



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRES  
EN EL INVENTARIO DE EMISIONES DE  
CONTAMINANTES CRITERIO.**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

Luis Adair Pérez Mayén



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA

VOCAL: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SECRETARIO: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

1ER. SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

2° SUPLENTE: RENE GONZÁLEZ ALBARRÁN

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** Facultad de Química

**ASESOR DEL TEMA:**

JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

**SUSTENTANTE (S):**

LUIS ADAIR PÉREZ MAYÉN

## *Dedicatorias y Agradecimientos.*

Quiero dedicar con toda mi entrega y agradecer de todo corazón, la realización del presente trabajo y el grado obtenido en cuestión, a las personas tan valiosas que tuve la fortuna de encontrarme en ésta vida y lo han hecho posible.

### ***A mi Madre Gabriela.***

Que gracias a ti, soy una persona responsable con ilusiones, valores y mucho amor por la vida, gracias por dedicar tu valiosa energía y esfuerzo incondicional a tu familia y por brindarnos siempre lo mejor de ti, demostrando con tu amor que todo es posible, al luchar contra toda adversidad, y gracias por enriquecer mi existencia al ser mi madre, además de mi mayor bendición y una excelente abuela, gracias por ayudarme a ser un hombre creyendo en mí incluso en mis etapas más difíciles e inciertas, por confiar en mí y motivarme a seguir siempre adelante y alcanzar mis sueños.

*{Eres la mejor y la más grata bendición de la vida,  
con quien siempre me quedaré en deuda por todo lo bueno que en mí lograste}.*

### ***A mi Padre Francisco.***

Que también siempre me has dado tu apoyo incondicional, y que sin tu ayuda no podría haber librado muchas de las batallas que en la vida se nos presentan, gracias por compartir tantas valiosas lecciones, aprendizajes y experiencias, por entenderme y motivarme superarme y gracias por enseñarme que la vida sólo es una, que se disfruta y se valora cada momento, compartiendo lo que somos con nuestros seres amados.

*{No me espanto de la vida, la recibo con una sonrisa}.*

### ***A mi adorada Diana Jessica.***

Que ha sido la mejor pareja en el mundo, mi compañera, amiga y el amor de mi vida, además de mi sostén y apoyo incondicional, con quien he sido inmensamente feliz y con quien comparto mis más profundos deseos y las mayor alegría de mi vida al ser padres.

*{Gracias por ser parte de mi pasado, de mi presente y de mi futuro,  
Y gracias por ser el complemento de mi vida}.*

### ***A mi hijo Luis Fernando.***

Que aún no puede leer, pero que ya empieza a dar sus primeros pasos, y que desde que llegó a éste mundo ha sido una inspiración y el motor que impulsa mis acciones día con día para lograr un mejor futuro, que me hizo conocer otra faceta del amor que jamás podría imaginar, mi propósito en la vida se volvió inspirarte y motivarte a aprovechar al máximo tu potencial y mi deseo es verte crecer como una gran persona con valores, humanismo y una gran misión en la vida, Gracias por hacerme cada día una mejor persona.

*{Cada pequeño o gran paso que doy en éste mundo, va dirigido a enseñarte a volar}.*

### ***A mis abuelitos Gregoria García y Luis Mayén.***

Que siempre han sido un claro ejemplo a seguir, una muestra del amor, respeto y de buenos valores, gracias por hacer posibles incontables momentos de alegrías y admiración, de dichosa gracia y por reunir siempre con amor a la familia.

*{Cuando dudo sobre que sea posible la prosperidad en una vida con buenos valores, digna,  
honorable, alegre y exitosa en sí misma, me acuerdo de ustedes y la duda se vuelve una  
motivación}.*

### ***A mis Grandes Hermanos.***

A Sinai que siempre has sido un compañero en el camino del aprendizaje en la vida, y a Uriel con quien siempre puedo compartir y aprender de su experiencia, gracias a ambos por todo su apoyo incondicional y por ser mis hermanos, mis primeros amigos, guías, y cómplices en la vida.

*{Nuestra sangre no sólo es un lazo; es una aleación de apoyo, confianza y orgullo}.*

### **A mis Amigos.**

Los cuales saben que son considerados como mis hermanos por elección, pues en algún momento hemos sido parte de la misma familia, ayudándonos a librar los problemas, o involucrándonos en algún otro, pero siempre compartiendo tanto la felicidad, como las desgracias juntos; las alegrías en los triunfos, o los lamentos en las resacas, a todos ustedes, gracias por formar parte de mi vida.

En particular mención a mis amigos que han estado desde hace ya más de 10 años conmigo, los de la secundaria, dónde conocí a mi mujer y empecé a conocer el mundo independiente, y los del CCH, con quienes comparto mi primer spot escolar en el legendario “F”, y una infinidad de buenos momentos, desde reuniones organizadas o improvisadas, logros, tropezones, vergüenzas, locuras, euforias, angustias, y demás emociones del alma, que sólo recorriendo el camino con la libertad de nuestros sentimientos y emociones se pueden sentir, y con quienes empecé a sentir realmente afecto y a volver mío éste sentimiento de hermandad por mis amigos.

*{Ese momento cuando no sabes el rumbo de tu vida, pero no es necesario, ya que cuentas con tus incondicionales amigos con quienes siempre hay un “a donde ir”}.*

A mis amigos colegas de la Facultad de Química y honorables profesores, profesoras y sinodales, también agradezco “moles” todo su apoyo, enseñanzas y experiencias compartidas durante la carrera, fue genial conocer personas tan brillantes, ingeniosas, agradables y con una visión del mundo tan diversa y radiante, *gracias por ser como un catalizador para mi motivación y aprendizaje durante mi preparación, liberaron tantas endorfinas, dopaminas y al mismo tiempo liberaron mi espíritu hacia el conocimiento y la vida*, gracias por permitirme formar parte de la docencia indirecta en el laboratorio por el simple motivo de compartir el conocimiento con las próximas generaciones ,y espero poder colaborar no en uno, si no en varios proyectos en un futuro próximo, porque la experiencia no termina aquí, si no que apenas comienza.

*{Sin ustedes mi rendimiento no hubiera sido el mismo, incluso en la entropía más compleja de la vida son el catalizador de mi transformación hacia la grandeza}.*

A mis amigos del Museo Universum, con quienes compartí durante dos años tan gratas experiencias, se volvieron mis hermanos tan cercanos e hicieron posible una realización personal de divulgar la ciencia a muchas personas y de expresar mis ideas frente a otros, gracias por enseñarme muchas cosas sobre diversos campos de conocimiento y culturas, y por enseñarme a trabajar en equipo con diferentes áreas y profesionistas en la UNAM. Gracias por compartir un mismo propósito, y enriquecer la cultura.

*{Estoy convencido de que la cultura no deriva de la humanidad, si no que la integra por partes, tanto las sociales como las ciencias exactas nos complementan}.*

### **Al resto de mi familia.**

A las familias de mis hermanos, qué más que un apoyo, ha sido parte fundamental de mi vida. A mis sobrinos que siguen creciendo y aprendiendo, les deseo que nunca dejen de perseguir sus sueños y que encuentren su propósito en la vida. A mis tíos, tías, primos, primas y demás familia que siempre me han ayudado y apoyado tanto a mí, como a mi familia en todo momento, muchas gracias.

*{Aunque no siempre nos veamos, siempre estaremos juntos}.*

### **A mi Alma Mater**

Finalmente a mí siempre hogar adoptivo Facultad de Química y a la UNAM, mi reconocimiento más sincero y agradecimiento por permitirme ser parte de una institución de ésta altura y prestigio, por contribuir a mi desarrollo tanto en lo profesional como en lo personal y humanitario y ser parte de una comunidad que cada día crece y prospera, por albergar tanto humanismo, creatividad, nobleza y ser tan diversa y multicultural en todos los campos, por ser la voz de muchas personas comprometidas con la nación y portando con merecido reconocimiento el orgullo que la distinguen, una institución comprometida con el planeta y la humanidad en general, de la cual siempre tendré muy buenos recuerdos y vivencias para recordar con orgullo y entusiasmo.

*{Por mi raza hablará mi espíritu}.*

## Índice General

1. Introducción.....	4
2. Justificación .....	5
2.1. Descripción del Problema .....	5
3. Antecedentes.....	6
3.1. La Contaminación Atmosférica.....	6
3.2. Por qué se realizan Inventarios de Emisiones. ....	7
3.3. Cómo se hacen los Inventarios de Emisiones en México. ....	8
3.4. Control de Calidad e Incertidumbre de los inventarios.....	11
3.5. Metodología General de la Categoría Fuentes de Área y su Incertidumbre.....	12
4. Métodos de Estimación de Incertidumbre Recomendados en las Directrices del IPCC. ....	14
4.1. Métodos Cualitativos.....	15
4.2. Métodos Cuantitativos.....	16
4.2.1. Métodos de Simulación Directa. ....	18
4.2.2. Métodos de Estimación Cuantitativa por Expertos. ....	21
4.2.3. Métodos de Propagación de la incertidumbre.....	22
4.2.3.1. Procedimiento de la Incertidumbre Combinada.....	23
4.2.3.2. Estimación de la incertidumbre asociada a los componentes individuales.27	
4.2.3.3. Consideraciones estadísticas para definir varianza e incertidumbre. ....	30
5. Propuesta de un Procedimiento para los inventarios Actuales de México .....	35
5.1. Recopilación de Información Disponible.....	35
5.2. Desarrollo del Modelo Matemático General.....	38
5.3. Desagregación del Modelo en Ecuaciones Simples (sumas, restas, productos o cocientes) .....	39
5.4. Definición de la Incertidumbre a Reportar.....	40
5.5. Evaluación de los Parámetros Desagregados. ....	41
5.6. Determinación de la Incertidumbre General.....	41
5.7. Análisis y Reporte de la Incertidumbre. ....	42
6. Aplicación de un caso de estudio (Combustión Domestica 2014).....	43

<b>6.1. Paso 1: Recopilación de Información Disponible.....</b>	<b>43</b>
<b>6.2. Paso 2: Desarrollo del Modelo Matemático General.....</b>	<b>49</b>
<b>6.3. Paso 3: Desagregación del modelo en ecuaciones simples (sumas, restas, productos o cocientes).....</b>	<b>51</b>
Para Gas Natural: .....	51
Para Gas Licuado de Petróleo: .....	52
Para Leña:.....	53
Para Queroseno:.....	54
<b>6.4. Paso 4: Determinación de la Incertidumbre a utilizar por parámetro. ....</b>	<b>56</b>
Parámetros para Gas Natural (de la ecuación 27): .....	58
Parámetros para Gas Licuado de Petróleo (de la ecuación 30) .....	61
Parámetros para la el combustible leña (de la ecuación 33): .....	62
Parámetros para combustible queroseno (de la ecuación 36): .....	66
<b>6.5. Paso 5: Evaluación de los Parámetros Desagregados .....</b>	<b>68</b>
<b>6.6. Paso 6: Determinación de la Incertidumbre General.....</b>	<b>72</b>
<b>6.7. Paso 7: Análisis y Reporte de la Incertidumbre. ....</b>	<b>73</b>
<b>7. Análisis de Resultados.....</b>	<b>74</b>
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>77</b>
<b>9. Bibliografía.....</b>	<b>80</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de los Rangos y calidad de los Factores de Emisión del AP-42.....	16
Tabla 2. Ejemplo de cálculo de incertidumbres usando el método Monte Carlo.....	19
Tabla 3. Resultados de la Cuantificación de Incertidumbres por método de Propagación del Error.....	33
Tabla 4. Asignación a Juicio de Experto de un Valor de Incertidumbre Relativa a Rangos de Calidad de Factores de Emisión del AP-42. ....	37
Tabla 5. Tipos de Ecuaciones para el Cálculo de Incertidumbre de Acuerdo al Modelo de Emisiones.....	39
Tabla 6. Información Recopilada para Datos de Actividad en la Categoría Combustión Domestica. ....	44
Tabla 7. Información de los F.E. recopilados para la subcategoría: "Combustión Domestica". ....	49
Tabla 8. Poderes caloríficos de los combustibles estimados en la subcategoría del INEM: "Combustión Domestica". ....	57
Tabla 9. Incertidumbre Relativa por Combustible para la Categoría de Combustión Domestica.....	72
Tabla 10. Resumen de los Resultados Obtenidos en la Estimación de Incertidumbre de la Categoría de Combustión Domestica. ....	75

## **1. Introducción**

En el presente trabajo se analiza y describe la importancia de los inventarios de emisiones de contaminantes criterio, y específicamente la importancia de cuantificar la incertidumbre en éstos inventarios.

En los antecedentes se describe la importancia del estudio de la contaminación atmosférica y se mencionan algunas de las actividades involucradas en la gestión de la calidad del aire, las cuales influyen directamente en la población y en sus hábitos de consumo, haciendo énfasis en cómo empezaron a desarrollarse los inventarios de emisiones y porque se desarrollan, además se presenta cómo se realizan y cómo se desagregan de manera general los resultados de los inventarios, se mencionan las categorías en las que se dividen y las actividades de control de calidad, en las cuales es importante la incertidumbre.

En los capítulos siguientes se describen las metodologías generales para desarrollar los inventarios para una de sus clasificaciones, la categoría de fuentes de área, y posteriormente se habla de los métodos recomendados por la IPCC para tener un buen control de calidad en los inventarios, enfocándonos en los métodos para la determinación de incertidumbres, ya sea de manera cualitativa o cuantitativa. Haciendo una investigación más detallada de los métodos cuantitativos, puesto que son los que nos ayudarán a comprender mejor la precisión de las estimaciones en los inventarios de contaminantes criterio.

Con base en las metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero, se pueden desarrollar métodos para determinar la incertidumbre asociada a las estimaciones de las emisiones resultantes, dichos métodos nos podrá servir de base para reportar incertidumbres en los inventarios que se desarrollan en México.

Además, se propone un procedimiento de 7 pasos para la determinación cuantitativa de incertidumbres en los inventarios de emisiones, con la intención de

que los pasos descritos en dicho procedimiento puedan ser adaptados para aplicarse en el desarrollo de cualquier inventario de emisiones.

A manera de ejemplo, se desarrollarán los cálculos para la estimación de emisiones y la determinación de su incertidumbre en un caso real de una subcategoría de la clasificación fuentes de área en el inventario de emisiones de contaminantes en México, haciendo uso del procedimiento propuesto en el presente trabajo para demostrar que se puede cuantificar así su incertidumbre. Finalmente se analizarán y presentarán los resultados obtenidos.

## ***2. Justificación***

### ***2.1. Descripción del Problema***

En México se realizan inventarios de emisiones para caracterizar y analizar la información referente a la mayoría de las actividades y hábitos de la población, y como éstos afectan al ambiente y a los recursos disponibles, se busca así poder tratar de mitigar la contaminación ocasionada por dichas actividades, y ayudar a investigadores, tomadores de decisiones y otros profesionistas del área a colaborar para mejorar la calidad del aire que todos respiramos, sin embargo desde hace ya unos años se reportan los resultados de éste inventario, sin presentar una incertidumbre asociada a las emisiones, la cual nos permita saber que tan confiables son las estimaciones realizadas.

En México los inventarios de emisiones se realizan y su incertidumbre es desconocida desde hace ya varios años, y debido tanto a los cambios en los avances tecnológicos, la innovación en los procesos y la variabilidad de la naturaleza, es necesario proponer en algunos casos nuevas metodologías y por lo tanto determinar la confiabilidad de los resultados reportados en la estimación de emisiones.

Para determinar la confiabilidad de la información, se pueden realizar aseguramiento y controles de calidad en los inventarios, los cuales están diseñados para asegurar que los métodos y datos usados sean apropiados, que los errores en los cálculos o transcripciones de datos sean minimizados y que la documentación sea adecuada para la adecuada construcción de los estimados

(USEPA, 2017), debido a que la incertidumbre determina la calidad de las estimaciones en los inventarios, es importante saber cuantificarlas y hacer cada vez mejores inventarios reduciendo en la medida de lo posible las incertidumbres asociadas a cada etapa del proceso durante el desarrollo del inventario.

### ***3. Antecedentes.***

#### ***3.1. La Contaminación Atmosférica***

“La contaminación del aire puede tener impactos negativos sobre la salud pública cuando su concentración en la atmósfera alcanza niveles significativos. En la mayor parte de las áreas rurales los problemas de calidad del aire se dejan sentir sólo en raras ocasiones mientras que muchos ambientes urbanos con frecuencia registran elevadas concentraciones de contaminantes. Durante los últimos años, México ha tenido un gran crecimiento poblacional y en la actividad industrial, lo que ha generado serias preocupaciones acerca de la calidad del aire en diversas regiones del país, principalmente las más urbanizadas” (Radian International LLC, 1995). 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 más abundantes y/o peligrosos para el ambiente.

Entre algunas de las actividades para la gestión de la calidad del aire se encuentran las siguientes:

- La aplicación de modelos y simulación de calidad del aire.
- El examen de las fuentes emisoras de contaminantes para analizar el control de emisiones.
- El desarrollo de proyecciones estadísticas de las emisiones para examinar posibles cambios en la futura calidad del aire.
- El análisis del transporte de las emisiones de una región a otra y la variación con la actividad climatológica.

El desarrollo de inventarios de emisiones bien elaborados es un aspecto clave en cada una de estas funciones de gestión de la calidad del aire. Estas actividades buscan ayudar a tener una mejora en la calidad del aire y del ambiente en general, ya sea, a corto, mediano y largo plazo. El presente trabajo se enfoca en la determinación de incertidumbres, y en el desarrollo de una propuesta para su estimación cuantitativa, enfocada a los Inventarios de emisiones de contaminantes criterio.

### ***3.2. Por qué se realizan Inventarios de Emisiones.***

Los inventarios de emisiones sirven como control, para saber y analizar cómo afecta la actividad del hombre a la calidad del aire, realizándose principalmente por categorías comerciales, institucionales, de transporte o naturales, se clasifican de acuerdo a su nivel de distribución espacio-temporal. Por lo general se realizan para un año en específico y cierta región con acceso a su respectiva información estadística.

“A través de la cooperación técnica del acuerdo de paz firmado por México y los Estados Unidos en el año de 1983, el Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAP, con el apoyo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA), inició en 1995 el proyecto de inventarios de emisiones para México, cuyo objetivo es dotar de herramientas básicas para la planeación, desarrollo y mantenimiento de esta componente estratégica para llevar a cabo programas de mejoramiento y preservación de la calidad del aire en México” (Radian International LLC, 1995).

El proyecto comenzó con la elaboración de una metodología para México y de un plan de ejecución, el cual incluye un curso completo de inventarios de emisiones y manuales para la planeación y estimación de las emisiones de las fuentes contaminantes que en aquella época se consideraron más importantes, actualmente las categorías pueden diferir un poco, de acuerdo al inventario deseado y a sus características, pero los manuales propuestos en el documento denominado comúnmente como RADIANT, se siguen considerando útiles para el cálculo de las estimaciones.

Los modelos de las estimaciones de emisiones que cumplan con los requerimientos de la gestión de la calidad del aire, requieren de una mejora continua y una refinación constante de todo el proceso; En éste sentido, se pueden desarrollar inventarios por única vez para cierto periodo de tiempo y determinada región, pero la realización de éste tipo de inventarios denominados: “de un solo paso”, no son adecuados para el proceso continuo de gestión de la calidad del aire. Para poder obtener beneficios de larga duración, debe desarrollarse un programa de inventarios continuos, de manera que sea posible el desarrollo de estimaciones de las emisiones para todas las regiones geográficas de importancia, que a su vez tengan la capacidad de ser ajustadas y mejoradas con el paso del tiempo y que puedan aplicarse efectivamente en el proceso de gestión y monitoreo de la calidad del aire durante un tiempo razonable.

En México se están desarrollando un conjunto de manuales de inventarios que puedan ser aplicados en todo el país para ayudar a coordinar el desarrollo de estimaciones de emisiones consistentes. Han sido diseñados para ser utilizados por las autoridades locales, estatales y federales, así como por consultores privados e industriales. El propósito es ayudar en el proceso del programa de inventarios y en su mantenimiento y eficacia a lo largo del tiempo, de manera que los inventarios de emisiones se puedan desarrollar periódicamente mejorándolos continuamente y adaptándolos a los diferentes cambios que sufra la época respecto a su actividad antropológica o natural.

De manera general, el propósito de los inventarios de emisiones es conocer, clasificar y distribuir las fuentes de emisión de gases contaminantes para usar la información en diversas acciones que ayuden a mejorar la calidad del aire. Estimar los impactos en la calidad del aire a través de estudios de modelado o para tomar diversas decisiones gubernamentales o institucionales que afecten a la calidad del aire y el ambiente.

### ***3.3. Cómo se hacen los Inventarios de Emisiones en México.***

Cada inventario de emisiones tiene varias características que describen su naturaleza fundamental y su enfoque. Algunos inventarios pueden requerir el

desarrollo de inventarios sólo con determinadas características y especificaciones, tales como contaminantes, tipo de fuentes emisoras, localización espacial y geográfica, y sólo en algunos casos se solicita un aseguramiento y control de la calidad del inventario, así como una determinación de incertidumbres, mientras que otros requerimientos pueden no necesitarlas. La mayor parte de estas características serán determinadas de acuerdo al propósito del inventario a desarrollar. Por lo tanto es necesario definir cada una de las características y el objetivo con el que se usará la información del inventario que se realiza.

Una vez determinadas las características del inventario a desarrollar, se identifican las fuentes de información que servirán como bases de datos referentes al año base del inventario y a la localización espacial, de preferencia se buscará que sean generadas en dependencias nacionales, estatales y municipales, principalmente, según sea el grado de distribución del inventario a realizar y a la par, para determinar sus emisiones se elige el método más conveniente de acorde a la información disponible.

Una vez decidido el método de estimación y recopilado la información necesaria, o en algunos casos generada a través de diferentes herramientas estadísticas, se procede a realizar el cálculo de emisiones y a su correspondiente distribución geográfica.

El documento manual denominado “Radian” recomienda en éste punto, un control de calidad de la información, con la evaluación correspondiente de la incertidumbre de los datos obtenidos en la estimación, sin embargo los actuales documentos de inventarios de emisiones en México carecen de dichos datos, las razones son inciertas.

La Figura 1 presenta los pasos técnicos que se siguen durante el desarrollo de un inventario de emisiones. (Radian International LLC, 1995).

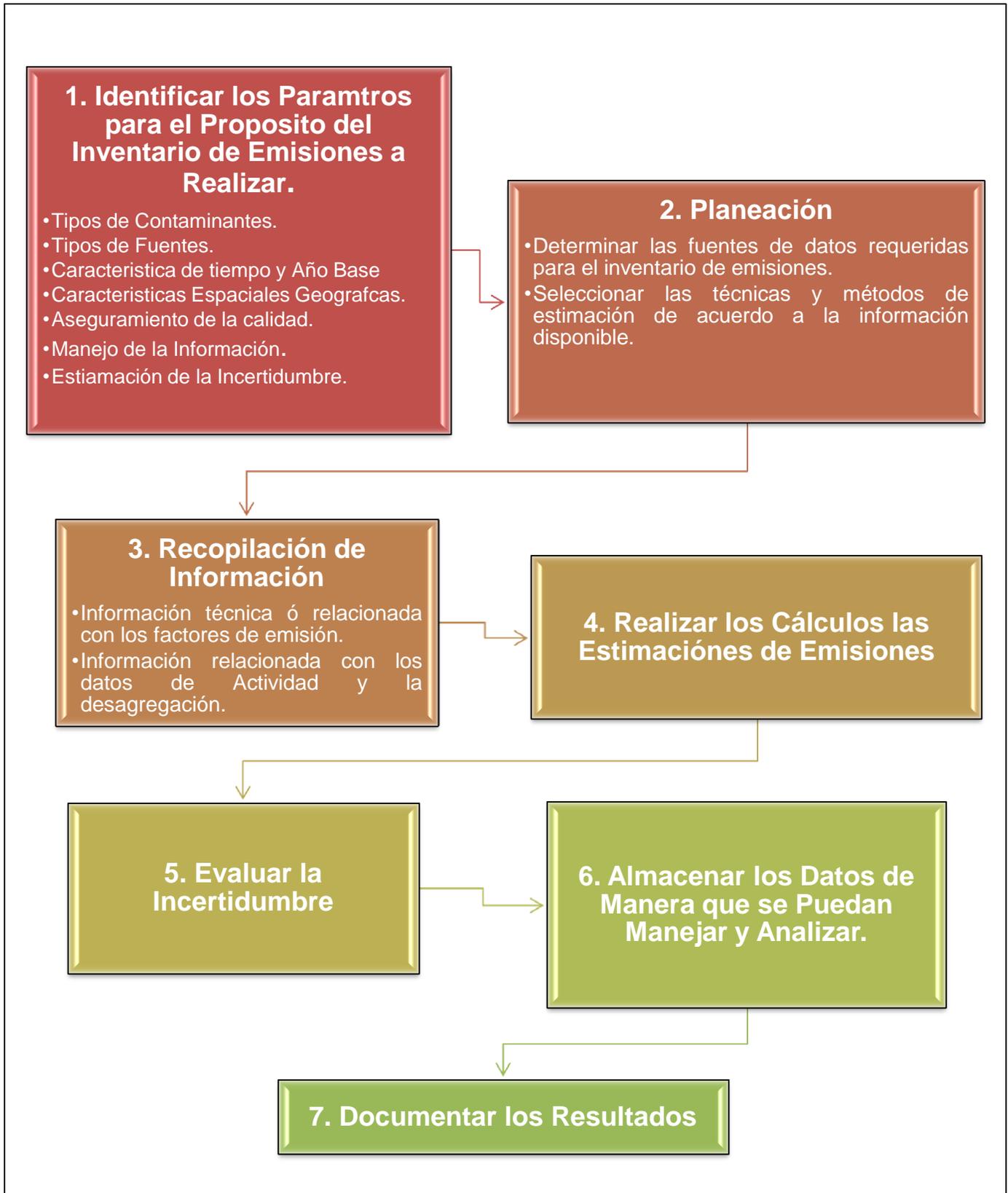


Figura 1. Pasos técnicos para realizar inventarios de emisiones. Fuente: (Radian International LLC, 1995).

### ***3.4. Control de Calidad e Incertidumbre de los inventarios***

La contaminación del aire proviene de una mezcla compleja de muchas fuentes emisoras que van desde las chimeneas industriales y vehículos de motor hasta el uso individual de limpiadores y pinturas, entre otras diversas actividades cotidianas. Incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Por ello, para los propósitos de un inventario de emisiones, las fuentes de emisión se agrupan en cuatro diferentes categorías (Radian International LLC, 1995):

- Fuentes Puntuales.
- Fuentes de Área.
- Vehículos Automotores.
- Fuentes Naturales.

A su vez cada categoría cuenta con sus propias subcategorías, de las cuales se eligió la de “Combustión Domestica” dentro de la categoría “Fuentes de Área” (FA), como ejemplo para desarrollar el procedimiento propuesto en el presente trabajo, describiendo el procedimiento más adelante.

Ante los aumentos poblacionales y las variaciones socioculturales, son evidentes los cambios en los hábitos de consumo y la variación de los recursos, con ello también se perciben un aumento en la falta de certeza de la información en los inventarios, ésta certeza determina la precisión en las estimaciones mediante un parámetro estadístico denominado “Incertidumbre”. Un buen inventario de emisiones buscará reducir en la medida de lo posible la incertidumbre.

El conocimiento de la incertidumbre en la realización de inventarios de emisiones reforzará la comprensión de las actividades involucradas durante el desarrollo de dichos inventarios, y en ocasiones también nos dará una idea clara de las actividades humanas causantes de las emisiones, incluyendo el impacto de estas en el ambiente.

Los procedimientos de aseguramiento y control de calidad (QA / QC) están diseñados para asegurar que los métodos y datos usados en cada categoría del inventario sean coherentes, que los errores en los cálculos sean minimizados y que la documentación utilizada sea adecuada para elaborar estimados de confianza. Es importante reconocer que la calidad resultante de las estimaciones de emisiones sólo se determina en parte por la acción de un buen programa de gestión y aseguramiento de la calidad, y a su vez la calidad está parcialmente determinada por la incertidumbre asociada a los parámetros involucrados y a la información usada para estimar las emisiones.

### ***3.5. Metodología General de la Categoría Fuentes de Área y su Incertidumbre.***

Como ya se mencionó, el presente trabajo se enfoca en la categoría denominada Fuentes de Área del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmosfera de México con año base 2014, y para la realización del inventario nacional de emisiones por fuentes de área, se requiere información muy diversa, así como ajustes y estandarizaciones de acuerdo al contaminante y a la distribución de la información en cada subcategoría, por lo tanto no hay una metodología única que se adapte a todas las subcategorías, la mayoría se basan en los manuales propuestos para México publicados como “RADIAN” (Radian International LLC, 1995), con algunos ajustes en los procedimientos debido a los años transcurridos desde la publicación de dicho documento y a los cambios constantes tanto en las actividades humanas, las tendencias sociales y las tendencias de consumo.

Para el desarrollo de las estimaciones de emisiones, en cada subcategoría de fuentes de área, primero se identifica el tipo de información necesaria de acuerdo a los manuales a seguir o a la metodología planteada para la estimación de cada contaminante, y con base en la información obtenida, se selecciona el método de cálculo más adecuado, algunos de éstos métodos pueden ser muy específicos y requerir información muy completa y específica de las fuentes emisoras como el método de balance de materiales y algunos otros que involucran cálculos de ingeniería e información de operación de equipos, sin

embargo los costes en recursos y tiempo al implementar éstos métodos suelen ser muy elevados, los otros métodos que se basan más en factores de emisión y datos de actividad como estadísticas poblacionales o encuestas, suelen ser una alternativa más rentable para el desarrollo de los inventarios, sin embargo, la mayoría de las veces, éstos métodos conllevan a una mayor incertidumbre.

La mayoría de los procedimientos usados para la determinación de emisiones en fuentes de área de los últimos años están basados en una combinación de más de uno de los métodos propuestos, sin embargo, la mayoría se basa en factores de emisión, dónde se buscan en bases de datos, principalmente del AP-42, (USEPA, 2017), en su versión más actualizada, el factor de emisión correspondiente para la distribución geográfica deseada, o en el caso de contar con un factor de emisión elaborado por uno mismo, se deberá colocar en el reporte final la referencia del estudio realizado para determinar dicho factor, sólo en algunos casos el factor de emisión se determina a partir de los datos estadísticos e información generada por la institución que realiza el inventario, usando información estadística de diversas fuentes bibliográficas del año correspondiente al inventario.

Además en algunas subcategorías de FA, las metodologías propuestas en el Radian se ajustan con información de años anteriores, o estimaciones elaboradas a partir de estudios y estadísticas generales, realizando ajustes matemáticos como proyecciones estadísticas, proporcionalidades, algunos balances de materia con información nacional, promedios, extrapolaciones e interpolaciones entre otros métodos matemáticos, con el fin de distribuir las emisiones de manera más precisa, por lo general, las emisiones en los Inventarios Nacionales en México se distribuyen a nivel municipal, y la mayoría de la información estadística disponible para México se puede consultar de la página de INEGI (INEGI-BIE, 2017), o de las secretarías correspondientes.

Específicamente en el presente trabajo se tomará como ejemplo, la subcategoría “Combustión Domestica” de la categoría fuentes de área, y con información generada y reportada nacionalmente en fuentes oficiales, se determinará la incertidumbre cuantitativa asociada a las emisiones

correspondientes de Compuestos Orgánicos Volátiles, también llamados contaminantes COV's o VOC, por sus siglas en inglés, los cuales son una mezcla de diversas sustancias químicas compuestas principalmente de carbono e hidrogeno, de mucho interés para la calidad del aire, pues además de ser precursores de la formación de ozono troposférico, algunas de sus especies tienen alta toxicidad para los seres humanos (Andrés, 2007).

#### ***4. Métodos de Estimación de Incertidumbre Recomendados en las Directrices del IPCC.***

El primer paso para determinar y reducir la incertidumbre asociada a cualquier estimación de emisiones es comprender y cuantificar las diversas fuentes de variabilidad e inexactitudes en los datos recopilados para la estimación (USEPA, 2017).

Existen muchas maneras y métodos propuestos para el desarrollo y la cuantificación de incertidumbres en los inventarios de emisiones, hay desde unos muy sencillos con herramientas básicas de estadística, hasta unos muy complejos, pero a la vez, más precisos, y por lo general implican más horas de trabajo y esfuerzo, lo que conlleva a una mayor inversión de recursos.

El análisis de incertidumbre debe incluir una evaluación tanto del sesgo de la información como de la imprecisión en las estimaciones. Cuando se identifica, el sesgo debe eliminarse mientras que la imprecisión debe ser minimizada en lo posible al realizar más de una vez los cálculos.

El modelo matemático de emisiones más común que se usa en FA, es multiplicar un factor de emisión por un dato de actividad para aproximar las emisiones, en dicho método tanto el factor de emisión, como el dato de actividad conllevan cierta variabilidad. Además, los modelos de emisiones pueden presentar diversas maneras de lograr un mismo objetivo, pero por diferente medio, con lo cual ya existe otra variabilidad en la estimación, por eso la determinación de incertidumbres está asociada a la variabilidad de los parámetros y a los métodos elegidos para la estimación de emisiones.

En ocasiones no es necesario asignarle un valor numérico a la imprecisión en la estimación, aunque exista variabilidad, por ende, los métodos de estimación de incertidumbre pueden ser de dos tipos: cualitativos o cuantitativos.

#### ***4.1. Métodos Cualitativos***

Son los métodos en los cuales no se genera un valor numérico como tal, pero se asegura cierta inexactitud de la información, lo cual conlleva a incertidumbre. El método más sencillo para estimar la incertidumbre es discutir e identificar todas las fuentes de información de las que se consideran posible causa de incertidumbre en el inventario, y determinar la magnitud del error de la fuente analizada. A veces las desviaciones estándar, límites de confianza, u otras estadísticas están disponibles para alguna de la información utilizada al desarrollar el inventario; esas estadísticas deben ser documentadas al momento de identificarlas, pues su contribución puede ser importante en la determinación de la incertidumbre.

La evaluación de la incertidumbre cualitativa se suele presentar en forma narrativa. Sin embargo, las tablas proporcionan un método más sistemático y conciso de resumir y apreciar la información. Las estimaciones en los métodos cualitativos son en su mayoría de manera subjetiva, esto podría significar un inconveniente para su uso, puesto que puede ser difícil evitar inconsistencias debidas a que los criterios subjetivos sean aplicados por diferentes personas en diferentes momentos y condiciones. Sin embargo algunas fuentes de información importantes los utilizan para determinar cierta calidad en la información, un ejemplo son los factores de emisión del AP-42 usados en los manuales Radian para determinación de emisiones, en los cuales se usa una clasificación de rango para cada factor de emisión, usando las letras de la A, a la E, representando la letra A un factor de emisión con mejor rango, y por lo tanto más recomendado comparado con uno evaluado con rango E, la justificación de la elección del rango en los factores de emisión del AP-42, se describe en la siguiente tabla, (ver Tabla 1). Tomada y traducida del RADIANT (Radian International LLC, 1995):

*Tabla 1. Descripción de los Rangos y calidad de los Factores de Emisión del AP-42*

<b>Rango</b>	<b>Calidad del rango</b>	<b>Descripción</b>
A	Excelente	El factor de emisión es desarrollado a partir de información calificada como A o B, tomados de muchas instalaciones elegidas al azar en la población de la muestra, la muestra es suficientemente específica que es posible minimizar la variabilidad.
B	Mejor que el promedio	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información de pruebas calificadas como A o B, tomados de un número razonable de instalaciones, aunque no es evidente un sesgo específico, no es claro si las instalaciones probadas son una muestra aleatoria de la industria, al igual que la calificación A, la fuente es suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
C	Promedio	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información de pruebas calificadas como A,B o en ocasiones como C, tomados de un número razonable de instalaciones, aunque no es evidente un sesgo específico, no es claro si las instalaciones probadas son una muestra aleatoria de la industria, al igual que la calificación A, la fuente es suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
D	Por debajo del promedio	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información de pruebas calificadas como A,B o en ocasiones como C, tomados de un número pequeño de instalaciones, y puede haber razones para sospechar que esas instalaciones no representan una muestra aleatoria de la industria, además puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población.
E	Pobre	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información de pruebas calificadas como C o D, y puede haber razones para sospechar que esas instalaciones no representan una muestra aleatoria de la industria, además puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población fuente.

#### **4.2. Métodos Cuantitativos**

A diferencia de los métodos cualitativos, en los métodos cuantitativos se dan las estimaciones numéricas del error asociado a la estimación de emisiones, para poder realizar un análisis de incertidumbre cuantitativa, tenemos primero que entender que existen diferentes maneras de expresar la incertidumbre o

imprecisión asociada a las estimaciones en emisiones de contaminantes criterio, las formas más comunes suelen ser a manera de incertidumbre absoluta, incertidumbre relativa o incertidumbre porcentual.

La incertidumbre absoluta, representa el límite de valores por encima o por debajo del valor estimado, en los cuales podemos confiar que se localice el valor real del estimado. En consecuencia, una manera de representar matemáticamente el resultado de cualquier medición o estimación con su respectiva incertidumbre absoluta es de la siguiente manera:

$$x = \mu \pm U_x \quad (1)$$

Dónde:

$x$ = sería la estimación o el parámetro a reportar.

$\mu$ = es el valor medio de la estimación o el valor central medido.

$U_x$ = Es la incertidumbre absoluta de  $x$ , expresado en las mismas unidades.

La incertidumbre relativa de una medida o estimación es el cociente del valor de la incertidumbre absoluta entre el valor central de la medida, como lo representa la siguiente ecuación:

$$U_{rel\ x} = \frac{U_x}{x} \quad (2)$$

Dónde:

$U_{rel\ x}$ = sería la incertidumbre relativa del estimado  $x$ , es un valor adimensional pues la incertidumbre absoluta debe determinarse en las mismas unidades que el valor del estimado  $x$ .

Matemáticamente podemos usar la ecuación (2) para pasar de incertidumbre absoluta a incertidumbre relativa y viceversa determinando cualquiera de las dos.

Cómo es evidente en la ecuación anterior, la incertidumbre relativa tiene sólo valores entre 0 y 1, y en ocasiones se presenta una cantidad muy pequeña,

por éste motivo para una mejor visualización de la imprecisión en la información reportada, se da el valor de la incertidumbre porcentual, la cual es la incertidumbre relativa multiplicada por 100%. Cómo lo representan las siguientes ecuaciones por medio de la incertidumbre relativa o absoluta:

$$U_{\% x} = U_{rel x} * 100\% \quad (3)$$

$$U_{\% x} = \frac{U_x}{x} * 100\% \quad (4)$$

Dónde:

$U_{\% x}$  = sería la incertidumbre en términos porcentuales de la estimación x.

Las tres formas para representar la incertidumbre son válidas en los inventarios de emisiones, pues representan el mismo error en la precisión del estimado, pero en diferentes términos, cabe aclarar que éste error no se debe a una equivocación durante el procedimiento de estimación, sino más bien es un error inherente a la estimación, la mayoría de las veces debida a la falta de certeza en la información que alimenta los modelos.

Una vez teniendo en cuenta las diferentes formas de expresar incertidumbre en las estimaciones, vamos a conocer las maneras en la que ésta se determina cuantitativamente para los inventarios de emisiones. Los métodos recomendados por la IPCC son los siguientes:

- Simulación Directa.
- Estimación Cuantitativa de Expertos.
- Propagación de la Incertidumbre.

#### **4.2.1. Métodos de Simulación Directa.**

Los métodos de simulación directa son métodos estadísticos en los que los límites de confianza y la incertidumbre en las estimaciones de emisiones se calculan directamente a través de procedimientos estadísticos computarizados como el denominado método Monte Carlo, el cual relaciona técnicas de arranque

o de muestreo directo con equipo de laboratorio en las principales fuentes o maquinariás emisoras (EIIP, 1997), en ocasiones se usan otros enfoques como el del hipercubo latino (C.J. Sallaberry, J.C. Helton, and C.C. Hora, 2006) para trabajar y analizar la información, éste método suele ser muy rápido y eficaz si se establece y se realiza el modelo matemático adecuadamente.

La agencia encargada la evaluación ambiental en Canadá llamada: “Canadian Environmental Assessment Agency”, en 1994 aplicó un método de simulación directa, para estimar la incertidumbre de las emisiones de gases de efecto invernadero en Canadá. La Tabla 4 presenta los resultados que se obtuvieron en aquel estudio usando el enfoque Monte Carlo para el análisis y modelación estadístico de las emisiones de dióxido de carbono en Canadá.

*Tabla 2. Ejemplo de cálculo de incertidumbres usando el método Monte Carlo.*

<b>Categoría</b>	<b>Fuente de Emisión</b>	<b>Rango de Emisiones [Mg/año]</b>	<b>Rango de Incertidumbre (2U<sub>E</sub>) [Mg/año]</b>	<b>Incertidumbre Relativa (± %)</b>
<b>Procesos industriales</b>	Sólo procesos de cemento	<b>4,700-6,000</b>	<b>1,300</b>	<b>12</b>
	Cal y otros inorgánicos	<b>1,900-2,600</b>	<b>700</b>	<b>15</b>
	Gas natural despojado	<b>5,100-7,300</b>	<b>1,800</b>	<b>18</b>
	Uso no energético	<b>9,900-18,400</b>	<b>8,500</b>	<b>30</b>
	Subtotal	<b>23,350-32,254</b>	<b>8,903</b>	<b>16</b>
<b>Combustión de Combustibles</b>	Generación de Energía	<b>89,000-99,000</b>	<b>10,000</b>	<b>5</b>
	Residencial	<b>38,000-43,000</b>	<b>5,000</b>	<b>6</b>
	Comercial	<b>22,500-25,500</b>	<b>3,000</b>	<b>6</b>
	Vapor Industrial	<b>72,500-85,500</b>	<b>13,000</b>	<b>8</b>
	Agricultura	<b>2,280-2,680</b>	<b>400</b>	<b>8</b>
	Administración Pública	<b>1,900-2,200</b>	<b>300</b>	<b>8</b>
	Uso en refinerías	<b>12,500-18,700</b>	<b>6,200</b>	<b>20</b>

Categoría	Fuente de Emisión	Rango de Emisiones [Mg/año]	Rango de Incertidumbre (2U <sub>E</sub> ) [Mg/año]	Incertidumbre Relativa (± %)
	Producción de aceite y gas	22,700-34,000	11,300	20
	Tubería	6,000-7,400	1,400	10
	Carbón	240-560	320	40
	Misceláneas	200-500	300	--
	Subtotal	282,409-304,074	21,666	4
Transporte	Gasolina	73,900-81,600	7,700	5
	Combustible para aviones	11,900-14,500	2,600	10
	Diésel	44,900-49,700	4,800	5
	Propano y gas natural	1,500-1,900	400	10
	Subtotal	135,024-144,540	9,515	3.5
<b>Total General</b>		<b>448,185-473,467</b>	<b>25,283</b>	<b>3</b>

Fuente: Tomada del ejemplo de las directrices del IPCC para determinar rangos de confianza por métodos de simulación directa (IPCC, 1996).

Una de las limitaciones del enfoque Monte Carlo para el método de simulación directa, es que el tipo de distribución estadística de cada parámetro en el modelo debe ser especificado adecuadamente. Por lo general, se requiere el juicio de expertos para determinar algunos o todas las distribuciones en cada parámetro. Además de que las dependencias entre parámetros también deben considerarse en la elaboración del modelo matemático para alimenta el programa estadístico.

El método de simulación directa permite estimar la incertidumbre incluso de algún parámetro de interés peculiar, como factores de emisión proponiendo algún modelo matemático, sin embargo, el proceso es muy costoso por el número de pruebas necesarias para su elaboración, sin embargo, puede considerarse una

opción para la adecuada actualización y estandarización de los factores de emisión a cualquier nivel y categoría. (Radian International LLC, 1995).

Otras metodologías similares, tales como el método de arranque y remuestreo (B. Efron, 1993) implican la realización de un muestreo in situ aleatorio en ocasiones con reemplazo de un conjunto experimentos o pruebas con el fin de estimar algún parámetro estadístico, como el error estándar o la varianza. Para un conjunto pequeño de datos, un cálculo directo del parámetro de interés puede tener una alta incertidumbre, debido a un tamaño de muestra pequeño, o puede incluso no ser posible debido a que no existe una fórmula con la cual se pueda calcular un valor que represente estadísticamente el total de la población muestral del parámetro de interés.

Sin embargo, aunque existen dificultades en la aplicación de técnicas de remuestreo de datos de emisiones debido a que están correlacionados con el tiempo y las condiciones meteorológicas, hay algunos trabajos que han permitido que éstas técnicas sean aplicadas en situaciones a las cuales los datos muestran una buena correlación (Carlstein, 1992).

El principal inconveniente de las metodologías de simulación directa es la intensiva naturaleza computacional de las técnicas. Empero como los costos informáticos han disminuido con el advenimiento de las computadoras cada vez más potentes, esta limitación es cada vez menos importante como un criterio de selección para utilizar metodologías de cálculo computacionales, pero debido a la complejidad en los análisis estadísticos y requerimientos específicos, se vuelve una tarea sólo para personal con títulos avanzados en estadísticas o computación, quienes dominan éstos métodos de simulación directa para estimar la incertidumbre. Además, el nivel de esfuerzo requerido puede acercarse o superar las 1 000 horas de esfuerzo persona, dependiendo de la complejidad del análisis y la recolección de información requerida. (Radian International LLC, 1995).

#### **4.2.2. Métodos de Estimación Cuantitativa por Expertos.**

Por lo general, para estimar los rangos de confianza en las estimaciones de emisiones se requiere información sobre la naturaleza de la distribución estadística de los datos usados, y por lo general, en las referencias oficiales no

hay información suficiente para definir la distribución en los datos de actividad, ni hay estimaciones de la desviación estándar de los parámetros, en consecuencia se pide a los expertos de diferentes campos, determinar los parámetros importantes asociados con un inventario de emisiones para cada categoría, y en algunos casos definir tanto los límites inferior y superior de una estimación, ya sea de la distribución de algún parámetro en particular, o de un cálculo más general, con el objetivo de que el rango recomendado por el experto nos ayude a obtener un límite de confianza para o un rango en el cual el valor medio sea por lo general, el valor a usar para la estimación de emisiones, o en su defecto proporcionar un porcentaje de confiabilidad e incertidumbre basado en argumentos sólidos, utilizando la información disponible y analizándola con ayuda de su juicio personal, reflejando su experiencia en el tema.

El juicio de expertos, utilizado para estimar la incertidumbre cuantitativa en los inventarios, usa métodos que pueden ser relativamente simples, pero confiables sí son bien estructurados, y en ocasiones uno o más expertos juzgan los valores de los parámetros clave para una determinada categoría, mejorando así la calidad de los resultados.

#### **4.2.3. *Métodos de Propagación de la incertidumbre.***

Los métodos de propagación de la incertidumbre sugeridos por el IPCC para determinar incertidumbres, siguen una metodología estadística tradicional para estimar el valor de la incertidumbre, usando ecuaciones matemáticas, las cuales involucran el error asociado a los parámetros que determinan la variable estimada, en éste caso, a las emisiones de contaminantes. Estos métodos consideran el error general como un error compuesto por la combinación de los factores individuales que componen el modelo matemático de emisiones, cada uno con su propia incertidumbre cuantificada. El hecho de que las incertidumbres de los parámetros individuales se transfieran a otra estimación más general que los involucre en su modelo matemático es conocido como propagación del error o propagación de la incertidumbre.

Estos métodos se basan en que el modelo matemático de las emisiones sea igual al producto o a la suma de una serie de parámetros, y cada uno de los

parámetros sea independiente entre sí, (es decir, no haya correlaciones de ninguna clase entre ellos), lo anterior se cumple para muchas de las subcategorías en los inventarios, verbigracia en la categoría de fuentes de área, el modelo matemático más común es el múltiplo de un factor de emisión por un dato de actividad correspondiente a la subcategoría, dónde el supuesto de independencia se cumple, en dichos casos se permite que la incertidumbre de los parámetros a estimar se exprese en términos de las incertidumbres individuales que conforman el error general, como veremos más adelante (EIIP, 1997).

#### **4.2.3.1. Procedimiento de la Incertidumbre Combinada.**

El IPCC sugiere un procedimiento con bases estadísticas para estimar incertidumbres relativas denominado “Incertidumbre Combinada”, porque es a partir de la combinación de las incertidumbres de parámetros independientes entre sí, por ejemplo del factor de emisión y del dato de actividad para algunas subcategorías de emisiones, el intervalo de confianza de éste procedimiento puede considerarse en un 95%, siempre y cuando la información usada para alimentar el modelo matemático provenga de fuentes oficiales a escala nacional, y además los errores relativos asociados a cada parámetro involucrado no se extienda más del 60% hacia sus extremos por arriba o por debajo de la estimación central.

Este método se basa en que muchas subcategorías de emisiones, usan el modelo matemático del factor de emisión por un dato de actividad, y en dichas categorías propone determinar la incertidumbre relativa ( $U_{rel\ x}$ ) de la estimación de emisiones, mediante la media cuadrática de las incertidumbres relativas asociadas al factor de emisión ( $U_{rel\ FE}$ ) y a los datos de actividad ( $U_{rel\ DA}$ ). Lo anterior se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$U_{rel\ Ei} = \pm \sqrt{(U_{rel\ FE}^2 + U_{rel\ DA}^2)} \quad (5)$$

Dónde:

$U_{rel\ Ei}$ = Es la incertidumbre relativa general de la subcategoría  $E_i$ .

$U_{rel\ FE}$ = Es la incertidumbre relativa del factor de emisión.

$U_{rel\ DA}$ = Es la incertidumbre relativa del dato de actividad.

Todas las incertidumbres relativas son adimensionales, y ésta ecuación podría ser utilizada para cada subcategoría en la cual el modelo matemático de emisiones cumpla la condición y sea la multiplicación del factor de emisión por su respectivo dato de actividad, tal como lo expresa la siguiente ecuación:

$$E_i = DA * FE \quad (6)$$

Dónde:

$E_i$ = Es la emisión total del contaminante  $i$ , en la categoría o subcategoría  $i$ , generalmente presentada en unidades de masa por año.

$DA$ = Es el dato de actividad total de la categoría o subcategoría  $i$ .

$FE$ = Es el factor de emisión para la categoría o subcategoría  $i$ .

Todos los valores deben de ser congruentes en sus respectivas unidades.

Para muchas subcategorías, la incertidumbre asociada a la distribución geográfica de las emisiones, por lo general está incluida en la incertidumbre asociada al dato de actividad ( $U_{DA}$ ) de la subcategoría.

La incertidumbre combinada también puede determinarse cuando el modelo matemático de emisiones no es precisamente el producto del factor de emisión por el dato de actividad, puede determinarse la incertidumbre combinada de modelos con más parámetros involucrados, o incluso para modelos matemáticos que sean sumas y no productos, realizando el ajuste correspondiente a la ecuación.

Para modelos matemáticos de emisiones de contaminantes que sean multiplicaciones, la ecuación general para la determinación de su incertidumbre, independientemente de que los parámetros involucrados sean o no factores de emisión y/o datos de actividad, sería la siguiente:

$$U_{rel E_i} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{rel x_i})^2} \quad ; \quad i = 1,2,3 \dots n \quad (7)$$

Dónde:

$U_{rel E_i}$  = Es la incertidumbre relativa de la categoría  $i$ .

$U_{rel\ x_i}$  = Es la incertidumbre relativa del parámetro  $x_i$ , y n depende de la cantidad de parámetros involucrados que se multiplican en el modelo de emisiones.

De manera análoga a la determinación de incertidumbre relativa a partir de las incertidumbres independientes de los parámetros multiplicados, cuando el modelo matemático es una suma de parámetros y no una multiplicación, es conveniente determinar la incertidumbre absoluta mediante las incertidumbres absolutas de los parámetros individuales.

De acuerdo a lo anterior, se puede expresar la ecuación general para determinar la incertidumbre absoluta en modelos matemáticos que son sumas de la siguiente manera:

$$U_{Ei} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{x_i})^2} \quad ; \quad i = 1,2,3 \dots n \quad (8)$$

Dónde:

$U_{Ei}$  = Es la incertidumbre absoluta de la categoría  $E_i$ .

$U_{x_i}$  = Es la incertidumbre absoluta del parámetro  $x_i$ , y n depende de la cantidad de parámetros que se suman en el modelo de emisiones.

Un ejemplo del uso de la ecuación (8), es la determinación de la incertidumbre general del inventario de emisiones, debido a que el estimado del total de emisiones para un determinado contaminante es la suma de las emisiones producidas por todas las subcategorías consideradas en el estudio, tal como lo representa la siguiente ecuación:

$$E_T = \sum_{i=1}^n E_i \quad (9)$$

Dónde:

$E_T$  = Es la estimación de emisiones totales del inventario, generalmente reportadas en unidades de masa [g, kg, Mg, etc.].

$E_i$ = Es la estimación de emisiones de cada categoría y/o subcategoría (de acuerdo al inventario), de la emisión del gas contaminante de estudio reportadas en las unidades correspondientes del inventario, generalmente masa [g, kg, Mg, etc.];  $n$  depende de la cantidad de parámetros que se suman en el modelo de emisiones.

Su respectiva incertidumbre general se determina combinando las incertidumbres absolutas de las categorías involucradas mediante la siguiente ecuación:

$$U_{Ti} = \pm \sqrt{(U_{E_1})^2 + (U_{E_2})^2 + \dots + (U_{E_n})^2} \quad (10)$$

Dónde:

$U_{Ti}$ = Es la incertidumbre absoluta general de la estimación de emisiones totales de contaminante  $i$  en el inventario, siendo la combinación de las incertidumbres de  $n$  número de categorías determinadas para el inventario, en las unidades que se reportan las emisiones, frecuentemente de masa [g, kg, Mg, etc.].

$U_{E_i}$ = Es la incertidumbre absoluta ocasionada por cada categoría de emisiones  $E_i$ , perteneciente al inventario total de emisiones, en las mismas unidades que se reportan las emisiones, frecuentemente masa [g, kg, Mg, etc.];  $n$  depende de la cantidad de incertidumbres absolutas que se suman en modelo para la determinación de la incertidumbre general.

Sin embargo, de acuerdo a las directrices presentadas por el IPCC para determinar incertidumbres asociadas a las emisiones de contaminantes, no es recomendable usar el método de la incertidumbre combinada cuando los parámetros involucrados presentan incertidumbres relativas mayores al 60% de su valor estimado (IPCC, 1996), el valor del 60% es debido a que éste método se basa en una regla estadística que sugiere una desviación estándar aleatoria ( $\sigma$ ) menor que el 30% por encima o por debajo del valor medio de una muestra específica de datos, por lo tanto se considera válido sólo cuando las

incertidumbres de los parámetros involucrados sean menores que  $2\sigma$  (60%), y así no generar una incertidumbre sobrestimada ni subestimada.

Por lo tanto, el procedimiento de usar la media cuadrática para determinar la incertidumbre combinada no sería muy confiable si se usan incertidumbres relativas muy elevadas, en tales casos se sugiere usar otras consideraciones estadísticas para determinar la varianza de la información, o definir los valores máximos y mínimos de los parámetros independientes y así definir un intervalo de incertidumbre en ellos, aunque esto conduzca a valores límites superiores e inferiores que pueden ser asimétricos respecto al valor de la estimación central para algunos parámetros, en ocasiones se suele usar el valor máximo de éstos límites para definir una incertidumbre relativa aceptable en relación con el valor central (IPCC, 2006).

#### ***4.2.3.2. Estimación de la incertidumbre asociada a los componentes individuales.***

Para estimar la incertidumbre por categoría o subcategoría usando el procedimiento de la incertidumbre combinada, es necesario primero cuantificar la incertidumbre de cada parámetro involucrado y en ocasiones desarrollar información estadística tanto para los factores emisión, los datos de actividad o cualquier otro término independiente que forme parte de los modelo matemáticos usados, para eso es necesario determinar la metodología adecuada y las fuentes de información disponibles para la determinación de los parámetros de entrada.

Muchas veces se requiere información sobre la distribución estadística de los datos usados, frecuentemente es necesario efectuar algunos cálculos para determinar valores estadísticos como la media, la mediana, la varianza o la desviación de la información; puesto que la mayoría de los datos de actividad carecen de dicha información, es necesario identificar la distribución estadística que mejor se ajusté a la información para poder determinar un error más coherente y con mayor precisión respecto al valor real de la estimación deseada.

Las distribuciones comúnmente utilizadas para representar la información empleada en los inventarios de emisiones son la “Distribución Normal” o la

“Distribución del tipo Log-normal”, la cual es una variable de la distribución normal. Aunque no podemos generalizar la distribución para todo el inventario de emisiones, muchas veces podremos utilizar la suposición de normalidad como una buena primera aproximación estadística de la información.

Las ecuaciones correspondientes para obtener parámetros estadísticos como la media aritmética, la varianza y la desviación estándar de una serie de datos son las siguientes:

Media  
Aritmética:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (11)$$

Varianza

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (12)$$

Desviación  
Estándar

$$s = \sqrt{s^2} \quad (13)$$

Dónde:

$\bar{x}$ = Es la media aritmética o promedio, es la estimación comúnmente usada como el estimado central, sin embargo, es muy sensible a los valores extremos y no es buena medida si hay una distribución muy sesgada o con valores muy dispersos y atípicos.

$x_i$ = Es el valor de la variable estimada.

$n$ = Es el número o cantidad de variables usados en la muestra

$s^2$ = Es la medida de la variabilidad en una muestra de datos.

$s$ = Es la desviación estándar, la cual es la medida de dispersión en las mismas unidades de la muestra, junto con la media aritmética, es comúnmente usada para definir un valor estimado junto con su respectiva incertidumbre para una serie de datos.

Frecuentemente las categorías que utilizan como datos de actividad el número de empleados o número de comercios se distribuyen de manera normal. De acuerdo a algunos estudios estadísticos (Johnson, 1996), una condición para la validez de que una variable se pueda distribuir de manera normal es que la variable medida “x” sea la resultante de un número elevado de causas independientes con efectos positivos, y en dónde cada una de estas causas tiene un efecto despreciable en el valor total de “x”.

Otro tipo de distribución también muy común en los inventarios de emisiones, además de la distribución normal, es la “Distribución Log-normal”, en la cual una variable “x” puede ser modelada como variable log-normal si es considerada como el producto multiplicativo de muchos pequeños factores independientes (EIIP, 1997).

En éste tipo de distribuciones la información puede proporcionarnos una media logarítmica como sugiere la siguiente ecuación:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln x_i}{n} \quad (14)$$

Dónde:

$\bar{y}$ = Es la media geométrica de la muestra, algunos parámetro ambientales como la información del monitoreo de la calidad del aire tienden a seguir una distribución log-normal más que un distribución normal

$\ln x_i$ = Es el logaritmo natural del valor de la variable estimada.

A su vez la ecuación para la varianza de la muestra, (la cual también puede considerarse para determinar la incertidumbre o desviación estándar de la muestra), se expresaría de la siguiente manera:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \bar{y})^2}{n} \quad (15)$$

Cuando se realizan éstos cambios de variable, hay que tener cuidado a la hora de realizar los cálculos finales de incertidumbre para la variable normal. Pues no siempre es necesaria dicha transformación, pero las unidades

correspondientes en las que se expresan la incertidumbre absoluta deben corresponder con las variables a estimar.

Una vez definida la distribución estadística de la información a usar, los intervalos de incertidumbres pueden ser estimados usando análisis estadísticos de acuerdo a la información disponible, ya sea empleando una técnica computarizada como la ya mencionada técnica de Monte Carlo en la sección 4.2.1, sí es que los datos y la información son suficientes.

#### ***4.2.3.3. Consideraciones estadísticas para definir varianza e incertidumbre.***

Es muy importante desarrollar el modelo matemático adecuado en las subcategorías de los inventarios a la hora de determinar sus emisiones, y que a su vez nos ayude a determinar de manera más directa la incertidumbre, con la menor cantidad de parámetros independientes posible, para así tratar los datos estadísticos de la mejor manera, ya que muchas veces los parámetros de entrada, carecen de elementos suficientes para determinar el tipo de distribución de los datos y su respectiva varianza, sin embargo, en ocasiones se puede obtener un aproximado con la información disponible, haciendo uso de algunos parámetros y descriptores estadísticos aplicando sus respectivas ecuaciones matemáticas.

Además de los ya mencionados, algunos parámetros estadísticos de importancia y que también pueden ser utilizados para determinar la incertidumbre, la varianza o el error asociado en subcategorías de inventarios de emisiones se presentan y describen a continuación:

$t_{\alpha}$  = se denomina “T de Student”, y es un parámetro con valor definido en una tabla estadística denominada tabla de Student, la cual determina por medio de la T de Student cierto grado de confianza a la estimaciones.

$(x + t_{\alpha/2})$  y  $(x - t_{\alpha/2})$  = éstos parámetros proporcionan los límites superior e inferior de un valor o una media muestral a un determinado nivel de confianza.

Error absoluto= El error absoluto en una estimación de emisiones o algún otro parámetro es la diferencia entre el valor estimado y el valor “verdadero” o “conocido” cuando éste último es medido por métodos directos, por ejemplo realizando mediciones con equipo especializado de la calidad del aire u algunas otras observaciones. La ecuación que determina el error absoluta de una estimación respecto a una medición directa es similar a la ecuación 1.

$$E_{abs} = \bar{x} - x_{obs} \quad (16)$$

Dónde:

$E_{abs}$ = Es el error absoluto en las unidades de la variable medida y la observada

$x_{obs}$ = Es la medición directamente medida de la variable, debe corresponder en unidades a la variable estimada para determinar el error absoluto.

Error relativo= Es el error absoluto, expresado como porcentaje o fracción del valor real estimado, tiene semejanza con la incertidumbre relativa, es una medida apropiada para homologar las unidades de las mediciones y poder comparar la precisión de las estimaciones, la ecuación que expresa el error relativo a partir de las variables estimadas y observadas es la siguiente:

$$E_{rel} = \frac{\bar{x} - x_{obs}}{\bar{x}} * 100 \quad (17)$$

Dónde:

$E_{rel}$ = Es el error relativo entre la variable medida y la observada, es un valor porcentual, por lo tanto es adimensional.

Coefficiente de Variación = Determina el nivel o grado de variación en una serie de medidas o estimaciones, este valor expresa la desviación estándar de una muestra como un porcentaje de la media aritmética de la muestra. Es comúnmente usado en los inventarios de emisiones para definir cierto grado de

variabilidad o incertidumbre de una gran cantidad de información. La ecuación por medio de la cual se determina éste coeficiente de variación es la siguiente:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (18)$$

Dónde:

*CV*= Es el coeficiente de variación, el cual es el cociente entre las ya mencionadas desviación estándar (*s*) y la media (*x*), *de una serie de datos o parámetros que determinan cierta información útil en los inventarios de emisiones, tales como datos de actividad*, es un valor porcentual, por lo tanto es adimensional.

De acuerdo al procedimiento y a la naturaleza de cada subcategoría del inventario de emisiones, es indispensable conocer y aplicar los parámetros y descriptores estadísticos que nos ayuden a determinar las emisiones y su incertidumbre usando la información disponible con la mayor calidad y certeza posible.

Para la mayoría de las subcategorías de FA, los procedimientos de la incertidumbre combinada considerando distribuciones estadísticas normales o log normal para la información producen valores razonables de incertidumbre. Sin embargo, reiteramos que estos métodos consideran una independencia entre los parámetros involucrados, consideraciones que no siempre se suelen alcanzar. Una consecuencia de que ésta independencia no se cumpla del todo es que la precisión en las estimaciones de la incertidumbre, es por lo general muy irregular usando solamente éste enfoque estadístico.

Un ejemplo de la estimación de incertidumbres utilizando éste método es el estudio de la estimación de incertidumbre en las emisiones de gases de efecto invernadero para ciertas categorías del año 2005, desarrollado por el IPCC, los resultados se presentan en la Tabla 2, se muestran los valores de la incertidumbre relativa asociada al factor de emisión, al dato de actividad y la incertidumbre general de las categorías.

*Tabla 3. Resultados de la Cuantificación de Incertidumbres por método de Propagación del Error.*

Resultados de la incertidumbre de factores de emisión, datos de actividad y subcategorías en general.				
Gas Contaminante	Categoría de la Fuente	Incertidumbre Relativa del Factor de Emisión "U <sub>FE</sub> "	Incertidumbre Relativa del Dato de Actividad "U <sub>DA</sub> "	Incertidumbre General "U <sub>T</sub> "
CO <sub>2</sub>	Energía	7%	7%	10%
CO <sub>2</sub>	Procesos industriales	7%	7%	10%
CO <sub>2</sub>	Uso de suelo y silvicultura	33%	50%	60%
CH <sub>4</sub>	Quema de biomasa	1/2	1/2	1
CH <sub>4</sub>	Actividades con aceite y gas natural	55%	20%	60%
CH <sub>4</sub>	Minería de carbón y actividades manuales	55%	20%	60%
CH <sub>4</sub>	Cultivo de arroz	3/4	1/4	1
CH <sub>4</sub>	Residuos	2/3	1/3	1
CH <sub>4</sub>	Animales	25%	10%	25%
CH <sub>4</sub>	Residuos animales	20%	10%	20%
N <sub>2</sub> O	Procesos industriales	35%	35%	50%

En la tabla anterior, no se muestran las incertidumbres de las categorías que parecen ser mayores del  $\pm 60\%$ . En su lugar, se muestra el juicio sobre la importancia relativa del factor de emisión y la incertidumbre de los datos de actividad, considerando una incertidumbre en esas subcategorías como 100%, para éstas subcategorías se representa la incertidumbre individual como fracciones, y la incertidumbre general como la suma de ambas.

El hecho de que la información de entrada en los modelos de emisiones a menudo violan los supuestos de independencia es una debilidad importante en la

mayoría de las metodologías simples para la estimación de incertidumbres de las emisiones. Por otra parte, una de sus mayores ventajas, es su costo de implementación relativamente bajo en comparación con otros métodos. En muchas circunstancias, las estimaciones razonables de incertidumbre para un inventario de emisiones pueden ser desarrolladas por menos de 2 000 horas de esfuerzo mediante las primeras aproximaciones estadísticas que brinda la incertidumbre combinada (EIIP, 1997).

El método de propagación del error para determinar incertidumbres resulta ser el más apropiado de los 3 métodos aquí descritos y propuestos por el IPCC para los inventarios de emisiones, debido a sus bases científicas y estadísticas, éste método resulta más confiable que la determinación por juicio de expertos, y debido a la posibilidad de su realización en cuestión de bajos costes y menos tiempo, resulta mejor en comparación con los métodos de simulación directa, aunque tiene las limitantes de que sí hay subcategorías en las cuales los valores de las incertidumbres relativas de sus parámetros exceden el 60%, la incertidumbre general del inventario no puede ser evaluada de la misma manera. Además en caso de no contar con la información necesaria para determinar las incertidumbres relativas de cada parámetro involucrado o su distribución estadística, la incertidumbre de estos parámetros puede ser determinada a juicio de expertos siguiendo las consideraciones que se mencionan en la sección 4.2.2.

En el presente trabajo se propone un procedimiento aplicable para determinar incertidumbres en la mayoría de las subcategorías de los inventarios de emisiones, en dicho procedimiento se usaran tanto técnicas de juicio de expertos como algunas de las técnicas mencionadas en el método de propagación del error, usando los parámetros estadísticos y los procedimientos que sean necesarios de los descritos en ésta sección.

## ***5. Propuesta de un Procedimiento para los inventarios Actuales de México***

Cómo objetivo de éste trabajo y con base en las recomendaciones del IPCC para el reporte de las estimaciones de incertidumbre en los inventarios de emisiones de contaminantes, las cuales se encuentran en el capítulo 3 del volumen 1 de las directrices 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, (IPCC, 2006). Se presenta el desarrollo de un procedimiento, que de manera simple y de una forma muy completa y adecuada a los inventarios de emisiones para México, nos permita cuantificar la incertidumbre de las emisiones de contaminantes criterio.

Se proponen 7 pasos iniciales como guía práctica, y con su respectiva descripción detallada más adelante.

Los pasos propuestos son los siguientes:

1. Recopilación de Información Disponible.
2. Desarrollo del Modelo Matemático General.
3. Desagregación del Modelo en Ecuaciones Simples (sumas, restas, productos o cocientes).
4. Definición de la Incertidumbre a Reportar.
5. Evaluación de los Parámetros Desagregados.
6. Determinación de la Incertidumbre General.
7. Análisis y Reporte de la Incertidumbre.

A continuación se describe con más detalle cada uno de los pasos desarrollados.

### ***5.1. Recopilación de Información Disponible.***

Principalmente éste paso se desarrolla a la par de la recopilación de la información para la estimación de emisiones, sin embargo, no siempre es necesaria toda la información que se recopila en principio, pues muchas veces se ajustan los métodos de estimación de acuerdo a la información disponible, cambiando en ocasiones la metodología inicialmente planteada. Una vez

elaborada la estimación de emisiones, es importante capturar a la brevedad posible la información referente a la incertidumbre o la variación de los parámetros utilizados en la estimación de emisiones, el valor más importante, si se llega a reportar por las fuentes oficiales es la propia incertidumbre, pero en ocasiones es necesario determinarla estadísticamente basándonos en otra información estadística cómo la descrita en la sección 4.2.3.

Alguna de la información cuantitativa más común y de mucha ayuda para estimar incertidumbres que se puede recopilar además de la incertidumbre es:

- Error absoluto y relativo.
- Varianza.
- Variación de inventarios.
- Intervalo de confianza de la Información.
- Tipo de distribución estadística de la información.
- Cualquier otra estadística relacionada directamente con el parámetro de alimentación.

En ocasiones la confianza o incertidumbre de la información no se presenta de manera cuantitativa, como es el caso de muchos factores de emisión en el AP-42, pero se encuentra indicada la calidad con un rango de letras que van de la “A” a la letra “E”, como ya se mencionó anteriormente, en éste caso se puede recurrir al juicio de expertos u algún otro método apropiado para cuantificar el rango de calidad y así poderlo incluir en el modelo de estimación de incertidumbres cuantitativo.

Basándonos en la descripción de la tabla de rangos de calidad para factores de emisión (ver Tabla 1), en éste trabajo se asignaron a juicio de experto los valores presentados en la Tabla 4 para cuantificar la incertidumbre a cada rango describiéndose además la justificación del valor asignado.

*Tabla 4. Asignación a Juicio de Experto de un Valor de Incertidumbre Relativa a Rangos de Calidad de Factores de Emisión del AP-42.*

<b>Rango de Calidad</b>	<b>Incertidumbre Relativa Asignada</b>	<b>Justificación.</b>
A	2%	El factor es desarrollado a partir de fuentes muy confiables, además de incluir muchas instalaciones elegidas al azar representativas de toda la población, por lo tanto la variabilidad es minimizada.
B	5%	El factor es desarrollado a partir de fuentes muy confiables, tomados de un número razonable de instalaciones, pero no es claro si éste número realmente es una muestra aleatoria representativa de toda la población. Sin embargo como las fuentes son confiables, la variabilidad es mínima.
C	10%	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información donde la mayoría son muy confiables, tomados de un número razonable de instalaciones, tampoco es claro que la muestra sea realmente representativa de toda la población, sin embargo, por la calidad de las fuentes de información, también se minimiza la variabilidad.
D	20%	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información donde se busca que la mayoría sean confiables, pero el número de la muestra es pequeño, entonces es probable que la muestra no represente a toda la población, entonces hay más probabilidad de variación.
E	40%	El factor es desarrollado a partir de fuentes de información calificadas como de mediana calidad, y puede haber razones para sospechar que las instalaciones no representan una muestra aleatoria de la población, por lo tanto puede haber más variabilidad dentro de la población.

## **5.2. Desarrollo del Modelo Matemático General.**

Una vez identificados todos los parámetros de entrada necesarios para el modelo matemático de las emisiones, se desarrolla la ecuación general para determinar el valor de éstas emisiones, y se desarrolla una ecuación correspondiente para la estimación de la incertidumbre general de acuerdo a la naturaleza del modelo.

Es muy importante homologar la información en las mismas unidades, se recomienda usar las indicadas en el Sistema Internacional de Unidades (SI) para el caso de magnitudes físicas, y en el caso de los parámetros de los datos de actividad y distribución, unidades individuales, como personas, viviendas, consumo, etc.

La mayoría de los modelos de emisiones en fuentes de área, se basan en modelos matemáticos del producto del factor de emisión (F.E.) por el dato de actividad (D. a.), de acuerdo a la ecuación 6.

Sin embargo en la mayoría de los casos es necesario desarrollar el dato de actividad de acuerdo a la información disponible para que coincida con las unidades del factor de emisión, y en el proceso muchas veces al dato de actividad hay que realizarle ajustes matemáticos y estadísticos de distribución con ciertas consideraciones o suposiciones en la información, de manera que la ecuación general de emisiones se puede expresar más correctamente como el múltiplo de una función del dato de actividad por una función del factor de emisión de la siguiente manera:

$$Emisiones = f(D. a) * f(F. E) \quad (19)$$

Dónde tanto el dato de actividad como el factor de emisión, pueden ser funciones independientes y por lo tanto tienen su propio modelo matemático ya sea de diferentes operaciones como productos, sumas o divisiones entre otras, siendo así posible desarrollar un modelo matemático final, el cual sea una combinación de todas las operaciones involucradas, teniendo cuidado de manejar siempre las mismas unidades y reportarlas en las unidades requeridas para los

inventarios, por lo general al ser inventarios anuales, las unidades comunes son: [emisiones de contaminante/unidad de Tiempo].

### **5.3. Desagregación del Modelo en Ecuaciones Simples (sumas, restas, productos o cocientes)**

Considerando que la mayoría de los modelos matemáticas para la estimación de emisiones en las subcategorías de los inventarios nacionales, utilizan parámetros que a su vez pueden tener más de un modelo matemático con subparámetros más simples, es recomendable desglosar los modelos complicados en modelos simples y obtener un modelo general para las emisiones finales, que de preferencia sea una función suma o producto de parámetros simples, de manera que la ecuación final sea una operación básica suma o producto de subparámetros desglosados (llamémosles a los subparámetros  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  dependiendo que tan complejo resulte el modelo), los modelos matemáticos desglosados serán asimismo de un solo tipo de operación, ya sea un producto, divisiones, o una sumas y restas, y evitar en la medida de lo posible la combinación de ambos tipos de operaciones.

Además de ayudarnos a entender mejor el proceso de las emisiones, la organización del modelo general en ecuaciones más simples nos ayudará con la estimación de la incertidumbre en cada parámetro, ya sea absoluta o relativa, si usamos las 2 ecuaciones correspondientes para la incertidumbre (ecuación 7 y 8) según el modelo matemático que nos ayude a estimar las emisiones.

*Tabla 5. Tipos de Ecuaciones para el Cálculo de Incertidumbre de Acuerdo al Modelo de Emisiones.*

Tipo de Función.	Modelo Emisiones (E).	Ecuación Incertidumbre General ( $U_T$ ).
Sumatoria y/o resta	$E = x_1 + x_2 + \dots + x_n$	$U_E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{x_i})^2}$

Tipo de Función.	Modelo Emisiones (E).	Ecuación Incertidumbre General (U <sub>T</sub> ).
Producto y/o Cociente	$E = x_1 * x_2 * \dots * x_n$ <p style="text-align: center;">y/o</p> $E = x_{x1}/x_{x2}$	$U_{rel E} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{rel x_i})^2}$

#### **5.4. Definición de la Incertidumbre a Reportar.**

Una vez determinado el modelo matemático final para el cálculo de las estimaciones en función de operaciones básicas, y por lo tanto definiendo la ecuación para la incertidumbre general. Se desarrolla el modelo matemático para determinar las incertidumbres de los subparámetros involucrados, en caso de que el valor venga reportado en la fuente oficial de la información consultada, se capturaría dicho valor directamente con su incertidumbre, y en caso de ser información que se tenga que estimar mediante el desarrollo de un modelo que involucre otros parámetros intermedios, se determinarían sus respectivas incertidumbres como más convenga, absoluta, en caso de que el modelo final sea una función suma, o como relativa, en caso de que sea una función producto usando nuevamente las ecuaciones generales 7 y 8, ajustándolas a los parámetros deseados.

Este paso recopila y repite en caso de ser necesario los pasos 1 y 2 del presente procedimiento propuesto, pero adaptándolo a cada subparámetro individual que se pueda estimar a su vez con un modelo matemático independiente, se debe realizar el modelamiento matemático de los parámetros las veces que sean necesarias hasta que todos los subparámetros de interés sean definidos por fuentes oficiales junto con su respectiva incertidumbre, procurando siempre que el modelo matemático sea sólo de ecuaciones básicas (ya sean sumas, restas, cocientes o productos).

Buscar la opción más práctica y resumida del modelo matemático general es una buena opción para no repetir incertidumbres asociadas entre sí, además de

facilitar el manejo del modelo final, por ejemplo, al capturar la incertidumbre en el consumo de cierto combustible por vivienda, y el de viviendas por municipio, resulta que ambos son parámetros diferentes, pero que tienen una misma fuente de información en común: las cifras de viviendas nacional y municipal. Para no repetir la incertidumbre de las viviendas, ya que se trata de la misma para los dos parámetros, se reajusta el modelo de manera que se pueda realizar una fracción municipal de viviendas por municipio, el cual ya incluirá la incertidumbre la fuente de información y el consumo total del combustible con su respectiva incertidumbre sin necesidad de repetirla en el modelo.

La idea de estos ajustes es usar la menor cantidad de operaciones y parámetros para la estimación de incertidumbres, sin perder el objetivo del modelo matemático general: la estimación precisa de las emisiones.

### ***5.5. Evaluación de los Parámetros Desagregados.***

Una vez desarrollados los modelos matemáticos de los parámetros necesarios (con un sólo tipo de operaciones básicas), se recomienda desarrollar los cálculos para determinar la incertidumbre de cada uno, usando las ecuaciones correspondientes dependiendo de la estructura del modelo, y se recomienda capturar cada valor del parámetro junto con respectiva incertidumbre, tanto incertidumbre absoluta, como incertidumbre relativa pueden ser de utilidad, pues dependiendo de la naturaleza de la función que involucran ciertos parámetros, se usará la forma relativa o la absoluta para calcular la incertidumbre general de toda la categoría a evaluar, para eso hay que analizar todos los parámetros, subparámetros y sus respectivos modelos matemáticos resultantes.

### ***5.6. Determinación de la Incertidumbre General.***

Ya teniendo el valor de todos los parámetros reportados en las fuentes de información oficiales y habiendo calculado el valor de las emisiones con su respectiva incertidumbre mediante los modelos matemáticos propuestos, se agruparán los subparámetros relacionados entre sí, para obtener la ecuación y los resultados del modelo general de emisiones, junto con su incertidumbre general en determinada subcategoría evaluada.

Una vez más se busca que la ecuación final sea sólo de sumas y restas de parámetros, o de productos y cocientes para así hacer uso de las ecuaciones propuestas en el paso 3.

A continuación se presentan la ecuación general para estimar la incertidumbre absoluta del inventario total en función de las incertidumbres absolutas de las subcategorías previamente evaluadas.

$$U_T = \pm \sqrt{(U_{E_1})^2 + (U_{E_2})^2 + \dots + (U_{E_n})^2} \quad (20)$$

Dónde n depende de la cantidad de subcategorías o categorías consideradas en el inventario total de emisiones.

### ***5.7. Análisis y Reporte de la Incertidumbre.***

Las emisiones y la incertidumbre final deben estimarse en las unidades correspondientes de acuerdo los requerimientos del inventario, tanto de la estimación de emisiones, como de la incertidumbre asociada, ya sea absoluta o relativa. El valor obtenido debe ser analizado con objetividad, observando que los valores de incertidumbre que se obtengan no se disparen de manera incoherente en relación a la incertidumbre de los subparámetros, de ser así, se debe analizar la razón de dicho comportamiento, analizar el cálculo efectuado para localizar y corregir los posibles errores dentro de la metodología empleada, y en caso de ser necesario se debe recalcular el estimado para verificar que todas las operaciones se realicen correctamente.

Una vez revisada tanto la metodología empleada, como los resultados obtenidos, y realizado las correcciones pertinentes en caso de ser necesarias para la estimación adecuada de la incertidumbre general, lo ideal es que se reporte la estimación de emisiones más menos ( $\pm$ ) su respectiva incertidumbre a manera de la ecuación 1, eligiendo la incertidumbre más adecuada a tratar para todo el inventario, ya sea la relativa o la absoluta, y de ser requerido se debe de especificar el método que se usó para la estimación, junto con las respectivas fuentes de información consultadas y las consideraciones que se hayan realizado, así como los valores asignados subjetivamente u otras observaciones realizadas.

## **6. Aplicación de un caso de estudio (Combustión Domestica 2014).**

Como ejemplo de la aplicación del procedimiento de los 7 pasos para determinación de incertidumbres, se presentan las estimaciones para el cálculo de la incertidumbre asociadas a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV's) de la subcategoría de "Combustión Domestica", en el inventario nacional de emisiones en México (INEM) 2014, describiéndose la aplicación de cada paso realizado en el procedimiento propuesto.

Se eligió la subcategoría debido a su importancia en los inventarios de emisiones anteriores de México y a su alto índice de incertidumbre estimada, asociada principalmente a la falta de información precisa respecto al uso de la tecnología involucrada en la combustión de combustibles del sector residencial a nivel nacional, y otra parte asociada a la falta de estudios suficientes para desarrollar factores de emisión adecuados a la diversidad de condiciones que representen a México y su actividad en el consumo de combustibles a nivel residencial, por lo tanto, la combustión doméstica es considerada una categoría principal de acuerdo a las definiciones del IPCC en el capítulo 4 del volumen 1, para identificar categorías principales en los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales se aplican muy bien al desarrollo de los inventarios en México (IPCC, 2006).

### **6.1. Paso 1: Recopilación de Información Disponible.**

Para la estimación de emisiones y la determinación de incertidumbres, se siguió la metodología planteada por la IPCC para la estimación de emisiones, en la cual la subcategoría "Combustión Residencial" representa el sector 1.A.4.b de la clasificación de categorías emisoras de contaminantes del IPCC localizadas en el capítulo 2 "Combustión Estacionaria" del volumen 2, de las directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006).

El primer paso tanto para la estimación de emisiones, como para el cálculo de su correspondiente incertidumbre en cualquier categoría, es la recopilación minuciosa de la información; de acuerdo a la información disponible, se realizaron estimaciones clasificadas como nivel 1, (de acuerdo a los parámetros propuestos

en las directrices del IPCC en el capítulo 4 del volumen 1), para los combustibles gas natural, gas licuado de petróleo (GLP) y queroseno, debido a que no hay suficiente información disponible para determinar factores de emisión de COV's para ésta subcategoría en México, y por lo tanto se usaron los factores de emisión propuestos en el AP-42 (USEPA, 2017), al no ser factores de emisión nacionales, se determina una estimación de nivel 1 en el uso de éstos combustibles, y en el caso del combustible leña, al usarse el valor de un factor de emisión desarrollado en un estudio de quema del combustible en comunidades mexicanas y en condiciones semejantes a las representativas del país para el consumo de dicho combustible, la estimación realizada se considera de nivel 2.

Para los datos de actividad se consultó información de fuentes nacionales y oficiales, tales como INEGI o la SENER, pero para obtener la información estadística que determine la incertidumbre, en ocasiones se usaron fuentes de información complementarias a las estadísticas reportadas, algunas vienen adjuntas en el documento oficial, como en el caso de la incertidumbre en los censos de viviendas y población, la cual se puede capturar del documento: "Diseño muestral censal" (INEGI, 2011).

Los valores y sus respectivas fuentes de información consultadas para definir los datos de actividad necesarios para estimar emisiones de COV's por combustiones domesticas se indican en la Tabla 6, así como el valor capturado de su incertidumbre.

*Tabla 6. Información Recopilada para Datos de Actividad en la Categoría Combustión Domestica.*

<b>Parámetro Consultado.</b>	<b>Fuente del Información.</b>	<b>Valor general y Unidades Correspondientes.</b>	<b>Valor relativo de Incertidumbre.</b>
Viviendas habitadas en el 2014.	Banco de Información INEGI. ENIGH. (INEGI, 2015).	31,128,396 viviendas	10% <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Obtenida de la "Encuesta Intercensal 2015 Síntesis Metodológica y conceptual" (INEGI, 2015).

Parámetro Consultado.	Fuente del Información.	Valor general y Unidades Correspondientes.	Valor relativo de Incertidumbre.
Viviendas habitadas por municipio en el 2010.	Censo de Población y Vivienda 2010. INEGI (INEGI-BIE, 2017).	28,159,373 viviendas	20% <sup>b</sup>
Consumo Nacional de combustibles en el sector Residencial 2014	Balance Nacional de Energía 2014 (SENER, 2015), cuadros 15 y 24.	Gas Natural: 39.86 PJ Gas L.P: 257.11 PJ Leña : 254.12 PJ Queroseno: 1.91 PJ	1.04% <sup>c</sup>
Proporción municipal del consumo de leña en casas a nivel nacional.	Información generada con datos del cuestionario ampliado de INEGI, del Censo de Población y Vivienda 2010	Distribución fraccional por municipio.  La suma del total de municipios dará 100%	10.35% <sup>d</sup>
Unidades de Producción con Actividad Agropecuaria o Forestal (UPAAF), consideradas principales consumidoras de queroseno en el sector residencial.	INEGI. Estados Unidos Mexicanos. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, Ags. 2009. (INEGI, 2007)	4,069,927 UPAAF's	5% <sup>e</sup>

Los factores de emisión en las unidades correspondientes para la estimación de emisiones se obtuvieron principalmente del AP-42 (USEPA, 2017), los cuales fueron desarrollados para los estados unidos en su mayoría, pero considerando el proceso de combustión y la tecnología muy similar a la usada en México, son considerados apropiados para usarse en el cálculo de estimaciones,

<sup>b</sup> Obtenida del “*Diseño Muestra censal 2010*” (INEGI, 2011).

<sup>c</sup> La variación de inventarios para éstos parámetros corresponde al 1.04% del valor de consumo en cada uno de los combustibles de acuerdo a la información de los cuadros 15 y 24 del Balance Nacional de Energía.

<sup>d</sup> La información consultada reporta una confianza de 90%. El aumento de población nacional de 2014 con 2011 es de 1.035, por lo que la incertidumbre relativa 2014 se estima en 10.35%.

<sup>e</sup> Valor asignado en la metodología del cuestionario realizado por INEGI para contabilizar dichas unidades de producción agropecuarias. (INEGI, 2007)

considerando a su vez su clasificación de calidad reportada en el AP-42, y a juicio de experto se le asignó un valor cuantitativo de incertidumbre a cada factor de emisión para los combustibles gas natural, GLP, y queroseno de acuerdo a la Tabla 4 correspondiente a su rango, el factor de emisión para leña, el cual por tener variaciones considerables en cuestión al proceso de combustión que se describe en el AP-42, se eligió con base a dos estudios realizados más recientemente, uno desarrollado en México para uso de leña en fogones (Michael Johnson, 2008), con valor de 3.2 g de carbono en Hidrocarburos totales menos metano ( $g C_{HCNM}$ ), emitidos por kilogramo de leña quemada, y otro factor de emisión de un estudio realizado en África: "Domestic biomass combustion and associated atmospheric emissions in West Africa". (Lacaux, 1998), el cual se consideró que tiene mucha similitud respecto a las condiciones de quema de leña en comunidades rurales de México, éste estudio reporta un factor de emisión de 2.5  $g C_{HCNM}$  por kilogramo de leña en combustión, el primero factor de emisión, al ser desarrollado en localidades mexicanas rurales y ser más reciente, se consideró mejor opción, sin embargo el estudio de Michael Johnson y colaboradores, reportan una desviación estándar al valor de 3.5 unidades de  $g C_{HCNM}$ , lo que correspondería a una incertidumbre de más del 100%, y a un límite inferior indefinido por estar en el rango de los números negativos, y eso sería imposible en la práctica, así que para comparar el resultado, y así estimar un límite inferior y un límite superior dentro de lo medible, se consideró el límite inferior del segundo estudio, el cual reporta un factor de emisión de 2.5 con una incertidumbre de 1.3, la cual nos determina un límite inferior definido para el factor de emisión, que no está por debajo del cero.

Basándonos en éstos dos valores de factores de emisión en unidades de  $g C_{HCNM}$ , se definió los valores del rango para éste parámetro, basándonos en lo indicado en el capítulo 4.2.2 y 4.2.3 del presente trabajo. De ésta manera se definió que el valor del factor de emisión para la combustión de leña en México debe de estar en el rango de 1.2-6.7  $g C_{HCNM}/kg$  leña, en dicho rango, el valor central, sería de 3.95  $g C_{HCNM}/kg$  leña, lo anterior se puede expresar de la siguiente manera:

$$FE_{leña} = \frac{(Ls FE_{leña} + Li FE_{leña})}{2} \quad (21)$$

Dónde:

$FE_{leña}$  = Es el valor central entre el límite inferior y superior definidos por los factores de emisión usados para el combustible leña. En unidades de gramos de hidrocarburos menos metano por kilogramo de leña quemada [ $g_{C_{HCNM}}/kg$  leña].

$Ls FE_{leña}$  = Es el límite inferior definido del valor del factor de emisión de leña, establecido por el valor del límite inferior del estudio en África, el cual reporta un valor de  $2.5 \pm 1.3$  [ $g_{C_{HCNM}}/kg$  leña], siendo éste límite inferior igual a  $1.2$  [ $g_{C_{HCNM}}/kg$  leña]

$Li FE_{leña}$  = Es el límite superior definido del valor del factor de emisión de leña, establecido por el valor del límite superior del estudio realizado en comunidades mexicanas, el cual reporta un valor de  $3.2 \pm 3.5$   $g_{C_{HCNM}}/kg$  leña, siendo el límite superior igual a  $6.7$   $g_{C_{HCNM}}/kg$  leña.

Remplazando los valores de la ecuación 21, el factor de emisión se determinó de la siguiente manera:

$$FE_{leña} = \frac{(6.7 \text{ g } C_{HCNM}/\text{kg leña} + 1.2 \text{ g } C_{HCNM}/\text{kg leña})}{2} \quad (22)$$

$$= 3.95 \text{ g } \frac{C_{HCNM}}{\text{kg}}_{leña}$$

Asimismo para la incertidumbre a usar en el factor de emisión, se considera el rango total de valores posibles arrojado por los límites inferior y superior definidos de la siguiente manera:

$$U_{FE} = \frac{(Ls FE_{leña} - Li FE_{leña})}{2} \quad (23)$$

Dónde:

$U_{FE}$  = Es el valor de la incertidumbre absoluta para el factor de emisión del combustible leña, usado para éste estudio. Con valor central de  $3.95$   $g_{C_{HCNM}}/kg$  leña.

Una vez más, sustituyendo los valores de los límites en la ecuación 23, obtenemos:

$$U_{FE_{leña}} = \frac{6.7 \left[ \frac{g C_{HCNM}}{kg leña} \right] - 1.2 \left[ \frac{g C_{HCNM}}{kg leña} \right]}{2} = 2.75 \left[ \frac{g C_{HCNM}}{kg leña} \right]$$

Una vez teniendo la incertidumbre absoluta, podemos expresar el valor del factor de emisión para el combustible leña, en la forma de la ecuación 1 de la siguiente manera:

$$FE_{leña} = 3.95 \pm 2.75 \left[ \frac{g C_{HCNM}}{kg leña} \right]$$

La incertidumbre relativa de éste parámetro, se calcula de acuerdo a la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$U_{rel FE_{leña}} = \frac{U_{FE_{leña}}}{FE_{leña}} \quad (24)$$

$$= \frac{2.75 \left[ \frac{g C_{HCNM}}{kg leña} \right]}{3.95 \left[ \frac{g C_{HCNM}}{kg leña} \right]} = 0.70$$

Para poder visualizar con mayor claridad la información, se determinan los factores de información en términos porcentuales con ayuda de la ecuación 3, para el combustible leña, el cálculo quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} U_{\% FE_{leña}} &= 0.70 * 100\% \\ &= 70 \% \end{aligned}$$

Una vez recopilado la información referente a los factores de emisión y su respectiva incertidumbre, se presentan en la Tabla 8, los valores usados por cada combustible para el cálculo de emisiones y su respectiva incertidumbre porcentual.

Tabla 7. Información de los F.E. recopilados para la subcategoría: “Combustión Domestica”.

Combustible	Valor	Rating del AP-42	Incertidumbre Relativa Asociada [%]
Gas Natural	$88 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{Mg}_{\text{COV's}}}{\text{hm}^3 \text{GN}} \right]$	C	10 %
Leña	$3.95 \left[ \frac{\text{g C}_{\text{HCNM}}}{\text{kg leña}} \right]$	N/D	70% <sup>f</sup>
Gas L.P	$10.1 \times 10^{-5} \left[ \frac{\text{Mg}_{\text{COV's}}}{\text{m}^3 \text{GLP}} \right]$	E	40 %
Queroseno	$4.0 \times 10^{-5} \left[ \frac{\text{Mg}_{\text{COV's}}}{\text{m}^3 \text{Queroseno}} \right]$	A	2 %

### 6.2. Paso 2: Desarrollo del Modelo Matemático General.

El modelo general de las emisiones es una suma de las emisiones ocasionadas por la combustión de los 4 combustibles involucrados (Gas Natural, Gas L.P, Leña y Queroseno) cada valor de emisión se obtiene al multiplicar el dato de actividad respectivo por el factor de emisión del combustible en cuestión.

Con base en la ecuación 19, para determinar las emisiones totales de la subcategoría “Combustión Domestica”, se determinó la ecuación general de la subcategoría mediante las emisiones ocasionadas por los cuatro combustibles presentes de la siguiente manera:

<sup>f</sup> Calculada usando los limites superior e inferior asignados.

$$E_T \text{ "Combustión Domestica"} = E_{GN} + E_{GLP} + E_{Leña} + E_{Queroseno} \quad (25)$$

Dónde:

$E_{TCOV's}$  "Combustión Domestica" = Es el valor de las emisiones totales de COV's estimadas para la subcategoría de "Combustión Domestica", en el inventario nacional de emisiones 2014.

$E_{GN}$  = Es el valor de las emisiones de COV's estimadas para el combustible gas natural, en la subcategoría "Combustión Domestica" del inventario nacional de emisiones 2014.

$E_{GLP}$  = Es el valor de las emisiones de COV's estimadas para el combustible gas licuado de petróleo, en la subcategoría "Combustión Domestica" del inventario nacional de emisiones 2014.

$E_{Leña}$  = Es el valor de las emisiones de COV's estimadas para el combustible leña, en la subcategoría "Combustión Domestica" del inventario nacional de emisiones 2014.

$E_{Queroseno}$  = Es el valor de las emisiones de COV's estimadas para el combustible queroseno, en la subcategoría "Combustión Domestica" del inventario nacional de emisiones 2014.

Todas las unidades, deben corresponder y ser congruentes en las ecuaciones finales, generalmente se usan unidades másicas [g/, kg, Mg, etc.] entre tiempo para los inventarios nacionales de emisiones. En éste estudio, se reportarán los resultados de las emisiones finales en unidades de Megagramos por año [Mg/año].

Así mismo, la incertidumbre absoluta de la categoría se calculó con base en la Tabla 5 usando la ecuación 8 en términos de incertidumbres absolutas:

$$U_{E_T \text{ "Combustión Domestica"}} = \pm \sqrt{(U_{E_{GN}})^2 + (U_{E_{GLP}})^2 + (U_{E_{Leña}})^2 + (U_{E_{Queroseno}})^2} \quad (26)$$

Dónde:

$U_{E_T \text{ "Combustión Domestica"}}$  = Es la incertidumbre absoluta del total de emisiones de COV's estimadas para la subcategoría de "Combustión Domestica".

$U_{E_{GN}}$  = Es el valor de la incertidumbre absoluta asociada a las emisiones de COV's para el combustible gas natural.

$U_{E_{GLP}}$  = Es el valor de la incertidumbre absoluta asociada a las emisiones de COV's estimadas para el combustible gas licuado de petróleo.

$U_{E_{Leña}}$  = Es el valor de la incertidumbre absoluta asociada a las emisiones de COV's estimadas para el combustible leña.

$U_{E_{Queroseno}}$  = Es el valor de la incertidumbre absoluta asociada a las emisiones de COV's estimadas para el combustible queroseno.

### ***6.3. Paso 3: Desagregación del modelo en ecuaciones simples (sumas, restas, productos o cocientes).***

En éste paso se presentan los modelos matemáticos que se desarrollaron para la estimación de las emisiones asociadas al consumo de los cuatro combustibles, considerando que sus emisiones se basan en el modelo representado por la ecuación 6, el cual involucra un factor de emisión multiplicado por un dato de actividad.

Con fines prácticos y para poder manejar mejor la información documentada, en éste paso se desglosa la información contenida en el dato de actividad para determinar el consumo de combustible y para su distribución a nivel municipal.

Se presentan las ecuaciones de la estimación de emisiones de COV's para cada uno de los cuatro combustibles involucrados en la subcategoría y la ecuación de sus correspondientes incertidumbres.

#### **Para Gas Natural:**

##### Emisiones de COV's:

$$E_{GN} = Viv\ GN\ 2014 * Consumo_{GN} * FE_{G.N.} \quad (27)$$

Dónde:

$E_{GN}$  = Son las emisiones de COV's derivadas de la combustión del combustible gas natural en el sector residencial, en éste parámetro

manejaremos las unidades finales que usaremos para determinar las emisiones totales [Mg /año].

*Viv GN 2014*= Es nuestro dato de actividad para definir la distribución de las emisiones, y es la fracción de viviendas por municipio que consumen gas natural con respecto al total nacional que consumen el combustible reportado para el año 2014 por INEGI y la CRE, utilizando la información disponible tanto del Censo de población y vivienda 2010, como de la ENIGH 2014 y la disponibilidad de combustible gas natural por municipio de la CRE.

*Consumo<sub>GN</sub>*= Es el consumo nacional de gas natural, se usa el valor del total nacional reportado por la SENER, y la estimación del municipio de interés se verá reflejado en el valor de *Viv GN 2014* para cada municipio, el cual es una fracción nacional, asumiendo el mismo consumo por vivienda para todo el país. El dato será manejado en unidades congruentes al factor de emisión recopilado, en éste caso, será en unidades de hectómetros cúbicos [hm<sup>3</sup> GN].

*FE<sub>GN</sub>*= Factor de emisión de COV's para gas natural expresado en Megagramos de COV's por hectómetro cúbico de gas natural  $\left[ \frac{Mg_{COV's}}{hm^3_{GN}} \right]$ .

Incertidumbre relativa de E<sub>GN</sub>:

Usando la ecuación 7:

$$U_{rel E_{GN}} = \pm \sqrt{(U_{rel Viv GN 2014})^2 + (U_{rel Consumo_{GN}})^2 + (U_{rel FE_{GN}})^2} \quad (28)$$

Incertidumbre absoluta de E<sub>GN</sub>:

Usando la ecuación 2:

$$U_{E_{GN}} = \pm (U_{rel E_{GN}} * E_{GN}) \quad (29)$$

## **Para Gas Licuado de Petróleo:**

Emisiones de COV's:

$$E_{GLP} = Viv GLP 2014 * Consumo GLP * FE_{GLP} \quad (30)$$

Dónde:

$E_{GLP}$ = Son las emisiones de COV's derivadas de la combustión del combustible gas LP en el sector residencial, en éste parámetro manejaremos las unidades finales que usaremos para determinar las emisiones totales [Mg /año].

$Viv\ GLP\ 2014$ = Es nuestro dato de actividad para definir la distribución de las emisiones, y es la fracción municipal de consumo de GLP respecto al total nacional, usando la información de viviendas por municipio reportado para el año 2014 por INEGI, y correlacionándola con el consumo de GLP por estado reportado en el año 2014 por la SENER.

$Consumo\ GLP$ = Es el consumo nacional de GLP, se usa el valor del total nacional reportado por la SENER, y la estimación del municipio de interés se verá reflejado en el valor de  $Viv\ GLP\ 2014$ , asumiendo la misma cantidad de consumo por vivienda en todo el país. El dato será manejado en unidades congruentes al factor de emisión recopilado, en éste caso, será en unidades de hectómetros cúbicos [ $m^3\ GLP$ ].

$FE_{GLP}$ = Factor de emisión de COV's para gas licuado de petróleo expresado en Megagramos de COV's por metro cúbico de gas natural  $\left[ \frac{Mg\ COV's}{m^3\ GLP} \right]$ .

Incertidumbre relativa de  $E_{GLP}$ :

Usando la ecuación 7:

$$U_{rel\ E_{GLP}} = \pm \sqrt{(U_{rel\ Viv\ GLP\ 2014})^2 + (U_{rel\ Consumo\ GLP})^2 + (U_{rel\ FE_{GLP}})^2} \quad (31)$$

Incertidumbre absoluta de  $E_{GLP}$ :

Usando la ecuación 2:

$$U_{E_{GLP}} = \pm (U_{rel\ E_{GLP}} * E_{GLP}) \quad (32)$$

**Para Leña:**

Emisiones de COV's:

$$E_{Leña} = X_{LeñaMun} * Consumo\ Leña * FE_{Leña} \quad (33)$$

Dónde:

$E_{Leña}$  = Son las emisiones de COV's derivadas de la combustión del combustible leña en el sector residencial, en éste parámetro manejaremos las unidades finales para determinar las emisiones totales [Mg /año].

$X_{LeñaMun}$  = Es nuestro dato de actividad para definir la distribución de las emisiones, es la fracción municipal de consumo municipal de leña respecto al total nacional, usando la información del cuestionario ampliado de viviendas por municipio y consumo de combustibles reportado para el año 2010 por INEGI, y ajustándolo con el crecimiento poblacional al año 2014.

*Consumo Leña* = Es el consumo nacional de leña, se usa el valor del total nacional reportado por la SENER, relacionando de acuerdo al modelo mixto de consumo de leña para México. El dato será manejado en unidades congruentes al factor de emisión, por lo cual primero se ajusta el factor de emisión en unidades de COV's por unidad másica de leña, y las unidades a manejar para el consumo de leña serán Mg [Mg leña].<sup>9</sup>

$FE_{Leña}$  = Factor de emisión de COV's para la combustión de leña expresado en Megagramos de COV's por Megagramo de leña quemada  $\left[ \frac{Mg_{COV's}}{Mg_{Leña}} \right]$ .

Incertidumbre relativa de  $E_{Leña}$ :

Usando la ecuación 7:

$$U_{rel E_{Leña}} = \pm \sqrt{(U_{rel X_{LeñaMun}})^2 + (U_{rel Consumo Leña})^2 + (U_{rel FE_{Leña}})^2} \quad (34)$$

Incertidumbre absoluta de  $E_{Leña}$ :

Usando la ecuación 2:

$$U_{E_{Leña}} = \pm (U_{rel E_{Leña}} * E_{Leña}) \quad (35)$$

**Para Queroseno:**

Emisiones de COV's:

$$E_{Queroseno} = X_{QueroMun} * ConsumoQueroseno * FE_{Queroseno} \quad (36)$$

---

<sup>9</sup> Los cálculos para transformar el factor de emisión para leña se presentan en la sección 6.4, en la parte del combustible Leña.

Dónde:

$E_{Queroseno}$  = Son las emisiones de COV's derivadas de la combustión del combustible queroseno en el sector residencial, en éste parámetro manejaremos las unidades finales que usaremos para determinar las emisiones totales [Mg /año].

$X_{QueroMun}$  = Es nuestro dato de actividad para definir la distribución de las emisiones, es la fracción del número de Unidades de Producción Agropecuaria con Actividad Forestal (UPAAF) con uso de tractor, estimado por municipio respecto al total nacional, usando la información del censo agropecuario 2007 de INEGI.

$ConsumoQueroseno$  = Es el consumo nacional de queroseno, se usa el valor del total nacional reportado por la SENER, y la estimación por municipio se verá reflejado en el valor de  $X_{QueroMun}$ . El dato será manejado en unidades congruentes al factor de emisión, en éste caso las unidades a manejar son  $m^3$  de queroseno [ $m^3$  queroseno].

$FE_{Queroseno}$  = Factor de emisión de COV's para la combustión de queroseno expresado en Megagramos de COV's por metro cubico de queroseno consumido  $\left[ \frac{Mg_{COV's}}{m^3 \text{ queroseno}} \right]$ .

Incertidumbre relativa de  $E_{Queroseno}$ :

Usando la ecuación 7:

$$\begin{aligned} &U_{rel E_{Queroseno}} \\ &= \pm \sqrt{\left( U_{rel X_{QueroMun}} \right)^2 + \left( U_{rel Consumo \ Queroseno} \right)^2 + \left( U_{rel FE_{Queroseno}} \right)^2} \end{aligned} \quad (37)$$

Incertidumbre absoluta de  $E_{Leña}$ :

Usando la ecuación 2:

$$U_{E_{Queroseno}} = \pm (U_{rel E_{Queroseno}} * E_{Queroseno}) \quad (38)$$

#### **6.4. Paso 4: Determinación de la Incertidumbre a utilizar por parámetro.**

Para saber qué tipo de incertidumbre es conveniente capturar de la información o cómo reportar estimaciones asignadas a juicio de expertos para los parámetros que alimentan los modelos, es indispensable conocer la ecuación en la que se vayan a utilizar, analizar el modelo nos permitirá saber si la ecuación es un producto o división, en cuyo caso lo mejor es manejar incertidumbres relativas, o en el caso de que el modelo sea una suma o resta de subparámetros, conviene tener el dato de incertidumbre absoluta.

En el caso del consumo de combustible, las unidades deben ser congruentes con las unidades del factor de emisión, o en su defecto, transformar el factor correspondiente a las unidades del consumo de combustible, para el presente trabajo, se decidió transformar el consumo de combustible, reportado en el BNE en PetaJoules, a las unidades del factor de emisión correspondiente, para no alterar la incertidumbre ya registrada para los factores de emisión. Las transformaciones de unidades energéticas a unidades de volumen o masa como vienen generalmente los factores de emisión, requiere el uso de poderes caloríficos independientes para cada combustible, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_f = \frac{C_i}{PC_j} * FC \quad (39)$$

Dónde:

$C_f$  = Es el consumo de combustible final. Expresado en las unidades deseadas, congruentes con el FE correspondientes.

$C_i$  = Es el consumo de combustible inicial. Expresado en las unidades originales recopiladas en la referencia, frecuentemente unidades de energía.

$PC_j$  = Es el poder calorífico para del combustible de estudio j, se puede considerar como el factor de conversión de unidades de energía a unidades de materia, ya que es la energía que se libera de la combustión de una unidad másica o volumétrica del combustible de estudio.

$FC$  = Es el factor de conversión de para obtener el valor del consumo final del combustible en las unidades deseadas, puede variar en prefijos y unidades de acuerdo a los resultados y parámetros requeridos.

El valor del poder calorífico puede variar con las condiciones ambientales de la combustión y la humedad, esto ocasiona incertidumbre al parámetro mismo, Se consideraron dos referencias de información para determinar el poder calorífico a usar para cada combustible, el reportado en el mismo balance nacional de energía 2014 (SENER, 2015), y otro documentado en el documento oficial de la federación (SEGOB, 2016), la Tabla 8, muestra los resultados resumidos de los poderes caloríficos reportados tanto en el BNE, como en el DOF, ya en las unidades que se y la diferencia en cada caso, considerada como la incertidumbre absoluta

*Tabla 8. Poderes caloríficos de los combustibles estimados en la subcategoría del INEM: "Combustión Domestica".*

Combustible	Unidades correspondientes al FE	BNE	DOF	Diferencia absoluta	Promedio	$U_{PC}$
GN	PJ/hm <sup>3</sup>	3.79x10 <sup>2</sup>	3.54x10 <sup>2</sup>	2.47 x10 <sup>-3</sup>	3.67 x10 <sup>-2</sup>	6.74%
GLP	PJ/m <sup>3</sup>	2.59x10 <sup>-5</sup>	2.59x10 <sup>-5</sup>	0	2.59x10 <sup>-5</sup>	N/a
Leña	PJ/Mg	1.45x10 <sup>-5</sup>	1.45x10 <sup>-5</sup>	0	1.45x10 <sup>-5</sup>	N/a
Queroseno	PJ/m <sup>3</sup>	3.48 x10 <sup>-5</sup>	3.50 x10 <sup>-5</sup>	1.95 x10 <sup>-7</sup>	3.49E x10 <sup>-5</sup>	0.56%

Una vez registrada y estandarizada la información sobre el poder calorífico de los combustibles, la cual nos servirá para homologar las unidades en el modelo de emisiones final, se desglosa el modelo matemático de cada parámetro involucrado en la estimación de cada uno de los combustibles involucrados.

A continuación se describen las ecuaciones desglosadas en dónde se involucran los parámetros usados para la determinación de emisiones por cada combustible utilizado, y se describe el valor de la incertidumbre estimada para cada uno de ellos.

## Parámetros para Gas Natural (de la ecuación 27):

$$E_{GN} = Viv\ GN\ 2014 * Consumo_{GN} * FE_{G.N.}$$

### Viv GN 2014:

Este parámetro es una división entre el número estimado de viviendas para el municipio de interés, en donde haya distribución de GN de acuerdo a la CRE, entre el total de viviendas en los municipios con disponibilidad de gas natural, la ecuación para cada municipio se reduce a la siguiente expresión:

$$Viv\ GN\ 2014 = \frac{Número\ de\ Viviendas\ Municipal\ GN}{Total\ de\ Viviendas\ GN} \quad (40)$$

Dónde:

*Número de Viviendas Municipal GN*= Es el número de viviendas estimado para el municipio *i* en el 2014 con disponibilidad de GN.

*Total de Viviendas GN*= Es el número total de viviendas estimadas en 2014 con disponibilidad de GN.

En el caso de los municipios sin disponibilidad de gas natural, la fracción de éste parámetro se considerará cero para efectos de cálculo. Para los municipios con disponibilidad de gas natural, la ecuación que se usó para estimar el número de viviendas es la siguiente:

$$\begin{aligned} Número\ de\ Viviendas\ Municipal\ GN \\ =\ info\ Censo\ 2010 * info\ ENIGH\ 2014 \end{aligned} \quad (41)$$

Dónde:

*Fracción Viviendas 2010*= Es un valor fraccional de viviendas por municipio usando el censo de población y vivienda 2010 (INEGI, 2011), con error relativo máximo reportado de 0.2. De aquí obtenemos:  $U_{rel\ info\ Censo\ 2010} = 0.2$

*info ENIGH 2014*= Es el valor del total de viviendas en México en el año 2014, reportado en la “Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2014” (INEGI, 2015), con valor de 31,128, 396 viviendas, estimado con un diseño muestral establecido para minimizar el error relativo al 0.1, reportado en la síntesis metodológica de la encuesta (INEGI, 2015). De aquí obtenemos:

$$U_{rel\ info\ ENIGH\ 2014} = 0.1.$$

Evaluando con la información capturada y usando la ecuación 40, se obtendrá el valor del parámetro de interés "Número de Viviendas Municipal GN", y al ser la ecuación 40 una ecuación de tipo producto, de acuerdo a la tabla 5, lo recomendable es estimar la incertidumbre relativa del parámetro usando la ecuación 7 de la siguiente manera:

$$U_{rel\ VivGN2014} = \pm \sqrt{(U_{rel\ info\ Censo\ 2010})^2 + (U_{rel\ info\ ENIGH\ 2014})^2} \quad (42)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 42, obtenemos:

$$U_{rel\ VivGN2014} = \pm \sqrt{(0.2)^2 + (0.1)^2} = 0.22$$

### Consumo GN:

Las unidades correspondientes a usar éste parámetro vienen determinadas por el factor de emisión correspondiente, en éste caso se requiere el valor del consumo expresado en  $hm^3$  del combustible, para ello se usará la ecuación 39 (omitiéndose el factor de conversión, pues ya se realizó antes el paso de homologación de unidades para el poder calorífico en cada combustible), al ser la ecuación un cociente de términos independientes, la incertidumbre del parámetro será determinada usando la ecuación número 7, obteniéndose las siguientes expresiones:

$$Consumo\ GN_f = \frac{Consumo\ GN_i}{PC_{GN}} \quad (43)$$

Dónde:

$Consumo\ GN_f$ = Es el valor del consumo de gas natural en unidades correspondientes al FE, en éste caso [ $hm^3$  de GN]

$Consumo\ GN_i$ = Es el valor del consumo de gas natural en unidades correspondientes a la fuente de información consultada, en éste caso unidades de energía de acuerdo a BNE, y es de PJ. La variación considerada para éste parámetro, viene reportada como "Diferencia Estadística" en el balance nacional de energía, el cual es de 7.88 PJ, para el total de la producción de energía primaria en dónde se encuentra

clasificado el combustible gas natural del sector residencial, dicho sector representa el 5.29 % del consumo la energía primaria, entonces se evaluó la proporción de la diferencia estadística que le correspondía a cada combustible en dicho sector y se obtuvo el valor de 0.42 PJ, como variación absoluta, y usando la ecuación 4, se determinó una incertidumbre porcentual de éste parámetro en 1.04%,(mismo valor para cada consumo de combustible registrado del BNE)

$PC_{GN}$  = Es el valor promedio del poder calorífico para del combustible gas natural obtenido del promedio calculado entre las dos fuentes de información consultadas y transformadas a unidades prácticas y útiles para su adecuado uso en la estimación de emisiones, en éste caso el valor obtenido con su respectiva incertidumbre porcentual es igual a  $3.67 \times 10^{-2} \pm 6.74\%$  PJ/hm<sup>3</sup>

Sustituyendo los valores en la ecuación 39 obtenemos los siguientes resultados para éste parámetro:

$$\text{Consumo GN} = \frac{\text{Consumo GN}_i}{PC_{GN}} = \frac{39.86 \text{ PJ}}{3.67 \times 10^{-2} \text{ PJ/hm}^3} = 1086.10 \text{ hm}^3$$

y utilizando la ecuación 7 para determinar su incertidumbre, la expresión queda de la siguiente manera:

$$U_{rel \text{ Consumo GN } f} = \pm \sqrt{(U_{rel \text{ Consumo GN } i})^2 + (U_{rel PC_{GN}4})^2} \quad (44)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 44:

$$\begin{aligned} U_{\% \text{ Consumo GN } f} &= \pm \sqrt{(0.0104)^2 + (0.0674)^2} = \pm 0.0682 \\ &= \pm 6.82\% \end{aligned}$$

#### **FE G.N:**

El factor de emisión para gas natural, tiene un rango de calidad C, con base en la descripción del cuadro de factores de emisión, se le asocia una incertidumbre relativa porcentual de 10%, por lo tanto:

$$U_{rel FE_{G.N.}} = 0.1$$

## Parámetros para Gas Licuado de Petróleo (de la ecuación 30)

$$E_{GLP} = Viv\ GLP\ 2014 * Consumo\ GLP * FE_{GLP}.$$

### *Viv GLP 2014:*

Este parámetro es muy similar al que se usa para la distribución de emisiones del gas natural, con la diferencia de que aquí se consideran todas las viviendas en todos los municipios, pues se considera que en prácticamente todo el territorio nacional hay disponibilidad del combustible gas LP, por lo tanto el parámetro es una división entre el número estimado de viviendas para el municipio de interés, entre el total estimado de viviendas nacional, la ecuación para cada municipio se reduce a la siguiente expresión:

$$Viv\ GLP\ 2014 = \frac{Número\ de\ Viviendas\ Municipal}{Total\ de\ Viviendas\ Nacional} \quad (45)$$

La fuente de información a usar para los dos parámetros involucrados en ésta ecuación es la misma que la que se usa para el parámetro Viv GN 2014, por lo tanto la incertidumbre relativa también se calcula con la ecuación 42, y tendría el mismo valor, por lo tanto

$$U_{rel\ VivGLP2014} = U_{rel\ VivGN2014} = 0.22$$

### *ConsumoGLP*

Éste valor se calcula mediante la ecuación 42 con los valores para GLP obteniéndose el siguiente resultado:

$$Consumo\ GLP = \frac{Consumo\ GLP_i}{PC_{GLP}} = \frac{257.11\ PJ}{2.59 \times 10^{-5}\ PJ/m^3} = 9,927,027.03\ m^3$$

El valor de incertidumbre del consumo de Gas L.P. se obtiene únicamente usando la “Variación de Inventarios” del balance nacional de energía. (SENER, 2014), ya que no presenta variación la información consultada sobre el poder calorífico a usar para transforma el valor de unidades energéticas a unidades de volumen, congruentes con su factor de emisión, dicho valor ya se mencionó en el parámetro de consumo GN, y corresponde a una incertidumbre porcentual de

$$U_{rel\ ConsumoGLP2014} = 0.0104$$

### *FE<sub>GLP</sub>*

El factor de emisión para Gas L.P., tiene un rango de calidad E, con base en la descripción del cuadro de factores de emisión, se le asocia una incertidumbre relativa de

$$U_{rel\ FE\ GLP} = 0.4.$$

### **Parámetros para la el combustible leña (de la ecuación 33):**

$$E_{Leña} = X_{LeñaMun} * Consumo\ Leña * FE_{Leña}$$

### *X<sub>LeñaMun</sub>*

Éste dato se proporcionó por la SEMARNAT para el año 2011, reportando así mismo una confianza de 90%, por lo cual teniendo una tasa de aumento poblacional 2014 respecto a 2011 de 1.035, la incertidumbre porcentual se calculó en 10.35%, al ser un error máximo esperado de 10%, ajustado con el crecimiento poblacional, por lo tanto:

$$U_{rel\ E_{GLP}} = 0.1035.$$

### *Consumo Leña*

Éste valor se calcula mediante la ecuación 39 con los valores para consumo de Leña del BNE, y como su poder calorífico capturado se obtiene en unidades de energía sobre masa, se calculó el resultado en unidades de Megagramos obteniéndose el siguiente resultado:

$$Consumo\ Leña = \frac{Consumo\ Leña_i}{PC_{Leña}} = \frac{25.12\ PJ}{1.45 \times 10^{-5}\ PJ/Mg} = 17,542,454.78\ Mg$$

La incertidumbre relativa en porcentaje de éste parámetro es 1.04%, al no tener variación con su poder calorífico, como ya se mencionó anteriormente para el consumo de gas natural y consumo de Gas L.P. por lo tanto:

$$U_{rel\ Consumo\ leña} = 0.0104$$

### *FE<sub>Leña</sub>*

Para transformar el valor del consumo de leña a unidades del factor de emisión  $\left[ \frac{g\ C_{HGNM}}{kg\ leña} \right]$ , habría que cuantificar la información referente a la cantidad de carbono contenida en la leña para combustión que se transforma en compuestos orgánicos

volátiles, dicha información no está todavía cuantificada en estudios formales, sin embargo, sí hay estudios sobre la composición de los COV's en las emisiones, con ésta información se puede hacer un aproximado cuantos gramos de COV's se emiten correspondientes a los gramos de carbono presentes en los compuestos presentes en los gases, para definir ésta información se usó una base de datos del IPCC, llamada "Speciate versión 4.5", descargable de la página de la EPA (EPA, 2016), la cual es una recopilación de caracterizaciones de emisiones provenientes de distintas actividades generadoras de gases contaminantes, en particular se usó la sección 1167 "Residential Wood Combustion", ésta sección presenta información sobre la concentración en masa de los diferentes componentes de los COV's emitidos por la quema residencial de leña, con la cual se determinó que el contenido promedio de masa de carbono corresponde al 86.55% de la masa total de los compuestos orgánicos volátiles, con una incertidumbre de 8.11%, con lo cual podemos obtener un factor de correlación de unidades de gramos de carbono a gramos de COV's en las emisiones de combustión de leña mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 FC_{FE\ Leña} &= \frac{\text{kg COV's}}{\text{kg } C_{HCNM}} & (46) \\
 &= \frac{1 \text{ kg COV's}}{.8655 \text{ kg } C_{HCNM}} = 1.155 \frac{\text{kg COV's}}{\text{kg } C_{HCNM}}
 \end{aligned}$$

Dónde:

$FC_{FE\ Leña}$  = Es el factor de conversión de unidades para el factor de emisión de leña, para transformar las unidades de masa de carbono en los COV's a masa total de COV's. Su valor es igual a la cantidad en gramos de compuestos orgánicos volátiles por gramo de carbono en dichos compuestos para poder  $1.155 \frac{\text{kg COV's}}{\text{kg } C_{HCNM}}$

Con éste factor obtenemos que por cada kilogramo de COV's emitido, 0.8655 kilogramos corresponden al elemento carbono, la incertidumbre relativa de éste parámetro corresponde a  $U_{rel\ FC_{FE\ Leña}} = 0.0811$ , usando la especiación obtenida de la base de datos del "Speciate versión 4.5".

Con éste valor, es posible y más conveniente para el caso del combustible leña transformar el valor del factor de emisión a unidades del contaminante de estudio, siendo

los COV's el contaminante determinado para el presente trabajo, la ecuación que representa ésta transformación de unidades del factor de emisión de leña es la siguiente:

$$FE_{Leña}' = FE_{Leña\ i} * FC_{FE\ Leña} * FCU \quad (47)$$

Dónde:

$FE_{Leña}'$  = Es el valor del consumo de leña en unidades másicas de kilogramos de COV's por Megagramo de leña quemada  $\left[ \frac{Mg\ COV's}{Mg\ Leña} \right]$ .

$FE_{Leña\ i}$  = Es el valor del consumo de leña en las unidades originales de la fuente de información consultada.  $\left[ \frac{g\ C_{HCNM}}{kg\ leña} \right]$ .

$FCU$  = Es el factor de conversión de unidades, en éste caso para transformar el valor del factor de emisión a unidades de Megagramos de COV's por Megagramo de leña quemada, por lo cual para transformar las unidades de COV's hay que dividir entre  $10^6$  los gramos de COV's y para transformar la masa de leña quemada se multiplica por  $10^3$  los kilogramos en la unidad original del factor de emisión, obteniéndose el valor del factor

como:  $\left[ \frac{Mg\ COV}{10^6 g\ COV's} * \frac{10^3 kg\ leña}{Mg\ Leña} \right] = 10^{-3} \frac{Mg\ COV's}{Mg\ Leña}$

Sustituyendo los términos de la ecuación 47, obtenemos el valor del factor de emisión para el combustible leña de la siguiente manera:

$$FE_{Leña}' = 3.95 * 1.155 * 10^{-3} \frac{Mg\ COV's}{Mg\ Leña} = 0.0046 \frac{Mg\ COV's}{Mg\ Leña}$$

El factor de emisión para leña que se usó presenta una incertidumbre calculada del 70%, por lo cual no es muy confiable manejar la incertidumbre con la ecuación 7 usando el método de propagación del error, las directrices del IPCC presentan una ecuación para obtener un factor de ajuste de la incertidumbre obtenida con parámetros que sobrepasan el 60% en su incertidumbre relativa, la ecuación obtenida es la número 3.3 del capítulo 3.7.3 "Manejo de incertidumbres grandes y asimétricas en los resultados del Método 1", consultada en el volumen uno de las directrices para inventarios de emisiones (IPCC, 2006), ésta ecuación es válida de acuerdo al documento para incertidumbres que estén en el rango de 10%-230%, resulta más precisa mientras menor sea la incertidumbre, y es la siguiente expresión:

$$Fc = \left[ \frac{(-0.720 + 1.0921U_{\%} - 1.63 * 10^{-3}U_{\%}^2 + 0.11 * 10^{-5}U_{\%}^3)}{U_{\%}} \right]^2 \quad (48)$$

Dónde:

$F_c$ = Es el factor de corrección para incertidumbres porcentuales obtenidas por medio de productos o divisiones (ecuación 7), los cuales tienen términos con incertidumbres relativas grandes (mayores al 60%).

$U_{\%}$ = Es el valor de la incertidumbre obtenida por medio de términos de incertidumbres relativas mayores al 60%.

Con lo cual la incertidumbre corregida se calcula con la siguiente fórmula:

$$U_{\% \text{ corregida}} = F_c * U_{\%} \quad (49)$$

De ésta manera, primero obtenemos la incertidumbre del factor de emisión expresado en las unidades correspondientes usando la ecuación 7 para modelos que son multiplicaciones obteniendo la siguiente fórmula:

$$U_{rel \ FE_{Leña}'} = \pm \sqrt{(U_{rel \ FE_{Leña}})^2 + (U_{rel \ FC_{FE \ Leña}})^2} \quad (50)$$

Sustituyendo los valores obtenemos:

$$U_{rel \ FE_{Leña}'} = \pm \sqrt{(0.70)^2 + (0.0811)^2} = 0.7047$$

En valores porcentuales usando la ecuación 3:

$$U_{\% \ FE_{Leña}'} = 70.47\%$$

Con éste valor, obtenemos el factor de corrección para éste valor sustituyendo el valor en la ecuación 48 obteniendo:

$$Fc_{FE_{Leña}} = \left[ \frac{(-0.720 + 1.0921(70.47) - 1.63 * 10^{-3}(70.47)^2 + .11 * 10^{-5}(70.47)^3)}{70.47} \right]^2$$

$$= 0.9457$$

Reemplazando éste valor y usando la incertidumbre obtenida en la ecuación 49, obtenemos el siguiente resultado:

$$U_{\% \text{ corregida}} = 0.9458 * 70.47\% = 66.64\%$$

Por lo tanto el valor completo del factor de emisión a usar para la combustión de leña expresado junto con su incertidumbre porcentual es el siguiente:

$$FE_{\text{Leña}} = 0.0046 \pm 66.64\% \left[ \frac{\text{Mg COV's}}{\text{Mg Leña}} \right]$$

Con lo cual se puede apreciar que la incertidumbre del parámetro sigue siendo elevada, pero usando el factor de corrección, el nuevo valor de incertidumbre se estima que considera y corrige las subestimaciones ocasionadas por el uso del modelo de incertidumbre combinada con incertidumbres grandes, la explicación estadística dice que la variación es pequeña a la incertidumbre cuando el valor estimado es menor al 100%, y que no afecta significativamente a la varianza si se considera el mismo valor de la incertidumbre inicial, que el corregido, pero que cuando la incertidumbre excede el 100% y hasta un valor máximo de 230%, ésta ecuación es en gran medida importante para ajustar el parámetro a un valor más confiable, en el presente trabajo se manejará el valor corregido como muestra de lo que se puede y es sugerido hacer de acuerdo a las directrices del IPCC para estimaciones de incertidumbres elevadas. Cuando el valor de la incertidumbre supera el 230%, se sugiere leer las directrices ya mencionadas en el capítulo de cómo tratar y manejar éste tipo de incertidumbres. (IPCC, 2006)

### **Parámetros para combustible queroseno (de la ecuación 36):**

$$E_{\text{Queroseno}} = X_{\text{QueroMun}} * \text{ConsumoQueroseno} * FE_{\text{Queroseno}}$$

*X<sub>QueroMun</sub>:*

De acuerdo al diseño de la muestra realizado para ésta encuesta a nivel nacional (SAGARPA-INEGI, 2015), se estimó un error relativo máximo de 5%, como tal, éste se considerara como incertidumbre:

$$U_{\text{rel } X_{\text{QueroMun}}} = 0.05$$

### **ConsumoQueroseno**

Las unidades correspondientes a usar éste parámetro vienen determinadas por el factor de emisión correspondiente, en éste caso se requiere el valor del consumo expresado en m<sup>3</sup> del combustible queroseno, para ello se usará la

ecuación 39 (omitiéndose el factor de conversión, pues ya se realizó antes el paso de homologación de unidades para el poder calorífico en cada combustible),

$$\text{ConsumoQueroseno}_f = \frac{\text{ConsumoQueroseno}_i}{PC_{\text{Queroseno}}} \quad (51)$$

Dónde:

$\text{ConsumoQueroseno}_f$  = Es el valor del consumo de queroseno en unidades correspondientes al FE, en éste caso [m<sup>3</sup> de Queroseno]

$\text{ConsumoQueroseno}_i$  = Es el valor del consumo de queroseno en unidades correspondientes a la fuente de información consultada, en éste caso unidades de energía de acuerdo a BNE, y es de PJ. La variación considerada para éste parámetro se estimó en 1.04%, como se menciona en la descripción del consumo de gas natural.

$PC_{\text{Queroseno}}$  = Es el valor promedio del poder calorífico para del combustible queroseno obtenido del promedio calculado entre las dos fuentes de información consultadas y transformadas a unidades prácticas y útiles para su adecuado uso en la estimación de emisiones, en éste caso el valor obtenido con su respectiva incertidumbre porcentual y unidades correspondientes es igual a  $3.49 \times 10^{-5} \pm 0.56\%$  PJ/m<sup>3</sup>.

Sustituyendo los valores en la ecuación 51 obtenemos el siguiente resultado para el parámetro del consumo de queroseno nacional:

$$\text{ConsumoQueroseno}_f = \frac{\text{ConsumoQueroseno}_i}{PC_{\text{Queroseno}}} = \frac{1.91 \text{ PJ}}{3.49 \times 10^{-5} \text{ PJ/m}^3} = 54,727.79 \text{ m}^3$$

Al ser la ecuación un cociente de términos independientes, la incertidumbre del parámetro será determinada usando la ecuación número 7, obteniéndose las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} U_{rel \text{ Consumo GN } f} &= \pm \sqrt{(U_{rel \text{ Consumo GN } i})^2 + (U_{rel PC_{GN4}})^2} \quad (52) \\ &= \pm \sqrt{(0.0104)^2 + (0.0056)^2} = 0.0118 \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 3 para obtener la incertidumbre porcentual obtenemos:

$$U_{\% \text{ Consumo Queroseno } f} = \pm 0.0118 * 100\% = \pm 1.18\%$$

*FE Queroseno*

El factor de emisión para queroseno o gasóleo, tiene un rango de calidad A, con base en la descripción del cuadro de factores de emisión, se le asocia una incertidumbre relativa de 2%. por lo tanto:

$$U_{rel FE_{Queroseno}} = 0.02$$

### **6.5. Paso 5: Evaluación de los Parámetros Desagregados**

En éste paso, se desarrollan todos los cálculos que restan una vez identificadas las incertidumbres de cada parámetro independiente, y se realizan los cálculos correspondientes a los parámetros involucrados de nuestra ecuación general de emisiones totales de COV's (Ecuación 25).

Considerando que nuestra ecuación general es una suma de las emisiones producidas por cada combustible de combustión doméstica, la incertidumbre general se manejará como incertidumbre absoluta de acuerdo a las recomendaciones del paso 3 del presente procedimiento (Tabla 5), obteniéndose a partir de cada incertidumbre absoluta asociada a la emisión de COV's de cada combustible por separado estimada por separado, la cual se calcula por medio de las ecuaciones 3, 7 y 8, como se muestra a continuación para cada combustible.

#### **Gas Natural:**

Sustituyendo los valores correspondientes y realizando el cálculo de la estimación de emisiones totales usando la ecuación 27, tomando en cuenta el parámetro de "VivGN2014" igual a 1, siendo que representa una fracción municipal y únicamente tiene sentido para la distribución espacial de las emisiones, pero para los fines del cálculo de incertidumbre tomaremos el total nacional, de ésta manera obtenemos los resultados de las emisiones de COV's en Megagramos de la siguiente manera:

$$E_{GN} = (1) * 1,086.10 \text{ hm}^3 * 88 \times 10^{-3} \left[ \frac{Mg_{COV's}}{hm^3 GN} \right] = 95.58 Mg_{COV's}$$

Los cálculos de la incertidumbre asociada a la emisión se presentan a continuación, con particular interés en la incertidumbre absoluta, misma que se usará en el modelo final para el cálculo de la incertidumbre general de la subcategoría “Combustión Doméstica”.

Incertidumbre Relativa:

Usando la ecuación 28:

$$U_{rel E_{GN}} = \pm\sqrt{(0.22)^2 + (0.0682)^2 + (0.1)^2} = \pm 0.2511$$

Incertidumbre Absoluta por Emisiones de G.N:

Usando la ecuación 29:

$$U_{E_{GN}} = \pm(0.2511 * 95.58 Mg_{COV's}) = \pm 24 Mg_{COV's}$$

Gas L.P.:

Tomando en cuenta de la misma manera que para el cálculo de emisiones por Gas Natural, que el valor del parámetro de “VivGLP2014”, es igual a 1, obtenemos los resultados de las emisiones de COV’s provenientes de la quema de GLP en unidades de Megagramos, usando la ecuación 30 y remplazando valores de la siguiente manera:

$$E_{GLP} = (1) * 9,927,027.03 m^3 * 10.1x10^{-5} \left[ \frac{Mg_{COV's}}{m^3_{GLP}} \right] = 1002.63 Mg_{COV's}.$$

Los cálculos para obtener la incertidumbre absoluta asociada a la emisión de gas LP se presentan a continuación:

Incertidumbre Relativa:

Usando la ecuación 31:

$$U_{rel E_{GLP}} = \pm\sqrt{(0.22)^2 + (0.0104)^2 + (0.4)^2} = \pm 0.4566$$

Incertidumbre Absoluta por Emisiones de GLP:

Usando la ecuación 32:

$$U_{E_{GLP}} = \pm(0.4566 * 1002.63 Mg_{COV's}) = \pm 457.83 Mg_{COV's}$$

## Leña:

Sustituyendo los valores correspondientes y realizando el cálculo de la estimación de emisiones totales usando la ecuación 33, una vez más considerando el parámetro de la fracción de consumo nacional igual a 1, obtenemos los resultados de las emisiones de COV's por Leña en Megagramos de la siguiente manera:

$$E_{Leña} = (1) * 17,542,454.78 \text{ Mg} * 0.0046 \left[ \frac{\text{Mg COV's}}{\text{Mg Leña}} \right] = 80,695.29 \text{ Mg}_{COV's}$$

Los cálculos de la incertidumbre asociada a la emisión de leña se presentan a continuación, considerando que la incertidumbre del factor de emisión es de 66.64.%, es aconsejable que a la incertidumbre obtenida se le realice nuevamente el ajuste correspondiente para incertidumbres elevadas utilizando las ecuaciones 48 y 49 para obtener la incertidumbre corregida de las emisiones por leña, tal como se muestran en los siguientes cálculos:

### Incertidumbre Relativa:

Usando la ecuación 34:

$$U_{rel E_{Leña}} = \pm \sqrt{(0.1035)^2 + (0.0104)^2 + (0.6664)^2} = 0.6745$$

En términos porcentuales para calcular el factor de corrección:

$$U_{\% E_{Leña}} = 67.45\%$$

Usando la ecuación 48, y reemplazando el valor de " $U_{\% E_{Leña}}$ " obtenemos:

$$Fc = \left[ \frac{(-0.720 + 1.0921(67.45) - 1.63 * 10^{-3}(67.45)^2 + 0.11 * 10^{-5}(67.45)^3)}{(67.45)} \right]^2$$
$$= 0.9535$$

Usando el valor obtenido en la ecuación 49, obtenemos el valor de la incertidumbre corregida para las emisiones por leña de la siguiente manera:

$$U_{\% E_{Leña}(\text{corregida})} = Fc * U_{\% E_{Leña}} = 0.9535 * 67.45\% = 64.31\%$$

$$U_{rel E_{Leña}}' = .06431$$

### Incertidumbre Absoluta por Emisiones de Leña:

Usando la ecuación 35 y el valor de la incertidumbre relativa corregida para leña obtenemos:

$$U_{E_{GN}} = \pm(0.6431 * 80,695.29 \text{ Mg}_{COV's}) = \pm 51,897.52 \text{ Mg}_{COV's}$$

### **Queroseno:**

Como ya se mencionó, el valor de la fracción de queroseno a nivel nacional es igual a 1, y sustituyendo los demás valores en la ecuación 36 obtenemos los resultados de las emisiones de COV's en Megagramos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_{Queroseno} &= (1) * 54,727.79 \text{ [m}^3 \text{ Queroseno]} * 4.0 \times 10^{-5} \left[ \frac{\text{Mg}_{COV's}}{\text{m}^3 \text{ Queroseno}} \right] \\ &= 2.19 \text{ Mg}_{COV's} \end{aligned}$$

Los cálculos de la incertidumbre asociada a la emisión se presentan a continuación:

### Incertidumbre Relativa:

Usando la ecuación 37:

$$U_{rel E_{Queroseno}} = \pm \sqrt{(0.05)^2 + (0.0118)^2 + (0.02)^2} = 0.0551$$

### Incertidumbre Absoluta por Emisiones de Queroseno:

Usando la ecuación 38:

$$U_{E_{Queroseno}} = \pm(0.0551 * 2.19 \text{ Mg}_{COV's}) = \pm 0.12 \text{ Mg}_{COV's}$$

Un resumen de los parámetros finales de incertidumbre absoluta y relativa obtenidos en éste paso se presenta en la Tabla 9.

*Tabla 9. Incertidumbre Relativa por Combustible para la Categoría de Combustión Domestica.*

Parámetro	Valor de la Emisión [Mg COV's anuales]	Incertidumbre Absoluta [Mg COV's anuales]	Incertidumbre Porcentual [%]
$E_{GN}$	95.58	$\pm 24.00$	$\pm 24.11\%$
$E_{GLP}$	1,002.63	$\pm 457.83$	$\pm 45.66$
$E_{Leña}$	80,695.29	$\pm 51,897.52$	$\pm 64.31$
$E_{Queroseno}$	2.19	$\pm 0.12$	$\pm 5.51$

### **6.6. Paso 6: Determinación de la Incertidumbre General.**

Una vez determinados los valores de las incertidumbres absolutas asociadas a cada combustible de la subcategoría “Combustión Domestica” se resuelve el modelo propuesto en la ecuación 25:

$$\begin{aligned}
 E_{T \text{ "Combustión Domestica"}} &= E_{GN} + E_{GLP} + E_{Leña} + E_{Queroseno} \\
 &= (95.58 + 1,002.63 + 80,695.29 + 2.19) [Mg COV's] \\
 &= 81,795.69 Mg COV's
 \end{aligned}$$

Así mismo, la respectiva incertidumbre general de la subcategoría “Combustión Domestica” en unidades absolutas se calcula mediante la ecuación 26 de la siguiente manera:

Incertidumbre Absoluta:

$$U_{E_{T \text{ "Combustión Domestica"}}} = \pm \sqrt{(U_{E_{GN}})^2 + (U_{E_{GLP}})^2 + (U_{E_{Leña}})^2 + (U_{E_{Queroseno}})^2}$$

$$= \pm \sqrt{(24)^2 + (457.83)^2 + (51,897.52)^2 + (0.12)^2} = \pm 51,899.55 \text{ Mg COV's}$$

### Incertidumbre Porcentual General:

Por último, usamos la ecuación 4 para analizar la precisión de la información y obtener la incertidumbre porcentual de la subcategoría “Combustión Domestica”:

$$U_{\% E_T \text{ "Combustión Domestica"}} = \frac{U_{E_T \text{ "Combustión Domestica"}}}{E_T \text{ "Combustión Domestica"}} * 100\% \quad (53)$$

$$= \pm \left( \frac{51,899.55 \text{ Mg COV's}}{81,795.69 \text{ Mg COV's}} \right) * 100\% = \pm 63.45 \%$$

### **6.7. Paso 7: Análisis y Reporte de la Incertidumbre.**

Una vez realizado el cálculo y analizado los valores obtenidos, en éste caso, el resultado de la incertidumbre porcentual se estima en 63.45%, es recomendable analizar los parámetros y determinar sí es congruente el resultado, para ésta categoría en específico, se observa que el combustible que más aporta tanto emisiones de COV's, como incertidumbre debido al factor de emisión, es el combustible leña, pero una vez determinado esto, se puede reportar el cálculo como aceptable, pues se cuentan con bases suficientes y argumentos válidos capturados de las fuentes oficiales de información reportadas, como podremos apreciar en el análisis de resultados.

El valor obtenido se reporta en unidades congruentes de manera que el dato estimado de emisiones totales de COV's de la subcategoría “Combustión Domestica del Inventario de Emisiones a la Atmósfera 2014” (INEM 2014) con su respectiva incertidumbre es el siguiente:

Emisiones COV's (Combustión Domestica)= 81,795.69 ± 51,889.55 Mg COV's o bien puede reportarse como: 81,795.69 ± 63.45% Mg COV's al año, puesto que fue la base temporal desde un inicio.

## **7. Análisis de Resultados**

El resultado obtenido de emisiones de COV's en la categoría "Combustión Domestica", está justificado con información documentada a nivel nacional, y se cuenta con la referencia directa de los parámetros, por lo tanto se considera que tiene un buen control de calidad de acuerdo a las directrices del IPCC para el buen control de calidad en inventarios de emisiones proporcionados por el IPCC (USEPA, 2017).

Observando los valores obtenidos para cada combustible de incertidumbre absoluta y su contribución porcentual a la incertidumbre general de la categoría (ver Tabla 10). Se puede apreciar en los resultados que el combustible que más contribuye a la incertidumbre general de la categoría es la leña, por lo que se puede utilizar ésta información para proponer medidas de mejora de la estadística y/o minimizar la incertidumbre al mejorar y reducir la incertidumbre de las fuentes de información para éste combustible, principalmente la incertidumbre en el factor de emisión, ya que las emisiones ocasionadas por leña son las que mayor contribución tienen a la subcategoría de "Combustión Domestica", su incertidumbre es la más representativa, con aproximadamente el 99.08%, además analizado los parámetros involucrados en la incertidumbre de leña, la incertidumbre relativa proveniente del factor de emisión es de 70%, mientras que el de la categoría total es de 64.31 %, lo cual es muy cercano, se puede decir que la incertidumbre total de la subcategoría "Combustión Domestica" está prácticamente determinada por la incertidumbre del factor de emisión de leña.

Es importante aclarar que como las emisiones finales se calculan por medio de una suma de las emisiones ocasionadas por cada combustible, la incertidumbre también es una suma de los cuadrados de las incertidumbres absolutas, por lo tanto, la gran parte del total que contribuye el combustible leña a las emisiones, también contribuye a que sea el más representativo y prácticamente el que la determina.

También se aprecia que aunque el combustible gas L.P. también tiene una incertidumbre relativa bastante elevada, no es tan representativa como la leña para la incertidumbre general de la subcategoría, debido a su contribución a las

emisiones totales, además analizando los números, se podrían omitir las contribuciones por queroseno, al ser una contribución porcentual extremadamente baja respecto a las demás incertidumbres de los otros combustibles, y no afectaría el cálculo, como se aprecia en la Tabla 10.

*Tabla 10. Resumen de los Resultados Obtenidos en la Estimación de Incertidumbre de la Categoría de Combustión Domestica.*

<b>Emisiones</b>	<b>Valor del Parámetro [Mg de COV's]</b>	<b>Incertidumbre Absoluta [Mg de COV's]</b>	<b>Incertidumbre Relativa [%]</b>	<b>Contribución porcentual a la incertidumbre general [%]</b>
<b>Emisiones Totales</b>	81795.69	± 51,899.55	± 63.45 %	<b>100</b>
Gas Natural	95.58	± 24.00	± 24.11 %	0.05%
Gas LP	1,002.63	± 457.83	± 45.66 %	0.87%
Leña	80,695.29	± 51,897.52	± 64.31 %	99.08%
Queroseno	2.19	± 0.12	± 5.51 %	<0.001%

Por otro lado, de acuerdo a la recopilación de información usada para elaborar el modelo matemático de emisiones y su respectiva incertidumbre en la categoría de “Combustión Domestica”, sin considerar la importancia del factor de emisión de leña, también sería posible mejorar la calidad de estimaciones en ésta categoría principalmente con la mejora en la estadística de la información censal poblacional, la cual al ser de dos fuentes distintas usadas en tiempos diferentes, (el CENSO 2010 de Población y Vivienda y la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en el Hogar 2014) ambas tienen diferente información relacionada al total de viviendas nacional, pero también reportan diseños muestrales con diferentes márgenes de error, el CENSO 2010, aunque proporciona información por municipio, realiza un diseño muestral con un error relativo permitido de 0.2, lo cual

no se aprecia a primera vista que sea un margen de error grande, pero analizando la cifra, esto sugiere un sesgo de 20% de acuerdo a la veracidad de la información, mientras la información del diseño muestral de la ENIGH en 2014 reporta un error máximo de 10% en su diseño muestral, ambos estudios y encuestas se realizaron una sola vez, con lo que no se tiene más información que la reportada en los documentos de referencia (INEGI, 2011), (INEGI, 2015).

## **8. Conclusiones.**

En éste trabajo se elaboró un procedimiento de siete pasos para la determinación de incertidumbre en inventarios de emisiones, con el cual se demostró cómo se puede cuantificar la incertidumbre mediante la aplicación de los 7 pasos en dicho procedimiento para un determinado caso de estudio, la subcategoría “Combustión Domestica” del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmosfera 2014, los pasos del 1 al 3, (Recopilación de Información Disponible, Desarrollo del Modelo Matemático General y Desagregación del Modelo en Ecuaciones Simples) son útiles para conocer la categoría a evaluar, pues el paso uno trata de la búsqueda y recopilación de toda la información necesaria, el 2 busca desarrollar la expresión matemática general y el 3 trata sobre la organización del modelo general y su simplificación en modelos más simples. El paso 4 (Definición de la Incertidumbre a Reportar) busca la elección adecuada del tipo de incertidumbre a reportar, los pasos 5 y 6 (Evaluación de los Parámetros Desagregados y Determinación de la Incertidumbre General), tratan sobre la realización de los cálculos necesarios una vez definidos los modelos matemáticos, y por último el paso número 7 es muy útil como revisión y corrección de cada uno de los pasos anteriores, de manera que se pueda entregar el informe final del resultado adecuado y de manera adecuada en las unidades correspondientes.

En el ejemplo realizado del presente trabajo, el valor de las emisiones de COV's por parte de la categoría de “Combustión Domestica” del inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera en México 2014, fue de 81,795.69 Mg de COV's al año, con una incertidumbre absoluta de  $\pm 51,899.45$  Mg COV's, o lo que también representa una incertidumbre relativa porcentual del 63.45 %, de acuerdo a los cálculos realizados y evaluados siguiendo los siete pasos establecidos en el presente trabajo.

De manera análoga es posible aplicar el mismo procedimiento de siete pasos para determinar la incertidumbre en cualquier categoría de los inventarios de emisiones, sin importar las diferencias geográficas o espaciales de los requerimientos del inventario, siempre y cuando se consideren las variaciones en la medida de lo posible para el modelo matemático a realizar, y se pueda

cuantificar la incertidumbre de cada parámetro involucrado en él, para lo cual también se describieron diferentes métodos en el presente trabajo.

En el caso del factor de emisión de leña, hay factores como el clima o el tipo de madera usada que podrían proporcionar un diferente valor al parámetro o a su incertidumbre si se tomará en cuenta, por lo que se recomienda para futuras estimaciones por combustión de Leña en México, mejorar la incertidumbre de dicho factor y de ser posible desarrollar un factor especial para México que abarque las diferentes condiciones a las que se lleva a cabo la quema de leña en el país, tomando en cuenta el tipo de leña y la eficiencia de la combustión en los lugares donde se consume mayor proporción de leña, para lo cual también sería necesario aumentar la precisión en la estadística que determina ésta proporción de consumo y si es posible, determinar cómo influyen las condiciones climatológicas en el proceso.

Es importante destacar que la determinación de incertidumbre en cualquier proceso conlleva cierta cantidad de recursos, y los usos previstos que se le den a la información resultante de los inventarios, deben ser considerados antes de realizar la estimación y cuantificación de la incertidumbre. Pues dependiendo de los requerimientos de la información, debe ser la calidad y los esfuerzos que conllevan la determinación y la confiabilidad de la información, así como la importancia de estimar los recursos destinados a dicha actividad. No se debe pasar por alto el desarrollo de nuevas herramientas para la precisión de la información y reducción de costos en los métodos de estimación de incertidumbre.

Para disminuir la incertidumbre general de cualquier parámetro, cuando se trata de las emisiones de contaminantes, básicamente se puede hacer hincapié en tratar de mejorar el factor de emisión o el dato de actividad, en el caso de los factores de emisión, al necesitar estudios más elaborados y especializados, resulta más costoso reducir su incertidumbre que en los datos de actividad, los cuales aunque sean muy variados y en ocasiones sea necesario realizar un modelamiento matemático especial para poderlos usar de acuerdo a los requerimientos del inventario, la mejora de la confiabilidad de ésta información es por lo general más práctica y económica, pues no requiere tecnología tan

avanzada, como instrumentos de precisión y laboratorios en el caso de la realización de factores de emisión, los datos de actividad con mayor incertidumbre se basan en encuestas de población o de consumo, por otro lado la información con la que cuentan instituciones públicas como la secretaría de energía, proporciona una información bastante confiable de acuerdo a sus reportes por medio de balances de combustibles, sin embargo, dicha información es aplicable sólo para el año base del inventario, contrario a la información que proporcionan los factores de emisión, los cuales pueden usarse para diferentes periodos de tiempo, siempre y cuando sean estudios realizados con suficiente calidad y precisión.

La información de los inventarios de emisiones es de gran utilidad para muchos desarrollos, simulaciones y propuestas de mejora de calidad del aire, es por ello en que radica la importancia de cuantificar la precisión de la información, para tener un conocimiento más preciso y acercado a la realidad respecto al consumo y aprovechamiento de nuestros recursos, así como sus respectivas consecuencias y efectos al ambiente y la calidad del aire.

Mientras menor sea la incertidumbre asociada a los parámetros involucrados en la determinación de emisiones, la información resultante será más confiable y más útil, por ello se recomienda seguir adelante en la proposición de mejoras de calidad de la información, y ajustar la información necesaria en la medida que sea posible a la realidad.

## 9. Bibliografía

- Andrés, C. M. (2007). *Principios de Ecotoxicología*. México: Tebar.
- Bradley Efron, R. T. (1994). *An Introduction to the bootstrap*. London-Washington-New York: Chapman & Hall/ CRC Press.
- C.J. Sallaberry, J.C. Helton, and C.C. Hora. (November de 2006). *Extension of Latin Hypercube Samples with Correlated Variables*. Recuperado el 2017, de Waste Isolation Pilot Plant: [http://www.wipp.energy.gov/library/cra/2009\\_cra/references/Others/Sallaberry\\_Helton\\_Hora\\_2006\\_Extension\\_of\\_Latin\\_Hypercube\\_Samples\\_SAND2006\\_6135.pdf](http://www.wipp.energy.gov/library/cra/2009_cra/references/Others/Sallaberry_Helton_Hora_2006_Extension_of_Latin_Hypercube_Samples_SAND2006_6135.pdf)
- Carlstein, T. (1992). *Time Resources, Society and Ecology vol. 1*. Londres, Allen y Unwin: Preindustriai Societies.
- Cox, G. M. (1937). Iowa State Collection. *Journal Science*. 11, 323-331.
- CRE. (2014). *Comisión Reguladora de Energía*. Recuperado el 2017, de <https://www.gob.mx/cre>
- DepaQuim. (s.f.). *Evaluación de incertidumbre*. Obtenido de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/eval\\_incert\\_6905.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/eval_incert_6905.pdf)
- EIIP. (1997). *GENERALQA/QC METHODS Final Report*. Carolina.
- EPA. (2016). *Air Emissions Modeling*. Obtenido de SPECIATE Version 4.5 through 4.0: <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-version-45-through-40>
- Hobbs, D. y. (1992). *Seedling and site interactions. Reforestation Practices Southwest Oregon and Northern California*. Oregon: Corvallis.
- INEGI. (2007). *Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007*. Recuperado el 2017, de [http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Agro/ca2007/Resultados\\_Agricola/default.aspx](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Agro/ca2007/Resultados_Agricola/default.aspx)
- INEGI. (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Recuperado el 2017, de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>
- INEGI. (2011). *Diseño Muestra censal 2010*. Recuperado el 2017, de [http://www3.inegi.org.mx/Sistemas/Microdatos/Microdatos\\_archivos/cpv/10/doc/Dise%C3%B1o\\_de\\_la\\_muestra\\_censal.pdf](http://www3.inegi.org.mx/Sistemas/Microdatos/Microdatos_archivos/cpv/10/doc/Dise%C3%B1o_de_la_muestra_censal.pdf)
- INEGI. (2015). *Anuario Estadístico y Geográfico por Entidad Federativa*. Recuperado el 2017, de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/AEGPEF\\_2015/702825077297.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGPEF_2015/702825077297.pdf)
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015 Síntesis Metodológica y conceptual*. Recuperado el 2017, de

[http://www3.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/2015/doc/eic2015\\_sintesis.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/proyectos/enchogares/especiales/intercensal/2015/doc/eic2015_sintesis.pdf)

INEGI. (2015). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2014*. Recuperado el 2017, de

<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/enchogares/regulares/enigh/tradicional/2014/default.html?init=2>

INEGI-BIE. (2017). *Banco de información Económica*. Recuperado el 2017, de

<http://www.beta.inegi.org.mx/default.html>

IPCC. (1996). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 2017, de

EVALUATING THE UNCERTAINTY OF EMISSION ESTIMATES, Volume VI, chapter 4:

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/vi04.pdf>

IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto*

*invernadero*. Recuperado el Octubre de 2017, de Orientación general y generación de

informes: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol1.html>

IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto*

*invernadero*. Recuperado el 2017, de Volumen 2 Energía: [http://www.ipcc-](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html)

[nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html)

Johnson, R. (1996). *Elementary Statistics*. Duxbury.

Lacaux, D. B.-P. (1998). Domestic biomass combustion and associated atmospheric. *GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES, VOL. 12, NO. 1*, 127-139.

Michael Johnson, R. E. (2008). In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment* 42 , 1206–1222.

Radian International LLC. (1995). *Methods Evaluation and Proposal for Mexico Emissions Inventory Program*. Denver, Colorado: Binational Advisory Committee, Dr. José Ortega, Corporación Radian.

SAGARPA-INEGI. (2015). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2014 Información Relevante*.

Recuperado el 2017, de

[http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2015/especiales/especiales2015\\_08\\_8.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2015/especiales/especiales2015_08_8.pdf)

SEGOB. (2016). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 2017, de DOF: 24/11/2016:

[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5462338&fecha=24/11/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5462338&fecha=24/11/2016)

SEMARNAT. (2017). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 2017, de

<https://www.gob.mx/semarnat>

- SENER. (2014). *Prospectivas del Sector Energético, Petróleo crudo y Petrolíferos 2014-2028*. Recuperado el 2017, de <http://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>.
- SENER. (2015). *Balance Nacional de Energía 2014*. Recuperado el 2017, de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>
- USEPA. (Enero de 2017). *AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Recuperado el Junio de 2017, de [www.epa.gov: https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors#5thed](https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors#5thed)