplicar tecnologías diseñadas para reducir las emisiones. Por ejemplo, los Desengrasadores a Vapor de Bajas Emisiones (*Low Emission Vapor Degreasers, LEVDs*), recientemente diseñados, usan nuevas tecnologías tales como el aspirado total y las cámaras de remoción de grasa totalmente selladas, que reducen las emisiones de manera significativa, si se compara con los removedores convencionales. Segundo, la edad del equipo debe ser considerada al seleccionar un factor de emisión para una fuente dada. Para que el factor de emisión sea aplicable, la edad del equipo examinado debe ser similar a la edad del equipo con el que se desarrolló el factor.

#### **8.1.5. Datos Meteorológicos y Climatológicos**

Para estimar las emisiones de ciertas fuentes es necesario contar con información meteorológica y climatológica. Para ecuaciones de estimación de emisiones para tanques de almacenamiento, por ejemplo, se requieren parámetros tales como la temperatura ambiente promedio anual y la velocidad del viento. Por otro lado, puede mencionarse que la cantidad de combustible utilizado por los equipos de acondicionamiento de aire o calefacción varía de acuerdo con las condiciones del clima. Para obtener la información climatológica específica de cada región, deben utilizarse los reportes desarrollados por el IDEAM.

#### **8.2. Fuentes de Emisión Típicamente Omitidas**

Algunos procesos que emiten contaminantes atmosféricos de manera rutinaria son, con frecuencia, omitidos en los inventarios de emisiones. Los responsables del desarrollo de los inventarios deben estar enterados de estos procesos, y deben incluir las emisiones de las siguientes fuentes:

- Equipo de procesos alimentado con combustible.
- Componentes fugitivos.
- Equipo de control.
- Uso misceláneo de solventes.
- Vehículos en sitio.
- Aditivos del proceso.
- Instalaciones de almacenamiento.
- Manejo de materiales.

La responsabilidad de registrar adecuadamente esta información recae en quien prepare el inventario de emisiones. A continuación se discuten algunos ejemplos de los procesos típicamente omitidos y de ambigüedades en la clasificación del equipo.

#### **8.2.1. Equipo de Proceso Alimentado con Combustible**

Muchos procesos industriales de manufactura usan equipo alimentado con combustible. Los hornos de cemento, por ejemplo, utilizan secadores de producto que operan con combustible; así como los secadores de gas natural que se aplican en los procesos de recubrimiento. Las emisiones por el uso de combustibles dentro del proceso se estiman utilizando las mismas técnicas usadas para estimar las emisiones de otras fuentes de combustión, y deben incluirse en el inventario.

#### **8.2.2. Fuentes de Emisiones Fugitivas**

Existen diversas fuentes potenciales de emisiones por fugas en el equipo, que están asociadas con las industrias de aceite y gas, refinación de petróleo, y distribución de productos del petróleo. Componentes tales como bombas, válvulas, válvulas de presión, bordes, agitadores y compresoras son fuentes potenciales que pueden fallar debido a roturas en los sellos. Las emisiones fugitivas de los componentes ocurren en el equipo de proceso cuando hay escapes accidentales de líquido o gas. En general, estas emisiones se presentan en raras ocasiones y son difíciles de predecir; algunas veces son intermitentes y varían en intensidad a lo largo del tiempo. Por consiguiente, las mediciones de las emisiones que se fugan del equipo representan una sola imagen del proceso de fuga.

Otras fuentes, tales como las tuberías abiertas y conexiones de muestreo pueden tener fugas ocasionadas por situaciones diferentes a una falla en los sellos. La mayor parte de la información recopilada en los Estados Unidos para estimar las fugas de cierto equipo se ha centrado en la industria manufacturera química orgánica sintética, refinerías de petróleo, terminales de distribución de petróleo, plantas procesadoras de gas, y establecimientos de producción de gas y aceite, para los compuestos orgánicos totales y los compuestos orgánicos no de metano.

El *Protocolo para Estimados de Emisión por Fugas en Equipos* (U.S. EPA, 1995 c) es una buena referencia con respecto a los procedimientos y enfoques para estimar las emisiones de fugas en equipos. Estos pueden ir desde lo más sencillo (multiplicar el equipo por los factores de emisión promedio) hasta lo más complejo (desarrollar correlaciones de unidad específica entre las tasas

de emisión de masa y los valores de separación (screening)). Además de las fugas derivadas de componentes con fallas en el equipo, existen otras emisiones fugitivas diversas que podrían, en ciertos casos, ser identificadas como “fuentes puntuales”, que están asociadas con un proceso dado o una industria determinada. Los especialistas en inventarios de emisiones utilizan las listas publicadas para iniciar una lista de fuentes puntuales que posteriormente sea desarrollada con base en observaciones personales.

Algunos ejemplos de emisiones de procesos fugitivos que podrían ser agregadas incluyen vapores metalúrgicos producidos en operaciones de soldadura y herrería, emisiones de partículas provenientes de operaciones metal-mecánicas, o emisiones de amoníaco de servicios de impresión (por ejemplo, heliografía). El desarrollo del inventario debe buscar con prontitud las fuentes de emisiones fugitivas, e incluirlas para prevenir la subestimación de las emisiones.

### **8.2.3. Equipo de Control**

Debe tenerse cuidado al considerar la influencia que los equipos de control tienen en las emisiones, dado que, si bien son utilizados para reducir las emisiones, en ocasiones ellos mismos constituyen una fuente adicional de emisiones. El mejor ejemplo es el uso de reducción selectiva para controlar emisiones derivadas de la combustión. Este proceso se utiliza para controlar las emisiones de NO<sub>x</sub>, pero puede provocar emisiones de amoníaco debidas al “deslizamiento de amoníaco”, es decir, el exceso de amoníaco que no reacciona y es emitido directamente.

### **8.2.4. Uso Misceláneo de Solventes**

Con frecuencia, los solventes son utilizados para limpiar piezas de equipo antes del recubrimiento o de algún otro proceso de manufactura. Además de las tinas de desgrasado, donde las piezas son literalmente sumergidas en solvente, otros limpiadores pueden aplicarse utilizando pequeñas brochas o trapos. Las emisiones ocurren cuando estos solventes se evaporan, y deben ser cuantificadas usando la técnica de balance de materiales, e incluidas en el inventario de emisiones.

### **8.2.5. Emisiones Vehiculares en Sitio**

Los grandes complejos industriales en ocasiones poseen flotillas vehiculares utilizadas para transportar materiales, productos o personal dentro de sus instalaciones. Los vehículos mismos son fuentes de contaminantes relacionados con la combustión de NO<sub>x</sub> y CO en particular. Adicionalmente, si los calles dentro de la instalación no están pavimentadas, se genera el levantamiento

de partículas. La Autoridad Ambiental debe decidir si las emisiones vehiculares en sitio deben ser incluidas en el inventario de fuentes puntuales. Las emisiones provenientes de esta fuente son usualmente estimadas usando factores de emisión.

### **8.2.6. Aditivos del Proceso**

Cualquier químico que se agregue al proceso de producción o control tiene el potencial de ser emitido a la atmósfera. Ejemplos de estos tipos de fuentes incluyen al amoníaco inyectado al gas de flujo para controlar NO<sub>x</sub>, y los catalizadores usados en los procesos de reacción química. Las emisiones de estos procesos se estiman usando información producida en los exámenes en la fuente, factores de emisión, o técnicas de balance material, y deben ser incluidas en el inventario.

### **8.2.7. Pilas de Almacenamiento**

Las pilas de almacenamiento pueden ser una fuente de emisiones de partículas, especialmente si no se cubren adecuadamente o se controlan con algún otro método. Los materiales que pueden encontrarse en las instalaciones de almacenamiento incluyen: carbón en las plantas de generación eléctrica; rocas en plantas de producción de asfalto o concreto; y otros materiales almacenados en bultos. Estas fuentes tienen el potencial de generar emisiones significativas de partículas, y deben estar incluidas en el inventario. En este caso, las emisiones de partículas son estimadas aplicando factores o modelos de emisión.

### **8.2.8. Manejo de Materiales**

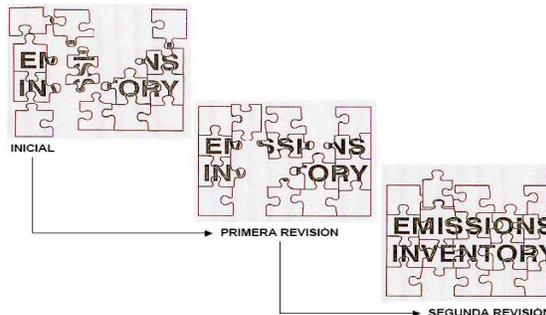
Los materiales transportados en camiones o vagones de ferrocarril, sin ser cubiertos de manera adecuada, también pueden producir emisiones de partículas. Dentro de un establecimiento, los materiales, tales como el carbón, que son transportados en bandas de transferencia o sistemas neumáticos, pueden provocar emisiones fugitivas de partículas. Al igual que en el caso de los establecimientos de almacenamiento, las emisiones de estas fuentes se estiman utilizando factores o modelos de emisión, y deben estar incluidas en cualquier inventario de emisiones.

## **9. ITERACIÓN DEL PROCESO DE INVENTARIO DE EMISIONES**

Los pasos técnicos para desarrollar un inventario de emisiones se mostraron antes en la Figura 1. Estos pasos comienzan con la identificación del propósito del inventario y terminan con la documentación de sus resultados. Es importante señalar que aún si todos los pasos en la Figura 1 se instrumentan apropiadamente durante el desarrollo del inventario, esto simplemente representa una iteración del

desarrollo del inventario de emisiones. Por lo general se requieren múltiples iteraciones para desarrollar inventarios de emisiones de alta calidad. Este concepto de iteración se representa por los rompecabezas de la Figura 18. Los primeros inventarios se caracterizarán por la información faltante y por otras imperfecciones, pero la calidad de los inventarios subsecuentes actualizados mejorará gradualmente.

La meta final es desarrollar un inventario de emisiones que sea completo, exacto y que contabilice las emisiones de contaminantes del aire y los datos asociados de las fuentes dentro de un área geográfica dada en un intervalo de tiempo específico. Sin embargo, las limitaciones prácticas hacen necesario un enfoque iterativo para alcanzar este objetivo. El desarrollo de un inventario, llevado en forma sistemática e iterativa a lo largo del tiempo, reducirá la cantidad de incertidumbre y mejorará la calidad global del inventario de emisiones.



**Figura 18. Iteraciones de un inventario de emisiones**<sup>18</sup>.

Un inventario de emisiones debe ser completo, lo que quiere decir que deben incluirse todas las fuentes de los contaminantes identificados del inventario. La limitación en los recursos puede reducir el número de fuentes inventariadas a un subconjunto de las fuentes totales existentes. De manera semejante, algunas fuentes de emisiones pueden ser ignoradas o pasadas por alto durante el proceso inicial del inventario. Las revisiones subsecuentes se usan para incluir las fuentes faltantes.

En la mayor medida posible, un inventario de emisiones también debe ser exacto. Los datos incorrectos o las suposiciones demasiado simplistas introducirán inexactitudes en el inventario.

Estas inexactitudes pueden ser corregidas en las iteraciones de inventarios posteriores con información más completa o mejorada. Finalmente, un inventario de emisiones debe representar las emisiones actuales. Algunas aplicaciones del inventario se actualizan cada año y requieren

información corriente para ese año específico. Estos inventarios se actualizarán anualmente para rastrear el incremento de emisiones debido al crecimiento en la actividad que las produce o la reducción debida a la instrumentación de diversas estrategias de control. Los datos y la información caducos deben ser actualizados en las iteraciones posteriores del inventario.

## 10. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD

Las actividades de aseguramiento de calidad son esenciales para el desarrollo de inventarios de emisiones completos y de alta calidad; y requieren la instrumentación de procedimientos de aseguramiento de calidad y control de calidad (AC/CC) a lo largo de todo el proceso de inventariado.

El aseguramiento de calidad es un sistema integrado de actividades que incluye la planeación, el control, la valoración, los reportes y mejoras de la calidad, que está diseñado para asegurar que el inventario cumpla con las metas u objetivos de calidad establecidos antes de su desarrollo. El control de calidad es el sistema general de actividades técnicas rutinarias diseñadas para evaluar y controlar la calidad del inventario conforme está siendo desarrollado.

El objetivo principal del sistema AC/CC para los inventarios de emisiones es la obtención de datos precisos, útiles y confiables.

La Figura 19 muestra los pasos básicos con respecto a los procedimientos AC/CC dentro del inventario de fuentes puntuales del INE. Para instrumentar los procedimientos AC/CC, los auditores del INE seleccionan aleatoriamente un establecimiento dentro de un grupo estratégico de sectores industriales. Posteriormente, el auditor obtiene una copia de la Encuesta Industrial que el establecimiento entregó al INE y efectúa una "revisión general", que consiste en el análisis de los datos presentados para verificar que estén completos y sean razonables. Más tarde, el auditor elabora una lista de los códigos del Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas (SNIFF) que, según su criterio, deben ser asignados a los datos presentados en la encuesta. Los códigos SNIFF asignados por el auditor se comparan con los códigos asignados por el INE en el momento en que los datos del cuestionario fueron capturados en los archivos del SNIFF, y se hacen las modificaciones pertinentes.

A continuación, el auditor analiza las "emisiones revisadas" reportadas por el establecimiento en la encuesta, y las compara con las emisiones calculadas usando una metodología estándar. En la encuesta, una planta debe, por ejemplo, presentar un estimado de emisiones basado en pruebas de

<sup>18</sup> LLC.Manuales del programa de inventarios de emisiones de México., VOL3. diciembre 1996

fuente, mismo que debe ser comparado con el estimado de emisiones desarrollado por el auditor, con base en el uso de combustibles y factores de emisión del documento AP-42. Si los resultados de estos dos enfoques son razonablemente consistentes, entonces el procedimiento AC/CC está completo. De lo contrario, se requiere que otras actividades AC/CC (por ejemplo una llamada de seguimiento al establecimiento o una revisión del auditor a los resultados de los datos de la fuente)

sean realizadas hasta que el auditor quede satisfecho con los estimados de emisión presentados ante el SNIFF.

Esta lista de revisión, diseñada para un inventario de precursores de ozono, incluye aspectos relacionados con el grado en que el inventario está completo, aplica los métodos aprobados y es razonable.

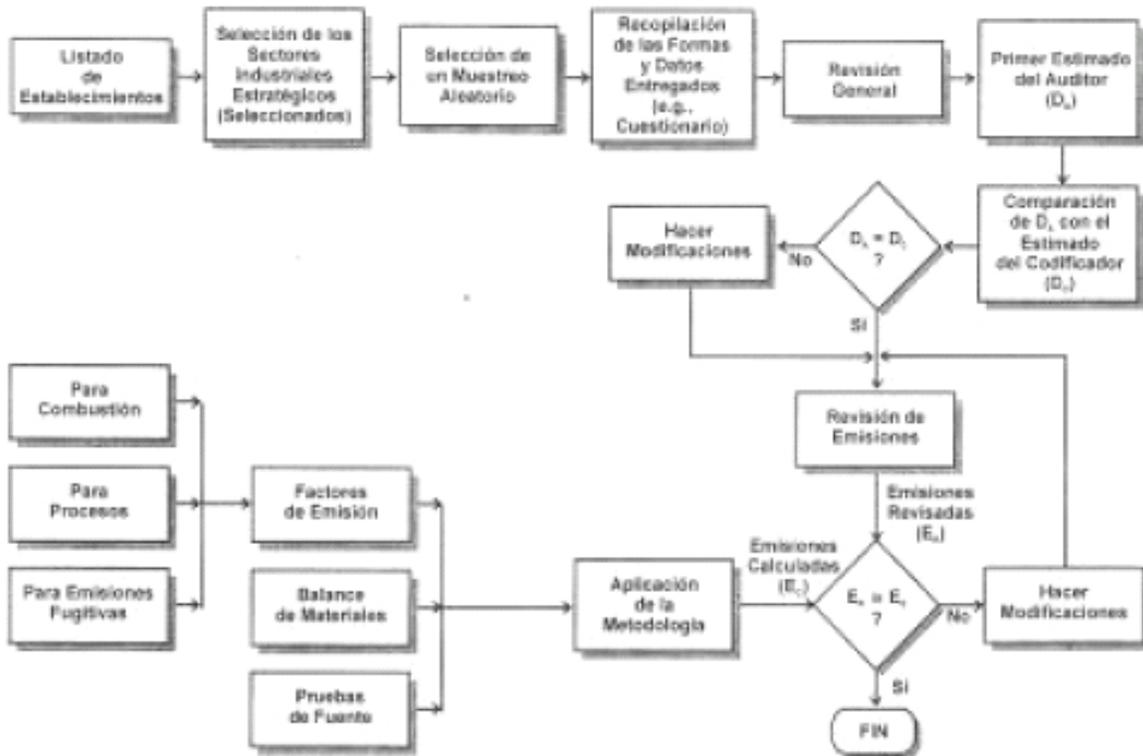


Figura 19. Procedimientos de AC/CC para el inventario de fuentes puntuales del INE.

### 10.1. Declaración de los Objetivos de Calidad de los Datos

El primer paso al planear un inventario es definir su propósito y uso. Esta información será aplicada, en su momento, para determinar tanto los objetivos de calidad de los datos (DQOs, por sus siglas en inglés) para el inventario, como los requerimientos AC/CC.

Los DQOs son declaraciones sobre el nivel de incertidumbre que un responsable de la toma de decisiones está dispuesto a aceptar. Su propósito es asegurar que los datos finales sean adecuados para el uso que se pretende darles. Las declaraciones DQO deben identificar el uso final o propuesto para los datos, así como el nivel anticipado de incertidumbre en los estimados de emisión. Es muy importante reconocer que los DQOs son específicos para cada método; están

basados en las posibilidades para una metodología dada y en la calidad de la información disponible.

Los responsables del desarrollo del inventario deben revisar los datos históricos. Es importante preguntarse qué problemas en el pasado han ocasionado una disminución de la calidad del inventario y si su resolución es posible. Si este programa es para una fuente o región que nunca ha sido inventariada, debe analizarse la información y las experiencias de esfuerzos similares.

Los DQOs deben ser analizados y redactados por adelantado. Una declaración sobre los objetivos de calidad de los datos debe incluir:

- Precisión (o incertidumbre) de los estimados de emisión.
- Nivel en el que los datos están completos.
- Representatividad.
- Grado de comparación.

A pesar de las mejores intenciones con que trabajan quienes preparan el inventario, es importante considerar las restricciones de tiempo, las limitaciones de recursos y la falta de datos. Los DQOs para el inventario deben ser realistas y considerar cualquier factor que pudiera limitar la calidad. El aspecto más importante es dedicar el tiempo necesario para asegurar la calidad del producto.

## 10.2. Indicadores de Calidad de la Información

Una vez que los DQOs han sido determinados, el siguiente paso, que con frecuencia es más difícil, consiste en identificar los indicadores de calidad de la información (DQIs) que se utilizarán para medir el avance en los DQOs, siendo preferibles las medidas cuantitativas (tales como los límites de confianza, sistemas de ordenamiento numérico o calificaciones). Cabe señalar que la instrumentación de estas medidas es todavía más compleja. Una alternativa es usar DQIs cualitativos, lo que puede hacerse mediante una discusión crítica y exhaustiva de las limitaciones y fortalezas del inventario. En última instancia, los medios de AC/CC dependerán de los métodos empleados para el inventario.

**Tabla 2. Métodos para Alcanzar los Objetivos de Calidad para los Datos del Inventario de Emisiones.**

Objetivo de calidad de los datos	Métodos
Asegurar la correcta instrumentación de los lineamientos del INE	Revisar la documentación del inventario comparando los procedimientos utilizados en la realidad con aquellos que son requeridos.
En los casos en que los lineamientos del INE no fueron utilizados o no estaban disponibles, determinar el sesgo evaluado que tan razonable fue el enfoque utilizado.	Revisión técnica del enfoque utilizado. Comparación de los resultados de otros métodos.
Asegurar la precisión de los datos de entrada.	Revisar la precisión de transcripción de los datos. Revisar cualquier factor de conversión utilizado. Determinar que tan razonables fueron los supuestos utilizados para calcular los datos de entrada. Verificar que la fuente de datos estuviera

	actualizada y fuera la mejor disponible.
Asegurar la precisión de los cálculos.	Repetir una muestra representativa (o todas) manualmente.
Determinar el grado de comparación y la representatividad del inventario.	Comparar las emisiones con otras de inventarios similares. Hacer una revisión cruzada de los datos comparándola con los datos oficiales.
Determinar el grado en que el inventario esta completo.	Comparar la lista de categorías de fuente o puntos de emisión con aquellos enlistados en los lineamientos del INE. Hacer una revisión cruzada con otros inventarios publicados, directorios industriales, etc.

Fuente: EIIP, Volumen IV, Tabla 7-1.

## 10.3. Procedimientos AC/CC para Métodos Específicos de Estimación de Emisiones

La siguiente sección contiene descripciones detalladas de los procedimientos AC/CC para técnicas específicas de estimación de emisiones, incluyendo pruebas de fuente, factores de emisión, balance de materiales y modelos de emisión.

### 10.3.1. Pruebas de Fuente

Actualmente existen descripciones completas sobre los procedimientos de muestreo en chimeneas, instrumentos y equipo de muestreo de fuente, identificación y manejo de muestras, análisis de laboratorio, uso de datos de las muestras y elaboración de reportes, que pueden encontrarse en muchas referencias bibliográficas, tales como los *"Guidelines for Assessing and Reporting Data Quality for Environmental Measurements"* (U.S. EPA, 1983) o el *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurements Systems : Volume III. Stationary Source Specific Methods* (U.S. EPA, 1984)". Estos documentos también contienen una discusión detallada sobre los cálculos de precisión requeridos y la interpretación de datos, los criterios específicos sobre datos inaceptables, así como los indicios de que un sistema está fuera de control. Además, el equipo encargado de la prueba debe desarrollar un Plan de Aseguramiento de Calidad antes de cada prueba de campo específica.

Una auditoria de sistemas en sitio debe conducirse, como una revisión cualitativa de los diversos

aspectos de un sistema de muestreo y/o análisis total, con el objetivo de evaluar su efectividad general. La auditoría de sistemas debe representar una evaluación objetiva de las fortalezas, debilidades y áreas de problemas potenciales de cada sistema. La auditoría proporciona una evaluación de la capacidad del sistema de medición completo para generar datos sobre calidad que sean adecuados, en términos de cantidad y calidad, para cumplir con los objetivos del programa.

Los criterios de aceptación, límites y valores para cada parámetro de control asociado con métodos de muestreo manual, tales como calibración métrica de gas seco y tasas de fuga, se resumen en la Tabla 3. Los procedimientos AC/CC asociados con el monitoreo continuo de emisiones (por ejemplo, calibración multi-punto de instrumentos, anulación de instrumentos y cálculo de la corriente) están contenidos en los métodos de referencia específicos (40 CFR, Parte 60, Apéndice A).

**Tabla 3. Resumen de los Criterios de Aceptación y Límites de Control para los Métodos de Muestreo Manual**

Parámetro o criterio	Límite de control y valores
TSP Isocinetica	100 ± 10%
PM <sub>10</sub> Isocinetica	100 ± 20%
DP <sub>50</sub> Tamaño calculado de corte	9-11 µg
Tasa de fuga final (después de cada puerto)	≤0.02 acfm o 4% de la tasa de muestreo, el que resulte menor.
Calibración seca del medidor de gas.	Factor post-promedio (Y) tolera ± 5% del pre-factor.
Factores individuales de corrección (Y <sub>i</sub> )	Queda dentro del 2% del factor promedio.
Factor de corrección promedio.	1.00 ± 1%
Medidor seco de gas intermedio.	Calibrado cada seis meses contra el estándar.
Balanza analítica (Top loader)	0.1 gramos de los clase C del National Bureau of Standard.
Peso constante del filtro.	Dos pesadas con una tolerancia de ± 0.5%

Fuente: EIIP, Volumen IV, Tabla 7-2.

### 10.3.1.2. Análisis del Error

El propósito de un análisis de error es identificar las fuentes de error, para evaluar la magnitud relativa de cada componente de error en los resultados, con el objetivo fundamental de minimizar los errores a través de esfuerzos AC/CC aplicados en los puntos de mayor impacto potencial. Las tasas de emisión de un contaminante particular son el producto del

gas de chimenea y de las medidas de muestreo, tales como concentración (g/dscm) y tasas de emisión (kg/hr). La magnitud de error en una concentración o tasa de emisión ocasionado por un error de medición puede ser calculada. El error relativo puede ser definido como:

$$\text{Error R} = \frac{(\text{Observado} - \text{Verdadero})}{\text{Verdadero}} \times 100$$

La Tabla 4 ilustra la manera en que los errores en las mediciones de gases de chimenea pueden afectar las concentraciones finales y los valores de emisiones. Los errores resultantes en las concentraciones y las tasas de emisión son causados por un error hipotético de medición aislado de +10 % en diversas medidas de muestreo de varias chimeneas. Las siguientes secciones muestran con mayor detalle cómo un error de medición puede afectar los parámetros medidos durante el muestreo de chimeneas.

**Tabla 4. Sensibilidad de los Resultados de las Pruebas de Emisión a los Errores Hipotéticos en las Mediciones Manuales**

MEDICION	ERROR OCASIONADO POR UN ERROR ± 10% EN LA MEDICION.	
	Error de concentración <sup>a</sup> (%)	Error en la tasa de emisión <sup>b</sup> (%)
D <sub>s</sub> Diámetro de la chimenea (metros)	0	21.0
Δp <sub>1</sub> Presión de la velocidad ( en H <sub>2</sub> O)	0	4.9
P <sub>estática</sub> Presión estática ( en H <sub>2</sub> O)	0	0.03
P <sub>bar</sub> Presión barométrica ( en Hg)	-9.0	-3.8
T <sub>s</sub> Temperatura de la chimenea ( F°)	0	-1.8
T <sub>m</sub> Metro-temperatura ( F°)	1.6	1.5
O <sub>2</sub> Medición de oxígeno (%V)	0	-0.03
CO <sub>2</sub> Medición de dióxido de carbono (%V)	0	-0.3
H <sub>2</sub> O Arrastre de agua (g)	0	-0.9
V Metro-volumen (m <sup>3</sup> )	-9.1	-8.3
ΔH, Metro-presión (en H <sub>2</sub> O)	-0.05	-0.04
Y, Metro-calibración	-9.1	-8.3

Análisis de contaminantes. (µg)	10	10.0
---------------------------------	----	------

a

Concentración del contaminante en el gas de la chimenea. Por ejemplo, un error del 10% en el diámetro de la chimenea medido no tiene efecto alguno sobre la concentración reportada.

b

Tasa de emisiones en masa por unidad de tiempo o actividad. Por ejemplo, un error del 10% en el diámetro de la chimenea medido, ocasiona un error del 1% en la tasa de emisión estimada.

Fuente: EIIP, Volumen IV, Tabla 7-3.

### 10.3.1.2. Flujo contra Diámetro de la Chimenea

La siguiente ecuación calcula el error en un flujo de gases de chimenea ocasionado por un error de medición en el diámetro de la chimenea:

$$ER = (2E_M + E_M^2)$$

donde:

ER = el error de tasa de flujo resultante (fracción)

E<sub>m</sub> = el error de medición del diámetro (fracción)

Si, por ejemplo:

E<sub>m</sub> = 10 %, entonces

ER = (2 x 0.1 + 0.12)

= 0.21 ó 21 %

### 10.3.1.3. Flujo contra Presión de Velocidad

La siguiente ecuación sirve para calcular el error en una tasa de flujo de gas de chimenea ocasionado por un error de medición en la presión de velocidad: Por consiguiente, un error de 10 % en la presión de velocidad tiene como consecuencia un error de 4.9 % en la medición de flujo.

### 10.3.2. Factores de Emisión

Los datos utilizados para desarrollar factores de emisión disponibles, por ejemplo, en el documento "AP-42 o en el *Factor Information Retrieval System* (FIRE)", se obtienen de pruebas de fuente, estudios de balance de materiales, y estimados ingenieriles. Los datos se obtienen a través de artículos y reportes, resultados e informes de exámenes reales, y comunicación personal.

Cada factor de emisión publicado en "AP-42 o en el FIRE" recibe una calificación de calidad, que sirve

como una evaluación del nivel de confianza que el generador de ese valor otorga a la precisión del factor de emisión. Cuando se utilizan factores de emisión existentes, el usuario debe estar familiarizado con los criterios para asignar las calificaciones sobre la calidad de los datos y los factores de emisión, tal como se describe en el documento "*Technical Procedures for Developing AP-42 Emission Factors and Preparing AP-42 Sections* (U.S. EPA, 1993b)".

El encargado del inventario debe revisar las calificaciones de los datos y de los factores de emisión asociados con las fuentes más importantes del inventario. Si los estimados de emisión para una fuente importante han sido desarrollados con base en datos o factores de emisión con baja calificación, deben hacerse intentos posteriores para obtener datos específicos del sitio o de la región. Los criterios para asignar las calificaciones sobre la calidad de los datos en las pruebas fuente son los siguientes:

$$E_R = \sqrt{(1 + E_M)} - 1$$

Por ejemplo si:

E<sub>m</sub> = 10%, entonces

$$E_R = \sqrt{(1 + 0.1)} - 1$$

= 0.049 ó 4.9%

Las pruebas con calificación A son las desarrolladas con metodologías bien fundamentadas y reportadas con detalle suficiente para soportar una validación adecuada. Estas pruebas no se hacen necesariamente con los métodos de prueba de referencia de la U.S. EPA, si bien éstos pueden ser usados como guía.

Las pruebas con calificación B son generalmente desarrolladas con metodologías bien fundamentadas, pero sin el nivel de detalle necesario para ser validadas.

Las pruebas con calificación C utilizan metodologías no validadas o de prueba, o carecen de datos de antecedentes significativos que los fundamente.

Las pruebas con calificación D, se basan en métodos que en general no son aceptables pero que pueden proporcionar un valor de orden de magnitud para la fuente.

Una vez que las calificaciones sobre calidad de los datos para las pruebas de fuente han sido asignadas, son evaluadas junto con el número de pruebas de fuente disponibles para un punto de emisión dado. Debido a que la tarea de asignar un límite de confianza significativo a las variables específicas de la industria (por ejemplo tamaño de la muestra contra población, variabilidad entre industria y establecimiento, o método de medición)

es prácticamente imposible, el uso de un intervalo de confianza estadístico para establecer un factor de emisiones representativo para cada categoría de fuente, en general no es práctico. Por consiguiente, es necesario algún tipo de calificación subjetiva. Las siguientes calificaciones sobre calidad de los factores de emisión se utilizan para los factores encontrados en "AP-42, FIRE", o en cualquier documento publicado por la U.S. EPA.

A - Excelente - El factor de emisión fue desarrollado solamente a partir de datos de pruebas con calificación A, tomados de numerosos establecimientos seleccionados de manera aleatoria dentro de la industria. La categoría de la fuente es lo suficientemente específica como para minimizar la variabilidad dentro del total de categorías de fuente.

B - Arriba del Promedio - El factor de emisión se desarrolló solamente con datos de pruebas con calificación A provenientes de un número razonable de establecimientos. Si bien no es evidente un sesgo específico, no queda claro si las plantas examinadas constituyen una muestra representativa de la industria. Al igual que con la calificación A, la categoría de fuente es lo suficientemente específica como para minimizar la variabilidad dentro del total de categorías de fuente.

C - Promedio - El factor de emisión se desarrolló solamente con datos de pruebas con calificación A y B de un número razonable de establecimientos. Si bien no es evidente un sesgo específico, no queda claro si las plantas examinadas constituyen una muestra representativa de la industria. Al igual que con las calificaciones A y B, la categoría de fuente es lo suficientemente específica como para minimizar la variabilidad dentro del total de categorías de la fuente.

D - Debajo del Promedio - El factor se desarrolló solamente con datos de exámenes con calificación A y B de un número pequeño de establecimientos, y hay razón para sospechar que éstas no constituyen una muestra representativa de la industria. Puede también existir evidencia de variabilidad dentro del total de categorías de la fuente.

E - Mala - El factor se desarrolló solamente con datos de pruebas con calificación C y D, y hay razones para suponer que los establecimientos examinados no constituyen una muestra

significativa de la industria. También puede existir evidencia de variabilidad dentro del total de categorías de la fuente.

U - No calificada o Incalificable - El factor se desarrolló con datos inferidos o sin fundamento documental alguno. Una calificación "U" puede aplicarse en las siguientes circunstancias (FIRE):

U1 - Balance de Masa (para estimar, por ejemplo, emisiones atmosféricas con base en insumos materiales, eficiencia de recuperación de un producto o control porcentual).

U2 - Deficiencias en la prueba de fuente (tales como control y aseguramiento de calidad inadecuados, métodos de examen cuestionables, o existencia de una sola prueba).

U3 - Transferencia tecnológica.

U4 - Juicio Ingenieril.

U5 - Falta de documentación de apoyo.

### 10.3.3. Balance de Materiales

Si el método de balance de masa es usado para estimar las emisiones, el responsable del desarrollo del inventario debe:

Asegurar que todos los supuestos sean razonables.  
Asegurar que todos los puntos finales y las rutas sean identificados y cuantificados.

Asegurar que todos los datos sean precisos.

Revisar que las emisiones sean razonables (comparando con los resultados de años anteriores o con otros puntos de referencia).

### 10.3.4. Modelos de Emisión

Si se utiliza un modelo para estimar las emisiones, el responsable del desarrollo del inventario debe:

Verificar la precisión de los datos de entrada.

Verificar la calidad del software utilizado.

De ser posible, verificar los resultados de los modelos mediante cálculos manuales, o comparándolos con los resultados de métodos alternativos.

Revisar que las emisiones resultantes sean razonables (comparando con los resultados de años anteriores o con otros puntos de referencia).

## 8.0 REFERENCIAS

- Radian International, Manuales del Programa de Emisiones de Mexico, Fundamentos de inventario de emisiones VOL 2 california diciembre 1997.
- Radian International, Manuales del Programa de Emisiones de Mexico, Tecnicas basicas de estimacion de emisiones VOL 3 california enero 1996.
- Radian International, Manuales del Programa de Emisiones de Mexico, Desarrollo del inventario de fuentes puntuales VOL 4 california agosto 1996.
- Radian International, Manuales del Programa de Emisiones de Mexico, Desarrollo de inventarios de emisiones de fuente de area VOL 5 california marzo 1997.
- AP-42, 1995. Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42) - Volume I: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. January.
- ARB, 1996. California Air Toxics Emission Factor (CATEF) Database, Versión 1.2. California Air Resources Board, Sacramento, California. April.
- CFR, 1997. U.S. EPA definition of VOC. 40 Code of Federal Regulations (CFR) 51.100(s). Latest amendment: Federal Register, Vol. 62, No. 164. August 25, 1997. pp. 44900 - 44903.
- Chow, J.C., J.G. Watson, D.H. Lowenthal, P.A. Solmon, K.L. Magliano, S.D. Ziman, and L.W. Richards, 1992. "PM<sub>10</sub> Source Apportionment in California's San Joaquin Valley," Atmospheric Environment 26A:3335-3354.
- De Soete, G., 1989. Updated Evaluation of Nitrous Oxide Emissions from Industrial Fossil Fuel Combustion. Reporte a la Comunicad Europea de Energía Atómica. Institute Francais du Petrole, Ref. 37-559.
- EIIP, 1997. Emissions Inventory Improvement Program technical reports. Página electrónica <http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/techrep.htm>.
- Espinosa, M.E., V.H. Páramo y J. Sarmiento, 1996. Mobile Sources Inventories in Colombia, Paper 96-RA108A.02. Presentado en la 89° Reunión Anual de la Air & Waste Management Association, Nashville, Tennessee. Junio.
- IPCC, 1993. Preliminary IPCC National GHG Inventories: In-Depth Review, Part III. Intergovernmental Panel on Climate Control. Presentado en el Taller de Trabajo de la IPCC/ODCE sobre los Inventarios Nacionales de GHG: Transparencia en la Estimación y el Reporte. The Hadley Centre, Bracknell, Reino Unido. Octubre 1.
- Pierce, T.W., B.K. Lamb, and A.R. Van Meter, 1990. Development of a Biogenic Emissions Inventory System for Regional Scale Air Pollution Models, Paper 90094.3. Presentado en la 83° Reunión Anual de la Air & Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania, Junio 24-29.
- Robinson, E., and R.C. Robbins, 1968. Sources, Abundance, and Fate of Gaseous Atmospheric Pollutants. Report SRI Project PR6755, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, pp. 1-122.
- Scheff, P.A., R.A. Wadden, D.M. Kenski, and J. Chang, 1984. Receptor Model Evaluation of the SEMOS Ambient NMOC Measurements, Paper 84-72.3. Presentado en la 77° Reunión Anual de la Air Pollution Control Association, San Francisco, California. Junio.
- Seinfeld, J.H., 1986. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- U.S. EPA, 1991a. Procedures for the Preparation of Emission Inventories for the Preparation of Emission Inventories for Carbon Monoxide and Precursors of Ozone. Volume I: General Guidance for Stationary Sources. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. EPA-450/4-91-016.
- U.S. EPA, 1991b. Procedures for Preparing Emissions Projections. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. EPA 450/4-91-019. Internet address - [http://www.epa.gov/ttn/chief/ei\\_guide.html](http://www.epa.gov/ttn/chief/ei_guide.html).
- U.S. EPA, 1993. Air Quality Criteria For NO<sub>x</sub>, Volume I, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. EPA 600/8-91/049a, pp. 4-11 to 4-14.
- U.S. EPA, 1995. Factor Information Retrieval System (FIRE), Version 4.0. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. June.
- Watson, J.G., J.A. Cooper, and J.J. Huntzicker, 1984. "The Effective Variance Weighting for Least Squares Calculations Applied to the Mass Balance Receptor Model," Atmospheric Environment 18:1347-1355.
- WMO, 1992. Scientific Assessment of Ozone Deletion: 1991. WMO/UNEP, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 25, Ginebra, Suiza.

## ANEXO

### EJEMPLOS DE LOS CALCULOS PARA LOS MODELOS DE EMISIONES

#### 1. Ejemplo de Cálculos Polvos Fugitivos

$$M = VKT \times EF$$

donde:

**M** = tasa promedio anual de emisión en masa, kg/año.

**VKT** = kilómetros recorridos por los vehículos VKT/año.

**FE** = factor de emisión, kg/VKT.

$$FE = K(1.7) \left( \frac{S}{12} \right) \left( \frac{S}{24} \right) \left( \frac{W}{2.7} \right)^{0.7} \left( \frac{W}{4} \right)^{0.5} \left( \frac{365-p}{365} \right) \left( \frac{Kg}{VKT} \right)$$

donde:

**FE** = factor de emisión.

**k** = multiplicador del tamaño de partícula (adimensional)

**s** = contenido de sedimentos en el material de recubrimiento de los caminos (%)

**S** = velocidad media del vehículo, km/hr.

**W** = peso medio del vehículo, Mg (ton).

**w** = número medio de ruedas.

**p** = número de días al año con una precipitación mínima de 0.254 mm (0.01 in.).

Calcular las emisiones anuales de PM10 (i. e., utilizando un multiplicador de tamaño aerodinámico de partícula de 0.36) a partir de caminos rurales de terracería con un contenido promedio de sedimentos de 12 por ciento. Suponer que el peso medio del vehículo es de 4 Mg, la velocidad media del vehículo es de 25 km/hr y el número medio de ruedas es cuatro. Asimismo, el número medio de días al año con una precipitación superior a 0.254 mm es de 40, y el número de kilómetros recorridos por los vehículos es de 3,650,000 km/año.

$$FE = 0.36(1.7) \left( \frac{12}{12} \right) \left( \frac{25}{24} \right) \left( \frac{4}{2.7} \right)^{0.7} \left( \frac{4}{4} \right)^{0.5} \left( \frac{365-40}{365} \right) \left( \frac{Kg}{VKT} \right)$$
$$= 0.3737 \frac{Kg}{VKT}$$

$$M = 3,650,000 \times 0.3737 = 1,364,000 \text{ Kg} \frac{PM_{10}}{\text{año}}$$

#### 2. Ejemplo de Cálculos Rellenos Sanitarios

$$Q_{CH_4} = Lo \times R \times (e^{-kC} - e^{-kC})$$

donde:

**Q<sub>CH4</sub>** = tasa de generación de metano en el tiempo t, m3/año.

**Lo** = potencial de generación de metano, m3CH4/Mg de residuos.

**R** = tasa promedio anual de aceptación de desperdicios durante la vida activa, Mg/año.

**e** = base de logaritmos naturales, sin unidades.

**k** = constante de la tasa de generación de metano, año-1.

**c** = tiempo transcurrido desde el cierre del relleno. años (c=0 para rellenos activos).

**t** = tiempo transcurrido desde la colocación inicial de desperdicios, años.

Calcular las emisiones anuales de metano de un relleno sanitario activo que ha estado abierto durante 15 años y que ha aceptado desperdicios a una tasa promedio de 10,000 Mg/año. Suponer un potencial de generación de metano de 125 m3/Mg y una constante de la tasa de generación de metano de 0.02/año.

$$Q_{CH_4} = (125 \text{ m}^3 \text{ Mg}) \times (10,000 \text{ Mg/año}) \times (e^{-0.02/15} - e^{-0.02/0})$$

$$= 125 \times 10,000 \times (1 - 0.7408)$$

$$= 324,000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{año}$$

#### 3. Ejemplo de Cálculos en que se usan Datos de Muestreo en la Fuente

En general, después de que se ha concluido un muestreo, los datos (incluyendo las concentraciones del contaminante y la tasa de flujo volumétrico del gas de escape) son presentados en un informe. La mayor parte de los reportes de muestreo en la fuente resumen las emisiones de cada contaminante expresándolas en cualquiera de los siguientes términos:

Una tasa de carga de masa o una tasa de emisión (masa de contaminante emitida por unidad de tiempo) ó

Un factor de emisión (masa de contaminante emitida por unidad de actividad del proceso).

Las variables y símbolos utilizados para los cálculos se enlistan en la Tabla A1. Los ejemplos que se proporcionan a continuación muestran la manera de

calcular tasas de emisión en masa, o factores de emisión, a partir de datos de muestreo en la fuente.

**Tabla A1**

Lista de Variables y Símbolos para los Cálculos de Emisión Variable Símbolo Unidades

Variable	Símbolo	Unidades
Volumen de la muestra de gas	$\Delta m^3$	Metro cúbico normal (base seca) $Nm^3$
Masa de partículas recolectadas en la mezcla de enjuague	$M_r$	Miligramos (mg)
Masa de partículas recolectadas en la muestra del filtro	$M_f$	mg
Tasa de Flujo volumétrico del gas de escape en condiciones estándar.	Q	Metro cúbico normal por hora (base seca) $Nm^3/hr$
Concentración de partículas en gas de escape	$C_s$	Miligramo por metro cúbico normal (base seca) (mg/ $Nm^3$ )
Tasa de emisión en masa	TEM	Kilogramos por hora (Kg/hr)
Tasa anual de emisión en masa	$TEM_a$	Toneladas métricas por año
Horas de operación por año	T	Horas por año (hr/año)
Tasa de emisión en masa por actividad	$TEM_b$	Kilogramos por millón de Kjoule (Kg/Mkj)
Tasa de consumo de calor de la caldera	R	Mkj/hr
Concentración del contaminante	C	Partes por millón en volumen (base seca) (ppmv)
Peso molecular del contaminante	PM	Gramo por gramo-mol (g/g-mol)
Volumen molar	V	Volumen ocupado por un mol de un gas ideal a presión y temperatura estándar (0.024m <sup>3</sup> /g-mol a 20°C y 1 atmósfera.
Factor de combustible del método 19 de EPA	$F_d^b$	Metros cúbicos estándar secos por joule a 0% de oxígeno (base

		seca) (dscm/J)
Concentración medida de oxígeno	O <sub>2</sub> %	Porcentaje (base seca)
Concentraciones de hidrogeno, carbono, azufe,nitrogeno y oxígeno	H,C,S,N,O	Porcentaje determinado por el análisis de combustible.
Poder calorífico superior del combustible	PCS	Kjoule por kilogramo (Kj/kg)

<sup>a</sup> El metro cúbico normal está dado a: 0°C y 760 mm Hg.

<sup>b</sup> El metro cúbico estándar está dado a: 20°C y 760 mm Hg.

Dados los siguientes datos específicos para una fuente:

$$\Delta V = 0.78 \text{ metros cúbicos normales (Nm}^3\text{)}.$$

$$M_r = 5.5 \text{ miligramos (mg)}$$

$$M_f = 9.5 \text{ mg}$$

$$Q = 34,170 \text{ metros cúbicos normales por hora (Nm}^3\text{/hr)}$$

$$T = 2,920 \text{ horas por año (hr/año)}$$

$$R = 118 \text{ millones de kjoules por hora (Mkj/hr)}.$$

Calcular la concentración de partículas en el gas de escape en unidades de miligramos por metro cúbico normal (mg/ $Nm^3$ ):

$$C_s = \frac{(M_r - M_f)}{\Delta V}$$

$$C_s = \frac{(5.5mg - 9.5mg)}{0.78Nm^3} = 19.2 \frac{mg}{Nm^3}$$

Calcular la tasa de emisión en masa, TEM, en kilogramos por hora (kg/hr):

$$TEM = C_s \times \frac{Q}{10^6} \frac{Nm^3}{hr} = 19.2 \frac{mg}{Nm^3} \times 34.170 \frac{hr}{10^6 mg / Kg} = 0.66 \frac{Kg}{hr}$$

Estos datos se expresan en unidades típicas para las emisiones de partículas. Los resultados también pueden expresarse en otras unidades tales como

miligramos por metro cúbico normal (base seca) (mg/Nm<sup>3</sup> seco), utilizando factores de conversión estándar. Con frecuencia, las tasas de emisión en masa se expresan en base anual (e. g., toneladas métricas por año). Estas estimaciones generalmente incluyen una tasa anual de uso real (i. e., horas por año) dado que la mayor parte de las fuentes no operan de manera continua durante todo el año.

Asumiendo que la fuente presentada antes opera 2,920 hr/año, calcular la tasa anual de emisión de partículas (TEM<sub>a</sub>) en toneladas métricas/año:

$$TEM_a = \frac{TEM \times T}{1.000}$$

$$TEM_a = 0.66 \frac{Kg}{hr} \times 2.920 \frac{hr}{año} \frac{1}{1.000 Kg / tonmetrica}$$

$$TEM_a = 1.93 tonmetricas / año$$

Algunos datos de emisión se expresan también por unidad de actividad como un factor de emisión. Estos factores de emisión se expresan a menudo como el peso del contaminante emitido por unidad de actividad del proceso. Como ejemplo, calcular la tasa de emisión en masa de la actividad (TEM<sub>b</sub>) de partículas de una caldera con una tasa de consumo de calor de 118 MMkJ/hr:

$$TEM_b = \frac{TEM}{R}$$

$$TEM_b = 0.66 \frac{Kg}{hr / 118 MMkJ / hr}$$

$$TEM_b = 0.0056 kg / MMkJ$$

Las concentraciones de contaminantes que están presentes como partícula o un aerosol (e.g., PM10, plomo, dioxinas) en general son expresadas en masa por unidades de volumen tales como microgramos por metro cúbico normal. Las concentraciones de otros contaminantes que están presentes como un vapor (e.g., NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO) se expresan por lo general en unidades de volumen/volumen tales como partes por millón por volumen (ppmv), o partes por billón (ppbv).

#### 4. Ejemplo de Cálculos Utilizando Datos de MCE

Para determinar las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCT, y/o CO, en una planta se puede instalar un sistema de MCE que mida de manera continua las concentraciones de contaminantes (en ppmv). El sistema de MCE a menudo está equipado con un monitor de oxígeno (O<sub>2</sub>) y/o uno de CO<sub>2</sub>. Estos gases se consideran como gases diluyentes (más que contaminantes), y se monitorean para que sirvan como indicadores de la tasa de flujo de escape los gases de escape y/o del flujo de aire en exceso. En general, las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se reportan en unidades de porcentaje (en volumen) dado que son mucho más altas que los niveles de los otros gases monitoreados (i. e., ppmv). Dependiendo de los requerimientos de la legislación y del tipo de fuente, los instrumentos se pueden instalar de forma permanente para recoger datos de manera continua durante la operación de la unidad, o pueden ser utilizados temporalmente para recolectar datos durante un periodo de tiempo determinado.

Los datos de concentraciones de MCE son transmitidos por lo general del instrumento al sistema de registro de datos, que está programado para almacenarlos y elaborar reportes en un formato específico. A menudo los datos de concentración se promedian en intervalos específicos de tiempo (e. g., 10 minutos, 1 hora, 24 horas).

Además de las unidades de concentración, los datos de las emisiones se reportan con frecuencia en otras unidades, tales como tasas de emisión en masa (e.g., kg/hr), o como factores de emisión (kg/unidad de proceso). Para convertir las unidades de concentración en estas otras formas de datos se requieren datos adicionales. Para convertir los datos de concentración en datos de tasa en masa, la tasa de flujo volumétrico del gas de escape (i. e., en unidades de metros cúbicos normales por hora) debe ser medida o estimada. La fuente puede estar equipada con un monitor de tasa de flujo del gas de escape que proporciona datos continuos de la tasa de flujo al sistema; o bien la tasa de flujo puede ser medida utilizando un tubo pitot. También es posible estimar la tasa de flujo con base en mediciones empíricas, en mediciones de la tasa de combustible, en las concentraciones del gas diluyente o en mediciones del aire de admisión (e. g., velocidad del ventilador, posiciones de la compuerta de tiro). Para convertir los datos de emisión en unidades de tasa de emisión (e. g., kg/MMkJ de consumo de calor o kg/tonelada métrica de carbón alimentado), la tasa de unidad de proceso (e.g., kg/MMkJ de consumo de calor o toneladas por hora carbón alimentado) debe ser medida o estimada.

También se pueden usar factores empíricos del combustible, conocidos como factores F, para convertir los datos de tasa de uso de combustible

en tasas de consumo de calor o de flujo de gas. Por lo común, los factores F son específicos para un tipo de combustible (e. g., gas natural, combustóleo #2). Algunos ejemplos de factores F que han sido adoptados por la EPA se presentan en el Método 19 (40 CFR 60, 1992).

Las variables y los símbolos usados en los siguientes cálculos se enlistan en la Tabla A1. La Tabla A2 presenta un ejemplo de los resultados obtenidos en un sistema de MCE, que consta de monitores de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub> y de tasa de flujo, instalados en una chimenea de escape de una caldera alimentada con petróleo. Los datos en la tabla representan una "instantánea" de las emisiones de la caldera durante un periodo de 60 minutos.

**Tabla A2**

Ejemplo de resultados de un MCE para una caldera que quema petróleo

Periodo	O <sub>2</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (ppmv)	NO <sub>x</sub> (ppmv)	CO (ppmv)	Tasa de Flujo de Gas en la Chimenea (Nm <sup>3</sup> /hr)
11:00	2.1	1,004.0	216.2	31.5	33,964
11:15	2.0	1,100.0	200.6	25.5	34,361
11:30	2.1	1,050.0	216.7	25.1	32,891
11:45	1.9	1,070.0	220.5	20.8	34,890
12:00	1.9	1,070.0	213.8	19.4	34,749
Promedio:	2.0	1,068.8	213.6	24.5	34,171

<sup>a</sup> Basado en un valor calorífico del combustible de 41,828 kJ/kg (18,000 Btu/lb).

5. Cálculo de emisiones horarias, a partir de mediciones de concentración

Aunque los MCEs pueden reportar emisiones horarias en tiempo real de manera automática, puede ser necesario estimar de forma manual las emisiones anuales de una fuente a partir de datos horarios de concentración de contaminantes. Esta sección describe la manera de calcular emisiones a partir de datos crudos de concentración de un MCE.

Utilizando los datos de un MCE presentados en la Tabla A2, es posible calcular las emisiones horarias en masa de SO<sub>2</sub> para las 11:00:

$$TEM_a = \frac{C \times PM \times Q}{1000 \times V \times 10^6}$$

$$= \frac{1.004 \text{ ppmv} \times 64 \text{ g/g-mol} \times 33964 \text{ Nm}^3/\text{hr}}{(1000 \text{ g/Kg} \times 0.024 \text{ m}^3/\text{g-mol} \times 10^6)}$$

$$= 90.9 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

Para calcular la tasa promedio de emisión de masa de SO<sub>2</sub> para todo el periodo de muestreo:

$$TEM_{prom} = \frac{C_{prom} \times MW_{prom} \times Q_{prom}}{1.000 \times V \times 10^6}$$

$$= \frac{1.058.8 \text{ ppmv} \times 64 \text{ g/g-mol} \times 34.171 \text{ Nm}^3/\text{hr}}{(1000 \text{ g/Kg} \times 0.024 \text{ m}^3/\text{g-mol} \times 10^6)}$$

$$= 96.5 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

Las emisiones anuales de SO<sub>2</sub> pueden ser calculadas asumiendo que la caldera opera durante 2,920 horas anuales.

$$TEM_a = 96.5 \text{ Kg/hr} / \text{año} / (1000 \text{ Kg/tonmetrica})$$

$$= 282 \text{ toneladas metricas / año}$$

Suponiendo que el consumo de calor de la caldera es de 118 MMkJ/hr, la tasa de emisión de actividad de SO<sub>2</sub> puede ser calculada.

$$TEM_b = 96.5 \text{ Kg/hr} / (118 \text{ MMkJ/hr})$$

$$= 0.82 \text{ Kg/MMkJ}$$

6. Cálculo de la tasa de flujo del gas en la chimenea

Cuando no se dispone de mediciones directas de las tasas de flujo del gas en la chimenea, Q puede calcularse utilizando factores del combustible (factores F). El factor F es la relación del volumen gaseoso de los productos de combustión con el contenido de calor del combustible e incluye todos los componentes de la combustión excepto el agua. Este factor puede ser calculado a partir de los resultados de un análisis elemental del combustible utilizando la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{10^6 [3.64(\%H) + 1.53(\%C) + 0.57(\%S) + 0.14(\%N) - 0.46(\%O)]}{HHV}$$

Los valores caloríficos de los combustibles están disponibles en publicaciones tales como *Steam, Its Generation and Use* (Stultz and Kitto, 1992). Los factores F promedio están en el Método de Referencia 19 de la EPA para diferentes combustibles y se presentan en la Tabla A3

Tabla A3

Tipo de Combustible	F <sub>d</sub>	
	dscm/J <sup>b</sup>	dscf/MMBtu
Carbón:		
Antracita <sup>c</sup>	2.71 x 10 <sup>-7</sup>	10,100
Bituminoso <sup>c</sup>	2.62 x 10 <sup>-7</sup>	9,780
Lignito	2.65 x 10 <sup>-7</sup>	9,860
Petróleo <sup>d</sup>	2.47 x 10 <sup>-7</sup>	9,190
Gas:		
Natural	2.34 x 10 <sup>-7</sup>	8,710
Propano	2.34 x 10 <sup>-7</sup>	8,710
Butano	2.34 x 10 <sup>-7</sup>	8,710
Madera	2.48 x 10 <sup>-7</sup>	9,240
Cortezas de Madera	2.58 x 10 <sup>-7</sup>	9,600

<sup>a</sup> Determinado en condiciones estándar: 20°C (68°F) y 760 mm Hg (29.92 in. Hg).

<sup>b</sup> dscm/J = metros cúbicos estándar secos por Joule

<sup>c</sup> Clasificado de acuerdo con el ASTM Método D 388-77.

<sup>d</sup> Crudo, residual o destilado.

Utilizando los datos del MCE en la Tabla A2 y el factor F para petróleo de la Tabla A3 es posible calcular la tasa de flujo del gas en la chimenea de la caldera.

$$Q = F_d \times \frac{20.9\%}{20.9\% - O_2\%} \times R \times 10^9$$

$$= 2.47 \times 10^{-7} \text{ dscm} / \text{J} \times \frac{20.9\%}{20.9\% - O_2} \times 118 \text{ MMkJ} / \text{hr} \times 10^9 \text{ J} / \text{MMkJ}$$

$$= 32.230 \text{ dscm} / \text{hr}$$