

INFORMES

TÉCNICOS

Metodologías  
para la  
evaluación del  
riesgo en el  
transporte  
terrestre de  
materiales  
y residuos  
peligrosos

Rubén Darío Rivera Balboa

COORDINACIÓN  
DE  
INVESTIGACIÓN

Área de Riesgos Químicos



**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN**

**Lic. Santiago Creel Miranda**  
Secretario de Gobernación

**Lic. María del Carmen Segura Rangel**  
Coordinadora General de Protección Civil

**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**M. en I. Roberto Quaas Weppen**  
Director General

**Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro**  
Coordinador de Investigación

**Ing. Enrique Guevara Ortiz**  
Coordinador de Instrumentación

**M. en I. Tomás Alberto Sánchez Pérez**  
Coordinador de Difusión

**Lic. Gloria Luz Ortiz Espejel**  
Coordinadora de Capacitación

**Lic. Luz María Flores Guerrero**  
Coordinadora Administrativa

**Profra. Carmen Pimentel Amador**  
Secretaria Técnica

1ª edición, noviembre 2002  
CI/RQ-30112002

©SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN  
Abraham González Núm. 48,  
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,  
C.P. 06699, México, D.F.

©CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES  
Av. Delfín Madrigal Núm. 665,  
Col. Pedregal de Santo Domingo,  
Deleg. Coyoacán, C.P.04360, México, D. F.  
Teléfonos:  
(55) 54 24 61 00  
(55) 56 06 98 37  
Fax: (55) 56 06 16 08  
e-mail: [editor@cenapred.unam.mx](mailto:editor@cenapred.unam.mx)  
[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)

© Autor: Rubén Darío Rivera Balboa

Edición: Violeta Ramos Radilla  
Portada: D.G. Demetrio Vázquez y Susana González

ISBN: 970-628-631-4  
Derechos reservados conforme a la ley  
IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL AUTOR

METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN EL TRANSPORTE TERRESTRE DE  
MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

Rubén Darío Rivera Balboa

Coordinación de Investigación

Área de Riesgos Químicos

Noviembre, 2002

## CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	7
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	9
CAPÍTULO II LEGISLACIÓN .....	11
2.1 Definiciones de material y residuo peligroso .....	11
2.2 Marco legal .....	13
2.2.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente .....	14
2.2.2 Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos .....	14
2.2.3 Ley Federal para el Control de Precursores Químicos, Productos Esenciales y Máquinas para Elaborar Cápsulas, Tabletas y/o Comprimidos .....	15
2.2.4 Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos .....	15
2.2.5 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos .....	18
2.2.6 Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo .....	18
2.2.7 Normas Oficiales Mexicanas .....	19
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RIESGO.....	23
3.1 Proceso de análisis de riesgo .....	23
3.1.1 Definición de los objetivos del análisis.....	23
3.1.2 Descripción del sistema .....	24
3.1.3 Identificación de peligros .....	24
3.1.4 Enumeración de incidentes .....	25
3.1.5 Selección de incidentes .....	25
3.1.6 Estimación de consecuencias .....	25
3.1.7 Estimación de frecuencias y probabilidades .....	25
3.1.8 Estimación del riesgo .....	26
3.2 Proceso de administración de riesgos en el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos .....	26
3.2.1 Evaluación de riesgos .....	29
3.2.1.1 Análisis de alcances y selección de objetivos .....	29
3.2.1.2 Identificación de eventos.....	30
3.2.1.3 Análisis de frecuencias .....	30
3.2.1.4 Análisis de consecuencias .....	31
3.2.1.5 Estimación o valoración del riesgo.....	31
3.2.2 Control de riesgos .....	31
3.2.3 Vigilancia del desempeño.....	32
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS .....	35
4.1 Modelos de fuente .....	35
4.1.1 Liberaciones tipo chorro de gas .....	38
4.1.2 Liberación tipo chorro de líquido .....	38
4.1.3 Liberación tipo chorro de dos fases .....	38

4.1.4 Charcas de líquido.....	38
4.2 Modelos de dispersión.....	40
4.2.1 Modelos para plumas de gases neutralmente o positivamente flotantes .....	41
4.2.2 Modelos para dispersión de gas denso.....	41
4.3 Modelos para explosión e incendio.....	42
4.3.1 Modelos basado en la detonación de TNT.....	43
4.3.2 Modelos no basados en la detonación de TNT .....	44
4.3.3 Explosión por expansión de vapor de líquido en ebullición (BLEVE) y bola de fuego .....	45
4.3.4 Charcas de fuego .....	46
4.4 Modelos de efectos .....	47
4.4.1 Efectos de material tóxico .....	48
4.4.2 Efectos térmicos .....	48
4.4.3 Efectos de explosiones .....	49
4.5 Escenarios .....	49
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE FRECUENCIAS .....	51
5.1 Métodos para la estimación de la frecuencia y la probabilidad de accidentes e incidentes .....	51
5.1.1 Registros históricos e inferencia estadística .....	51
5.1.2 Árbol de fallas .....	53
5.1.3 Árbol de eventos.....	54
5.1.4 Modelación analítica y simulación .....	55
5.1.5 Estimación subjetiva .....	56
5.1.6 Análisis bayesiano.....	56
5.2 Factores que contribuyen a los accidentes .....	56
5.2.1 Factores asociados con el vehículo .....	57
5.2.2 Factores asociados con el conductor .....	57
5.2.3 Factores asociados con el camino o el ambiente .....	57
5.3 Base de datos sobre accidentes, incidentes y exposición .....	58
5.3.1 Datos sobre accidentes de tráfico .....	58
5.3.1.1 Frecuencia de accidentes .....	59
5.3.2 Datos sobre incidentes .....	59
5.3.2.1 Frecuencia de incidentes .....	59
5.4 Procedimiento para la estimación del volumen de tráfico y tasa de accidentes .....	60
CAPÍTULO VI METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL RIESGO EN EL TRANSPORTE TERRESTRE DE MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS .....	65
6.1 Definición de accidente, incidente y resultados de incidente .....	65
6.2 Medición del riesgo .....	65
6.2.1 Riesgo individual .....	66
6.2.2 Riesgo social.....	66
6.3 Modelos para la evaluación del riesgo en el transporte .....	67
6.3.1 Incertidumbre en los modelos de evaluación de riesgo .....	69
6.4 Primera metodología para la evaluación del riesgo en el transporte .....	70
6.4.1 Evaluación del riesgo individual .....	70
6.4.1.1 Procedimiento para el cálculo del riesgo individual.....	71
6.4.2 Evaluación del riesgo social .....	73
6.4.2.1 Procedimiento para el cálculo del riesgo social .....	74

6.5 Segunda metodología para la evaluación del riesgo en el transporte.....	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	85
BIBLIOGRAFÍA .....	87

## **RESUMEN**

El transporte de materiales y residuos peligrosos es una actividad vital en cualquier sociedad industrializada. En México, el transporte de dichos materiales se realiza principalmente por vía carretera y ferroviaria, para lo cual se dispone de 98 031 kilómetros de carreteras pavimentadas de dos carriles, 10,055 kilómetros de carreteras de cuatro o más carriles y una red ferroviaria con 26,622 kilómetros de longitud. Los riesgos asociados al transporte de materiales y residuos peligrosos es la causa principal por la cual las autoridades regulan esta actividad. A pesar de que los accidentes en el transporte de estos materiales son eventos que pueden considerarse poco frecuentes, una liberación de material puede ocurrir y tener impactos considerables al ambiente, las personas próximas al sitio del incidente y a propiedades. El presente trabajo proporciona información que permite un acercamiento al transporte de materiales y residuos peligrosos, y como objetivo principal establece un procedimiento para la evaluación cuantitativa del riesgo, el cual incluye la determinación de la exposición, las consecuencias posibles de una liberación e integra ambos componentes en los resultados. Sin embargo, en el trabajo se concluye que para la aplicación en México del procedimiento para la evaluación cuantitativa del riesgo es necesario determinar las tasas de accidentes para los vehículos utilizados en el transporte de materiales y residuos peligrosos, así como las frecuencias y probabilidades condicionales indicadas en el procedimiento, de acuerdo con la situación particular del país.

## **ABSTRACT**

Transportation of waste and hazardous materials is an essential activity in any industrialized society. In Mexico such materials are mainly transported by highways and railways. For this purpose, there are 98,031 kilometers of two-lane paved highways; 10,055 kilometers of four-lane (or more lanes) highways; and a 26,622 kilometer long railway network. Risks related to the transportation of waste and hazardous materials are the principal reason for which authorities regulate this activity. Although accidents during transportation of these materials are events that can be considered less frequent, releases of hazardous materials may occur and considerably impact the environment, people close to the incident and properties. This document provides an examination of the transportation of waste and hazardous materials, and as a main objective establishes a procedure for quantitatively assessing the risk, which includes the evaluation of the exposition, the possible consequences of spills, and integrates both components in the results. However, the work concludes that, in order to apply the risk quantitative assessment procedure in Mexico, it is necessary to determine the accident rates for vehicles used in hazardous materials and waste transportation, as well as the conditional frequencies and probabilities indicated in the procedure, according to the specific situation of the transportation infrastructure in Mexico.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El transporte de materiales y residuos peligrosos es inherente a cualquier sociedad con un desarrollo tecnológico. Los procesos industriales dependen de un flujo ininterrumpido de materiales y residuos, y cuando éste se realiza existe un peligro potencial para la población y el ambiente en caso de una liberación accidental. En México, las materias primas, productos terminados y residuos, empleados, elaborados o generados por la industria se transportan principalmente por vía carretera y ferroviaria; en esta operación se utilizan diferentes configuraciones y tipos de camiones, autotanques y carrotranques. Estos materiales y residuos peligrosos presentan características: explosivas, inflamables, oxidantes, radiactivas, tóxicas y/o biológico-infecciosas. Los materiales peligrosos normalmente son transportados por empresas especializadas que utilizan equipo diseñado para este propósito y para prevenir liberaciones al ambiente en caso de un accidente; por lo que una liberación accidental de material es posible sólo si existe un daño al recipiente o sus accesorios.

Actualmente México cuenta con una infraestructura carretera de aproximadamente 329,532 kilómetros, de ésta destacan alrededor de 108,086 kilómetros de carreteras pavimentadas (98 031 kilómetros de dos carriles y 10,055 kilómetros de cuatro o más carriles); asimismo, la red ferroviaria está integrada por 26,622 kilómetros que incluyen vías principales, secundarias y particulares, de las cuales 26,455 kilómetros son de vía ancha y 167 de vía angosta (SCT, 2000).

Los riesgos asociados con el transporte de materiales peligrosos es una de las razones principales por la cual las autoridades regulan esta actividad; asimismo los accidentes durante el transporte constituyen la causa principal de liberaciones no intencionales debido a esto las autoridades han establecido disposiciones con el propósito de disminuir el número de accidentes y los riesgos. Dentro de los aspectos considerados en las regulaciones se encuentran el etiquetado de recipientes, la identificación de vehículos, especificaciones de diseño del contenedor o recipiente, y medidas a realizarse en caso de un incidente.

Los accidentes en el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos son eventos que pueden considerarse poco frecuentes, de acuerdo a la magnitud de sus frecuencias; sin embargo una liberación accidental del material puede ocurrir y tener impactos de consideración al ambiente, propiedades y a personas próximas al sitio del incidente. El riesgo en el transporte puede establecerse en términos de la posibilidad de un accidente y sus consecuencias, para esto se requiere el obtener información sobre los resultados del accidente, por ejemplo si existe una liberación de material, cantidad liberada y si el material se incendió, explotó o fue una dispersión de segura en la atmósfera. Por ello el registro de accidentes y su análisis son imprescindibles para determinar las frecuencias, probabilidades y medidas o estimaciones del riesgo.

Para establecer la probabilidad de una liberación accidental en el transporte de materiales y residuos peligrosos y en la evaluación del riesgo, se requiere determinar las tasas de accidentes en camiones, las cuales integran tres tipos de datos: geometría de la carretera, volúmenes de tráfico y registros de accidentes; estos datos deberán relacionarse por medio de un identificador común, que puede ser el kilometraje asignado al camino en consideración.

La estimación del riesgo implica la consideración de una serie de pasos que inicia con la comprensión del nivel de exposición (número de envíos, toneladas transportadas, distancia recorrida), tipo de incidente, causa y frecuencia, y las consecuencias del incidente (muerte, lesiones, daños), para la posterior integración de los resultados. La manera en que los anteriores componentes se definan y midan dependerá principalmente de la información disponible y del propósito de la evaluación del riesgo. El riesgo se expresa comúnmente por un número conocido como riesgo social. Las medidas de riesgo pueden expresarse de acuerdo a los daños a la propiedad, lesionados o muertes. Sin embargo, evaluar el riesgo como un número no proporciona la misma información de los perfiles o contornos de riesgo, ya que ésta es una distribución de la probabilidad y de las consecuencias.

De esta manera, para establecer medidas para incrementar la seguridad en carreteras durante el transporte de materiales y residuos peligrosos es fundamental el disponer de información detallada, precisa y suficiente sobre carreteras, accidentes, unidades de transporte, tráfico de vehículos, etcétera, que permitan aplicar los métodos de análisis y fundamentar la toma de decisiones. Lo anterior permitirá realizar una comparación de las medidas posibles basándose en términos cuantitativos, como son las tasas de accidentes, el riesgo social e individual, y costos económicos asociados. La cuantificación del riesgo en el transporte, además de ayudar en la selección de alternativas para el manejo y a la toma de decisiones, puede utilizarse para una comunicación efectiva del riesgo al público.

El presente trabajo tiene como propósito principal establecer una metodología para la evaluación del riesgo debido al transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos, que posea una estructura sistemática, no utilice índices subjetivos e integre las componentes principales del riesgo. Asimismo, se incluye en los diferentes capítulos información que permite un acercamiento al transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos.

El capítulo I proporciona una introducción al contenido del trabajo; en el capítulo 2 se presentan los artículos de las leyes, reglamentos y normas que constituyen el marco legal en el cual se desarrollan las actividades de transporte de materiales y residuos peligrosos. En el capítulo 3 se describen las etapas del proceso de análisis de riesgos y los componentes del proceso de administración de riesgos. El capítulo 4 presenta las principales características de los modelos empleados para el análisis de consecuencias. El capítulo 5 contiene las técnicas para la estimación de la frecuencia y probabilidad de un accidente e incidente, factores involucrados en los accidentes, procedimiento para la estimación del volumen de tráfico, y de la tasa de accidentes. En el capítulo 6 se establece el desarrollo metodológico para la evaluación cuantitativa del riesgo. Por último se incluyen las conclusiones obtenidas y algunas recomendaciones.

## CAPÍTULO II

### LEGISLACIÓN

Las disposiciones que regulan el transporte de materiales y residuos peligrosos se fundamenta en que una liberación accidental de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radiactivas, corrosivas u oxidantes, puede ocasionar una afectación a la población cercana, al ambiente y/o a las propiedades. Por lo tanto la regulación de esta actividad tiene como propósito su control y el logro de un nivel de seguridad apropiado.

En este capítulo se presenta el marco legal que rige el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos.

#### 2.1 DEFINICIONES DE MATERIAL Y RESIDUO PELIGROSO

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente define a un *material peligroso* como:

*“Elemento, sustancia, compuesto, residuo o mezcla de ellos que, independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas”.*

La Ley anterior define a un *residuo* como:

*“Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permite usarlo nuevamente en el proceso que se generó”.*

La norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-1993 establece los residuos peligrosos de acuerdo a su fuente generadora, clasificándolos en residuos peligrosos por giro industrial y por proceso, así como por fuente no específica de acuerdo a las tablas 1, 2 y 3 incluidas en la norma; además establece las propiedades que definen a las características que deberán presentar los residuos para ser considerados como peligrosos; estas características y propiedades se indican en la Tabla 2.1.

Asimismo, el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos define a un *material peligroso* como: *aquella sustancia peligrosa, sus remanentes, sus envases, embalajes y demás componentes que conformen la carga que será transportada por las unidades.* De igual manera define a una *sustancia peligrosa* como: *todo aquél elemento, compuesto, material o mezcla de ellos que independientemente de su estado físico, represente un riesgo potencial para la salud, el ambiente, la seguridad de los usuarios y la propiedad de terceros; también se consideran bajo esta definición los agentes biológicos causantes de enfermedades.*

En el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, se clasifican las sustancias peligrosas de acuerdo a sus características en clases, y éstas a su vez en divisiones de acuerdo al tipo de riesgo que presentan. En la tabla 2.2 se describen las características que corresponden a cada una de las clases.

**Tabla 2.1 Características CRETIB**

<b>Característica</b>	<b>Propiedad</b>
<b>Corrosividad</b>	En estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0; o mayor o igual a 12.5. En estado líquido o en solución acuosa, a una temperatura de 55°C es capaz de corroer el acero al carbón, a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año.
<b>Reactividad</b>	Bajo condiciones normales (25°C y 1 atmósfera), se combina o polimeriza violentamente sin detonación. En condiciones normales (25°C y 1 atmósfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3, 5:5, reacciona violentamente formando gases, vapores o humos. Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con solución de pH ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N) en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3, 5:5, reaccionando violentamente formando gases, vapores o humos. Posee en su constitución cianuros o sulfuros que al exponerse a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 mg de H <sub>2</sub> S/kg de residuo, o cuando es capaz de producir radicales libres
<b>Explosividad</b>	Tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del dinitrobenzeno. Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 °C y a 1.03 kg/cm <sup>2</sup> de presión
<b>Toxicidad al ambiente</b>	Cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la Norma Oficial mexicana NOM-053-ECOL-1993, el lixiviado de la muestra representativa contiene cualquiera de los constituyentes listados en las tablas del anexo 5 de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993.
<b>Inflamabilidad</b>	En solución acuosa contiene más de 24% de alcohol en volumen Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60 °C. No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25 °C y a 1.03 kg/cm <sup>2</sup> ). Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.
<b>Biológica infecciosa</b>	Un residuo es biológico-infeccioso cuando: el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección; contiene toxinas producidas por microorganismos con capacidad de infección.

Fuente: NOM-052-ECOL-1993.

**Tabla 2.2 Clasificación de las sustancias peligrosas**

Clase	Denominación	Descripción
1	<b>Explosivos</b>	Incluye: <i>Sustancias explosivas</i> : Son sustancias o mezcla de sustancias sólidas o líquidas que de manera espontánea o por reacción química, pueden desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que causen daños en los alrededores. <i>Sustancias pirotécnicas</i> : Son sustancias o mezclas de sustancias destinadas a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno o una combinación de los mismos, como consecuencia de reacciones químicas exotérmicas autosostenidas no detonantes. <i>Objetos explosivos</i> : Son objetos que contienen una o varias sustancias explosivas.
2	<b>Gases comprimidos, refrigerados, licuados o disueltos a presión</b>	Son completamente gaseosas a 20 °C a una presión normal de 101.3 kPa; a 50 °C tienen una presión de vapor mayor a 300 kPa.
3	<b>Líquidos inflamables</b>	La clase 3 son mezclas o líquidos que contienen sustancias sólidas en solución o suspensión, que despiden vapores inflamables a una temperatura no superior a 60.5 °C en los ensayos en copa cerrada o no superiores a 65.6 °C en copa abierta.
4	<b>Sólidos inflamables</b>	Son sustancias que presentan riesgo de combustión espontánea, así como aquellos que en contacto con el agua desprenden gases inflamables.
5	<b>Oxidantes y peróxidos orgánicos</b>	<i>Sustancias oxidantes</i> : Sustancias que sin ser necesariamente combustibles, pueden generalmente liberando oxígeno, causar o facilitar la combustión de otras. <i>Peróxidos orgánicos</i> : Sustancias orgánicas que contienen la estructura bivalente -O-O- y pueden considerarse derivados del peróxido de hidrógeno, en el que uno de los átomos de hidrógeno, o ambos han sido sustituidos por radicales orgánicos. Los peróxidos son sustancias térmicamente inestables que pueden sufrir una descomposición exotérmica autoacelerada; además pueden poseer otras propiedades.
6	<b>Tóxicos agudos (venenos) y agentes infecciosos</b>	<i>Tóxicos agudos (venenos)</i> : Son aquellas sustancias que pueden causar la muerte, lesiones graves, o ser nocivas para la salud humana si se ingieren, inhalan o entran en contacto con la piel. <i>Agentes infecciosos</i> : Son las que contienen microorganismos viables incluyendo bacterias, virus, parásitos, hongos, o una combinación híbrida o mutante; que son conocidos o se cree que pueden provocar enfermedades en el hombre o los animales.
7	<b>Radiactivos</b>	Son todos los materiales cuya actividad específica es superior a 70 kBq/kg (2 nCi/g).
8	<b>Corrosivos</b>	Son sustancias líquidas o sólidas que por su acción química causan lesiones graves a los tejidos vivos con los que entran en contacto o que si se produce un escape pueden causar daños e incluso destrucción de otras mercancías o de las unidades en las que son transportadas.
9	<b>Varios</b>	Son aquellas sustancias que durante el transporte presentan un riesgo distinto de los correspondientes a las demás clases y que también requieren un manejo especial para su transporte, por representar un riesgo potencial para la salud, el ambiente, la seguridad a los usuarios y la propiedad a terceros

Fuente: Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, 1993.

## 2.2 MARCO LEGAL

El transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos está regido por disposiciones contenidas en leyes, reglamentos y normas emitidos por las autoridades correspondientes, las cuales constituyen el marco legal que regula esta actividad. A continuación se describen las principales disposiciones.

### **2.2.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente contiene diferentes disposiciones aplicables al manejo de materiales y residuos peligrosos, destacando las siguientes:

En materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente compete a la Federación, entre otras facultades, la regulación y el control de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas (artículo 5 fracción VI).

El artículo 38 establece que: los productores, empresas u organizaciones empresariales podrán desarrollar procesos voluntarios de autorregulación ambiental, a través de los cuales mejoren su desempeño ambiental, respetando la legislación y normatividad vigente en la materia y se comprometan a superar o cumplir mayores niveles, metas o beneficios en materia de protección ambiental.

El título cuarto capítulo VI hace referencia a la regulación y control de los materiales y residuos peligrosos, donde el artículo 150 establece que: los materiales y residuos peligrosos deben manejarse de acuerdo a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su reglamento y las normas oficiales mexicanas que expida la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (actualmente Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales, SEMARNAT), con previa opinión de diversas Secretarías como la de Comercio y Fomento Industrial (actualmente Secretaría de Economía), la de Comunicaciones y Transporte, de Marina y de Gobernación. La regulación de estos materiales incluirá según corresponda, su uso, recolección, almacenamiento, transporte, reuso, reciclaje, tratamiento y disposición final. Asimismo, la SEMARNAT en coordinación con las anteriores dependencias, expedirá las normas oficiales mexicanas en las que establecerán los requisitos para el etiquetado y envasado de materiales y residuos peligrosos, así como para la evaluación del riesgo e información sobre contingencias y accidentes que pudieran generarse por su manejo, particularmente tratándose de sustancias químicas.

El manejo y disposición final de residuos peligrosos es responsabilidad de quien los generó, en el caso de contratar los servicios para el manejo y disposición final de residuos peligrosos, la responsabilidad por las operaciones será de estas empresas independientemente de quien los haya generado (artículo 151). Asimismo, el artículo 151 Bis indica que se requiere autorización de la SEMARNAT para el transporte de residuos peligrosos. Cuando los residuos peligrosos se transporten a un predio distinto a aquél en el que se generaron, se estará en lo dispuesto en la normatividad aplicable al transporte terrestre de residuos peligrosos (artículo 152).

Por último, en lo relativo a la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos el Ejecutivo Federal es el encargado de restringir estas actividades, correspondiendo a la SEMARNAT el control y la vigilancia ecológica de los anteriores, aplicando las medidas de seguridad que correspondan (artículo 153).

### **2.2.2 Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos**

El Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos en el artículo 1, menciona que: el transporte terrestre de materiales peligrosos realizado por las fuerzas armadas mexicanas no lo regula el anterior Reglamento sino la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos. Es así, que el transporte de explosivos por particulares además de las disposiciones contenidas en el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, deberán sujetarse a las contenidas en la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos, la cual hace énfasis en el control y vigilancia que debe tenerse de estos productos, es decir de su posesión, fabricación, comercio, importación, exportación y actividades conexas, y sobre el transporte y almacenamiento.

En el título tercero de la presente Ley (correspondiente a la fabricación, comercio, importación, exportación y actividades conexas) el artículo 37 indica que el control y vigilancia de las actividades y operaciones industriales, y comerciales que se realicen con armas, municiones, explosivos, artificios y sustancias químicas será realizada por la Secretaría de la Defensa Nacional; y los permisos que se requieran en

estas actividades serán otorgados por la misma Secretaría con conocimiento de la Secretaría de Gobernación. Asimismo en el artículo 38 indica que los permisos no eximirán a los interesados de cubrir los requisitos que señalen otras disposiciones legales.

El artículo 40 señala que las actividades industriales y comerciales relacionadas con armas, municiones, explosivos y demás objetos que regula esta ley, se sujetarán a las disposiciones que dicte la Secretaría de la Defensa Nacional. En el artículo 41 indica que las disposiciones contenidas en el título tercero son aplicables a todas las actividades relacionadas con los diferentes tipos de: armas, pólvora y explosivos, artificios, y sustancias químicas relacionadas con explosivos. De acuerdo al artículo 42 los permisos específicos pueden ser generales, ordinarios o extraordinarios. Asimismo los permisos son intransferibles (artículo 44) y la SEDENA podrá negar, suspender o cancelar discrecionalmente los permisos (artículo 43).

Dentro del capítulo IV, relativo al transporte, el artículo 60 establece que los permisos generales para cualquiera de las actividades contempladas en el título tercero (que incluye la autorización para el transporte dentro del territorio nacional de las armas, objetos y materiales que amparen), y sus tenedores deberán sujetarse a las leyes, reglamentos y disposiciones relativas. La transportación que deriven de los permisos deberá ajustarse a las medidas de seguridad que se precisen en dichos permisos (artículo 61). En los aspectos del control y vigilancia, se establece en el artículo 68 que quienes posean permiso general, deberán informar a la SEDENA de manera detallada sus actividades mensuales. Asimismo el artículo 73 establece que los permissionarios están obligados a cumplir con la medidas de información, control y seguridad que establezca la SEDENA. El artículo 86 indica la sanción para quienes transporten sin el permisos respectivo; y el artículo 87 contiene las sanciones correspondientes cuando el transporte se realiza sin ajustarse a las condiciones de seguridad, quienes realicen el transporte por medio de empresas no autorizadas y para las empresas transportistas.

### **2.2.3 Ley Federal para el Control de Precursores Químicos, Productos Químicos Esenciales y Máquinas para Elaborar Cápsulas, Tabletas y/o Comprimidos**

Esta Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de diciembre de 1997, tiene por objeto controlar la producción, preparación, enajenación, adquisición, importación, exportación, transporte, almacenaje y distribución de precursores químicos, productos químicos esenciales y máquinas para elaborar cápsulas, tabletas y/o comprimidos, a fin de evitar su desvío para la producción ilícita de narcóticos. En el artículo 4 se indican las substancias controladas, clasificándolas como precursores químicos y como productos químicos esenciales. Las cantidades o volúmenes de productos químicos esenciales a partir de los cuales serán aplicables, a las personas que realicen las actividades reguladas las disposiciones contenidas en esta Ley, se determinarán mediante acuerdo y se publicarán en el Diario Oficial de la Federación (artículo 6). La Ley establece que no se podrá separar o reducir la cantidad o volumen de cada operación que se realice con productos químicos esenciales, con el propósito de eludir la aplicación de la misma. Quienes realicen el transporte terrestre, marítimo o aéreo de precursores químicos o productos químicos esenciales deben presentar aviso por única vez a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, dentro de los 30 días siguientes a la fecha en que lo realicen por primera ocasión. Asimismo deberán informar anualmente a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, las cantidades o volúmenes de precursores químicos o productos químicos esenciales que hubieren transportado durante el periodo (artículo 9). Quienes transporten productos químicos o productos químicos esenciales por sus propios medios y únicamente para su uso particular, estarán exentos de las obligaciones previstas en los artículos 8 y 9. De acuerdo al artículo 18, la verificación de las actividades reguladas en lo correspondiente al transporte de precursores químicos o productos químicos esenciales la realizará la Secretaría de Comunicaciones y Transportes respecto de las obligaciones previstas en los artículos 8, 9, 11, 12 y 13.

### **2.2.4 Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos**

El Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos establece las disposiciones a que deberá sujetarse el transporte en las vías generales de comunicación de los productos considerados como peligrosos. En forma general, este Reglamento abarca los siguientes puntos:

El título primero corresponde a las disposiciones generales y a la clasificación de las sustancias peligrosas. En el artículo tercero menciona que la aplicación del Reglamento para el Transporte de Materiales y Residuos Peligrosos en las vías generales de comunicación terrestre y sus servicios auxiliares y conexos, corresponde a la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). El artículo 5 indica que para el transporte de materiales y residuos peligrosos por las vías generales de comunicación es necesario que la Secretaría otorgue a los transportistas un permiso.

El artículo 6 establece la prohibición de transportar personas, animales, productos alimenticios de consumo humano o animal, artículos de uso personal y residuos sólidos municipales, en unidades que hayan sido autorizadas para transportar materiales y residuos peligrosos. En los artículos 7 al 16 se establece la clasificación de las sustancias peligrosas de acuerdo a las características que presenten. El artículo 17 indica que la identificación de las sustancias peligrosas, así como su traslado y método de envase y embalaje deberá realizarse de acuerdo a la norma correspondiente.

El título segundo contiene disposiciones aplicables a los envases y embalajes, nuevos y reutilizables, empleados para el transporte de sustancias o residuos, y las excepciones correspondientes. En el artículo 21 se menciona que la inspección deberá realizarla el expedidor de estas sustancias, al envase y embalaje antes de ser llenado y entregado para su transporte; asimismo, las medidas preventivas para evitar el crear o aumentar el riesgo durante el transporte del material se establecen en los artículos 22 al 28. El artículo 29 indica que las especificaciones y características de construcción y reconstrucción, así como los métodos de prueba de envase y embalaje, se establecerán en las normas correspondientes.

El artículo 31 establece que para la identificación y el reconocimiento del riesgo de las sustancias o residuos peligrosos, cada envase y embalaje deberá contar con la etiqueta o etiquetas correspondientes. Asimismo, de acuerdo al artículo 32 todo envase y embalaje destinado a transportar sustancias o residuos peligrosos deberán llevar marcas indelebles, visibles y legibles que certifiquen que están fabricados conforme a las normas correspondientes.

En el título tercero correspondiente a las características, especificaciones y equipamiento de los vehículos motrices y unidades de arrastre, se hace mención a las especificaciones que debe cumplir toda unidad motriz utilizada en el traslado de materiales y residuos peligrosos. El artículo 34 indica que la construcción o reconstrucción de los autotankers, unidades de arrastre, recipientes intermedios para granel y contenedores cisternas, deberá realizarse conforme a las normas respectivas; además las unidades mencionadas deberán contar con aditamentos de emergencia y dispositivos de protección, de conformidad con la norma respectiva. Los artículos 37 al 40 establecen la manera en que deberán identificarse los camiones, unidades de arrastre, recipientes intermedios para granel y contenedores cisternas.

El título cuarto que trata sobre las condiciones de seguridad, se establecen las condiciones en que se realizará la inspección de las unidades que transportan materiales y residuos peligrosos, el acondicionamiento de la carga, la documentación requerida para el traslado de materiales, así como lo relativo al Sistema Nacional de Emergencia en Transportación de Materiales y Residuos Peligrosos. De esta manera el artículo 41 precisa que la inspección técnica y de operación de las unidades será periódica.

El acondicionamiento de la carga deberá hacerse de acuerdo a las normas correspondientes (artículo 47); asimismo las unidades que estén cargadas con diversas clases de materiales y residuos peligrosos deberán contar con la información de emergencia de cada uno de los materiales (artículo 49). Los artículos 50 al 53 indican la documentación obligatoria para el traslado de materiales y residuos peligrosos.

En los artículos 54 al 56, se establece que se creará el Sistema Nacional de Emergencia en Transportación de Materiales y Residuos Peligrosos. El sistema tendrá por objeto proporcionar información técnica y específica sobre las medidas y acciones que deben tomarse en caso de algún accidente o incidente. Asimismo, cuando el sistema reciba información sobre alguna emergencia en el transporte se alertará a la Policía Federal de Caminos y Puertos, al gobierno de la entidad federativa y las autoridades locales donde aquella suceda y en su caso a la Secretaría de Gobernación a fin de poner en marcha los operativos de protección civil existentes.

Los artículos 58 a 101 mencionan las restricciones que como medidas de seguridad deberán observar en el autotransporte y el ferrocarril para el traslado de materiales y residuos peligrosos; para el caso del autotransporte se incluye no realizar paradas no justificadas y detener la unidad cuando las condiciones meteorológicas son adversas. Además, se hace referencia a las acciones a seguir, en caso de congestión vehicular, descompostura mayor de la unidad motriz y el estacionamiento nocturno en carretera.

Los artículos 102 a 108 establecen disposiciones especiales para el transporte de materiales y residuos peligrosos; de forma resumida abarca los siguientes puntos:

- ◆ El transporte de residuos peligrosos se realizará conforme a la clase de la sustancia peligrosa de que se trate (artículo 102).
- ◆ El manejo de los remanentes peligrosos por lavado o descontaminación de las unidades deberá apegarse a la normatividad correspondiente (artículo 103).
- ◆ La unidad a utilizar cumplirá con las especificaciones de construcción determinadas para el transporte de materiales, de acuerdo a la norma correspondiente (artículo 106).
- ◆ En el transporte de residuos peligrosos se deberán guardar la compatibilidad entre sí, en conformidad con la norma correspondiente (artículo 108).

Los artículos contenidos en el título séptimo, artículos 109 a 113, establecen la obligación de los transportistas, expedidores o generadores de los materiales y residuos peligrosos contraten un seguro que ampare los daños que puedan ocasionarse a terceros en sus bienes y personas, ambiente, vías de comunicación y cualquier otro daño; asimismo trata sobre la cobertura mínima del seguro y de la responsabilidad de transportista, expedidor, destinatario y generador.

Los artículos contenidos en el título octavo mencionan las obligaciones específicas del expedidor y destinatario de materiales y residuos peligrosos, autotransportista, conductor y la empresa constructora, reconstructora o arrendadora de unidades de arrastre. Las obligaciones del expedidor y destinatario del material y residuo peligroso, son medidas de seguridad para el manejo de estas sustancias que incluye el envase y embalaje, proporcionar la “*Información de emergencia en transportación*” del material o residuo transportado, equipo de seguridad necesario, carteles para la unidad y la verificación de maniobras de carga y descarga.

De acuerdo al artículo 118, en el autotransporte el expedidor, el autotransportista y el destinatario deberán coordinarse para que el material y residuo peligroso se transporte en condiciones de seguridad y llegue a tiempo a su destino y en buen estado, para lo cual se deberán tomar diferentes medidas entre las que destaca: *el determinar la ruta de transporte que presente mejores condiciones de seguridad (art. 118 fracción III)*. El artículo 119 lista los requisitos que el autotransportista deberá cumplir, por ejemplo: no cargar materiales o residuos peligrosos que en su envase y embalaje o contenedor presenten fracturas, fugas o escurrimientos, revisar que la unidad no cuente con elementos punzocortantes u otros que puedan deteriorar la carga, exponiendo la salud y la vida de personas, bienes y el ambiente; proporcionar capacitación y actualización de conocimientos a su personal y conductores.

El artículo 120 establece las obligaciones que tiene el conductor, que incluye su capacitación y actualización, el realizar la revisión ocular diaria del vehículo verificando tanto las condiciones mecánicas como las de operación, y en caso de accidentes realizar las indicaciones de seguridad indicadas en la información de emergencia en transportación.

El artículo 121 indica las obligaciones de la empresa ferroviaria que transporte materiales o residuos peligrosos; asimismo los artículos 122, 123 y 124 establecen las respectivas obligaciones para las tripulaciones de trenes, de los jefes de patio y de los jefes de estación.

El artículo 125 establece que la empresa constructora, reconstructora o arrendadora de unidades de arrastre está obligada a entregar al comprador las especificaciones de diseño y construcción de la unidad adquirida, así como certificaciones que garanticen los materiales empleados, de acuerdo a la normatividad correspondiente.

Los artículos 128 a 133 tratan sobre la capacitación del personal y conductores que intervengan en el transporte de materiales y residuos.

Por último, los artículos 134 al 136 establecen las sanciones económicas y administrativas que se aplicarán en caso de infracción a los artículos dispuestos en el Reglamento. Las sanciones económicas incluyen multas (determinado número de salarios mínimos) de acuerdo al tipo de infracción. Las sanciones administrativas se determinan considerando la condición económica y el carácter intencional del infractor.

### **2.2.5 Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos**

El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de noviembre de 1988, establece en el artículo 4 fracción IV que es competencia de la SEMARNAP (actualmente SEMARNAT) el autorizar la instalación y operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de los residuos peligrosos. Asimismo en la fracción VI del mismo artículo establece que para cualquier operación de manejo de residuos peligrosos el generador y las empresas de servicios de manejo deberá estar autorizado por la SEMARNAT; entendiéndose por manejo diversas operaciones incluido el transporte de residuos peligrosos (artículo 9). En el artículo 13 establece que el generador podrá contratar los servicios de una empresa de manejo de residuos peligrosos, estas empresas deberán contar con autorización previa de la SEMARNAT y serán responsables por lo que toca a la operación de manejo en la que intervengan. Para el almacenamiento y transporte de residuos peligrosos, el generador deberá envasarlos de acuerdo al estado físico, características de peligrosidad e incompatibilidad (artículo 14). De acuerdo al artículo 23, para transportar residuos peligrosos el generador deberá contar con los formatos de manifiesto de transporte; por cada volumen de transporte el generador deberá entregar al transportista un manifiesto original, debidamente firmado y dos copias del mismo, el original firmado por el transportista y una copia se le entregará al destinatario. El transportista deberá entregar a la SEMARNAT un informe semestral sobre los residuos transportados (artículo 25 y 26). Asimismo, de acuerdo al artículo 26 el transportista de residuos peligrosos deberá: contar con autorización de la SEMARNAT, contar con el manifiesto para transporte, verificar que los residuos estén correctamente envasados e identificados, sujetarse a las disposiciones sobre seguridad e higiene en el trabajo que correspondan, así como las aplicables en materia de tránsito y, de comunicaciones y transportes. Los vehículos destinados al transporte de residuos peligrosos deben contar con registro de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y cumplir con los requisitos que para este vehículo determine; los vehículos registrados para el transporte de residuos peligrosos solo podrán utilizarse para dicho fin, con excepción de aquellos que no estén en contacto directo con los residuos (artículo 27).

El artículo 42 establece que cuando por cualquier causa se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos peligrosos en el transporte se deberá dar aviso inmediato a la SEMARNAT ratificado por escrito en los tres días siguientes.

### **2.2.6 Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo**

El Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo establece diferentes disposiciones relacionadas con el transporte y manejo de materiales peligrosos, acotadas a los centros de trabajo entendiéndose por éste a: *todo aquel lugar, cualquiera que sea su denominación, en el cual se realicen actividades de producción, de comercialización o de prestación de servicios, o en el que laboren personas que estén sujetas a una relación de trabajo*. El artículo 15 indica que el patrón deberá informar a los trabajadores de los riesgos relacionados con la actividad laboral específica que desarrollen, y en particular

acerca de los riesgos que implique el uso o exposición del medio ambiente laboral, así como capacitarlos respecto a las medidas y programas para su prevención y control. El capítulo VI correspondiente al *manejo, transporte y almacenamiento de materiales en general, materiales y sustancias químicas peligrosas* establece disposiciones para prevenir y, evitar daños a la vida humana y la salud de los trabajadores. En el artículo 135 establece que el patrón deberá capacitar a los trabajadores informándoles sobre los riesgos de trabajo inherentes a sus labores y las medidas preventivas para evitarlos. En el artículo 138 indica que en el transporte de materiales peligrosos se deberá contar con capacitación especializada.

### 2.2.7 Normas Oficiales Mexicanas

En las anteriores leyes y reglamentos se contempla la elaboración y aplicación de Normas Oficiales Mexicanas, las cuales de acuerdo a la Ley Federal sobre Metrología y Normalización son *regulaciones técnicas de observancia obligatoria, expedidas por las dependencias competentes, que establecen especificaciones, atributos, características, prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación*. La tabla 2.3 muestra las Normas Oficiales Mexicanas expedidas por diferentes Secretarías relacionadas con el manejo y transporte de materiales y residuos peligrosos.

**Tabla 2.3 Normas Oficiales Mexicanas para el manejo y transporte de materiales y residuos peligrosos**

<b>Norma Oficial Mexicana</b>	<b>Descripción</b>
NOM-002/SCT2-1994	Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados.
NOM-003-SCT/2000	Características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de materiales y residuos peligrosos.
NOM-004-SCT/2000	Sistema de identificación de unidades destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-005-SCT/2000	Información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-006/SCT2-1994	Aspectos básicos para la revisión ocular diaria de la unidad destinada al autotransporte de materiales y residuos peligrosos.
NOM-007/SCT2-1994	Marcado de envases y embalajes destinados al transporte de sustancias y residuos peligrosos.
NOM-009/SCT2-1994	Compatibilidad para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos de la clase 1 (explosivos).
NOM-010/SCT2-1994	Disposiciones de compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-011/SCT2-1994 NOM-EM-011/SCT2-1999	Condiciones para el transporte de las sustancias, materiales o residuos peligrosos en cantidades limitadas.
NOM-017/SCT2-1994	Lineamientos generales para el cargado, distribución y sujeción en las unidades de autotransporte de los materiales y residuos peligrosos.
NOM-019/SCT2-1994	Disposiciones generales para la limpieza y control de remanentes para las unidades de autotransporte de materiales y residuos peligrosos.
NOM-020/SCT2-1994	Requerimientos generales para el diseño, construcción de autotanques destinados al transporte de materiales y residuos peligrosos, especificaciones SCT 306, SCT 307 y SCT 312.
NOM-023/SCT2-1994	Información técnica que debe contener la placa que portarán los autotanques, recipientes metálicos intermedios para granel y envases de capacidad mayor a 450 litros que transportan materiales y residuos peligrosos.
NOM-024/SCT2-1994	Especificaciones para la construcción y reconstrucción, así como métodos de prueba de los envases y embalajes de las sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-025/SCT2-1994	Disposiciones especiales para las sustancias, materiales y residuos peligrosos de la clase 1 explosivos.

Continuación

Continuación tabla 2.3

NOM-027/SCT2-1994	Disposiciones generales para el envase, embalaje y transporte de las sustancias, materiales y residuos peligrosos de la división 5.2 (peróxidos orgánicos).
NOM-028/SCT2-1994	Disposiciones especiales para los materiales y residuos peligrosos de la clase 3 líquidos inflamables
NOM-043/SCT2-1994	Documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
NOM-052-ECOL-1993	Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-053-ECOL-1993	Determinación de residuos peligrosos por su toxicidad al ambiente.
NOM-054-ECOL-1993	Incompatibilidad entre dos o más residuos peligrosos según la NOM-052-ECOL-1993.
NOM-087-ECOL-1995	Separación, envasado, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos biológico infecciosos que se generan en establecimientos que presten atención médica.
NOM-10-SEDG-2000	Valoración de las condiciones de seguridad de los vehículos que transportan, suministran y distribuyen gas LP y medidas mínimas de seguridad que se deben observar durante su operación.
NOM-021/5-SCFI-1993	Recipientes sujetos a presión no expuestos a calentamiento por medios artificiales para contener gas LP tipo portátil para transporte de gas LP.
NOM-018-STPS-1994	Identificación y comunicación de riesgos por sustancias químicas en los centros de trabajo.

Asimismo, de acuerdo a los articulados del Tratado para el Continucción tabla 2.3 Libre Comercio de América del Norte las regulaciones (normatividad) para el transporte de materiales y residuos peligrosos deberán armonizarse entre los países firmantes, y con las recomendaciones establecidas por la Organización de las Naciones Unidas.

Además de las anteriores normas existe la *Guía Norteamericana para Respuesta en Caso de Emergencia* la cual fue desarrollada para ser usada por bomberos, policía, personal de servicios atención a emergencia, y por el propio conductor de la unidad en la respuesta inicial a un incidente. En donde la respuesta inicial es el periodo en el cual se confirma la presencia y/o identifican los materiales peligrosos, se inician las acciones protectoras, se establece el área de seguridad, se informa del incidente y se solicita ayuda de personal capacitado. La guía contiene:

- ◆ Recomendaciones para el uso de la guía
- ◆ Números telefónicos de organismos para aviso, para obtener información y de ayuda en caso de emergencia
- ◆ Ilustraciones de los carteles utilizados para la identificación de las diferentes clases de riesgo y sus divisiones
- ◆ Sección en la cual los materiales se ordenan de manera progresiva ascendente de acuerdo al número de identificación de la Organización de las Naciones Unidas donde se indica el número de guía correspondiente y el nombre del material
- ◆ Sección en la cual los materiales se ordenan alfabéticamente de acuerdo al nombre del material, se indica el número de guía correspondiente y el número de identificación de la Organización de las Naciones Unidas
- ◆ Guías numeradas que contienen: título que identifica el riesgo general de los materiales peligrosos a los cuales esta guía aplica; una sección donde se describen los riesgos potenciales que el material puede presentar en términos de fuego/explosión y efectos potenciales a la salud por exposición; una sección sobre medidas de seguridad pública basadas en la situación que se presente, esta sección proporciona información general sobre el aislamiento inmediato del sitio de acuerdo a las dimensiones del derrame y para incendio, tipo de ropa protectora y protección respiratoria recomendada; una sección sobre respuesta a emergencias por fuego, derrame o fuga y sobre medidas de primeros auxilios.

- ◆ Sección sobre la distancia de aislamiento inicial para los diferentes materiales ordenados conforme al número de las Naciones Unidas, especificado de acuerdo al tamaño del derrame o fuga y, distinción de acuerdo al día o la noche. Incluye asimismo una lista de materiales peligrosos reactivos al agua.
- ◆ Sección sobre: acciones de protección, factores considerados para la elaboración e interpretación de la tabla sobre distancias de aislamiento, ropa de protección personal, glosario de términos y sobre datos de la publicación.

En el contenido de este capítulo se puede observar que en el marco legal que regula el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos no existe disposición alguna que exija un análisis de riesgos para la realización de esta actividad; solo se indica en el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (artículo 118 fracción II) que *es responsabilidad del expedidor, autotransportista y el destinatario, dentro de la esfera de sus responsabilidades el determinar la ruta de transporte que presente mejores condiciones de seguridad*. Para realizar identificación de la ruta de transporte más segura es necesario que las autoridades correspondientes establezcan los criterios y procedimientos en que deba realizarse dicha selección, es aquí donde el análisis de riesgos de las diferentes rutas posibles puede ser una alternativa para evaluar de manera cuantitativa cual de las rutas presenta el menor riesgo, y proceder a una selección y medidas de seguridad adicionales o propuestas.

Asimismo, dentro del marco legal que regula el transporte de materiales peligrosos no contempla una disposición que obligue a elaborar y entregar a las autoridades correspondientes un reporte detallado sobre incidentes y/o accidentes, con el propósito de disponer de información sobre los mismos, su posterior análisis y preparación de estadísticas. El artículo 54 del Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos establece la creación del Sistema Nacional de Emergencia en Transportación, el artículo 55 del mismo Reglamento indica que el Sistema Nacional de Emergencia proporcionará información sobre medidas y acciones en caso de accidente o incidente. Además, el artículo 42 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos señala que en caso de un incidente con residuos peligrosos se deberá dar aviso inmediato y ratificado por escrito a la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (actualmente SEMARNAT), en este mismo artículo se establece el contenido que deberá tener el aviso por escrito, para lo cual existe un formato publicado como *Manifiesto para casos de derrame de residuos peligrosos por accidente*; el aviso para caso de derrame se aplica también al derrame de materiales peligrosos. Sin embargo, el contenido del manifiesto para casos de derrame no es apropiado para la investigación de incidentes en el transporte terrestre. Actualmente la fuente principal de información sobre accidentes e incidentes en transportación son los reportes de accidentes elaborados por la Policía Federal Preventiva (antes Policía Federal de Caminos) cuyo formato no incluye algunos aspectos sobre las condiciones del incidente. De acuerdo a lo anterior se requiere establecer una disposición que obligue al reporte detallado de los accidentes e incidentes con materiales peligrosos y un formato que contenga aspectos no considerados en los elaborados por la Policía Preventiva como son: origen y destino del envío, nombre del producto o productos involucrados, número de las Naciones Unidas, clase de peligro, tipo de área (rural, urbana) donde se localizó el incidente, resultado del incidente (fuga, incendio, explosión, etc.), entre otros posibles. De esta manera un formato de reporte obligatorio y apropiado permitirá establecer registros y elaborar estadísticas adecuadas para la identificación de peligros y riesgos; adicionalmente, se puede establecer en dicha disposición el reporte de incidentes en operaciones de carga, descarga y almacenamiento temporal, la cantidad liberada a partir de la cual se obliga al reporte, pérdidas mínimas que obliguen a su reporte, el reporte obligatorio en caso de existir lesionados sin importar la cantidad liberada, entre otras.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE RIESGO

Dentro del contexto del transporte de materiales peligrosos el riesgo se refiere a la probabilidad de ocurrencia de consecuencias indeseables ocasionadas por una posible liberación de material. Una liberación puede conducir a una variedad de resultados, por ejemplo: incendio o explosión (para el caso de un material inflamable), nube tóxica o inflamable en el caso de gases licuados a presión. Las consecuencias indeseables de estos incidentes incluyen a la muerte, lesiones, daños a la propiedad, pérdida del valor de las propiedades, daños al ambiente, etcétera.

En este capítulo se describe lo correspondiente al proceso análisis de riesgos y el proceso de administración de riesgos.

#### 3.1 PROCESO DE ANÁLISIS DE RIESGO

El proceso del análisis de riesgo puede dividirse en una serie de componentes, la aplicación de estos componentes permiten el establecer una revisión cualitativa y cuantitativa de los riesgos que puede abarcar desde eventos frecuentes a eventos raros, y de baja consecuencia a eventos mayores. Los componentes o técnicas del proceso de análisis de riesgos ayudan a identificar los mayores contribuyentes al riesgo y por lo tanto se pueden hacer recomendaciones y ayudar en la tomas de decisiones en la aplicación de medidas para su disminución. El análisis de riesgos puede variar en profundidad desde un estudio elemental hasta uno de mayor detalle, de acuerdo al número de incidentes considerados, el grado de sofisticación de las frecuencias y probabilidades, así como de los modelos empleados para la determinación de consecuencias. La complejidad de los modelos para determinación de consecuencias pueden variar desde ecuaciones algebraicas simples a funciones extremadamente complejas. Asimismo el número de incidentes considerados puede variar de acuerdo a las clases de incidentes: incidente menor (zona de afectación limitada), incidente mayor (zona de afectación media) o incidente catastrófico (zona de afectación extensa) (AIChE, 1989; Harwood et al., 1989; OPS, 1996).

En el análisis de los riesgo debido al transporte, el proceso inicia con la determinación del conjunto de los tipos de accidentes que pueden ocurrir, este conjunto puede estar integrado por una gran variedad de subconjuntos; por lo cual es necesario descartar del análisis aquellos eventos que son altamente improbables (ejemplo: colisión con un meteorito). Por lo general este proceso se realiza estableciendo una serie de restricciones, es decir una eliminación implícita o explícita de los eventos de acuerdo a su posibilidad. Para realizar este proceso se utilizan diferentes métodos, el más común involucra el empleo de estadísticas de tipo histórico. En la estimación de probabilidades utilizando estadísticas históricas siempre existe una eliminación implícita que incluyen a tipos de accidentes poco probables; sin embargo incluir eventos de muy baja probabilidad (especialmente aquellos que son tan improbables ya que nunca han ocurrido) tiene poco efecto en la estimación del riesgo, ya que debido a sus probabilidades aun teniendo una gran consecuencia el valor del riesgo por si mismo es muy pequeño. Otro método es establecer un límite que de manera explícita eliminan los eventos con probabilidades iguales o menores de algún evento catastrófico, como puede ser el caso de la colisión con un meteorito (aproximadamente  $2 \times 10^{-18}$  por año). Los accidentes restantes, después de este proceso de eliminación, pueden incluirse en subconjuntos que representen un agrupamiento lógico de resultados de accidentes. A continuación se describen los componentes del proceso de análisis de riesgo (AIChE, 1989; OPS, 1996).

##### 3.1.1 Definición de los objetivos del análisis

Los objetivos de un análisis de riesgo pueden ser diversos, en el caso del transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos puede enfocarse principalmente a: la estimación del riesgo a la población o personas y a la planeación de emergencias. El riesgo a la población puede expresarse de diferentes formas, entre las medidas más empleadas se encuentran: el riesgo social, riesgo individual y riesgo de evacuación. En la planeación de emergencias el análisis de riesgo se puede emplear para determinar las zonas de afectación, población en riesgo, recursos necesarios, etcétera. Para satisfacer los objetivos contemplados en el estudio

debe de contarse con información suficiente, este requerimiento es mayor con un incremento en el número de incidentes, de los resultados del incidente, de los casos particulares resultado del incidente y de la complejidad de los modelos para determinación de consecuencias (AIChE, 1989).

### 3.1.2 Descripción del sistema

Existen dos causas por las cuales las personas pueden exponerse a materiales y residuos peligrosos:

- ◆ Liberación de material o residuo peligroso debido a un accidente
- ◆ Incidente sin accidente; ejemplo transporte de materiales radiactivos

Asimismo, los grupos de población que pueden ser expuestos en el traslado de materiales y residuos peligrosos a lo largo de la trayectoria son:

- ◆ Personas ubicadas en áreas contiguas a la ruta de transporte
- ◆ Personas que comparten la ruta: personas en el interior de vehículos que transitan en el camino
- ◆ Personas en paraderos
- ◆ Ocupantes de la unidad que transporta los materiales o residuos peligrosos

La descripción del sistema incluye las particularidades que limitan el caso a analizar. En el caso del transporte de materiales y residuos peligrosos estas particularidades incluyen las relativas a la trayectoria, el vehículo y al material transportado; por ejemplo: inicio y destino de la ruta, clases de camino, longitud total de la ruta, topografía del terreno, características del vehículo, características del recipiente, condiciones en que se encuentra el material transportado, distribución de la población en las áreas adyacentes, condiciones meteorológicas, propiedades físicas y químicas del material transportado (Harwood et al., 1989; Harwood et al., 1990; Lupton y Bolsdon, 1999).

Cuando la ruta de transporte se divide en segmentos debe considerarse para cada caso:

- ◆ Modo de transporte
- ◆ Densidad o distribución de la población en las áreas contiguas a la trayectoria
- ◆ Volumen de tráfico
- ◆ Clase de camino

También debe considerarse al número de envíos, un envío consiste de uno o más materiales transportados en una unidad en un viaje sencillo. Una unidad (vehículo) puede transportar al material peligroso desde su origen a su destino final o emplearse más de un vehículo o más de un modo de transporte (camión, ferrocarril, etc.). Cuando se utilizan más de un modo de transporte es preferible separar cada modo para realizar la evaluación de riesgo correspondiente.

### 3.1.3 Identificación de peligros

Para la identificación de peligros se requiere: conocer las consecuencias específicas indeseables y la identificación del material, sistema, proceso o actividad que puedan provocar estas consecuencias. Las consecuencias indeseables pueden agruparse en tres categorías principales: impactos a personas, impactos al ambiente e impactos económicos. Estas categorías pueden subdividirse de acuerdo al tipo de resultado (ejemplo: exposición a material tóxico, exposición a calor o energía, sobrepresión, etc.). La identificación de los peligros pueden realizarse por medio de (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989):

*Determinación de las propiedades del material y de las condiciones en el recipiente:* a partir de las propiedades del material pueden determinarse las consecuencias de interés (explosión, incendio, etc.). Las condiciones en que se encuentra el material (por ejemplo: presión, temperatura) y su interacción con el ambiente pueden ayudar a establecer el peligro.

*Matrices de interacción:* cuando existe la posibilidad de mezclar dos o más sustancias, puede analizarse la interacción entre las mismas y con otros parámetros. Cuando se tiene solo una sustancia puede analizarse su interacción con otros parámetros como son: condiciones del material (temperatura, presión, carga estática), condiciones ambientales (lluvia, humedad, polvo), efectos a personas (exposición corta), etcétera.

*Técnicas de evaluación:* pueden emplearse técnicas como son: lista de revisión, ¿que pasa si?, árbol de fallas, árbol de eventos, etcétera, que permiten la identificación de eventos peligrosos y la secuencia en que puede presentarse un incidente.

### **3.1.4 Enumeración de incidentes**

El objetivo de la enumeración de incidentes es identificar y tabular todos los incidentes posibles; sin embargo existe un número infinito de posibles maneras en que un material puede ser liberado, por ejemplo desde un orificio hasta la ruptura total; de esta manera cualquier lista elaborada puede ser considerada una selección (AIChE, 1989).

### **3.1.5 Selección de incidentes**

Accidentes de diferentes tipos pueden ocasionar incidentes, asimismo de los anteriores es posible tener diferentes resultados (fuego, explosión, etcétera), y de acuerdo a ciertas características como son velocidad del viento y estabilidad atmosférica, obtenerse diferentes casos particulares de incidentes. El propósito de la selección de incidentes es limitar el número de casos particulares resultado de los incidentes, para que el estudio tenga un tamaño manejable y se analicen los casos más probables de ocurrir, sin pérdida u omisión de incidentes o casos resultado de incidentes que provoquen una falta de precisión, representatividad y verosimilitud. Un conjunto apropiado de incidentes es el número mínimo de incidentes necesarios para satisfacer los objetivos del estudio, representar adecuadamente la totalidad posible de incidentes enumerados y las clases de incidentes. La lista inicial contiene a todos los posibles incidentes identificados por los métodos de enumeración empleados. En un proceso de selección, esta lista se revisa para identificar los eventos de poca importancia. La lista revisada, nuevamente se revisa para eliminar aquellos incidentes similares o repetidos; de esta lista final se obtendrán los diferentes grupos de incidentes que pueden estudiarse; por ejemplo: puede realizarse una selección de los incidentes catastróficos y posteriormente seleccionar el peor caso posible o el peor caso creíble. Un subconjunto de incidentes representativo puede obtenerse de una selección en cada una de las clases de incidentes consideradas. Deberá hacerse una selección de los resultados de incidentes para cada incidente considerado, ya que cada uno de estos últimos puede tener más de uno de los primeros. Asimismo, para cada uno de los resultados de incidentes deberán establecerse sus casos particulares a estudiarse mediante la identificación de los parámetros (velocidad del viento, estabilidad, temperatura, humedad, etc.) a considerarse (AIChE, 1989).

### **3.1.6 Estimación de consecuencias**

La estimación de consecuencias tiene como propósito el determinar el daño potencial provocado por un incidente. Un incidente puede tener diferentes resultados (incendio, BLEVE, etc.); asimismo cada resultado de un incidente deberá ser analizado utilizando los modelos para fuente y dispersión, los modelos de fuego y explosión, y los modelos de efectos. Además puede incluirse factores de mitigación como son el refugio y la evacuación las cuales pueden reducir la magnitud de las consecuencias o efectos de un incidente (AIChE, 1989).

### **3.1.7 Estimación de frecuencias y probabilidades**

Existen diferentes metodologías para estimar las frecuencias y probabilidades de accidentes, incidentes y sus resultados. Frecuencias y probabilidades pueden obtenerse a partir de registros históricos y mediante modelos sobre la secuencia de falla como son el árbol de fallas y el árbol de eventos. En el caso del transporte de materiales y residuos peligrosos se busca estimar la tasa de accidentes, la probabilidad de un incidente y las probabilidades condicionales de cada resultado posible de un incidente, las anteriores estimaciones para cada uno de los segmentos que componen una ruta o trayectoria (Harwood *et al.*, 1989; Harwood *et al.*, 1990).

### 3.1.8 Estimación de riesgo

La manera de estimar y expresar el riesgo, dependerá de la información disponible y de los objetivos planteados al inicio del análisis. La estimación de riesgo se obtiene al combinar la información sobre frecuencia, probabilidades y consecuencias de los resultados de un incidente. El riesgo de todos los incidentes seleccionados en el análisis se estiman de manera individual, para posteriormente sumarse y obtener el riesgo total (AIChE, 1989).

Para la estimación del riesgo en el transporte de materiales peligrosos, las consecuencias y las probabilidades de los accidentes deben calcularse de manera separada y después multiplicarse. La probabilidad de ocurrencia de un accidente en el cual sucede una liberación de material se determina por:

- ◆ La frecuencia de todos los tipos de accidentes y
- ◆ La probabilidad condicional del evento particular dado que sucedió un accidente e incidente

La probabilidad condicional es la probabilidad de que dado un accidente pueda ser de un tipo particular. La frecuencia de los accidentes por modo de transporte y clase de camino se estima comúnmente a partir de datos históricos y la probabilidad condicional se obtiene tanto de datos históricos como de árboles de eventos. La probabilidad condicional no depende del tipo de tanque o recipiente, sino del tipo de vehículo y del modo de transporte (Saccomanno y Shortreed, 1992; Harwood *et al.*, 1990).

La evaluación del riesgo en el transporte difiere con respecto a la relativa a instalaciones fijas, esta diferencia radica que en las instalaciones, los eventos u operaciones sujetas al análisis pueden calcularse para una distribución de la población, direcciones de viento y frecuencias relativas, así como condiciones meteorológicas conocidas localmente; pero para el caso del transporte los datos sobre condiciones meteorológicas son de muy difícil obtención, asimismo la distribución de la población a lo largo de la ruta es cambiante. Para las instalaciones fijas normalmente los datos sobre dirección y velocidad del viento se obtienen a partir de estaciones meteorológicas, sin embargo este tipo de estaciones no se encuentran disponibles a lo largo de la ruta o segmento utilizado para el transporte por lo que las frecuencias y probabilidades para estos parámetros son desconocidos. Además, debido a que las condiciones topográficas a lo largo de una ruta de transporte son muy variables, esto incorpora una mayor incertidumbre con respecto a las instalaciones fijas donde las condiciones topográficas no son variables (Neuhauser *et al.*, 2000).

La estabilidad atmosférica es un término que se utiliza para describir el grado de turbulencia de la atmósfera y por lo tanto de dilución durante el transporte del material liberado en la dirección del viento, este parámetro es utilizado para la evaluación de las consecuencias de una liberación y al igual que los datos sobre rosa de los vientos y velocidad del viento asociada, puede obtenerse a partir de los registros de estaciones meteorológicas o inferirse. La recopilación de datos sobre estos parámetros de acuerdo a diversas estaciones meteorológicas y la extrapolación de los resultados a otros puntos circundantes es posible, sin embargo no existen aun métodos consistentes para realizar esta operación. Los datos obtenidos a nivel regional no son recomendables para su utilización, una opción conservadora es el elegir una estabilidad moderada así como de la velocidad del viento (Harwood *et al.*, 1990; Saccomanno *et al.*, 1992; Neuhauser *et al.*, 2000).

## 3.2 PROCESO DE ADMINISTRACIÓN DE RIESGOS EN EL TRANSPORTE TERRESTRE DE MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

El riesgo es algo inherente a las actividades de transporte de materiales y residuos peligrosos, este puede ser controlado o reducido pero no eliminado. La administración de riesgos es un proceso que incluye a la identificación y análisis de riesgos; la identificación, análisis y selección de medidas alternativas de control de riesgo, y la subsecuente evaluación del desempeño. La administración de riesgos incluye a la recolección de datos, análisis y comunicación de información para su uso en la formulación de políticas, toma de decisiones y sobre el manejo de los riesgos. El proceso de administración de riesgos en el transporte de materiales peligrosos es una herramienta útil para mejorar la seguridad y la aplicación efectiva de recursos ya que es posible (OPS, 1996):

- ◆ Analizar los eventos precursores y causas potenciales para accidentes e incidentes.
- ◆ Evaluar la probabilidad y severidad de potenciales accidentes e incidentes.
- ◆ Proveer de múltiples medios para examinar y comparar los riesgos posibles y las estrategias de prevención y mitigación.
- ◆ Proporcionar medios estructurados, facilitar la comunicación para la identificación, jerarquización los riesgos y las medidas de reducción de estos.
- ◆ Establecer los objetivos y calificar el desempeño de las medidas para asegurar la mejora de la seguridad.

La administración de riesgos puede aplicarse a las diferentes etapas del ciclo de vida, ya sean estas: diseño (de equipo, de rutas), construcción, operación, mantenimiento y retiro de la unidad.

Cuando la administración de riesgos se establece como un programa, proporciona la infraestructura organizativa que soporta el proceso analítico y técnico de los elementos de la administración de riesgos. El contenido y complejidad de los elementos de un programa de administración de riesgos deberán ser consistentes con el grado de riesgo, las metas del programa, la cantidad y calidad de la información, y de las capacidades organizativas de la empresa. De esta manera existirán diferentes maneras de estructurar un programa de administración de riesgos; sin embargo, los programas deberán integrar componentes que desarrollen las funciones de (OPS, 1996):

*Administración:* Para la administración del programa de administración de riesgos es necesario la documentación de las políticas establecidas y que éstas sean comprendidas, implantadas y mantenidas. Las políticas y procedimientos estarán dirigidas a cumplir con requerimientos administrativos que incluyen: funciones y responsabilidades, calificación del personal y administración de cambios.

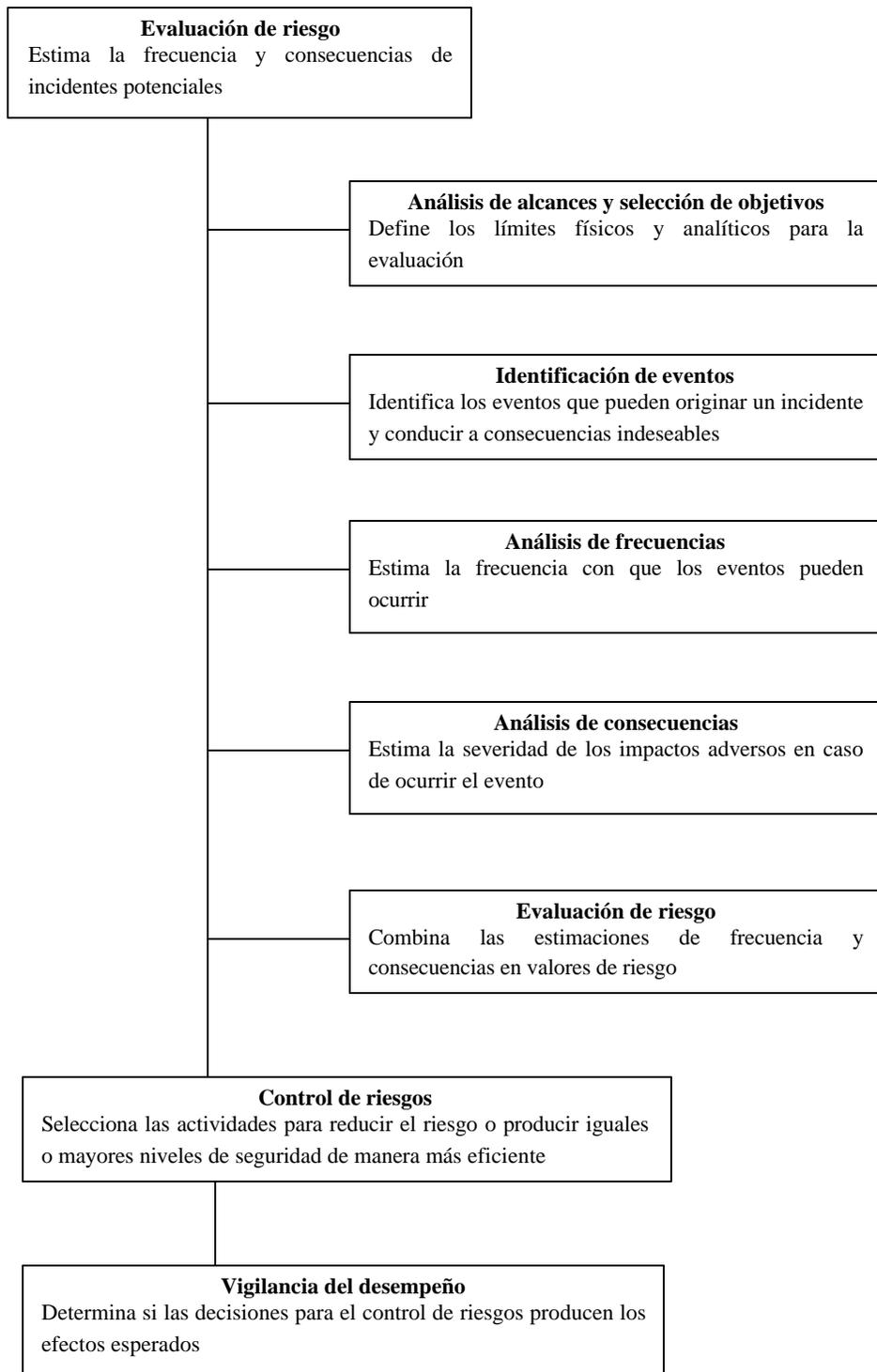
*Comunicación:* Una apropiada comunicación interna y externa permite una mejora en la calidad de los análisis, la toma de decisiones, y la alimentación retroactiva del proceso. Los elementos de la comunicación interna deben promover los objetivos y la implantación del programa; así como de comunicación de información básica y de los resultados dentro de la organización. Los elementos de comunicación externa deberán enlazar a la organización con las autoridades, público, etcétera, de tal manera que los intereses, objetivos del programa y resultados sean comunicados y discutidos.

*Documentación:* Dentro del programa deberá colectarse y conservarse la documentación de la información básica, los análisis realizados y los resultados obtenidos en cada uno de los elementos del programa.

*Evaluación del programa:* El programa deberá incluir una evaluación planeada y estructurada de las actividades y procedimientos con el propósito de incrementar la efectividad del programa. La evaluación permite un mejoramiento continuo de la calidad de los elementos del programa.

El proceso de administración de riesgos está integrado por los anteriores componentes, así como por los elementos del proceso, ambos se encuentran relacionados estrechamente. La administración de riesgo es un proceso continuo en el cual los resultados de cualquier parte del proceso puede ser actualizado y refinado al retroalimentar la información de las partes siguientes.

Los elementos del proceso de administración de riesgos son las actividades técnicas y analíticas necesarias para determinar los riesgos, identificar las opciones de control de los riesgos, distribuir recursos para controlar los riesgos de la forma más efectiva, y revisar su desempeño. Existen múltiples maneras de estructurar el proceso de administración de riesgos de acuerdo a los elementos del proceso a considerarse, sin embargo deberá contener los siguientes elementos: evaluación de riesgos, control de riesgos y vigilancia o valoración del desempeño (OPS, 1996).



**Figura 3.1** *Proceso de administración de riesgos (OPS,1996).*

### 3.2.1 Evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos es un proceso para la identificación de peligros potenciales en el sistema analizado, comprender los riesgos específicos a ser manejados y realizar una jerarquización en términos de las características del riesgo; éstas pueden expresarse de manera cualitativa (por ejemplo: bajo, mediano y alto riesgo) o de manera cuantitativa (por ejemplo: pérdidas económicas, probabilidades). La evaluación de riesgos está dirigida a determinar (AIChE, 1989):

- ◆ Los riesgos que se presentan
- ◆ Los efectos adversos que pueden presentar estos riesgos
- ◆ La posibilidad de que se presenten estos eventos
- ◆ La severidad de las consecuencias en caso de suceder el evento
- ◆ La magnitud del riesgo

La evaluación de riesgos está constituida por una serie de pasos o etapas. Los elementos aceptados de manera general son (AIChE, 1989):

- ◆ Análisis de alcances y selección de objetivos
- ◆ Identificación de eventos
- ◆ Análisis de frecuencias
- ◆ Análisis de consecuencias
- ◆ Estimación o valoración del riesgo

#### 3.2.1.1 Análisis de alcances y selección de objetivos

Debido a que el análisis de riesgos es una herramienta que requiere de considerables recursos económicos y de tiempo, por ello es esencial el aplicar una selección y establecer prioridades. La definición del alcance o ámbito de competencia proporciona los fundamentos y límites del proceso de evaluación de riesgos. Dentro de la definición de los alcances debe incluirse (AIChE, 1989; Harwood *et al.*, 1990; OPS, 1996):

- ◆ Las fronteras físicas consideradas.
- ◆ La etapa del ciclo de vida a considerar: traslado de materiales y/o maniobras de carga y descarga.
- ◆ La amplitud o profundidad del análisis a realizar.

Los alcances deberán ser consistentes con los objetivos. El juicio y la experiencia de los responsables del proceso de evaluación de riesgos tiene gran importancia para delimitar los alcances, sin embargo esta tarea puede iniciar identificando:

- ◆ Rutas de transporte establecidas y alternativas.
- ◆ Selección de los segmentos de la trayectoria ubicados en zonas de alta densidad poblacional. Cuando el estudio posee una mayor amplitud de objetivos pueden determinarse: áreas ambientalmente sensibles, áreas de recarga de acuíferos, zonas de importancia histórica, proximidad a ríos, características del suelo, etcétera.
- ◆ Los segmentos con mayor tránsito vehicular o que presentan mayores índices de accidentes.
- ◆ Las circunstancias especiales que determinen la utilidad estratégica de un segmento.

El sistema a ser analizado está definido cuando se establece una descripción general del sistema que incluya a los límites (trayectorias, derechos de vía, etc.), sustancia transportada, condiciones ambientales y condiciones de operación. Una descripción más extensa del sistema y de los factores que afectan a la estimación del riesgo incluiría (Harwood *et al.*, 1990; Lupton y Bolsdon, 1999):

- ◆ Localización geográfica de los accidentes sobre una base regional, estatal o de otro tipo
- ◆ Estación o mes del año
- ◆ Día de la semana
- ◆ Hora del día

- ◆ Modalidad de transporte (autotransporte, ferroviario, etcétera) y recipiente (autotank, RIG, tambor, etcétera)
- ◆ Estado físico del material
- ◆ Sustancia química
- ◆ Clase de riesgo del material (inflamable, explosivo, etc.)

### 3.2.1.2 Identificación de eventos

El peligro en el transporte de materiales depende de las características de éstos. Un incidente es el resultado de una secuencia de uno o más eventos que llevan a la pérdida en la integridad del recipiente y por consiguiente a la pérdida de contención del sólido, líquido o gas transportado. Cada una de estas secuencias de eventos puede tener una o más causas posibles (Abkowitz y Cheng, 1989):

Dentro de la evaluación de riesgos puede identificarse los eventos específicos o sus combinaciones que pueden conducir a la pérdida en la integridad del recipiente y a la liberación del producto transportado, y asimismo establecer las causas potenciales de estos eventos. La identificación de posibles incidentes se puede lograr mediante diferentes métodos variando en los niveles de detalle, dentro de estos se incluyen (Abkowitz y Cheng, 1989):

*Procedimiento basado en la experiencia:* se establecen los accidentes, incidentes y las causas de manera subjetiva.

*Procedimiento basado en registros:* en este los registros históricos u otros similares se analizan para identificar las posibles causas de accidentes e incidentes.

*Procedimientos basados en análisis lógicos:* los modelos lógicos se construyen con objeto de identificar las causas potenciales y sistemáticamente encontrar cada secuencia de causas que contribuyan al incidente; también es posible iniciar (en orden inverso) a partir de un resultado, como puede ser una explosión, y analizar hasta llegar a la causa o causas que pueden dar inicio al incidente y su secuencia.

### 3.2.1.3 Análisis de frecuencias

Una vez establecidos los eventos que pueden conducir a un incidente y de los impactos consecuentes, es necesario estimar que tan posible es cada incidente. El objetivo del análisis de frecuencias es estimar la probabilidad de cada escenario debido a los incidentes. Las frecuencias de los eventos pueden estimarse de manera cualitativa o cuantitativa. En los procesos cualitativos a menudo se recurre a categorías relativas como son: frecuente, poco frecuente o raro, para representar la posibilidad de que suceda un evento. A menudo las categorías cualitativas se establecen a partir de intervalos cuantitativos de frecuencias. En los procesos cuantitativos se estima el número esperado de eventos por unidad de tiempo (o de demanda). Existen además procesos semicuantitativos, en los cuales se utiliza un índice numérico para estimar o representar la frecuencia relativa de los eventos lo que hace posible el comparar dos o más eventos (Abkowitz y Cheng, 1989; AIChE, 1989; Rowe, 1983).

La estimación de frecuencias pueden realizarse de diversas maneras de acuerdo a los niveles de detalle:

*Procedimiento basado en la experiencia:* la opinión de un experto se utiliza para estimar la frecuencia de un evento, apoyándose en la experiencia propia y en las observaciones de operadores, inspectores, etcétera.

*Procedimiento basado en registros:* las estimación de las frecuencias se basa en registros históricos de accidentes e incidentes, de los tipos de vehículos a analizarse o de vehículos similares.

*Procedimientos basados en modelos lógicos:* estos modelos lógicos se construyen a partir de combinaciones matemáticas de frecuencias de los eventos o series de eventos para estimar la frecuencia de un incidente. Los procedimientos basados en análisis lógicos se utilizan frecuentemente cuando los datos históricos son insuficientes para estimar directamente la frecuencia de eventos raros.

En el análisis se deben describir los procedimientos, herramientas y modelos por medio de los cuales la frecuencia se estimará. Las limitaciones e incertidumbres en el análisis deberán documentarse.

#### 3.2.1.4 Análisis de consecuencias

El objetivo del análisis de consecuencias es cuantificar el impacto negativo de un evento. Las consecuencias generalmente se miden en términos del número de muertes esperadas, aunque también es posible expresarlas en función del número de lesionados, número de personas evacuadas o de daños a la propiedad. Normalmente se consideran tres tipos de efectos: radiación térmica, ondas de sobrepresión por explosión y exposición a sustancias tóxicas (AIChE, 1989).

Una variedad de modelos se utilizan en el análisis de consecuencias; los modelos de fuente se utilizan para predecir la tasa de descarga, la evaporación instantánea de una sustancia, la cantidad de aerosol formado y la cantidad de sustancia evaporada. Los modelos de nube de vapor se utilizan para medir la dispersión en la dirección del viento, tomando en consideración las condiciones meteorológicas y la densidad del vapor. Los modelos de impacto permiten predecir las zonas de afectación debidas a fuego y explosión. Los modelos para gas tóxico se usan para predecir la respuesta humana debida a la exposición a un gas tóxico. Otros modelos se utilizan para predecir los efectos en humanos expuestos a radiación térmica y ondas de sobrepresión (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989).

Las consecuencias de los eventos pueden estimarse de una manera cuantitativa o cualitativa, o en ambas. Los procedimientos cualitativos a menudo utilizan categorías relativas como son: severo, moderado o insignificante, dependiendo de la severidad del incidente; a menudo las categorías cualitativas se establecen a partir de una consecuencia esperada (por ejemplo: 1 ó 5 lesionados). Los procedimientos cuantitativos estiman el nivel esperado de severidad en términos del número de muertos, heridos, etcétera. Los procedimientos semicuantitativos a menudo usan un índice numérico para expresar las consecuencias relativas de un evento (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989).

El análisis de consecuencias debe contemplar como mínimo:

- ◆ La cantidad de sustancia liberada.
- ◆ Los procesos físicos y mecanismos de dispersión por los cuales una sustancia puede alcanzar y afectar a las personas próximas al lugar de la fuga, o dañar al ambiente.
- ◆ La cantidad de sustancia, radiación o sobrepresión que pueda alcanzar a las personas, o a propiedades.
- ◆ Los efectos esperados de la sustancia liberada.

En el análisis se deben describir los procedimientos, herramientas y modelos por medio de los cuales las consecuencias de un incidente se estimarán. Las limitaciones e incertidumbres en el análisis deberán documentarse.

#### 3.2.1.5 Estimación o valoración del riesgo

Una vez que los diferentes escenarios han sido identificados, y que la frecuencia de los eventos y sus consecuencias han sido determinadas, el riesgo puede evaluarse. El riesgo puede estimarse de manera cualitativa, cuantitativa o en ambas formas, dependiendo del proceso usado para el análisis de frecuencias y de consecuencias. En esta etapa de la evaluación de riesgos se puede obtener un perfil de riesgos, esto es un gráfico de la frecuencia contra el número acumulado de muertes o lesionados. La ventaja de presentar en esta forma los resultados es que incluye la distribución de la población alrededor del segmento considerado y las condiciones meteorológicas locales (AIChE, 1989).

#### 3.2.2 Control de riesgos

El control de riesgos es un procedimiento estructurado mediante el cual se identifica, evalúa y seleccionan las opciones para el control; y tiene como propósito la reducción del riesgo o producir niveles

iguales o mayores de seguridad de manera más eficiente. Los elementos para el control de riesgos pueden incluir a los siguientes (OPS, 1996):

*Identificación de alternativas para el control de riesgos:* define los contribuidores mayores del riesgo y las opciones para un eficiente control. Las opciones de control mejoran el nivel de protección del público, el ambiente y la propiedad, al hacer cambios o modificaciones durante las diferentes etapas del ciclo de vida. Las opciones de control de riesgos incluyen a: los contribuidores sustantivos del riesgo, las situaciones en las cuales las reducciones pueden ser efectivas en cuestión de costos, y las situaciones en las cuales las prácticas comunes o los mecanismos de control de riesgos pueden ser más costosos que efectivos (AIChE, 1995; OPS, 1996).

*Identificación de opciones de control de riesgos:* define las opciones específicas para el diseño y operación que reduzcan el riesgo o incrementen la efectividad. Las opciones de control de riesgos incluyen:

- ◆ Modificar o reemplazar las prácticas o procedimientos empleadas en las diferentes etapas del ciclo de vida (diseño o selección de equipo, métodos de prueba, métodos de construcción y prácticas) de tal manera que se reduzcan las probabilidades de incidentes.
- ◆ Modificar o reemplazar las prácticas anteriores de tal manera que las consecuencias asociadas a los incidentes puedan reducirse.
- ◆ Modificar o reemplazar las prácticas por otras de mayor efectividad en cuanto a costos y con iguales o mayores niveles de seguridad.
- ◆ Mantener las prácticas usuales y continuar con los niveles de riesgo existentes.

La progresión del incidente puede utilizarse para guiar y estructurar la identificación de las opciones de control de riesgos. Acciones de prevención, mitigación y respuesta pueden definirse en varios puntos de la progresión del incidente. Dentro de las posibles acciones de prevención se pueden contemplar (AIChE, 1995; OPS, 1996):

- ◆ Mejoras en el diseño de los recipientes.
- ◆ Cambios en las prácticas de mantenimiento, incluyendo la naturaleza y frecuencia de mantenimiento e inspección.
- ◆ Mejoras en la calificación del personal de operación, mantenimiento e inspección.

Dentro de las acciones de mitigación y respuesta a incidentes pueden incluirse:

- ◆ Mayor calificación o entrenamiento para la atención de incidentes, ya sea en la respuesta inicial como en las siguientes etapas.
- ◆ Mejora de los planes para respuesta a emergencias y en los equipos disponibles.

*Evaluación y comparación de opciones para el control de riesgos:* tiene como objetivo el seleccionar el mejor conjunto de prácticas que produzcan igual nivel de seguridad o lo mejoren. El procedimiento de evaluación incluye un examen de: los riesgos existentes antes de la aplicación de las opciones de control propuestas, la estimación de los riesgos existentes después de la implantación de las opciones de control de riesgos, y los costos o ahorros debidos a la implantación de las opciones de control. En el procedimiento de comparación se deben considerar los beneficios de la reducción del riesgo, los costos de implantación y otros factores asociados a cada opción de control de riesgos. Una vez evaluadas y comparadas las opciones de control de riesgo se realizará una selección y se establecen las medidas a tomarse para su realización (implantación) (AIChE, 1995; OPS, 1996).

### 3.2.3 Vigilancia del desempeño

La identificación de los riesgos y la selección de las opciones de control, deben completarse con la vigilancia y medición de la efectividad tanto de las medidas específicas de control, como del programa completo de administración de riesgos, para así identificar y mejorar estas oportunidades. El procedimiento de

vigilancia del desempeño define medidas de desempeño, las maneras y frecuencia con la cual los datos deben ser recolectados, y la evaluación del desempeño de acuerdo a resultados esperados (OPS, 1996).

El proceso de vigilancia o seguimiento del desempeño se define como un mecanismo que se empleará para la recolección de información sobre una base predeterminada, observar las condiciones en que se realizan las operaciones de transporte y comparar el desempeño observado con las medidas de desempeño seleccionadas. De esta manera se deberán identificar las variaciones o tendencias estadísticas en los comportamientos del sistema (rutas de transporte, transporte de materiales), identificando las fallas en el desempeño al comparar el desempeño actual con el esperado (OPS, 1996).

En la vigilancia del desempeño se deben establecer las medidas apropiadas para su evaluación; las medidas deben cumplir con criterios como:

- ◆ Documentar las condiciones iniciales.
- ◆ Poder utilizarse para auditoria, vigilancia y documentación del desempeño.
- ◆ Uniformidad de los datos.
- ◆ Costo de la adquisición de datos.
- ◆ Confianza en las medidas.
- ◆ Poder interpretarse de manera consistente.
- ◆ Poder utilizarse para evaluaciones cuantitativas.

En lo referente a medidas relacionadas con la estimación del riesgo que de manera directa proporcionan información sobre la seguridad, se tienen:

- ◆ Frecuencia y severidad de los incidentes.
- ◆ Extensión del daño ambiental debido al incidente.
- ◆ Probabilidad/número de muertes o lesionados debido a un incidente.
- ◆ Pérdida económica por incidente.

La vigilancia en el desempeño permite y debe propiciar una alimentación retroactiva para identificar:

- ◆ Mejoras que corresponden a las decisiones de control de riesgos tomadas.
- ◆ Medidas que ofrecieron los mejores resultados.
- ◆ Cuales fueron las medidas de control que ofrecieron los efectos esperados.
- ◆ Como puede mejorarse el proceso de administración de riesgos.

En la vigilancia del desempeño y para la retroalimentación del proceso de administración de riesgos se deben establecer los criterios para el ajuste de las decisiones en el control de riesgos, de tal manera que se alcancen los niveles programados o requeridos (AIChE, 1989; OPS, 1996).

El programa de administración de riesgos cuando se aplica a la solución de diferentes problemas, por ejemplo en la reducción en la frecuencia de incidentes con materiales peligrosos por medio de la selección, usos de rutas de transporte más adecuadas y programación del traslado, podrá preguntarse lo siguiente (U.S. DOT, 2000):

- ◆ Se utiliza la ruta de menor riesgo.
- ◆ La programación del transporte (horarios, tiempos de traslado, longitud del recorrido) es el apropiado.
- ◆ Las rutas de transporte son revisadas regularmente.
- ◆ Las instalaciones empleadas para el descanso y estacionamiento de unidades están establecidas e indicadas.
- ◆ Los puntos conflictivos en la ruta de transporte están determinadas: cruces, altura de puentes, puentes, áreas ambientalmente sensibles, tipos de camino, túneles, etcétera.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

El objetivo del análisis de consecuencias es cuantificar el impacto negativo de un evento. Las consecuencias generalmente se miden en términos del número probable de muertos, aunque también es posible expresarlas en función del número de lesionados o de daños a la propiedad. Normalmente se consideran tres tipos de efectos: radiación térmica, ondas de sobrepresión por explosión y exposición a sustancias tóxicas.

Existe una gran variedad de modelos que se utilizan en el análisis de consecuencias. Los modelos de fuente se utilizan para predecir la tasa de descarga, la evaporación instantánea de una sustancia, la cantidad de aerosol formado y la cantidad de sustancia evaporada. Los modelos de nube de vapor se utilizan para medir de dispersión en la dirección del viento, tomando en consideración las condiciones meteorológicas y la densidad del vapor. Los modelos de impacto permiten predecir las zonas de afectación debidas a fuego y explosión. Los modelos para gas tóxico se usan para predecir la respuesta humana debida a la exposición a un gas tóxico. Otros modelos se utilizan para predecir los efectos en humanos a la exposición a fuego y ondas de sobrepresión (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989).

Las consecuencias de los eventos pueden estimarse de una manera cuantitativa o cualitativa, o en ambas. Los procedimientos cualitativos a menudo utilizan categorías relativas como son: severo, moderado o insignificante, dependiendo de la severidad del incidente; a menudo las categorías cualitativas se establecen a partir de una consecuencia esperada (ejemplo 1 ó 5 lesionados). Procedimientos cuantitativos estiman el nivel esperado de severidad en términos del número de muertos, heridos, etcétera. Los procedimientos semicuantitativos a menudo usan un índice numérico para expresar las consecuencias relativas de un evento (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989).

El análisis de consecuencias debe contemplar como mínimo:

- ◆ La cantidad de sustancia liberada.
- ◆ Los procesos físicos y mecanismos de dispersión por los cuales una sustancia puede alcanzar y afectar a las personas próximas al lugar de la fuga y dañar al ambiente.
- ◆ La cantidad de sustancia, radiación u ondas de sobrepresión que pueda alcanzar a las personas y al ambiente.
- ◆ Los efectos esperados de la liberación de sustancias.

En este capítulo se describen los diferentes modelos empleados para el análisis de consecuencias.

#### 4.1 MODELOS DE FUENTE

Los modelos de fuente se utilizan para definir cuantitativamente el escenario producto de la liberación de los materiales por medio de la estimación de las tasas de descarga y la evaporación de un derrame líquido. La mayoría de los incidentes con materiales peligrosos inician con una liberación del material con características tóxicas o inflamables. Esta liberación puede ser producto de la ruptura o fractura de los recipientes, válvula de venteo o válvula abierta. El material fugado puede estar en estado gaseoso, líquido, en dos fases, etcétera. El establecer la fase en la que se encuentra el material liberado es importante ya que afecta la estimación del flujo para el tamaño del orificio considerado. La fase en que se encuentra la descarga depende del escenario en que se da la liberación y ésta puede determinarse de acuerdo al diagrama de fases del material y del comportamiento de la sustancia en el diagrama durante el tiempo que dure la liberación. El punto inicial dentro del diagrama de fases está dado por las condiciones en que se encuentra el material antes de la liberación, el punto final dentro del diagrama puede estimarse de acuerdo a las condiciones en que se efectúa

la liberación. La presión final a la que se encontrará el material liberado será la presión atmosférica. El proceso de liberación se considera normalmente adiabático y con este criterio se determina la temperatura y composición a la presión atmosférica. Cuando existe un cambio de fase, un flujo bifásico debe considerarse. Un líquido puro se evaporará a la temperatura de ebullición, en cambio una mezcla lo hará en un rango de temperaturas (AIChE, 1989; AIChE, 1995; AIChE, 1996).

En los modelos de fuente o descarga lo primero que se debe determinar es la dimensión del orificio de fuga; para así estimar el tiempo de duración y el comportamiento en el flujo de descarga.

Los modelos de emisión de fuente requieren de una información inicial o básica para poderlos utilizar. Los datos iniciales sobre las características de la fuente son los siguientes (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

*Propiedades físicas y químicas del material.* Es indispensable conocer la composición química del líquido y/o gas liberado, y establecer las propiedades; dentro de éstas se incluyen al peso molecular, densidad, difusibilidad, conductividad y punto de ebullición. Las propiedades dependientes de la temperatura como son presión de vapor, capacidad calorífica, calor de vaporización y tensión superficial, también pueden determinarse. Cuando el material liberado es una mezcla, las propiedades de cada componente deben determinarse.

*Geometría del recipiente.* La tasa de liberación está relacionada con la geometría de la fuente, esto incluye a las dimensiones del tanque y las características del orificio de fuga. Estos parámetros permiten estimar la cantidad liberada y el tipo de fuga (instantánea o continua). Asimismo la posición relativa del orificio con respecto al nivel del líquido (y su volatilidad) determinará cuando una liberación es exclusivamente gaseosa o, de gas y líquido.

*Características del suelo.* Las liberaciones de materiales en fase líquida o con características de gas denso que están en contacto con la superficie del terreno, intercambian calor, humedad e interaccionan con el suelo, por lo cual es importante conocer no solo las características topográficas sino también el calor específico del suelo, contenido de humedad y porosidad; de tal manera que sea posible evaluar la tasa de emisión por evaporación.

*Variación en el tiempo.* Las concentraciones máximas pronosticadas para un tiempo promedio,  $T_p$ , es probable que sean proporcionales a la tasa máxima de emisión para este periodo de tiempo; por lo que conocer como varía la tasa de emisión con respecto al tiempo es de utilidad. En algunos casos la tasa de emisión puede variar debido al cierre de alguna válvula u otro dispositivo; asimismo debe ponerse atención en que la tasa de flujo en recipientes presurizados o de líquidos decrece con respecto al tiempo.

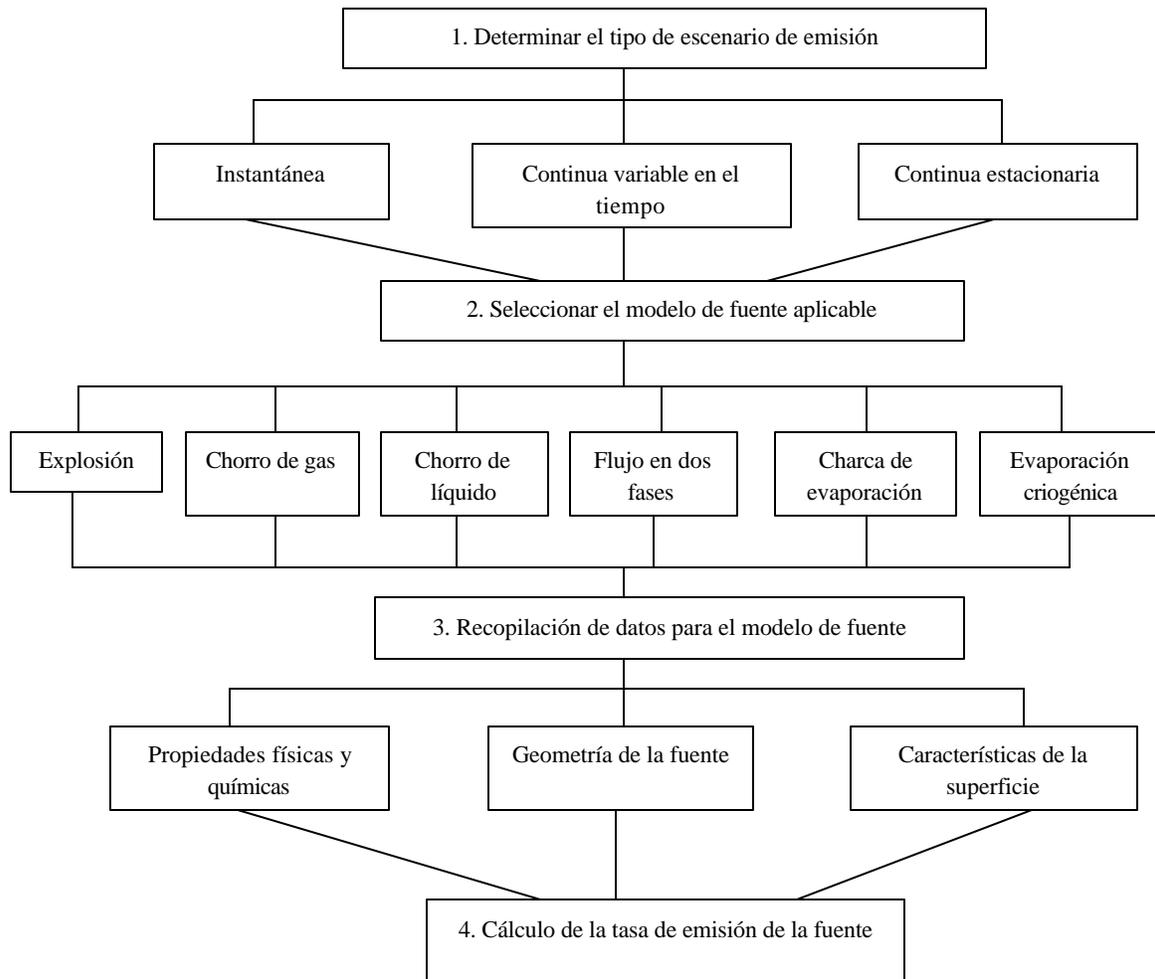
*Presencia de gas y aerosol en el chorro de salida.* La presencia en el momento de la fuga de gases y aerosoles debe establecerse. Además, los líquidos que no se evaporan de manera instantánea pueden no estar en forma de aerosol y formar una charca en el suelo.

La simulación del comportamiento en la fuente debido a una liberación accidental de materiales peligrosos es tal vez la operación más crítica para una adecuada estimación de las concentraciones viento abajo. Las unidades utilizadas para definir la tasa de emisión son unidades de masa por tiempo (por ejemplo kg/s), también puede utilizarse unidades de masa por superficie por tiempo para la evaporación de un charco; así como expresar la emisión en unidades de masa (kg) cuando se considera que la liberación es instantánea.

Las liberaciones accidentales de materiales peligrosos pueden ser de diferentes tipos, por ejemplo gas o líquido, liberación instantánea o continua, material refrigerado o presurizado, en suelo, en agua, etcétera; en muchos casos pueden ser una combinación de los anteriores. Para la estimación de la tasa de emisión se requieren de manera simplificada los siguientes pasos (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ Determinar la dependencia con respecto al tiempo de la emisión
- ◆ Seleccionar el modelo a aplicar de acuerdo al tipo de fenómeno: evaporación en charca, flujo en dos fases, etcétera.

- ◆ Determinar los datos necesarios sobre propiedades físicas, químicas, de geometría de la fuente y sobre la superficie del terreno donde se localiza la fuga, requeridos por el modelo seleccionado
- ◆ Estimar la tasa de emisión.



**Figura 4.1 Estimación de tasa de emisión (AIChE, 1994)**

Las liberaciones accidentales pueden agruparse en tres clases de acuerdo a su duración: instantáneas, continuas con variaciones con respecto al tiempo, continuas estacionarias o casi invariables con respecto al tiempo. El conocer que tipo de fenómeno se presenta permite seleccionar entre las diferentes técnicas de modelación y en la estimación de tasas de liberación. La selección del modelo de emisión depende del tipo de escenario en el que sucede la liberación, del material liberado y de sus propiedades. Los incidentes en tanques normalmente involucran liberaciones de tipo continuo con variación en el tiempo que pueden requerir de modelos de emisión para chorro de gas, chorro de líquido o para emisión en dos fases. La evaporación en charcas de líquidos comúnmente presentan emisiones continuas que varían con el tiempo, debido a la variación temporal en los balances de masa y calor entre la superficie y el material en la charca. Para tasas de evaporación pequeñas y un área de la charca aproximadamente constante, un modelo para evaporación de charca líquida de tipo continuo estacionario puede ser el apropiado (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Cada tipo de modelo de emisión requiere de información de entrada para poder estimar la tasa de emisión, las cuales pueden agruparse en tres clases: propiedades físicas y químicas, geometría de la fuente y características del terreno.

#### **4.1.1 Liberaciones de tipo chorro de gas**

Las liberaciones de tipo chorro de gas son ocasionadas por pequeños orificios en, por ejemplo recipientes con gas a presión, o cuando este orificio se localiza en el espacio que contiene vapor de un recipiente con un líquido volátil a presión. En este tipo de liberación puede esperarse que presente inicialmente una elevada tasa de emisión y ésta disminuya a medida que la presión en el recipiente disminuya. Cuando la liberación es producto de un orificio pequeño el gas es liberado a una velocidad próxima o igual a la velocidad del sonido; cuando esta velocidad se alcanza se le denomina flujo crítico. Las ecuaciones para determinar la tasa de emisión de liberaciones tipo chorro de gas ideal son conocidas, asimismo la ecuación que define la ocurrencia de un flujo crítico para un gas ideal cuando es liberado a través de un orificio pequeño. También se han desarrollado ecuaciones para calcular la tasa de emisión cuando: un gas presenta un flujo crítico en condiciones isoentropicas, cuando la presión en el recipiente ha disminuido de tal manera que existe un flujo subcrítico, así como cuando la presión en el recipiente disminuye con respecto al tiempo y la liberación del material ocurre de manera isotérmica o adiabática. Para un orificio en el espacio con vapor en un recipiente con líquido presurizado o criogénico, el gas liberado se suministra continuamente por la evaporación del líquido en el tanque, y puede modelarse considerando condiciones isoentropicas (AIChE, 1996).

#### **4.1.2 Liberaciones tipo chorro de líquido**

En una liberación de material debida a un orificio localizado en la parte que contiene líquido en un recipiente con líquido criogénico o presurizado, el chorro líquido es impulsado hacia el exterior del recipiente y dependiendo del punto de ebullición del material, una fracción del líquido desalojado puede evaporarse de manera instantánea. Es lógico esperar que la tasa de liberación en forma de chorro líquido puro en un recipiente dependa de la presión en el interior de éste y de la columna de líquido en el orificio; en este caso la ecuación utilizada para calcular el flujo a través de un orificio está basada en las ecuaciones de Bernoulli y Torricelli (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

#### **4.1.3 Liberaciones tipo chorro de dos fases**

La tasa de emisión cuando se presenta un chorro en dos fases se encuentra ubicada entre la de un gas y la de un líquido. Cuando un material se libera una fracción líquida que puede evaporarse instantáneamente, y esto dependerá del punto normal de ebullición. La evaporación instantánea es normalmente significativa en líquidos presurizados que presentan puntos de ebullición por abajo de la temperatura ambiente. Asimismo, una manera de determinar la cantidad de material evaporado instantáneamente, es considerar que el proceso de evaporación es tan rápido que puede considerarse adiabático, por lo cual el calor de evaporación es proporcionado por la entalpía del líquido liberado. En mezclas de dos o más sustancias el proceso de evaporación instantánea es más complicado y requiere que se realicen iteraciones y conocer el comportamiento de la mezcla en equilibrio entre las fases vapor-líquido (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

#### **4.1.4 Charcas de líquido**

En los casos de liberaciones en forma de chorro de gas, chorro líquido o en dos fases pueden describirse como liberaciones continuas variables en el tiempo, donde esta variación es normalmente una disminución en el flujo. Este tipo de liberaciones resultado de un orificio en un tanque o tubería puede resultar en la formación de una charca de líquido, de la cual se busca estimar la cantidad que se evapora. Un incremento en el área de la charca aumenta la tasa de emisión de manera aproximadamente lineal, así el aumento en función del tiempo en las dimensiones de la charca aumentará la emisión. Se han desarrollado ecuaciones

para estimar el aumento en las dimensiones de la charca formada en función del tiempo para suelo y agua, las cuales pueden emplearse en la estimación de la tasa de emisión (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Cuando sucede un incidente con material criogénico (por ejemplo: cloro), en donde el material presenta un punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente, el líquido puede escurrir rápidamente a la tierra o superficie y formar una charca de líquido a baja temperatura, los vapores emitidos resultan en una nube de gas denso y frío que pende o cubre la charca. La tasa de evaporación de un líquido criogénico depende casi por completo del balance de calor de la charca. Cualquier cantidad de calor que se transmita a la charca se utilizará para la evaporación del material, y la tasa de evaporación dependerá de la tasa de transferencia de calor y del calor de evaporación del líquido (AIChE, 1996).

Para charcas de líquidos que presentan un punto de ebullición superior a la temperatura del ambiente, la tasa de evaporación puede estar controlada por variables meteorológicas (como la velocidad del viento) o por difusión en la capa líquida. En ambos casos, la temperatura del líquido es una variable importante para determinar la tasa de evaporación de líquidos que no están en ebullición. De esta manera el balance de calor es importante en este caso como lo es para el caso de charcas con líquido en ebullición (AIChE, 1996).

En el balance de calor de una charca la fuente primaria e inicial de calor proporcionado es el suelo, la convección del aire, la energía solar incidente, la pérdida de calor por evaporación, y la transferencia por radiación del aire complementan el balance en la charca de líquido. Ya que la masa líquida varía con el tiempo las ecuaciones que expresan el balance de energía deben expresarse con exactitud para determinar los cambios en la temperatura y la tasa de evaporación. Las ecuaciones empleadas para expresar la transferencia de calor para conducción, convección, radiación solar y radiación, se basan en las ecuaciones y consideraciones conocidas de la transferencia de calor. Normalmente los modelos empleados para derrames asumen que la temperatura en la charca es uniforme de manera vertical, lo cual no es completamente apropiado para charcas grandes y profundas (AIChE, 1996).

Para derrames de líquidos criogénicos la fuente primaria de calor para la evaporación es la conducción a través del suelo. La temperatura de esta charca disminuye rápidamente y permanece cercana al punto de ebullición, y la posterior evaporación del líquido depende del calor por conducción. En este proceso es posible que se forme hielo en el suelo del fondo de la charca debido a la humedad, lo que disminuiría la conducción del calor y por lo tanto la tasa de evaporación (AIChE, 1996).

En el caso de derrames de líquidos que presentan una temperatura de ebullición superior a la ambiente la charca formada en el suelo se evaporara lentamente a una tasa que dependerá de la presión de vapor del líquido, la superficie de la charca y de las condiciones atmosféricas. En este caso en que la evaporación es lenta la mayoría de los modelos de simulación asumen que la evaporación está limitada por la transferencia de masa entre la fase líquida y la gaseosa. En la fase inicial para derrames grandes o para charcas de líquido relativamente profundas, la difusión a través del líquido puede ser el factor limitante en compuestos que posean una presión de vapor relativamente alta. Para compuestos muy volátiles y una capa de líquido gruesa o viscosa, la tasa de evaporación puede estar limitada por la rapidez con la cual el líquido se difunda hacia la capa superficial de la charca (AIChE 1996).

Para charcas con líquidos formados por más de un componente, las ecuaciones básicas empleadas para determinar la tasa de evaporación para un componente son aplicadas modificándolas para incorporar a los diferentes componentes de acuerdo a su fracción mol (AIChE, 1996).

Las condiciones en que se da una liberación a semejanza de las condiciones meteorológicas pueden ser muy variables y deben conocerse lo mejor posible para un adecuado aprovechamiento de los modelos. Es así que cualquier imprecisión en la estimación de la fuente de emisión influye en las subsiguientes estimaciones de la evaporación y dispersión en el aire del material. Existen tres causas básicas de imprecisiones en la estimación de la fuente (AIChE, 1996):

- ◆ Errores en la definición sobre el tipo de fuente.
- ◆ Imprecisiones en la estimación de los parámetros de entrada de acuerdo al modelo empleado.
- ◆ La imprecisión inherente al propio modelo.

Al jerarquizar las técnicas para la estimación de las emisiones iniciando por las que poseen un grado de precisión mayor se tiene (AIChE, 1996):

- ◆ Chorro de líquido.
- ◆ Chorro de gas.
- ◆ Evaporación en charca de líquido (un solo componente).
- ◆ Derrame de líquido criogénico.
- ◆ Evaporación de charca de líquido (más de un componente).
- ◆ Dos fases (un solo componente).
- ◆ Dos fases (más de un componente).

#### 4.2 MODELOS DE DISPERSIÓN

Los modelos de dispersión tratan los aspectos de transporte y dispersión de un material una vez que se ha liberado a la atmósfera. En estos modelos se estima uno o más de los siguientes valores (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ Distancias para niveles de concentración a nivel del suelo
- ◆ Contornos o áreas donde se presentan diferentes concentraciones de interés
- ◆ Masa de material inflamable dentro de ciertas concentraciones de interés

En estos modelos las concentraciones están definidas para un tiempo promedio. Existen tres tipos de comportamiento de las nubes de material y tres modalidades de acuerdo al tiempo de liberación.

**Tabla 4.1 Tipos de nubes debidas a liberación de materiales a la atmósfera**

Comportamiento de la nube	Duración de la liberación
Gas neutralmente flotante	Liberación instantánea (puff)
Gas positivamente flotante	Liberación continua (pluma)
Gas denso	Liberación continua variable con el tiempo

Los modelos de dispersión gaussiana describen de manera aproximada el comportamiento de una nube de vapor (material) a diferentes distancias viento abajo del punto de liberación. En el estudio del comportamiento de las liberaciones continuas (plumas) e instantáneas (puffs) de materiales se han empleado los modelos gaussianos. Los gases densos presentan un comportamiento combinado de gas denso y dispersión gaussiana con una elevación de la pluma al inicio debido al *momentum*, seguido por un curvamiento de la pluma y caída debido a los efectos de la densidad del gas (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Las condiciones meteorológicas en el momento de la liberación tienen una influencia determinante en la extensión de la dispersión. De las condiciones meteorológicas los factores principales son la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica. La velocidad del viento puede ocasionar una dilución de los vapores; y una condición estable (estabilidad atmosférica) provoca un menor mezclado. La velocidad del viento y la estabilidad atmosférica pueden obtenerse de registros meteorológicos, cuando no se tiene información sobre la estabilidad puede utilizarse la tabla de Pasquill que permite establecerla a partir de una estimación de la intensidad solar y de la velocidad del viento. Cuando no se tienen datos meteorológicos de un sitio, se utilizan típicamente para la evaluación de la dispersión una estabilidad D y una velocidad de 5 m/s que corresponde a un día soleado, y una estabilidad F con velocidad del viento de 2 m/s para una noche tranquila. La velocidad del viento varía en magnitud y dirección debido a la topografía del terreno; además los datos proporcionados por estaciones meteorológicas normalmente reportan la velocidad a una altura de 10 metros por lo cual debe de corregirse de acuerdo a la altura de la fuente (AIChE, 1996).

#### 4.2.1 Modelos para plumas de gases neutralmente o positivamente flotantes

Los modelos aplicados para la simulación de la dispersión de gases neutralmente o positivamente flotantes, así como los modelos aplicados a liberaciones instantáneas se utilizan para predecir la concentración de materiales inflamables o tóxicos en intervalos de tiempo. Estos modelos están basados en los conceptos de la dispersión gaussiana, en los cuales la difusión en la atmósfera es un proceso de mezclado aleatorio que sigue el comportamiento en los ejes horizontal y vertical de una distribución gaussiana. Estos modelos pueden aplicarse a liberaciones pequeñas de gas denso en la cual la fase densa en el proceso de dispersión es relativamente menor comparada con la fase neutralmente flotante; normalmente no se aplican estos modelos a liberaciones mayores de gas denso (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Las ecuaciones utilizadas en los modelos de dispersión gaussiana incluyen coeficientes de dispersión en los ejes horizontal y vertical, los cuales poseen diferentes valores cuando la modelación se aplica a plumas continuas o liberaciones instantáneas (puff). Los modelos de dispersión proporcionan como resultados concentraciones de acuerdo al tiempo para localizaciones viento abajo del lugar de la liberación. En nubes de material tóxico o inflamable puede obtenerse para una concentración determinada una isopleta, que normalmente tiene forma elíptica. Los resultados comúnmente se limitan a una distancia de la fuente de 100 metros a 10 km. Para los modelos de liberación instantánea existe solo una concentración para cada punto en un tiempo determinado (AIChE, 1996).

#### 4.2.2 Modelos para dispersión de gas denso

La diferencia en la forma de dispersión de una nube de gas denso con respecto a otras es que la nube de gas denso en su trayectoria presenta una curvatura hacia abajo o hundimiento, una vez que el momentum deja de dominar el movimiento de la nube y la densidad del gas con respecto a la del aire obliga a este comportamiento. El mecanismo de dispersión de un gas denso difiere notablemente del que presenta una nube neutralmente flotante, esto se debe principalmente a una mayor densidad del gas con respecto a la densidad del aire. Las diferencias en el mecanismo de dispersión incluyen (AIChE, 1994; AIChE, 1996):

- ◆ Aceleración inicial y dilución
- ◆ Dominio de una flotabilidad negativa
- ◆ Dominio de la turbulencia ambiental

Existen varios tipos de modelos para simular la dispersión de un gas denso cuando la fuente de emisión está elevada con respecto al nivel del suelo; en los incidentes que ocurren en el transporte terrestre la fuente está próxima al suelo y por lo tanto los modelos empleados para fuentes elevadas no resultan satisfactorios. Cuando se analizan liberaciones a nivel del suelo de un gas denso, el número de Richardson es un criterio que se utiliza en ocasiones; este número representa la energía potencial debido al exceso de densidad dentro de la nube densa y la energía cinética debida a la turbulencia del ambiente. Si el número de Richardson es menor a 50 (sugerido por experimentos en laboratorio), el movimiento de la nube está dominado por la turbulencia del ambiente y el efecto del gas denso posee poca importancia. Para decidir cuando un gas denso debe considerarse como una liberación continua o instantánea es necesario comparar la duración de la liberación,  $T_d$ , con el tiempo necesario para viajar de la fuente a la posición del receptor,  $x/u$ . Si se supone que la velocidad del viento es constante, entonces cuando  $T_d$  es mayor a  $x/u$  la nube es considerada continua; cuando  $T_d$  es menor a  $x/u$  la nube es considerada instantánea; cuando estos valores son aproximadamente iguales es recomendable tratar la liberación de las dos maneras (AIChE 1996).

En muchos accidentes, especialmente cuando la liberación es de un material presurizado, la nube de vapor se libera en forma de chorro con un significativo *momentum* inicial, en contraste existen otras liberaciones las cuales se localizan cercanas al nivel del suelo y poseen un bajo *momentum*. Cuando el momentum es alto la trayectoria inicial de la nube es dominada por la velocidad del chorro, lo cual debe ser tomada en cuenta en la simulación y utilizar modelos en donde el *momentum* es dominante. En liberaciones donde esta característica es baja no pueden utilizarse los modelos anteriores y deberán emplearse otros como

es el conocido por modelo de caja y considerar la formación de aerosoles para determinar cual modelo puede ser el más apropiado (AIChE, 1996).

Cuando se realiza la simulación de una liberación es normal identificar los peores escenarios probables que tienen gran influencia en las estrategias de mitigación y control. El peor caso se define con respecto a la máxima concentración a nivel del suelo para los receptores. Para liberaciones continuas cercanas al nivel del suelo de gases (por ejemplo para gases neutralmente flotantes) o gases densos en los cuales no existe una etapa de hundimiento de la pluma de emisión, el peor caso está asociado con condiciones estables y velocidades de viento pequeñas, para la cual la dispersión y dilución son menores. Para una liberación instantánea o de corta duración de un gas denso cercana al suelo las condiciones para el peor caso son posiblemente las asociadas con velocidades de viento moderadas. En liberaciones de corta duración en los cuales los vientos son ligeros, existe un retardo en la advección en dirección viento abajo; por el contrario cuando los vientos son intensos, la nube de gas denso no se extiende lateralmente en las proximidades de la fuente pero la advección se da viento abajo con menor dilución (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

### 4.3 MODELOS PARA EXPLOSIÓN E INCENDIO

Como resultado de una liberación de material se pueden tener gases inflamables o líquidos los cuales podrían incendiarse o hacer explosión. Un incidente con materiales peligrosos puede tener como resultado (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)
- ◆ Explosión por expansión de líquido en ebullición (BLEVE)
- ◆ Explosión
- ◆ Explosión confinada
- ◆ Bola de fuego (fireball)
- ◆ Charca de fuego (poolfire)
- ◆ Fuego tipo chorro (jet fire)
- ◆ Fuego instantáneo (flash fire)

Las explosiones de nube de vapor no confinada pueden definirse como explosión en exteriores, que producen un daño debido a ondas de sobrepresión. Las condiciones necesarias para que suceda una explosión de nube de vapor son:

- ◆ El material liberado debe ser inflamable y en condiciones apropiadas de temperatura y presión
- ◆ Previamente a la ignición la nube debe tener un tamaño suficiente
- ◆ Una porción suficiente de la nube debe estar dentro del rango de inflamabilidad del material
- ◆ La velocidad de propagación de la flama en la nube debe ser la apropiada.

El mecanismo para la propagación de la flama en una mezcla de combustible y aire está determinado por la conducción y difusión molecular del calor. El calor se produce en la zona de reacción debido a una reacción química; el calor se transmite principalmente por conducción y por difusión molecular. La difusión molecular es un proceso relativamente lento, la propagación de la flama de forma laminar es lenta, sin embargo la velocidad de propagación aumenta debido a la turbulencia y a las inestabilidades en la combustión. En una mezcla que presenta alta turbulencia la combustión tiene lugar en una zona extensa en la cual los productos de combustión y la mezcla que no ha reaccionado está intensamente mezclada. Asimismo, las altas velocidades de propagación están relacionadas con una alta turbulencia. Existen dos modalidades de combustión: la deflagración y la detonación, las cuales difieren en sus mecanismos de propagación. En una deflagración la reacción de combustión se propaga debido a un transporte difusivo molecular del calor y a un mezclado turbulento de reactantes y productos de combustión. En una detonación la reacción se propaga por una fuerte onda de choque que comprime a la mezcla más allá de la temperatura de autoignición. En la deflagración las tasas de propagación en el material sin reaccionar es menor a la velocidad del sonido, en la detonación las velocidades de propagación son superiores a la velocidad del sonido (AIChE, 1989; AIChE, 1994; AIChE, 1996).

Una nube de vapor inflamable puede, de acuerdo a la condiciones en que se encuentra la mezcla en el momento de la ignición, ocasionar una charca de fuego, un fuego tipo chorro, fuego instantáneo o una bola de fuego. Cuando sucede lo anterior el calor es transmitido a los alrededores por convección y radiación térmica. Para describir la radiación del fuego se emplean dos métodos principalmente (AIChE, 1994):

*Modelo de fuente puntual.* En este modelo se considera que una fracción del calor de combustión se emite como radiación en todas direcciones. El modelo se asume que la superficie del receptor dirigida hacia la fuente de radiación recibe el máximo flujo de radiación. La fracción de energía debida a la combustión, que es emitida como radiación térmica depende del combustible y de las dimensiones de la flama; asimismo la tasa de combustión depende de la liberación. Se han obtenido medidas de la fracción de energía emitida para diferentes materiales y tipos de resultados (charca de fuego, bola de fuego, etc.). Sin embargo, los modelos de fuente puntual son imprecisos para receptores próximos a la fuente (AIChE, 1996).

*Modelo de flama sólida.* Este modelo considera que el fuego puede representarse como un cuerpo sólido de contorno geométrico simple y que toda la radiación térmica la emite la superficie. Para evitar que el volumen del fuego sea subestimado, la geometría del fuego y del cuerpo receptor, así como las posiciones relativas se debe considerar, ya que una porción del fuego puede ser obstruida por el cuerpo receptor. Lo anterior se incluye en la determinación de la radiación incidente al considerar un factor de visibilidad que depende de los contornos de la fuente, del receptor y de la distancia entre estos. En este modelo se requiere calcular el poder emisor, que es el poder o potencia total de radiación que abandona la superficie del fuego por unidad de área y por unidad de tiempo; la emisividad se calcula determinando la absorción de la radiación de los productos de combustión en las flamas y la longitud de onda de la radiación, así como de la transmisividad que es la absorción de la radiación por el medio presente entre el emisor y el receptor (AIChE, 1996).

#### 4.3.1 Modelos basados en la detonación de TNT

Estos modelos se basan en relacionar un peso equivalente de TNT con los patrones de daños provocados por una explosión de nube de vapor. Los modelos basados en la explosión de TNT tienen como propósito el cuantificar el potencial poder explosivo de un material y establecer los efectos dañinos potenciales para una determinada cantidad de material. En estos modelos la energía de combustión disponible en la nube de vapor se convierte en un peso equivalente de TNT; así, cuando se conoce el peso equivalente de TNT las características de la detonación, expresada como onda de sobrepresión, puede obtenerse para diferentes distancias del lugar de la explosión. La equivalencia de TNT para un material puede interpretarse como un factor de conversión que expresa la eficiencia del proceso de conversión de la energía química (calor de combustión) en energía mecánica (explosión). Para una detonación estequiométrica de una mezcla aire-hidrocarburo la eficiencia máxima teórica de la conversión del calor de combustión es de aproximadamente 40%. Para la mayoría de los incidentes de explosión de nube de vapor las equivalencias de TNT se ha deducido que han estado en un intervalo de 1 a 10%, basadas en el calor de combustión de la cantidad total de material liberado. Aparentemente solo una parte de la energía de combustión disponible está involucrada en una combustión explosiva (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

Los modelos basados en el equivalente de TNT para la predicción de explosiones de nube de vapor se han desarrollado ampliamente, entre las diferencias existentes destacan (AIChE, 1994; AIChE, 1996):

*La fracción de material combustible:* existen diferentes valores para la fracción de material combustible que debe considerarse en los cálculos: cantidad total liberada, cantidad evaporada instantáneamente y la cantidad evaporada instantáneamente modificada por un factor de atomización.

*El valor del equivalente de TNT:* pueden emplearse valores basados en promedios deducidos de la observación de accidentes mayores; o un valor seguro o conservativo.

*Los datos utilizados sobre la explosión de TNT:* se ha observado que existe una dispersión significativa en los datos obtenidos para diferentes experimentos, por lo cual esto debe considerarse.

*La energía de la explosión de TNT:* los valores comúnmente utilizados se encuentran en un rango de 1800 a 2000 BTU/lb (4.19 a 4.65 MJ/kg).

#### 4.3.2 Modelos no basados en la detonación de TNT

Las ondas de choque proporcionadas por el modelo de explosión de TNT no corresponden adecuadamente con las observadas en la explosión de un gas, por lo cual se han desarrollado otros modelos que buscan una determinación más satisfactoria de las características de las ondas de choque. Estos métodos buscan una mejor interpretación de las explosiones de gases no incluidos en los métodos de TNT equivalente, e incluyen el que la fuente de las ondas de sobrepresión no es un punto, y que la fuerza de estas ondas varía de acuerdo a la extensión de la fuente de las ondas (AIChE, 1994).

El modelo de TNT considera a la nube de vapor que explota como un todo, el concepto de multienergía define a la explosión de una nube de vapor como un número de subexplosiones que corresponden con varias fuentes de ondas de choque en la nube. El método de multienergía considera que los efectos de las ondas están determinados por el tamaño y naturaleza de las regiones dentro de la nube parcialmente confinada u obstaculizadas; este modelo divide la nube de vapor en volúmenes de acuerdo al grado de obstrucción y/o confinamiento, a los cuales se les asigna un índice de fuerza (intensidad) que varía de 1 a 10; el valor de 1 representa a una explosión débil y el valor de 10 a una detonación. Estos volúmenes confinados y/o obstaculizados serán las fuentes mayores de ondas de choque. Las partes no confinadas o no obstaculizadas no contribuirán significativamente a las ondas de choque. Cada volumen en que se ha dividido la nube se modela como una carga de aire-combustible hemisférica y estequiométrica, y se le asigna una fuerza (intensidad) de explosión. El trazo de gráficas que representan los niveles de sobrepresión y duración de la explosión como función de la distancia y de la fuerza de la explosión permiten predecir los efectos de las ondas de choque (AIChE, 1996).

Existen otros modelos como son los que incluyen el método de Baker-Strehlow o el desarrollado por el Comité para la Prevención de Desastres (incluido en el Yellow Book, publicado en 1979) que se basan en resultados experimentales y ofrecen interpretaciones de como se desarrollan las ondas de choque (AIChE, 1996).

El método de Baker-Strehlow para modelar una explosión de nube de vapor utiliza datos numéricos y experimentales relacionando la estructura de las ondas de choque generadas con la velocidad constante y la propagación en la aceleración de las flamas en una geometría esférica. Los datos se expresan como gráficas de sobrepresión e impulso positivo como función de la energía y de la distancia al centro de la nube. La aplicación de este método requiere se estime la velocidad máxima alcanzada por la flama y la energía equivalente de la explosión. La velocidad máxima alcanzada por la flama es una función del confinamiento, los obstáculos, la reactividad del combustible y la intensidad de la ignición. La energía explosiva liberada por cada porción de la nube que contribuye a la onda de choque se puede calcular por diferentes métodos que son (AIChE, 1996):

- ◆ Estimar el volumen de cada región congestionada, multiplicando la masa de combustible en esa región y tratando cada región congestionada dentro de la porción inflamable de la nube como una fuente separada de ondas de choque.
- ◆ Estimar la cantidad total del material liberado en un periodo de tiempo razonable y multiplicar por el calor de combustión y un factor de eficiencia.
- ◆ Estimar la cantidad de material dentro de los límites de inflamabilidad (generalmente por medio de modelos de dispersión) y multiplicarlo por el calor de combustión.

Cuando se ha calculado la energía se debe multiplicar por un factor de reflexión del suelo; este factor es normalmente 2 para nube de vapor que está en contacto con el suelo, si la liberación es elevada la nube no se dispersa a nivel del suelo y se debe seleccionar un factor entre 1 y 2 (AIChE, 1996).

### 4.3.3 Explosión por expansión de vapor de líquido en ebullición (BLEVE) y bola de fuego

Un BLEVE es una liberación súbita a la atmósfera de una gran masa de líquido presurizado sobrecalentado. La causa que origina al BLEVE es normalmente una flama externa que incide sobre la pared del recipiente abajo del nivel del líquido, debilitando la pared y provocando la ruptura del recipiente. Un BLEVE ocurre por cualquier mecanismo que resulte en la ruptura de un recipiente que permite al líquido sobrecalentado el evaporarse instantáneamente, incrementando su volumen en aproximadamente 200 veces, ocasionando una onda de choque y la proyección de fragmentos del recipiente. Si el líquido liberado es inflamable puede resultar una bola de fuego, fuego instantáneo (flash fire) o una explosión de nube de vapor. En los incidentes que involucran un BLEVE, ya sea que el material sea inflamable o no, los efectos de la presión y la proyección de fragmentos deben determinarse. Los efectos debidos a la presión son comúnmente limitados, pero debe considerarse el efecto dominó que puede provocar en recipientes adyacentes. Existen diferentes teorías que buscan explicar el mecanismo de las BLEVE's; sin embargo, no existe una que explique por completo el fenómeno, la teoría más aceptada es la de Reid que se basa en el comportamiento de líquidos sobrecalentados. En los incidentes que tienen como resultado un BLEVE se debe determinar: las ondas de sobrepresión, proyección de fragmentos, así como la intensidad de la radiación térmica (cuando se trata de materiales inflamables) (AIChE, 1994).

Existen diferentes modelos desarrollados para determinar el diámetro de la bola de fuego y la duración de la combustión, así como modelos para la radiación emitida, basados en conceptos teóricos y resultados experimentales.

La radiación de una bola de fuego puede establecerse de acuerdo al diámetro (como función del tiempo o de acuerdo a la cantidad original de combustible) y a la duración de la combustión. Asimismo diferentes autores han publicado ecuaciones empíricas para describir la duración de la combustión de una bola de fuego como función de la masa original del combustible. Los modelos presentados por Lihou y Maund, Roberts y otros autores consideran hipotéticamente una esfera premezclada de aire y combustible a temperatura ambiente. Para los modelos isotérmicos en los cuales se asume que la combustión se realiza a temperatura constante, la combustión está controlada por el suministro de aire el cual cesa después de un tiempo, este tiempo está relacionado empíricamente con la masa de gas inflamable en la esfera inicial de vapor. En este modelo para calcular la temperatura de la bola de fuego y el diámetro máximo se utilizan diferentes ecuaciones que proporcionan la tasa de incremento en el volumen de la esfera, la tasa de combustión, la temperatura de la bola de fuego, la duración de la combustión y la tasa de incremento en el diámetro. Es posible estimar la elevación que sufre una bola de fuego; sin embargo para el cálculo del peligro debido a la bola de fuego se supone que ésta es de forma esférica y que se encuentra a nivel del suelo, por lo cual este cálculo puede omitirse (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

Hasegawa y Sato indican que cuando la cantidad calculada de evaporación rápida (o instantánea) es igual al 36% o mayor, todo el material liberado contribuye a la formación de un BLEVE y eventualmente a una bola de fuego. Para porcentajes menores de evaporación, parte del combustible forma un BLEVE y el restante forma una charca. Se asume que cuando el porcentaje es menor al 36%, la cantidad calculada de material evaporado instantáneamente multiplicada por 3 es la que contribuye a un BLEVE. Para predicciones sobre el peligro debido a la bola de fuego, la cantidad de gas en el BLEVE puede considerarse como tres veces la cantidad de material evaporado instantáneamente hasta un máximo que no rebase el 100% del material combustible disponible (AIChE, 1994).

El principal peligro de las bolas de fuego es la radiación térmica ya que puede ocasionar incendios secundarios y provocar quemaduras severas en las personas expuestas. Los métodos para calcular la radiación para diferentes tipos de fuegos, incluidas las bolas de fuego, contemplados anteriormente se agrupan en dos tipos: modelo de fuente puntual y modelo de flama sólida. En el modelo de fuente puntual se calcula la fracción del calor de combustión que es irradiado en todas direcciones; este modelo no debe emplearse para calcular la radiación a la que están expuestas los receptores de manera parcial. El modelo de flama sólida es más realista que el anterior, este modelo considera las dimensiones de la bola de fuego, el poder emisor de la superficie de la bola de fuego, la atenuación debido a la atmósfera y un factor visual o factor de configuración geométrica. El factor visual se refiere a la fracción de radiación que choca directamente con la superficie receptora, para esto

se considera la orientación relativa del objeto con respecto a la bola de fuego y la distancia al centro de la misma (AIChE, 1994).

Las distancias para diferentes niveles de peligrosidad debidas a la radiación de un BLEVE-bola de fuego pueden obtenerse de acuerdo a diferentes estudios y publicaciones. Una ecuación útil para determinar la probabilidad de muerte debido a radiación térmica es la propuesta por Eisenberg y colaboradores en la cual la probabilidad es proporcional al producto de  $It^{4/3}$ , donde  $I$  es la intensidad de la radiación y  $t$  es la duración de la radiación (AIChE, 1994).

Las ondas de choque producto de un BLEVE pueden producirse de tres maneras:

- ◆ El vapor presente por encima del líquido puede generar una onda de choque, como sucede con los recipientes llenos de gas.
- ◆ El líquido puede hervir por una depresurización, y si la ebullición es rápida resulta una onda de choque.
- ◆ Si el fluido es combustible y el BLEVE no es inducido por fuego exterior, una explosión de nube de vapor puede presentarse.

Existen diferentes métodos para calcular los valores de los parámetros de las ondas inducidas por la explosión de recipientes a presión y de BLEVES que las presentan. La selección del método apropiado dependerá de la fase en que se encuentra el material en el recipiente y de la distancia al receptor de la onda explosiva (AIChE, 1994).

Además de la onda de presión debido a una explosión, la anterior puede provocar fragmentos. Cuando un material altamente explosivo detona se produce un gran número de pequeños fragmentos a gran velocidad y de forma muy irregular; por el contrario cuando sucede un BLEVE produce pocos fragmento, de diferentes tamaños y menores velocidades iniciales. Las características de los fragmentos a utilizarse para la evaluación de consecuencias incluye el número, velocidad, geometría y trayectoria. Las investigaciones para la predicción de la velocidad de los fragmentos y su alcance se ha concentrado en situaciones idealizadas de recipientes con gas presurizado, aunque también se han considerado recipientes con gas no ideal presurizado y combinaciones de gas y líquido. Para la explosión en el interior de un recipiente la velocidad inicial de los proyectiles puede estimarse, por ejemplo, considerando que una fracción de la energía disponible se transfiere del fluido en expansión a los fragmentos. La energía disponible por la explosión en el interior de un recipiente debe dividirse entre el trabajo para propagar las grietas que causan la ruptura, la energía cinética de los fragmentos, la energía de la onda de choque, el calor en los productos y la energía plástica remanente en los fragmentos. Otro método para determinar la velocidad inicial de los fragmentos comprende un análisis paso por paso de la transferencia de *momentum* del fluido que escapa a través de las grietas en medio de los proyectiles y a los proyectiles mismos; en el caso de detonaciones, es posible una fragmentación severa en recipientes de material quebradizo, mientras que en aquellos de material más dúctil se obtendría un menor número de fragmentos (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

#### 4.3.4 Charcas de fuego

Las charcas de fuego son un resultado común de incendios en charcas producto de liberaciones de materiales líquidos, gases licuados y/o líquidos presurizados. Éstas tienen un efecto localizado y son de interés debido a posibles efectos dominó y en la determinación de zonas de seguridad. La modelación de charcas de fuego es una técnica bien desarrollada, estos modelos se integran de diferentes módulos que permiten calcular las características de interés, entre los que destacan (AIChE, 1996):

*Tasa de quemado:* las charcas de fuego con dimensiones mayores arden con una tasa vertical constante específica para cada material, existen ecuaciones desarrolladas para predecir la tasa de quemado; asimismo se dan valores de esta tasa que por ejemplo para hidrocarburos fluctúan en un intervalo de 0.05 kg/m<sup>2</sup> s (gasolina) a 0.12 kg/m<sup>2</sup> s (gas LP);. La tasa de quemado permite estimar el calor producido por unidad de área y estimar la duración del fuego.

*Dimensiones de la charca:* el tamaño de la charca lo determina tanto la cantidad liberada como las características del terreno. En la modelación normalmente se asume que ésta es circular y cuando tiene forma rectangular (debido a un confinamiento) se utiliza un diámetro equivalente.

*Altura de la flama:* Diversas observaciones indican que las charcas de fuego presentan una relación entre la altura de la flama y el radio, la más conocida es la de Thomas; existen además otras correlaciones que permiten conocer el efecto del viento. Algunos autores sugieren valores para la relación altura de la flama/diámetro de la charca de 2 ó 3.

*Inclinación de la flama:* Las flamas de las charcas incendiadas son afectadas por la velocidad del viento, provocando una inclinación de la flama, cuando la velocidad del viento es grande la base de la charca puede ser arrastrada viento abajo; esto afecta la radiación que reciben los receptores cercanos; el arrastre de la flama es un efecto que no se incluye en muchos modelos. Normalmente se asume que la flama es vertical y que el calor irradiado es igual en todas direcciones. Aunque en el análisis de riesgos pueden incluirse o no estos efectos, es importante que se considere la inclinación de la flama.

*Poder emisivo superficial:* El poder emisivo de una superficie o flujo de calor irradiado puede calcularse por medio de la ecuación de Stefan Boltzmann. Esta ecuación es muy sensible a la temperatura de la flama ya que la radiación varía con la temperatura que se expresa a la cuarta potencia; además el efecto oscurecedor del humo reduce la radiación total emitida por la flama. Otros métodos utilizan los flujos térmicos de las charcas incendiadas de varios materiales, o utilizan una fracción del calor irradiado de acuerdo al poder total de combustión; en ambos se considera la absorción de la energía irradiada debida al humo.

El poder emisivo de una superficie por unidad de área puede estimarse usando el método de la fracción de radiación, de acuerdo a lo siguiente (AIChE, 1996):

- ◆ Calcular el poder total de combustión (basado en la tasa de quemado y en el área de la charca)
- ◆ Multiplicarlo por la fracción de irradiación para determinar la potencia total de radiación
- ◆ Determinar el área de la superficie de la flama
- ◆ Dividir la potencia de radiación por el área de la superficie de la flama

La fracción de irradiación normalmente se considera en un rango de 0.15 a 0.35.

*Factor geométrico de visión:* La radiación térmica que recibe un objetivo está determinada por un factor geométrico de visión. Para establecer este factor existen varias ecuaciones en las que se consideran diferentes contornos de la superficie emisiva.

*Transmisividad atmosférica:* La transmisividad atmosférica es un factor importante que comúnmente se considera de 20 a 40% del flujo de calor que puede ser absorbido o disperso en la atmósfera en una distancia de 100 metros bajo condiciones típicas de la atmósfera.

#### 4.4 MODELOS DE EFECTOS

Los modelos de efectos se emplean para establecer las consecuencias de un incidente, las consecuencias que se analizarán dependen del propósito u objetivo del estudio. Como indicadores de las consecuencias en individuos puede emplearse la muerte o lesiones; en el caso de propiedades se pueden utilizar las pérdidas económicas. Para expresar el riesgo se utilizan medidas comunes para cada tipo de efecto. Un método para establecer las consecuencias resultado de un incidente es el modelo *de efecto directo*, el cual predice los efectos sobre las personas o estructuras basados en criterios predeterminados, por ejemplo se considera que una persona muere cuando se expone a determinada concentración de un gas tóxico. Esto se considera a pesar de que las consecuencias pueden representarse de una manera más realista como funciones de distribuciones de probabilidad. El utilizar funciones de distribución de probabilidad para establecer las consecuencias de un incidente es otro método posible (AIChE, 1989).

#### 4.4.1 Efectos de material tóxico

En la evaluación de las consecuencias de los efectos de un gas tóxico existen diferentes razones que dificultan una evaluación precisa en la respuesta de las personas a exposiciones agudas a gases tóxicos; en primer lugar se encuentra la diferente tolerancia que presentan las personas, en segundo lugar el que la severidad depende de la intensidad y duración de la exposición. En tercer lugar, para muchas sustancias no se ha determinado la respuesta que presentan las personas a su exposición. Como cuarta razón, muchos incidentes involucran liberaciones de más de una sustancia, y no existe una regla para determinar los efectos que esta sinergia, antagonismo o adición de efectos que se producen. Por último no existen protocolos para pruebas toxicológicas que permitan relacionar con exactitud los efectos sobre animales y los correspondientes a las personas.

Existen diferentes medidas para predecir la posibilidad de que una liberación de material peligroso que pueda resultar en muerte o en lesiones severas de personas expuestas, un ejemplo de estas medidas son las concentraciones inmediatamente peligrosas para la vida y la salud (IDLH siglas en inglés). Otra forma de establecer las consecuencias es mediante la utilización de una función de probabilidad (función Probit) que establece una relación entre la dosis y la respuesta, y permite cuantificar el número de muertes que son más probables de ocurrir dada una exposición. El método Probit puede utilizarse para aproximadamente 20 sustancias de las cuales existe suficiente información, esta información se basa en experimentos con animales, por lo cual existe una incertidumbre al aplicarse a personas. Los modelos Probit pueden emplearse para estimar las consecuencias debidas a la exposición para emisiones de tipo continuo o emisiones súbitas o instantáneas (puff). Los modelos de dispersión se utilizan para determinar contornos que especifiquen la concentración de un gas en función del tiempo, localización y distancia con respecto al punto de liberación. Una vez que se tiene determinada esta información se utilizan los modelos de efectos para establecer las consecuencias. Las zonas de afectación pueden determinarse de acuerdo a la concentración del gas y la duración de la exposición de tal manera que igualen o rebasen un nivel establecido (por ejemplo el IDLH) (AIChE, 1989).

#### 4.4.2 Efectos térmicos

Existen dos maneras principales de estimar los efectos debidos a la radiación (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ El uso de tablas o gráficas elaboradas a partir de datos experimentales o de incidentes ocurridos.
- ◆ El uso de modelos teóricos basados en la fisiología de la respuesta de la piel a la radiación.

Los modelos de efectos térmicos estiman la probabilidad de muerte o lesiones a las personas, así como de daños a propiedades debido a la radiación emitida por la combustión de un material. Existen diferentes tablas y gráficas que relacionan la intensidad de la radiación con los efectos y el tiempo de exposición; además se han desarrollado modelos Probit para estimar los niveles de daño para una exposición o dosis determinada, sin embargo estos modelos se utilizan menos que los correspondientes para efectos tóxicos (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Los modelos para la estimación de los efectos debidos a la radiación requieren en su mayoría el determinar los niveles de radiación y la duración de la exposición. Los niveles de radiación pueden obtenerse de los modelos para evaluación de consecuencias por fuego, la duración a partir de los modelos de consecuencias (por ejemplo para BLEVE) y por la estimación del tiempo necesario para extinguir el fuego. A partir de los anteriores parámetros se estima el nivel de daño para una exposición determinada. En lugares con una insolación elevada es necesario sumar la intensidad de la radiación solar a la estimada por los modelos de consecuencias para obtener la exposición total (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

#### 4.4.3 Efectos de explosiones

Los modelos para efectos de explosiones se utilizan para predecir el impacto de las ondas de sobre presión, y de proyectiles en personas y objetos. La simulación de los efectos de una explosión está basada en los modelos para explosión de TNT. En las explosiones de nube de vapor las características de la detonación

difieren de las explosiones de TNT ya que las explosiones de nube de vapor son generalmente deflagraciones. La intensidad y forma de una onda debido a una súbita liberación de un fluido depende de diversos factores que incluyen el tipo de fluido liberado, la energía que produce la expansión, la tasa en que la energía se libera, la forma del recipiente, tipo de ruptura y las características de los alrededores. La duración de la sobrepresión es importante para determinar los efectos sobre estructuras. La fase de presión positiva de la onda puede abarcar de 10 a 100 metros para explosiones de nube de vapor confinada típica. Un mismo nivel de sobrepresión puede tener un efecto diferente dependiendo de la duración, si la duración de la detonación es menor que el tiempo de respuesta de las estructuras es posible que la estructura soporte aun altas sobrepresiones (AIChE, 1994).

Existe una ecuación Probit que relaciona el daño estructural con el pico de sobrepresión de acuerdo a su probabilidad, asimismo existe una relación para determinar la ruptura de vidrios con el pico de sobrepresión, ambas basadas en datos experimentales y de incidentes. Los efectos sobre las personas debidas a la sobrepresión depende del pico o máximo alcanzado, la tasa de elevación y de la duración de la fase positiva. El efecto del daño para un pico de sobrepresión dado es mayor si el levantamiento es rápido. El problema de determinar los efectos sobre las personas debido a una explosión es complejo, sin embargo existe una extensa literatura sobre los grados de daño asociados con diferentes efectos de la explosión. Utilizando algunos de estos datos Eisenberg desarrollara diferentes ecuaciones Probit para los efectos de una explosión. Así existen ecuaciones Probit para determinar el número de muertes probables debidas al pico de sobrepresión, para determinar la ruptura de tímpanos y que relacionan daños serios debido a proyectiles, particularmente cristales, debido al impulso explosivo; a partir de la primera se pueden desarrollar ecuaciones Probit para estimar la muerte y daños severos debido a la proyección o traslado del cuerpo de las personas debido a la onda de choque (AIChE, 1989; AIChE, 1994).

#### 4.5 ESCENARIOS

Las consecuencias de un incidente dependen de las condiciones de la liberación y de las condiciones particulares del sitio en el momento de la liberación. En el transporte de materiales peligrosos es necesario establecer los posibles escenarios que generaría una liberación accidental, a partir de éstos podrán estimarse las consecuencias potenciales. Los escenarios posibles pueden agruparse en (EPA, 1999):

- ◆ Escenario de liberación en el peor caso
- ◆ Escenarios alternativos

El escenario para el peor caso puede definirse como la liberación de la mayor cantidad de un material peligroso que resulta en la mayor distancia, a partir de la fuente, hasta un nivel de interés. De una manera general la distancia estará determinada para una nube de material tóxico, radiación térmica debido a un incendio o nivel de sobrepresión para una explosión desde el punto de origen de la fuga hasta un punto en que los efectos sobre las personas o instalaciones no sean serios (o de interés) de acuerdo a la exposición.

Los escenarios alternativos son aquellos que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia que el escenario del peor caso. Las características propuestas en la tabla siguiente para el escenario del peor caso es una combinación de condiciones que ocurren rara vez y que son poco probables que persistan un tiempo de duración largo, por lo que los escenarios alternativos contemplan condiciones más probables y menos conservadoras. Además, se debe contemplar que las incertidumbres debidas al modelo de simulación empleado pueden aumentar las distancias estimadas ya que las condiciones (estabilidad, velocidad del viento y rugosidad) no permanecerán constantes en segmentos de camino largos. Debido a que el escenario del peor caso, aunque probable, puede sobrestimar el valor de las distancias de afectación, pueden utilizarse preferentemente las distancias obtenidas en los escenarios alternativos para la planeación, preparación y atención de emergencias (EPA, 1999).

**Tabla 4.2 Parámetros de referencia para la determinación de escenarios en el análisis de consecuencias**

Escenario para el peor caso	Escenarios alternativos
<i>Niveles de interés</i>	
En sustancias inflamables el nivel de interés para determinar la zona de riesgo es: 1 lb/pulg <sup>2</sup> en explosión de nube de vapor, y zona de amortiguamiento 0.5 lb/pulg <sup>2</sup> . Debido a radiación térmica el valor es 5 KW/m <sup>2</sup> o 1500 BTU/ft <sup>2</sup> h para zona de riesgo y zona de amortiguamiento de 1.4 KW/m <sup>2</sup> o 440 BTU/ft <sup>2</sup> h. Con sustancias tóxicas emplear el valor para inmediatamente peligroso a la vida y la salud (IDLH) para determinar la zona de riesgo y TLV <sub>15</sub> o TLV <sub>8</sub> para zona de amortiguamiento.	En sustancias inflamables el nivel de interés para determinar la zona de riesgo es: 1 lb/pulg <sup>2</sup> en explosión de nube de vapor y zona de amortiguamiento de 0.5 lb/pulg <sup>2</sup> . Debido a radiación térmica el valor es 5 KW/m <sup>2</sup> o 1500 BTU/ft <sup>2</sup> h para zona de riesgo y zona de amortiguamiento de 1.4 KW/m <sup>2</sup> o 440 BTU/ft <sup>2</sup> h. Con sustancias tóxicas emplear el valor para inmediatamente peligroso a la vida y la salud (IDLH) para determinar la zona de riesgo y TLV <sub>15</sub> o TLV <sub>8</sub> para zona de amortiguamiento.
<i>Estabilidad, Velocidad del viento</i>	
Estabilidad F y velocidad del viento de 1.5 m/s. Puede utilizarse otra velocidad del viento y estabilidad siempre y cuando se demuestre que los datos están de acuerdo a mediciones meteorológicas locales	Estabilidad D y velocidad del viento de 3 m/s. Puede utilizarse otra velocidad del viento y estabilidad siempre y cuando se demuestre que los datos están de acuerdo a mediciones meteorológicas locales.
<i>Temperatura ambiente y humedad</i>	
Temperatura de 25 grados centígrados y 50% de humedad. Cuando se tienen registros confiables puede utilizarse la temperatura máxima diaria y la humedad promedio para el caso de nube tóxica.	Temperatura de 25 grados centígrados y 50% de humedad. Cuando se cuenta con registros meteorológicos locales puede utilizarse los valores correspondientes.
<i>Altura de la liberación</i>	
Nivel del suelo.	Nivel del suelo.
<i>Rugosidad de la superficie</i>	
Utilizar área urbana (terreno con obstáculos) o área rural (terreno plano) según corresponda.	Utilizar área urbana (terreno con obstáculos) o área rural (terreno plano) según corresponda.
<i>Gas denso o gas neutralmente flotante</i>	
Determinar el comportamiento del gas de acuerdo a sus propiedades.	Determinar el comportamiento del gas de acuerdo a sus propiedades.
<i>Temperatura a que la sustancia es liberada</i>	
Para líquidos diferentes a gases licuados por refrigeración, considerar que la liberación ocurre a la temperatura máxima diaria de acuerdo a registros meteorológicos. Para gases licuados por refrigeración considerar el punto de ebullición.	Utilizar lo establecido para el peor caso o establecer la temperatura para el escenario establecido.

Fuente: Offsite consequence analysis guidance; EPA, 1999.

# CAPÍTULO V

## ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

Una etapa esencial en el proceso de estimación del riesgo en el transporte de materiales y residuos peligrosos es la obtención de frecuencias y probabilidades de los eventos no deseados. En este capítulo se describe de manera resumida las técnicas empleadas para la estimación de frecuencias y probabilidades de accidentes e incidentes, asimismo se describen los factores que contribuyen a que suceda un accidente, consideraciones para el análisis de los datos sobre accidentes e incidentes y un procedimiento para la estimación de la tasa de accidentes.

### 5.1 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA Y LA PROBABILIDAD DE ACCIDENTES E INCIDENTES

El proceso de evaluación del riesgo implica la estimación de las frecuencias, probabilidades y consecuencias de eventos no deseados. Dentro de las metodologías o técnicas para la estimación de frecuencias y probabilidades se encuentran (Abkowitz y Cheng, 1989):

- ◆ Registros históricos e inferencia estadística
- ◆ Árbol de fallas
- ◆ Árbol de eventos
- ◆ Modelación analítica y simulación
- ◆ Estimación subjetiva
- ◆ Análisis bayesiano

Sin embargo, debe considerarse que en algunos casos las técnicas anteriores no pueden combinarse entre sí o complementarse para la obtención de frecuencias y probabilidades.

#### 5.1.1 Registros históricos e inferencia estadística

La frecuencia de accidentes e incidentes puede estimarse a partir de registros históricos, para esto es necesario que el número de accidentes e incidentes ocurridos sean referido a un periodo de exposición. Así, es posible establecer la frecuencia de un evento tope sin requerir de una detallada modelación de la frecuencia por medio de árbol de fallas o árbol de eventos. La frecuencia de un evento en el transporte de materiales y residuos peligrosos puede expresarse como el número de eventos esperados por unidad de distancia recorrida (evento/vehículo-kilómetro), también puede hacerse con respecto a una unidad de volumen y de distancia (evento/tonelada-kilómetro) (Abkowitz y Cheng, 1989).

La probabilidad no posee unidades y puede utilizarse para describir la posibilidad de que ocurra un evento durante un periodo específico de tiempo o la probabilidad condicional de que ocurra un evento dado que algún evento precursor ha sucedido. El concepto de probabilidad puede interpretarse de tres maneras diferentes: clásica (probabilística), frecuentista y subjetiva. El conocer la probabilidad exacta de un evento, como lo requeriría el método clásico, es muy difícil; una interpretación frecuentista es más práctica pero se requiere de un tamaño suficiente de la muestra (o población). Cada una de estas interpretaciones siguen las mismas reglas y axiomas, y pueden por lo tanto utilizarse juntas y aprovechar las fortalezas de cada una (U.S.C.G, 2000).

**Tabla 5.1 Interpretaciones de la probabilidad**

Interpretación	Descripción
Clásica	La probabilidad de un evento es la razón del número de resultados que presentan los atributos de un evento entre el número total de posibles eventos igualmente probables.
Frecuentista	La probabilidad de un evento está dado por el límite de su frecuencia relativa cuando el número de muestras aumenta.
Subjetiva	La probabilidad de un evento es una medida del grado de confianza que posee una persona en que suceda dicho evento.

Fuente: U.S. Coast Guard, 2000

La técnica de análisis de frecuencias basado en registros histórico es apropiado cuando las causas de falla son muy diversas y difíciles de predecir, como es el de los incidentes en transportación. Asimismo para que una estimación de la frecuencia sea confiable, se requiere que los registros empleados sean suficientes en número, precisos y aplicables al proceso particular en análisis (Abkowitz y Cheng, 1989).

Para obtener la frecuencia de un evento basado en registros históricos se puede emplear un método formado por cinco pasos (AIChE, 1989):

*Definición del contexto:* En este paso se deben definir los objetivos, requisitos de la base de datos, definición del sistema (rutas, vehículos, tipos de materiales, etc.), identificación de peligros, tipos de accidentes, lista de incidentes, selección de incidentes a considerarse. Obteniéndose en este paso la lista específica de los accidentes e incidentes para las cuales se estimará la frecuencia.

*Revisión de las fuentes de los datos:* Las fuentes de datos pueden ser diversas, y deben analizarse para determinar que sean completas e independientes. El periodo de tiempo para la cual existen registros debe ser suficiente para proporcionar una muestra de tamaño significativo. Las frecuencias de incidentes derivadas de listas que contengan uno o dos incidentes de un tipo particular pueden ser muy inciertas. Cuando se utilizan varias fuentes de datos los incidentes duplicados deben eliminarse.

*Revisión de la pertinencia de los datos:* Cuando los registros históricos abarcan un periodo extenso de tiempo, las condiciones en que se desarrolla el proceso (transporte, tipo de vehículos) pudieran haber sido modificados por lo cual debe revisarse la descripción del accidente o incidente para descartar las fallas sin relevancia. Por ejemplo se debe decidir cuando se separan o no los datos para diferentes tipos de vehículos, o se descartan datos para vehículos no permitidos.

*Cálculo de la frecuencia del evento:* Cuando los datos han sido confirmados como apropiados para su aplicación y, los accidentes, incidentes y la exposición (kilómetros recorridos por la unidad) son consistentes, la frecuencia del evento puede ser calculada dividiendo el número de eventos entre la exposición. Cuando los datos no son totalmente apropiados (consistentes) puede emplearse un método alternativo como es el análisis por medio del árbol de fallas.

*Validación de la frecuencia:* Es posible comparar la frecuencia del evento con una población (vehículos) que no fue empleada para la estimación de la frecuencia. Esto permite revisar posibles errores o indicar algún error producto de un inadecuado tratamiento.

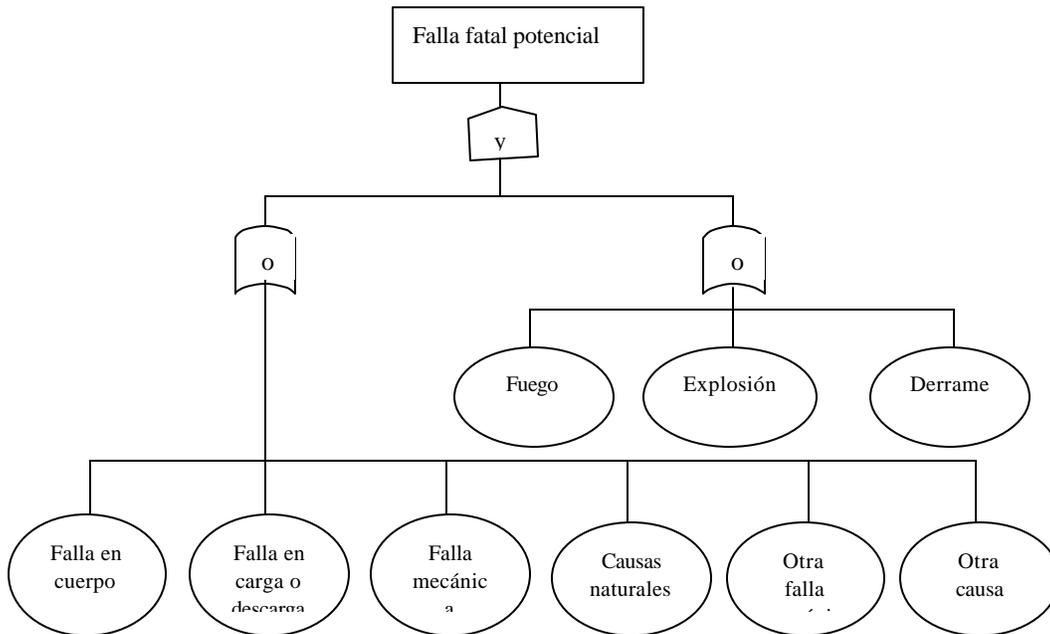
El uso de la inferencia estadística se basa en la condición de que existen suficientes datos para llevar a cabo un análisis objetivo. La inferencia estadística es común en los procedimientos para estimar el riesgo. La metodología asume que los incidentes en el sistema ocurren en forma independiente y con probabilidades constantes. De esta manera, el desempeño en el pasado puede extrapolarse para inferir una previsión del futuro. Sin embargo esta técnica presenta varios inconvenientes:

- ◆ Cuando se cuenta con un registro de los accidentes, a menudo no se tiene información para estimar el nivel de exposición (volumen transportado, distancia transportada).

- ◆ El tamaño de la base de accidentes puede ser inadecuada, al no existir un registro de datos de accidentes mantenido por un periodo de tiempo extenso, es así que la calidad del registro puede cuestionarse.
- ◆ Por último, existe una dificultad en asumir que la distribución de accidentes es constante y que no se modifica con el tiempo o con el desarrollo de nuevas técnicas, medidas de mantenimiento, etcétera. Por lo tanto, cuando la estimación del riesgo depende únicamente de la inferencia estadística (o de cualquier otro método) es necesario identificar las incertidumbres en el proceso de estimación del riesgo para poder así incorporarlas dentro del proceso de decisión.

### 5.1.2 Árbol de fallas

El análisis de árbol de fallas permite estimar la frecuencia de un incidente peligroso a partir de un modelo sobre el mecanismo de falla de los componentes básicos de un sistema. El árbol de fallas se compone por variables binarias (el evento ocurre o no) relacionadas por funciones lógicas, esencialmente “y” y “o”. En un árbol de fallas se identifica un evento tope a partir de un conjunto de eventos básicos, mediante los cuales se puede obtener la probabilidad del evento tope. En la aplicación del árbol de fallas se requiere que los eventos de interés sean desarrollados a través de todas las posibles secuencias a los eventos iniciadores. En el ejemplo de árbol de fallas ilustrado en la figura 5.1, el evento de interés es una falla que resulta potencialmente en muerte; la estructura lógica indica que esto sucederá si un accidente ocurre y tiene por resultado un derrame, incendio o explosión. La causa directa de un accidente puede ser resultado de uno de los factores identificados en la parte inferior del árbol de fallas (Abkowitz y Cheng, 1989; AIChE, 1989).



**Figura 5.1 Árbol de fallas (Abkowitz y Cheng, 1989).**

El árbol de fallas permite además de estimar las probabilidades de eventos iniciadores y eventos subsecuentes, el representar una secuencia de eventos compleja. Para elaborar un árbol de fallas se pueden seguir los siguientes pasos (AIChE, 1989):

*Descripción del sistema:* En este paso se busca comprender las causas de los eventos indeseables a través del conocimiento del funcionamiento del sistema (vehículo, contenedor, camino, etc.). En este paso se requiere revisar y disponer de información sobre: propiedades físicas y químicas del material transportado, especificaciones del vehículo y recipiente con material peligroso, operación del equipo, factor humano, factores ambientales, etcétera.

*Identificación del peligro:* Existen diferentes métodos para identificar los peligros que incluyen: análisis preliminar de peligros (PHA), ¿que pasa si? (What if ?), análisis de peligros y operatividad (Hazop), análisis de modos de falla y efectos (FMEA). Estos métodos proporcionan una lista de eventos tope.

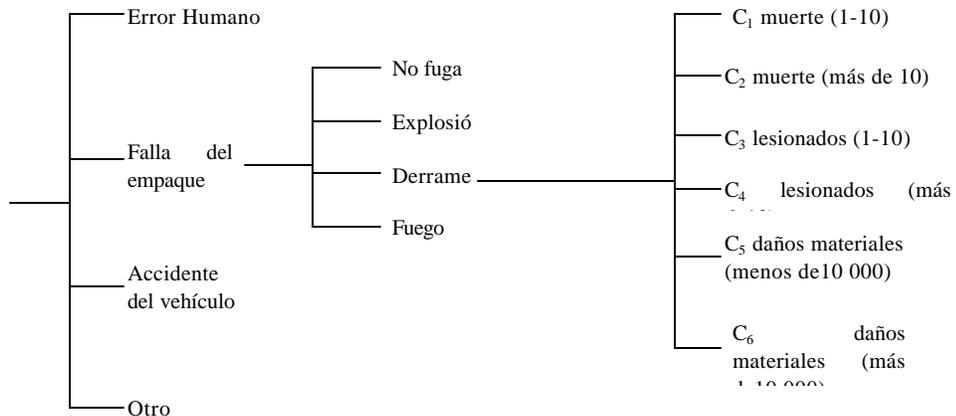
*Construcción del árbol de fallas:* Normalmente el árbol de fallas se construye considerando el evento tope y, desarrollando las causas necesarias y suficientes para originarlo junto con sus relaciones lógicas (relaciones y, o). durante este proceso se deduce qué elemento origina un evento y continúa con el proceso deductivo hasta que se tenga un conjunto de eventos básicos, que al asignárseles una probabilidad permitan obtener la probabilidad correspondiente al evento tope.

*Examen cualitativo de la estructura:* Una vez que el árbol está construido se le puede examinar cualitativamente para comprender el mecanismo de falla. Este examen proporciona información sobre los posibles modos de falla (combinación de eventos que conducen al evento tope). A este proceso se le conoce como análisis del conjunto de cortes mínimos (minimal cut set analysis). De esta manera la efectividad de las protecciones (salvaguardas) la importancia cualitativa de varios subeventos y la susceptibilidad de modos de falla comunes se destacan.

*Evaluación cualitativa del árbol de fallas:* De acuerdo a la estructura del árbol de fallas y estimando o conociendo la frecuencia de cada evento básico y de los eventos no desarrollados es posible calcular la frecuencia del evento tope.

**5.1.3 Árbol de eventos**

El árbol de eventos es un modelo lógico gráfico que identifica y cuantifica los posibles resultados que siguen a un evento iniciador. El árbol de eventos proporciona una cobertura sistemática de la secuencia temporal de la propagación del evento. Los árboles de fallas se usan a menudo para modelar las ramificaciones a partir de un nodo del árbol de eventos. Existe una diferencia del término evento iniciador entre su aplicación en el análisis de árbol de fallas y el árbol de eventos; en el primero se pueden tener muchos eventos iniciadores que conducen a un evento tope sencillo, pero un árbol de eventos tendrá solo un evento iniciador que conduzca a varios posibles resultados (Abkowitz y Cheng, 1989; AIChE, 1989).



**Figura 5.2 Árbol de eventos (Abkowitz y Cheng, 1989).**

El árbol de eventos además de poder estimar las probabilidades de eventos iniciadores y eventos subsecuentes, puede emplearse para determinar los posibles impactos de un evento.

La construcción de un árbol de eventos es secuencial y como en el análisis del árbol de fallas es de arriba a abajo. La secuencia lógica de pasos para un árbol de eventos es la siguiente (AIChE, 1989):

*Identificación del evento iniciador:* El evento iniciador es en la mayoría de los casos un evento de falla que corresponde a la liberación del material; este evento de falla puede identificarse por alguno de los métodos para la identificación de peligros. La frecuencia de este incidente puede estimarse por medio de registros históricos o análisis de árbol de fallas.

*Identificación de funciones de seguridad, factores que promueven el peligro y definición de resultados:* Una función de seguridad es un dispositivo, acción o barrera que puede interrumpir la secuencia de un evento iniciador hacia un resultado peligroso; ejemplo de funciones de seguridad son sistemas de seguridad automáticas, alarmas, etcétera. Un factor promotor del peligro puede cambiar el resultado final de un incidente (por ejemplo modificar una dispersión segura de material en la atmósfera a un incendio o una explosión de nube de vapor). Un encabezado puede utilizarse para señalar la función de seguridad o un factor promotor de peligro; esto es, las ramas de un árbol poseen valores de sí y no, y el encabezado estará determinando de que se trata. La definición de resultados de un incidente es el determinar cual es el resultado final de la secuencia: BLEVE, explosión de nube de vapor no confinada, fuego instantáneo, dispersión segura, etcétera.

*Construcción del árbol de eventos:* El árbol de eventos representa gráficamente la progresión cronológica de un incidente, para cada encabezado o nodo, dos o más alternativas pueden analizarse hasta que un resultado final se obtenga para cada nodo. Los encabezados deben indicarse en la parte superior de la hoja, sobre la rama apropiada de un árbol de eventos. Comenzando con el evento iniciador, muchos analistas etiquetan cada encabezado con una letra, así cada secuencia de eventos puede especificarse como una combinación de letras.

*Clasificación de resultados:* El objetivo de construir un árbol de eventos es identificar los eventos posibles más importantes. Cuando lo que interesa es estimar el riesgo de muerte solo los resultados que llevan a esto necesitan desarrollarse. Diferentes resultados de incidentes desarrollados a través de las ramas de un árbol de evento pueden ser iguales. Por lo tanto los resultados finales de un árbol de eventos pueden clasificarse y agruparse de acuerdo al tipo de modelo de consecuencias que se emplee para el análisis.

*Estimación de probabilidades de cada rama del árbol de eventos:* Cada encabezado en el árbol de eventos, diferente del evento iniciador, corresponde a la probabilidad condicional de algún resultado si el evento precedente ha ocurrido. La probabilidad asociada a cada una de las opciones que tiene un encabezado, pueden ser binarias o múltiples pero deben sumar 1.0. La fuente de la probabilidad condicional pueden ser registros históricos, datos ambientales, datos de confiabilidad del equipo, datos sobre confiabilidad humana, datos a opinión de expertos, etcétera.

*Calidad de los resultados:* La frecuencia de cada resultado de un incidente o accidente puede determinarse multiplicando la frecuencia del evento iniciador por la probabilidades condicionales a lo largo de la rama que conduce a un resultado final.

*Comprobación de resultados:* Al igual que con los árboles de fallas, el análisis del árbol de eventos pueden llevarnos a resultados incorrectos o inexactos, de tal manera que es importante hacer una comprobación de acuerdo al sentido común y con resultados de registros históricos.

#### 5.1.4 Modelación analítica y simulación

La modelación analítica y la simulación para la estimación del riesgo expresan la operación de un sistema en términos de parámetros funcionales que representan a los componentes del sistema y a los factores externos; las condiciones para las cuales los incidentes ocurren y las consecuencias se asocian con combinaciones

específicas de los valores de estos parámetros. En el caso de los modelos de simulación los parámetros son estocásticos y los valores se representan por distribuciones de probabilidad, a menudo derivadas de datos empíricos (Abkowitz y Cheng, 1989).

Los modelos analíticos son más simples, por lo cual se aplican principalmente a los componentes de la metodología para la estimación del riesgo, como es el desarrollo de los modelos de ocurrencia de incidentes, que se representan comúnmente como un modelo de Poisson. Un acercamiento analítico típico asume que los derrames o liberaciones son eventos independientes que suceden de manera aleatoria con respecto a la distancia recorrida por la unidad de transporte. El número de derrames  $n$  que ocurre en una distancia recorrida  $L$ , es una variable aleatoria; si se cumple una premisa de independencia, entonces  $n$  está distribuida de acuerdo a la distribución de Poisson con un parámetro  $\nu L$ :

$$P(n) = \left[ (\nu L)^n / n! \right] e^{-\nu L} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde  $\nu$  es el número promedio de derrames por unidad de distancia (kilómetro, milla, etcétera).

### 5.1.5 Estimación subjetiva

La estimación subjetiva la realizan expertos o grupos de expertos que poseen una familiaridad con el problema manejado y pueden extrapolar su experiencia y expresarlos en términos cualitativos o cuantitativos para incorporarlos al proceso de estimación de riesgo. Existen algunas publicaciones en las cuales se desarrolla la estimación subjetiva mediante índices, sin embargo la estimación cuantitativa de efectos cualitativos es un factor que debe considerarse con reserva (Abkowitz y Cheng, 1989).

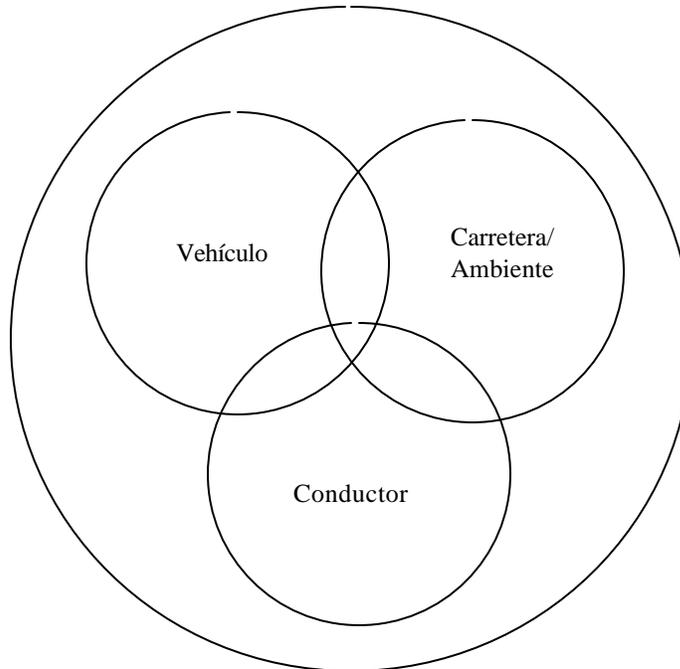
### 5.1.6 Análisis bayesiano

El análisis bayesiano se basa en la aplicación del teorema de Bayes, este análisis permite el incorporar la probabilidad previa (del accidente o incidente) y la posterior (probabilidad condicional) para la obtención de probabilidades. Además, puede diseñarse para incorporar estimaciones subjetivas en la obtención de probabilidades previas, y entonces utilizar cualquier dato empírico existente para derivar posteriormente probabilidades condicionales (Abkowitz y Cheng, 1989).

## 5.2 FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LOS ACCIDENTES

Los factores involucrados en la ocurrencia de accidentes en el transporte de materiales y residuos peligrosos pueden agruparse en: factores asociados con el vehículo, factores asociados con el camino o el ambiente, y los factores asociados con el conductor. La mayoría de los accidentes se inician por algún tipo de error humano, comúnmente una falta de atención o un mal juicio sobre las condiciones en que se realiza el transporte, de esta manera el comportamiento y desempeño del conductor se considera como la causa principal de los accidentes. Los factores relacionados con los camiones y su equipamiento como son las dimensiones del camión, peso, fallas mecánicas y operativas, desempeñan un papel de menor importancia, aunque son difíciles de separar o diferenciar en términos de las causas de accidentes (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997).

Claramente la interrelación entre los anteriores factores y su contribución a los accidentes no está definida con precisión, es por esto que en muchos de los registros sobre accidentes no se define cual de estos tres factores fue el factor determinante del accidente.



**Figura 5.3 Factores que contribuyen a los accidentes (U.S.DOT, 1997)**

### **5.2.1 Factores asociados con el vehículo**

Dentro de las particularidades de los camiones y su equipamiento se incluyen características físicas, como son el número de remolques, la longitud del remolque, capacidad de carga, desempeño dinámico del vehículo bajo condiciones de carga variables, y otros sistemas mecánicos como son el sistema de frenos y las características del motor. La capacidad de frenado para las combinaciones de camiones es un elemento de especial importancia; esta capacidad relaciona una adecuada distancia para el frenado, con el mantenimiento en el control del vehículo y la estabilidad, y está influenciado por un variado número de factores que tienen que ver con la características y diseño del equipo. Lo anterior aunque enfocado al autotransporte puede aplicarse sin dificultad al transporte ferroviario (U.S. DOT, 1997).

### **5.2.2 Factores asociados con el conductor**

Dentro de los factores asociados con el desempeño del conductor se encuentran la habilidad, experiencia y estado físico (salud, fatiga); estos factores son críticos sin importar el tipo o tamaño del vehículo. Para el traslado o transporte seguro de materiales y residuos peligrosos, es el conductor el elemento más importante. La experiencia del conductor y su entrenamiento tienen un efecto directo en la tasa de accidentes; asimismo, la falta de experiencia es un factor de importancia significativa en la pérdida de control de los vehículos y el consecuente accidente (U.S. DOT, 1997).

### **5.2.3 Factores asociados con el camino o el ambiente**

Los factores ambientales incluyen a las condiciones meteorológicas adversas, condiciones de visibilidad, tráfico, etcétera. Dentro de los factores del camino se incluyen a la clase de camino, condiciones de la carretera,

estado de mantenimiento, presencia o ausencia de señalamientos, intersecciones, barreras, etcétera. Por geometría del camino se entiende a las estructuras físicas donde operan los vehículos y que incluyen al tipo de carretera, número de carriles e intersecciones. Los vehículos de grandes dimensiones presentan dificultades adicionales en las intersecciones, rampas de entrada y salida, y con los elementos estructurales (o de diseño) de las carreteras ya que estas pueden no ser adecuadas para las dimensiones de los vehículos, sus pesos y configuraciones. Las interacciones entre el camión, la geometría del camino y la visibilidad se acentúa cuando el volumen de tráfico aumenta. Condiciones del tiempo como es la lluvia, la nieve y el hielo crean condiciones que dificultan la estabilidad y el control de los vehículos durante los cambios de dirección y frenado. La visibilidad es función de las condiciones del tiempo y de la hora, el atardecer, el amanecer y la noche incrementan la demanda de atención del conductor para tener un control adecuado del vehículo (U.S. DOT, 1997).

### 5.3 BASES DE DATOS SOBRE ACCIDENTES, INCIDENTES Y EXPOSICIÓN

Para el análisis de la base de datos sobre el transporte de materiales y residuos peligrosos se requiere hacer una distinción entre bases de datos sobre accidentes, incidentes y exposición. Las bases sobre accidentes contiene los reportes sobre accidentes de tráfico, donde cada reporte contiene o debe contener las características de un accidente en particular. Las bases de datos que interesan para el análisis de accidentes en el transporte de materiales y residuos peligrosos son aquellos que contienen datos sobre accidentes en camiones que transportan estos materiales de manera desagregada con respecto a otros tipos de accidentes (carga general, pasajeros) (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997).

Las bases de datos sobre accidentes se elaboran a partir de reportes y contienen las características de como sucedió una liberación no intencional de material peligroso. Los accidentes de mayor interés son aquellos que suceden en carreteras ya que los incidentes en las operaciones de carga y descarga de materiales en terminales y patios de maniobras no son relevantes en los análisis sobre transporte en carretera o para el análisis de rutas de transporte, aunque también pueden considerarse, analizarse e integrarse. Diferentes tipos de incidentes deben tomarse en cuenta incluyendo aquellas liberaciones de material resultado de:

- ◆ Accidentes de tráfico
- ◆ Fugas en válvulas o en el cuerpo del tanque
- ◆ Fuego o explosión

Los datos sobre accidentes e incidentes se utilizan para establecer la frecuencia con que un evento en particular ocurre. Asimismo, se requiere que estos datos correspondan (estén vinculados) con los datos sobre exposición, entendiendo por exposición a una medida de las veces que suceden accidentes o incidentes, así como el número de envíos o traslados de materiales peligrosos, toneladas trasladadas de materiales peligrosos o de una manera más apropiada vehículos-kilómetro de materiales y/o residuos peligrosos trasladados. Así, una medida del riesgo como son las tasas de accidentes ocurridos por millón de vehículos-kilómetro, se obtienen a partir de los diferentes bases de datos; sin embargo, para obtener las tasas de accidentes para un tipo específico de camión establecida para una clase de camino se requiere que el conjunto de datos sobre accidentes y exposición esté debidamente seleccionado. Es de aclararse además que los incidentes pueden ocurrir sin que suceda un accidente (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997).

Las bases de datos a utilizarse deben proporcionar la información suficiente para estimar: accidentes, incidentes, frecuencias o tasas de accidentes.

#### 5.3.1 Datos sobre accidentes de tráfico

En las bases de datos sobre accidentes se deben identificar y discriminar los accidentes en los cuales estén involucrados camiones que transportan materiales y residuos peligrosos, cuando estos camiones debido al accidente han sufrido una pérdida de contención y liberación del material, y otros resultados de interés como son lesionados, muertes, costos, etcétera.

### 5.3.1.1 Frecuencia de accidentes

Para establecer la frecuencia de los accidentes deben separarse aquellos en los cuales estén involucrados los camiones que transportan materiales y residuos peligrosos, de aquellos vehículos que no transportan dichos materiales. Sin embargo, hay que considerar que los accidentes serán reportados de acuerdo a la severidad del accidente, así para los accidentes de mayor severidad serán reportados con mayor frecuencia que los accidentes de menor severidad. Lo anterior también aplica a los accidentes en los que ha existido una liberación de material, ya que su reporte ante las autoridades variará de acuerdo a la severidad del incidente y de la cantidad de material liberado, y por lo tanto el número de accidentes podrá subestimarse. Los accidentes pueden agruparse de acuerdo a diferentes categorías o características comunes (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997):

#### *Tipo de accidente*

Los accidentes deben diferenciarse por tipos, de acuerdo tanto al número de vehículos involucrados, tipo de percance (volcadura, salida del camino, etc.) y si existe liberación de material.

#### *Configuración de camiones*

Es recomendable que las bases de datos sobre accidentes incluyan la configuración de los vehículos accidentados, ya que esto es útil para el análisis de la distribución de accidentes.

#### *Consecuencias de accidentes*

En las bases de datos se debe incluir las consecuencias de cada accidente, diferenciando para cada uno de ellos si estos fueron originados por una liberación de material o debido a un accidente de tráfico. Se debe tener cuidado al incluir las consecuencias de accidentes de todo tipo de camiones y todo tipo de material transportado.

### 5.3.2 Datos sobre incidentes

Para el análisis de incidentes se requiere considerar la información existente, para lo cual es necesario el integrarla, y tener de ésta manera una base lo más extensa posible. Además es necesario hacer una distinción entre incidentes que ocurren durante el traslado de los materiales y, aquellos que ocurren en terminales y durante las operaciones de carga y descarga.

#### 5.3.2.1 Frecuencia de incidentes

Para estimar la frecuencia de los incidentes es posible hacer una distinción entre los incidentes que ocurren en el interior de las carreteras y en sus derechos de vía, y los ocurridos fuera de las carreteras. Los incidentes que ocurren en un camino o carretera pueden agruparse de la siguiente manera (Harwood *et al.*, 1990; Saccomanno *et al.*, 1989):

- ◆ Incidentes causados por accidentes de tráfico
- ◆ Incidentes ocasionados por movimientos en la carga (en el vehículo en movimiento)
- ◆ Incidentes debido a falla en el recipiente y sus dispositivos

Los incidentes que ocurren fuera de la carretera pueden agruparse en:

- ◆ Incidentes en operaciones de carga o descarga
- ◆ Incidentes debido a la manipulación de los materiales
- ◆ Incidentes debido a un accidente de tráfico (por ejemplo: vehículo estacionado y colisión con otro vehículo)

Estas causas de incidentes pueden clasificarse de acuerdo a la severidad del accidente (consecuencias):

- ◆ Muerte
- ◆ Muerte o lesiones
- ◆ Muerte o lesiones o fuga de material tóxico
- ◆ Muerte o lesiones o explosión
- ◆ Muerte o lesiones o explosión o incendio
- ◆ Pérdida económica

#### **5.4 Procedimiento para la estimación del volumen de tráfico y tasa de accidentes**

El requisito indispensable para la evaluación del riesgo a lo largo de una trayectoria (ruta) por la cual se transportan materiales y/o residuos peligrosos, es contar con las frecuencias relativas de los accidentes; éstas deberán ser confiables para determinar las probabilidades de los diferentes eventos dado que sucedió un accidente. En la estimación de las tasas de accidentes de camiones debe considerarse el efecto que sobre la frecuencia ocasionan el tipo de camino y el tipo de área (urbana o rural), por lo tanto en el cálculo de tasas de accidentes de camiones que puedan utilizarse como valores típicos (utilizables a falta de valores para un caso particular) debe ponerse énfasis en incluir y determinar los efectos del tipo de camino y tipo de área. Para el análisis de los accidentes y el cálculo de la tasa de accidentes de camiones se requiere información sobre (Harwood *et al.*, 1990):

- ◆ Geometría del camino
- ◆ Volumen de tráfico
- ◆ Registro de accidentes

Es posible hacer una separación de los incidentes en el transporte de acuerdo al material involucrado, considerando las clasificaciones existentes para materiales y residuos peligrosos; de esta manera se obtiene una distribución de los incidentes de acuerdo a la clase de material liberado. Asimismo, los datos sobre consecuencias de incidentes deben contemplar a las muertes, lesionados y otros parámetros considerados producto de la liberación de materiales y residuos peligrosos; en estos registros se debe excluir o desagregar aquellas muertes, lesiones u otras consecuencias atribuibles a accidentes de tránsito y no a incidentes con materiales peligrosos (Harwood *et al.*, 1990).

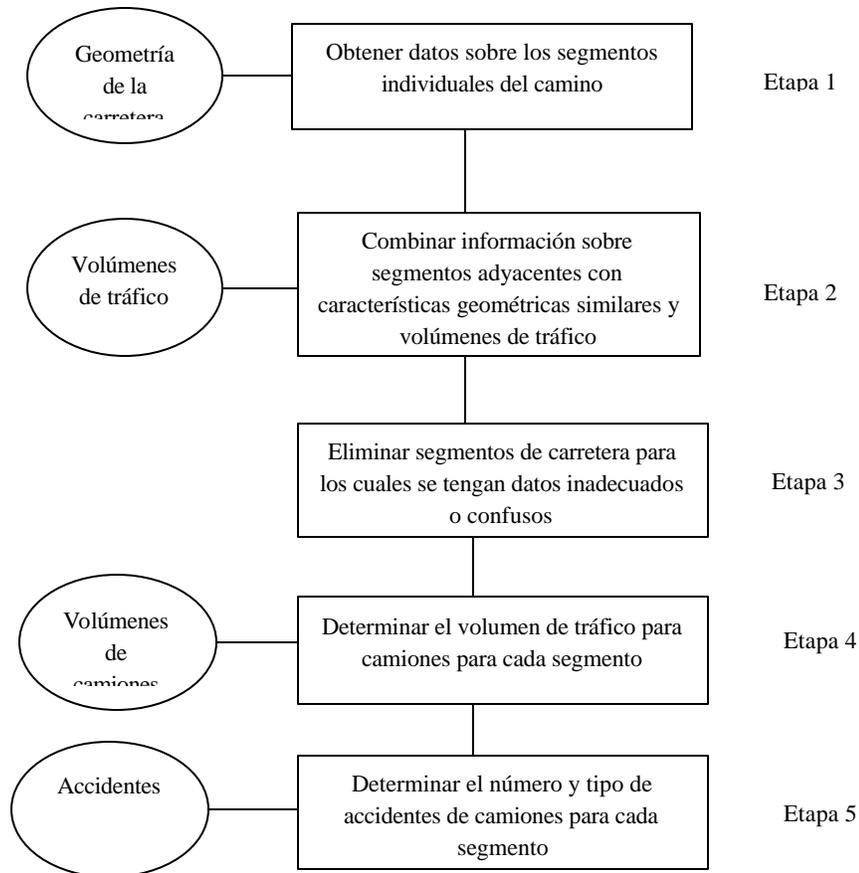
En la información sobre la geometría del camino es necesario definir las características de los segmentos (o tramos) que lo constituyen, a los cuales el volumen de tráfico y los datos sobre accidentes deberán asignarse. Las características sobre geometría del camino determinados para cada segmento deben integrar como mínimo:

- ◆ Número de carriles
- ◆ Estructura de los carriles: dividido o no dividido
- ◆ Control de acceso: de cuota o libre
- ◆ Dirección: un sentido o doble sentido
- ◆ Tipo de área: rural o urbana

Los registros sobre tráfico de vehículos se utilizan en el análisis de frecuencias para obtener el promedio anual de tráfico diario, el volumen promedio diario de camiones y el porcentaje de camiones con respecto al tráfico. Estos volúmenes de tráfico de camiones deben ser asignados o referidos a los segmentos carreteros correspondientes al igual que los datos correspondientes sobre la geometría del segmento y los datos sobre accidentes. Es de tomarse en cuenta que los registros sobre tráfico incluyen normalmente a todo tipo de vehículos (automóviles, autobuses, carga general, etc.) por lo que es necesario que estos datos se depuren para separar únicamente a los camiones y sus combinaciones (tractor-trailer) que transportan materiales y residuos peligrosos; asimismo, esto se debe realizar con los registros de accidentes. De esta manera los registros sobre volúmenes de tráfico y de accidentes para camiones serán un subconjunto de los registros del tráfico de vehículos y de los registros sobre accidentes. Sin embargo, hay que considerar que es poco posible que existan

datos suficientes para asignar valores de tráfico para todas las carreteras o vías de comunicación, principalmente las localizadas en ciudades y que no son jurisdicción federal.

La determinación sobre volúmenes de tráfico y accidentes de camiones puede realizarse mediante un procedimiento de cinco etapas y una etapa adicional de análisis de datos. En el procedimiento la principal función es relacionar el volumen apropiado correspondiente al tráfico de camiones y los datos sobre accidentes para cada uno de los segmentos de camino, de acuerdo a la clase de camino. Donde la combinación de tipo de geometría de camino y tipo de área se le denominará clase de camino (o carretera). A continuación se describen las etapas que integran el procedimiento (Harwood *et al.*, 1990).



**Figura 5.4 Procedimiento para determinar volúmenes de tráfico y accidentes de camiones (Harwood *et al.*, 1990)**

#### *Etapa 1*

La primera etapa consiste en determinar la clase de camino a que pertenece cada segmento de la ruta considerada. Esto es, determinar el tipo de geometría y tipo de área que le corresponda a cada segmento del camino. Para determinar las clases de camino puede utilizarse la clasificación contenida en el apéndice del “Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal”, en este documento solo se consideran vías de jurisdicción federal y la clasificación se basa en el tipo de geometría, consideraciones sobre uso y ubicación; sin embargo esta clasificación podrá modificarse incluyendo otros tipos de geometría y tipo de área correspondiente, como se muestra en la tabla 5.2 (Harwood *et al.*, 1990).

**Tabla 5.2 Clasificación de caminos de acuerdo al tipo de geometría y tipo de área**

Clase de camino Tipo de área <sup>1</sup>	Tipo de geometría	Nomenclatura <sup>2</sup>
Rural	Carretera 4 carriles	A4
Urbana	Carretera 4 carriles	A4
Rural	Carretera 2 carriles	A2
Urbana	Carretera 2 carriles	A2
Rural	Carretera 4 carriles red privada	B4
Urbana	Carretera 4 carriles red privada	B4
Rural	Carretera 2 carriles red privada	B2
Urbana	Carretera 2 carriles red privada	B2
Rural	Carretera 2 carriles red secundaria	C
Urbana	Carretera 2 carriles red secundaria	C
Rural	Carretera 2 carriles red alimentadora	D
Urbana	Carretera 2 carriles red alimentadora	D
Urbana	Calle de un solo sentido (en ciudad) <sup>3</sup>	

<sup>1</sup> Referencia al tipo de área no incluida en el “Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal”.

<sup>2</sup> La nomenclatura fue tomada del “Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal”, sin embargo en ésta no se hace diferenciación con respecto al tipo de área.

<sup>3</sup> No considera en la clasificación incluida en el “Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal”.

La nomenclatura incluida en la tabla anterior se incluye en el *Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*; sin embargo, en dicho reglamento no se hace referencia al tipo de área por la cual el camino atraviesa, así es posible modificarla para que esta característica se considere e identificar con precisión la clase de camino que corresponde a cada segmento de la carretera. Además, pueden incluirse categorías adicionales para calles, avenidas, etcétera, localizadas en zonas urbanas no contempladas en el reglamento ya sea por no ser de jurisdicción federal u otra causa.

#### Etapa 2

Los segmentos de la carretera que presentan una longitud relativamente menor al promedio de las longitudes de los demás segmentos considerados, puede sumarse siempre y cuando los segmentos adyacentes sean de igual tipo de geometría, presenten otras similitudes y posean un volumen de tráfico promedio diario que por ejemplo, no difiera en 20%. Cuando esta operación se realice los volúmenes de tráfico promedio diario pueden combinarse de la siguiente manera (Harwood *et al.*, 1990):

$$VTPD = \frac{(VTPD_1)L_1 + (VTPD_2)L_2}{L_1 + L_2} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde:

VTPD: Volumen de tráfico promedio diario de los segmentos unificados, en vehículos/día

VTPDi: Volumen de tráfico promedio diario de cada segmento *s* considerado, para *i*=1,2 en vehículos/día.

Li: Longitud de cada segmento *s* considerado para *i*=1,2

*Etapa 3*

Los segmentos para los cuales los datos sobre volumen de tráfico y sobre accidentes en caminos no puedan obtenerse o que no ajusten dentro de las categorías para clase de carretera se deberán eliminar del análisis.

*Etapa 4*

Los volúmenes de tráfico de camiones se obtienen para los segmentos a partir de los registros sobre volúmenes de tráfico, estos datos se multiplica por la longitud del segmento y por 365 días para obtener el recorrido anual de camiones-kilómetro (vehículos-kilómetro) en cada segmento:

$$RAC_s = VPDC_s \times L_s \times 365 \quad s=1,2 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde:

- RACs: Recorrido anual de los camiones en el segmento  $s$ , en vehículos-kilómetro  
 VPDCs: Volumen promedio diario de camiones por día en el segmento  $s$  en vehículos/día

*Etapa 5*

Del total de registros sobre accidentes se obtienen los datos sobre accidentes de camiones. Los accidentes de camiones se clasifican por año, severidad del accidente y tipo de accidente; la severidad del accidente se refiere a una clasificación previamente establecida, por ejemplo: accidente debido a colisión de uno o más vehículos, accidente sin colisión, etcétera. En esta etapa se determina la localización de cada accidente referido con respecto al kilómetro del camino donde sucede el accidente, severidad del accidente y tipo de camino; paso siguiente se suma el total de accidentes para cada segmento del camino de acuerdo al año y tipo de accidente. De esta manera se obtienen datos para cada segmento sobre: el volumen de camiones y accidentes de camiones ocurridos, para posteriormente realizar un análisis de los datos y calcular la tasa de accidentes y las probabilidades de fuga o liberación. En esta etapa el analista deberá considerar de acuerdo a la calidad de los registros existentes, si dentro del volumen de tráfico considera a los diferentes combinaciones de caminos y la posibilidad de hacer el análisis de manera integrada (todos los tipos de arreglos de camiones) o diferenciada (para diferentes tipos de arreglos de camiones).

Los registros de accidentes pueden agruparse de acuerdo al tipo de accidente para un periodo de tiempo, considerando lo siguiente (Harwood *et al.*, 1990):

- ◆ Clase de camino
- ◆ Tipo de área
- ◆ Tipo de geometría
- ◆ Accidentes para un solo vehículo sin colisión
  - Volcadura en camino
  - Volcadura fuera del camino
  - Salida del camino
  - Otro tipo
- ◆ Accidente para un solo vehículo con colisión
  - Colisión con vehículo estacionado
  - Colisión con vehículo en movimiento
  - Colisión con objeto fijo
  - Colisión con ferrocarril
  - Colisión con ganado
  - Otro tipo
- ◆ Accidente para más de un vehículo con colisión
  - Colisión con camión
  - Colisión con automóvil
  - Colisión con autobús
  - Otro tipo

Así del análisis por tipo de accidente se puede obtener la frecuencia y/o la probabilidad correspondiente.

Para el cálculo de las tasa de accidentes de camiones para cada clase de camino, se utilizarán las siguientes variables (Harwood *et al.*, 1990; Erkut y Verter, 1995):

- ◆ Clase de camino
- ◆ Tipo de área
- ◆ Tipo de geometría
- ◆ Longitud total recorrida por los camiones, en kilómetros
- ◆ Número de secciones o segmentos considerados
- ◆ Volumen promedio diario de camiones, en vehículos/día
- ◆ Número de accidentes ocurridos
- ◆ Distancia recorrida por los vehículos considerados, en vehículo-kilómetros

Las variables anteriores permitirán realizar el cálculo de la tasa de accidentes en camiones expresado como accidentes/vehículo-kilómetro. Asimismo se podrá apreciar el efecto de las dos variables principales relacionadas con el transporte de materiales y residuos peligrosos (tipo de camino y tipo de área) sobre la tasa de accidentes en camiones.

Existen además otras variables que afectan a las tasas de accidentes entre las que se incluyen: ancho de carril, rampas, peraltes, intersecciones, etcétera; las cuales pueden incorporarse para la obtención de las tasas de accidentes, sin embargo la inclusión de estas variables requerirá de registros más detallados, un proceso más laborioso y la utilidad del producto obtenido ha sido cuestionado por diferentes autores (Harwood *et al.*, 1989).

Puesto que la liberación de materiales peligrosos dado un accidente varía de acuerdo con los tipos de accidentes y éstos varían de acuerdo a las clases de camino, se pueden calcular a partir de los registros de accidentes, las probabilidades de liberación de materiales peligrosos de acuerdo al tipo de accidente para cada clase de camino.

Posterior a las etapas anteriormente descritas, se realiza un análisis de los datos para de esta manera obtener la tasa promedio de accidentes de camiones para cada clase de carretera; esta tasa se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente (Harwood *et al.*, 1990):

$$TPAC_j = \sum_s \frac{A_{sj}}{RAC_{sj}} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

TPAC<sub>j</sub>: tasa promedio de accidentes de camiones para la clase de carretera *j*, en accidentes/vehículo-kilómetro.

As<sub>j</sub>: número de accidentes por año en el segmento *s* correspondiente a un tipo de carretera *j*, en accidentes/año.

RAC<sub>sj</sub>: recorrido anual de los camiones en el segmento *s* perteneciente a la clase de carretera *j*, en vehículo-kilómetro/año.

La ecuación anterior se aplica a todos los segmentos y todos las clases de carretera considerados, para los cuales se cuenta con volúmenes de tráfico y datos de accidentes suficientes.

La tasa promedio de accidentes en camiones determinada para las diferentes clases de caminos, se emplearán en la evaluación del riesgo debido al transporte; asimismo, pueden utilizarse en el análisis de rutas alternativas cuando no se tienen datos específicos para cada ruta en estudio. Las tasas promedio de accidentes puede emplearse con confianza siempre y cuando se hayan calculado considerando muestras de tamaño apropiado.

## CAPÍTULO VI

### METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL RIESGO EN EL TRANSPORTE TERRESTRE DE MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

El planteamiento de metodologías y modelos para la evaluación del riesgo en el transporte es un proceso que se ha llevado a cabo por múltiples investigadores, autoridades e instituciones, este proceso se ha ido completando de acuerdo a los problemas presentados, información disponible y resultados obtenidos, de esta manera existen diferentes metodologías y modelos que pretenden no solo evaluar el riesgo a personas sino también evaluar costos, seleccionar rutas, etcétera, y que de manera general comparten principios comunes. El propósito de las técnicas o metodologías para la evaluación cuantitativa del riesgo en el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos es la estimación del riesgo en una trayectoria o ruta, para lo cual existen diferentes procedimientos, mismos que pueden simplificarse mediante la aceptación de diferentes consideraciones particulares.

En la cuantificación del riesgo debido al transporte de materiales y residuos peligrosos se determina numéricamente el riesgo a que las personas estarán expuestas; estas determinaciones es posible utilizarlas para elaborar estrategias tendientes a: minimizar riesgos y disminuir gastos relativos a la restauración por impactos al ambiente, reparación de daños a estructuras y equipos, o los debidos a la afectación a personas. A continuación se presentan conceptos básicos sobre riesgo y se desarrollan dos procedimientos para su evaluación, los cuales se fundamentan en principios comunes. La primera metodología presentada es una adaptación aplicable al transporte de la desarrollada originalmente por el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (American Institute of Chemical Engineers) y otras instituciones, para instalaciones industriales; la segunda es una integración y adaptación de las propuestas por diferentes investigadores.

#### 6.1 DEFINICIÓN DE ACCIDENTE, INCIDENTE Y RESULTADOS DE UN INCIDENTE

Un accidente puede definirse como *cualquier evento no deseado que interrumpe el traslado de materiales o residuos peligrosos y que puede provocar o no una pérdida en la contención del recipiente*. A su vez, un incidente puede definirse como: *la pérdida de contención de material o energía*; ejemplo de incidente es la liberación de 100 kg/min de amoníaco debido a ruptura en el cuerpo del tanque (AIChE, 1989).

Como resultado de un incidente se identifica a *la manifestación física de este incidente*; para el caso de materiales tóxicos el resultado de un incidente es una liberación tóxica, mientras que para materiales inflamables el resultado de un incidente puede ser una BLEVE, fuego instantáneo (flash fire), explosión de nube de vapor no confinada, etcétera. Se entiende por caso particular resultado de un incidente a: *la definición cuantitativa de un resultado simple o particular de un incidente mediante la especificación de los parámetros suficientes que permitan la distinción de este caso con respecto a otros, producto del mismo resultado de un incidente*. Ejemplo de un caso particular resultado de un incidente es la concentración de 3333 ppm de amoníaco a una distancia de 610 metros viento abajo, para una tasa de liberación de 4.5 kg/seg, estabilidad D y velocidad del viento de 2.25 km/h (AIChE, 1989).

#### 6.2 MEDICIÓN DEL RIESGO

El riesgo puede definirse como: *una medida de la pérdida económica o del daño a personas en términos tanto de la probabilidad del incidente como de la magnitud de la pérdida o daño*.

La estimación del riesgo se caracteriza por ser un proceso que inicia con la determinación del nivel de exposición (por ejemplo: número de envíos, toneladas transportadas, distancia recorrida), la frecuencia para el tipo de incidente ocurrido (por ejemplo: volcadura de autotank, pérdida de contención por un accesorio) y de las consecuencias del incidente (por ejemplo: muerte, lesiones, pérdidas económicas). La manera en que estos

componentes se definen y la medición del riesgo, dependen de la información disponible y del propósito de la evaluación del riesgo (Glickman, 1991; Erkut y Verter, 1995; Harwood *et al.*, 1990).

Para calcular de manera cuantitativa el riesgo se requiere determinar y seleccionar los incidentes a estimarse, una vez definidos estos se establecen los resultados de los incidentes y de los casos particulares resultado de cada incidente. No existe una manera única de medir el riesgo, y la medición estará determinada por los objetivos del análisis, la información y los recursos disponibles. Dentro de las formas de combinar información sobre frecuencia, probabilidad y consecuencias se encuentra la evaluación de riesgo individual y de riesgo social (AIChE, 1989).

### 6.2.1 Riesgo individual

El riesgo individual considera el riesgo para una persona ubicada en cualquier punto de la zona de impacto de un incidente, es decir el riesgo individual es el riesgo de una persona en la vecindad de un peligro, esto incluye la naturaleza del daño, la posibilidad de que ocurra el daño y el periodo de tiempo en el cual el perjuicio pueda ocurrir. El cálculo del riesgo individual en una localización geográfica próxima al lugar del incidente asume que las contribuciones de todos los casos particulares resultado de un incidente son aditivos, por lo tanto el riesgo individual total en cada localización es igual a la suma de los riesgos individuales en esa localización particular, de todos los casos particulares resultado de los incidentes. El riesgo individual puede estimarse para los individuos más expuestos, para personas en lugares específicos o para un individuo promedio en la zona de afectación obteniéndose para cada caso valores diferentes dado un mismo incidente. Dentro de las medidas de riesgo individual pueden considerarse (AIChE, 1989):

*Contornos de riesgo individual*: muestran la distribución geográfica de los riesgos individuales, es decir la frecuencia esperada de un evento que puede causar un nivel específico de daño en una localización establecida, se encuentre o no alguien presente en el sitio para sufrir el daño.

*Riesgo individual máximo*: es el riesgo de una persona o personas expuestas al riesgo mayor.

*Riesgo individual promedio*: puede determinarse de varias maneras:

- ◆ De acuerdo a la población expuesta: es el riesgo individual promediado entre la población expuesta.
- ◆ De acuerdo a la población total: es el riesgo individual promediado entre una población predeterminada, sin importar si toda la gente esta expuesta.
- ◆ De acuerdo a las horas de exposición sobre horas trabajadas: el riesgo individual de una actividad puede calcularse de acuerdo a la duración de la actividad o puede promediarse entre un día de trabajo.

El riesgo individual expresa el riesgo de muerte o lesiones serias debidas a la exposición de un individuo en la cercanía de una fuente de peligro, y se representa normalmente en forma de contornos de iso-riesgo. Para el caso del transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos el riesgo individual puede representarse como un trazo (del riesgo individual) en forma transversal a lo largo de la trayectoria del camino, de esta manera se obtienen líneas de riesgo separadas a una distancia perpendicular a la trayectoria del camino. Cuando la trayectoria (o ruta) atraviesa o se aproxima a poblados, asentamientos humanos o cualquier otro punto de interés particular, los contornos de riesgo individual deberán calcularse con mayor detalle (Erkut y Verter, 1995).

### 6.2.2 Riesgo social

Riesgo social es una medida de riesgo a un grupo de personas, se expresa frecuentemente en términos de la distribución de frecuencias de eventos que presentan múltiples resultados de incidentes. El riesgo social es una medida del peligro potencial que posee una actividad para los individuos localizados dentro de una zona de impacto; en el caso del transporte la zona de impacto se encuentra a lo largo de la ruta, e incluye a las personas en áreas adyacentes a la misma, además puede incluirse a quienes comparten la ruta. Para el cálculo del riesgo social se emplea la misma información sobre frecuencias y consecuencias que el riesgo individual; adicionalmente el riesgo social requiere para su estimación la definición de la población en riesgo alrededor de

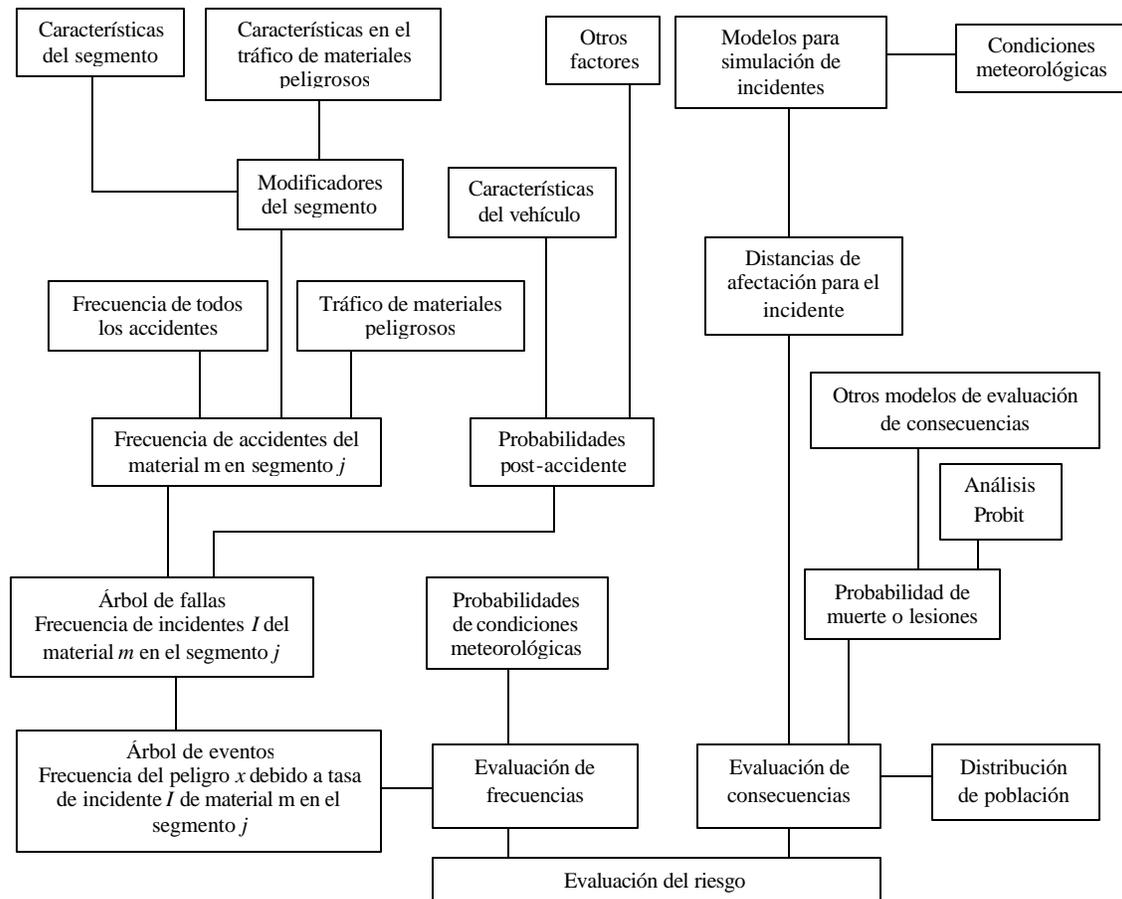
la trayectoria considerada. Para el análisis detallado del riesgo social se requiere información específica de la población próxima a la ruta, que puede incluir:

- ◆ Información sobre el tipo de población (ejemplo: residencial, oficina, escuelas, etc.) para evaluar los factores de mitigación.
- ◆ Información sobre comportamientos horarios.
- ◆ Información sobre efectos de acuerdo a días de la semana (para instalaciones industriales, educativas o recreativas).
- ◆ Información sobre el porcentaje de tiempo que la población se encuentra en el interior de sus casas, para evaluar factores de mitigación.

Existen diferentes maneras de presentar el riesgo social, la más frecuentemente utilizada es la curva  $F-N$  o gráfico Frecuencia-Número de muertes. El riesgo social es particularmente importante cuando se evalúa el riesgo a poblaciones, como son las áreas de alta densidad poblacional a lo largo de la trayectoria o ruta de transporte. Asimismo, en el cálculo del riesgo social debe reflejarse con la mayor precisión posible, la situación real en términos de las características de la distribución de la población, el tipo de vivienda o construcción, la habilidad de la gente para evacuar el sitio, las fuentes de ignición y las condiciones meteorológicas (AICHe, 1989).

### 6.3 MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN EL TRANSPORTE

En el desarrollo de la evaluación del riesgo en el transporte se consideran los componentes mostrados en la figura 6.1, estos componentes se integran en las diferentes metodologías o técnicas establecidas con este propósito.



**Figura 6.1 Componentes para la evaluación del riesgo en el transporte terrestre de materiales peligrosos (Saccomanno et al., 1992)**

Los modelos diseñados para determinar el riesgo en el transporte de materiales peligrosos incluyen las propiedades y características de la infraestructura empleada para esta actividad que influyen en la estimación de las consecuencias y las probabilidades de los accidentes. Existen modelos ya desarrollados que integran de manera modular los componentes anteriores para la evaluación del riesgo en el transporte, y que de forma general pueden estar constituidos por los siguientes módulos (Neuhauser *et al.*, 2000; Leeming y Saccomanno, 1994):

#### *Definición de los segmentos de la ruta*

El modelo debe discriminar a lo largo de la ruta las porciones que presentan igual clase de camino; asimismo para una trayectoria sobre una determinada clase de camino debe hacer una partición de acuerdo a la longitud y las áreas contiguas a los segmentos. Los segmentos pueden determinarse de acuerdo a la densidad de población de las áreas contiguas; así a cada segmento de la ruta de longitud determinada, se le asigna una densidad de población.

#### *Distribución de la población*

En este módulo se determinan las diferentes poblaciones que pueden verse afectadas por un accidente o incidente, una es la que se localiza fuera del camino y la otra es la que comparte el uso del camino o carretera con el vehículo que transporta el material peligroso. La población ubicada fuera del camino puede considerarse, de acuerdo a la información disponible, como distribuida uniformemente o no distribuida uniformemente. Cuando se considera que la población se encuentra distribuida uniformemente en el segmento analizado puede utilizarse la densidad de población, que tendrá un valor de cero cuando el área adyacente esté deshabitada. Para determinar la población que comparte el camino con el vehículo que transporta el material peligrosos se pueden identificar tres grupos:

- ◆ Personas en vehículos que transitan en la misma dirección
- ◆ Personas en vehículos que transitan en dirección contraria
- ◆ Personas en vehículos que transitan en la misma dirección, pero que rebasan a la unidad de transporte de materiales peligrosos

#### *Probabilidad del accidente*

A este módulo corresponde establecer las probabilidades del accidente contemplado, para las diferentes categorías de severidad, y estimar la probabilidad de ocurrencia de los accidentes e incidentes para cada segmento de la ruta identificado en el análisis. De esta manera, se establece la probabilidad de un accidente para un determinado modo de transporte (ferroviario, carretero, etc.) y las probabilidades condicionales correspondientes dado que ha sucedido un accidente. Los valores empleados normalmente se derivan de datos históricos, pero no necesariamente. Las probabilidades condicionales asociadas con los accidentes, deben multiplicarse con la probabilidad del accidente. Las probabilidades condicionales deben estar asociadas con cada una de las categorías de severidad para la modalidad de transporte correspondiente; asimismo, estas probabilidades pueden desarrollarse de acuerdo a uno o más árboles de eventos. Las probabilidades de muerte debido al accidente también pueden obtenerse a partir de datos históricos.

#### *Modelos de simulación y determinación de consecuencias*

Las consecuencias deben calcularse con base al accidente, lo que hace a los cálculos independientes de la manera en que el análisis se estructuró. La estimación de consecuencias es una metodología usada para determinar el daño potencial de un incidente específico. Un incidente (por ejemplo ruptura de un tanque con líquido inflamable a presión) puede tener resultados diversos; estos resultados del incidente son analizados utilizando los modelos de fuente, dispersión, explosión y fuego. Los modelos de fuente y dispersión proporcionan información cuantitativa sobre las tasas de liberación y la dispersión de vapores para diferentes niveles de concentración. Los modelos de fuego y explosión transforman la información sobre una nube de material inflamable en los peligros potenciales tales como niveles de radiación y ondas de sobrepresión. Los modelos de efecto convierten los resultados de un incidente en efectos sobre las personas.

### *Modelos para determinar la exposición*

La naturaleza de los efectos sobre la salud debidos a la exposición con materiales peligrosos depende de la dosis total y de la tasa con que fue suministrada la dosis, cuando ésta excede a determinado valor umbral se presentan efectos agudos. La variabilidad en la respuesta de la población expuesta y la variabilidad en la atención médica dificultan el definir un umbral para mortalidad. El impacto a la salud debido a un incidente varía de acuerdo a la severidad, a la densidad de población a lo largo de la ruta o segmento y las condiciones ambientales. Para cada grado de severidad se hace la estimación del número de personas afectadas de acuerdo, al producto la probabilidad de exposición a una concentración o radiación potencialmente letal y de la frecuencia promedio para cada grado de severidad de una liberación. Adicionalmente puede graficarse la frecuencia de la exposición contra el número de personas afectadas.

### *Cálculo del riesgo*

Para cada segmento se deben realizar los cálculos de cada accidente, severidad del accidente y densidad de población de la zona. Las probabilidades de accidentes y la densidad de población pueden variar para cada segmento de la ruta por lo cual se deben determina de manera individual. Los valores de las consecuencias se multiplican por la probabilidad de ocurrencia; la suma de los riesgos para cada segmento resulta en el riesgo total debido al accidente. Los riesgos asociados a cada resultado de incidente se calculan separadamente y se suman posteriormente.

Ejemplos de modelos integrales son: RISKCHEM desarrollado por la Universidad de Illinois y Argonne National Laboratory de los Estados Unidos de América, Transport RISKAT desarrollado por Health and Safety Executive de Inglaterra, y RADTRAN desarrollado por Sandia National Laboratories en los Estados Unidos de América, este último para el transporte de materiales radiactivos; los modelos anteriores poseen diferencias en la manera de evaluar el riesgo, y en algunos casos en la manera de expresarlo.

## **6.3.1 Incertidumbre en los modelos de evaluación de riesgo**

En los modelos para la estimación cuantitativa del riesgo en el transporte de materiales peligrosos se reconoce que existe una incertidumbre en la estimación del riesgo, y que dada la naturaleza de los procedimientos para estimar el riesgo la incertidumbre no puede ser completamente eliminada. Debido a que la incertidumbre en la estimación del riesgo varía con el número de casos (accidentes, incidentes) reportados para validar las estimaciones de un modelo, la incertidumbre asociada con las consecuencias de eventos de baja probabilidad y alta consecuencia es posible que sea mayor que la presente en eventos de alta frecuencia y baja consecuencia. Lo anterior hace necesario el análisis de las incertidumbres, por lo que se requiere que las medidas de riesgo se definan claramente y los resultados se refieran dentro de límites de confianza (Saccomanno *et al.*, 1993; Saccomanno *et al.*, 1994).

Desde un punto de vista estadístico pueden considerarse dos tipos de incertidumbre: incertidumbre en la estimación del riesgo e incertidumbre en el proceso. El primer tipo es una incertidumbre acerca del conocimiento en el valor de las entradas y sus parámetros; el segundo se refiere a que el riesgo puede tratarse como una variable aleatoria, que tiene un rango de posibles valores tendientes a una media.

La incertidumbre en la cuantificación del riesgo puede deberse a los siguientes factores (Saccomanno *et al.*, 1994):

- ◆ Error de medición: expresado como el rango dentro del cual un parámetro se conoce que varía dado un nivel de confianza.
- ◆ Incertidumbre en el modelo para la representación del fenómeno o proceso.
- ◆ Incertidumbre debido a cuando un parámetro representa o no un efecto a ser incluido en la estimación.
- ◆ Omisión de posibles causas de riesgo debido a un análisis incompleto.

Estas incertidumbres comúnmente se manejan de alguna de las siguientes maneras (Saccomanno *et al.*, 1994):

- ◆ Uso de la mejor estimación de los datos para los parámetros a ser empleados en la estimación del riesgo.
- ◆ Equivocarse hacia el lado de la seguridad, lo anterior indica una subestimación o sobrestimación de los valores a utilizarse, e implica un mayor costo debido a las posibles decisiones a tomarse.
- ◆ Análisis de sensibilidad de los valores o entradas, se dirige a establecer como rangos en los valores de determinadas entradas pueden afectar la estimación del riesgo, sin enfocarse específicamente a la veracidad de estas últimas.
- ◆ Análisis estadístico de todos los valores para los parámetros considerados y de los resultados; sin embargo, la información requerida puede no estar disponible haciendo el análisis inadecuado o imposible.

## 6.4 PRIMERA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN EL TRANSPORTE

La evaluación del riesgo que presenta el autotransporte de materiales peligrosos es un proceso que comprende dos etapas:

- ◆ Representación del riesgo mediante un modelo cuantitativo.
- ◆ Estimación de los parámetros del modelo

A continuación se describe exclusivamente la primera etapa que corresponde al modelo de evaluación.

### 6.4.1 Evaluación del riesgo individual

El riesgo individual debido al transporte de material peligroso *RI* puede estimarse como la probabilidad de un incidente durante el transporte multiplicado por la probabilidad de que el individuo experimente las consecuencias de interés (muerte, quemaduras, etc.) como resultado del incidente. Asimismo, el riesgo individual puede calcularse para los individuos con mayor exposición, para grupos de individuos en lugares particulares o para un individuo promedio en una zona de impacto (AIChE, 1989).

La trayectoria entre los puntos de origen y destino en el transporte de materiales peligrosos puede subdividirse en segmentos (identificables mediante el subíndice *s*) en donde cada subdivisión o segmento posee características homogéneas, que influyen a la probabilidad de incidentes cuando el material se transporta. Para el cálculo del riesgo individual en una localización geográfica cercana a la trayectoria se asume que todas las contribuciones de los casos particulares resultado de los incidentes son aditivos. Por lo tanto el riesgo individual total en cada localización es igual a la suma de los riesgos individuales, en la localización, para todos los casos particulares resultado de los incidentes. De esta manera el riesgo individual debido al transporte de material peligroso *RI* puede calcularse como la suma de los riesgos asociados a cada segmento *RI<sub>s</sub>* para cada uno de los incidentes considerados (AIChE, 1989; Glickman, 1991).

$$RI = \sum_{s=1}^n RI_s \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde *s* pertenece a la trayectoria *t*.

El riesgo individual en un segmento para todos los posibles resultados de un incidente es:

$$RIs = \sum_{r=1}^n RI_{x,y,r} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

- $r$ : caso particular resultado de un incidente.
- $RIs$ : riesgo individual del segmento  $s$  debido al material  $m$  para todos los casos posibles resultados de un incidente  $roc$
- $RI_{x,y,r}$ : riesgo individual en la localización  $x,y$  cercana al segmento  $s$  para un caso particular resultado de un incidente  $r$ .
- $x,y$ : localización considerada cercana al punto del incidente.
- $n$ : número total de casos resultados de un incidente  $r$  considerados en el análisis.

Para resolver la ecuación anterior se tiene:

$$RI_{x,y,r} = f_r r f_{r,r} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

- $f_r$ : frecuencia del caso particular resultado de un incidente  $r$  de acuerdo al análisis de frecuencias en año<sup>-1</sup>.
- $r f_{r,r}$ : probabilidad de que el caso particular resultado de un incidente  $r$  resulte en una muerte en la localización  $x,y$  cercana al segmento  $s$ ; este valor se obtiene a partir de los modelos de efecto y consecuencia.

Y para la ecuación anterior:

$$f_r = FI P_{o,r} P_{oc,r} \quad \text{Ecuación 6.4}$$

- $FI$ : frecuencia de un incidente  $I$  para el cual  $r$  es un caso particular resultado de un incidente.
- $P_{o,r}$ : probabilidad de un resultado de un incidente que tenga a  $r$  como uno de sus casos particulares resultado de un incidente, ocurra dado que el incidente  $I$  ha ocurrido.
- $P_{oc,r}$ : probabilidad de que un caso particular resultado de un incidente  $r$  ocurra dado que ocurrió el incidente  $I$  y el resultado del incidente corresponde al caso particular  $r$ .
- $f_r$ : frecuencia del caso particular resultado de un incidente  $r$  de acuerdo al análisis de frecuencias en año<sup>-1</sup>.

Para el cálculo de  $f_r$  se requiere la evaluación de la probabilidad del resultado de un incidente  $P_{o,r}$  y de las probabilidades de los casos particulares resultado de un incidente ( $P_{oc,r}$ ) dada la ocurrencia de un incidente  $I$ . Por ejemplo la liberación de un material inflamable (incidente  $I$ ) puede resultar en un fuego tipo jet, explosión de nube de vapor no confinada, ignición inmediata (flash fire) o en una dispersión segura sin ignición (eventos posibles de incidentes); cada uno de estos eventos tiene una probabilidad  $P_{o,r}$  asociada. Algunos de estos incidentes pueden a su vez generar casos particulares resultado de un incidente  $r$  dependiendo de la localización de la fuente de ignición y de las condiciones meteorológicas; asimismo, cada uno de estos casos particulares resultado de un incidente tienen una probabilidad de ocurrencia  $P_{oc,r}$  (AIChE, 1989)

Las ecuaciones 6.3 y 6.4 deben aplicarse a todas las localizaciones geográficas  $x,y$  para las cuales el riesgo individual se desee calcular.

#### 6.4.1.1 Procedimiento para el cálculo del riesgo individual

El procedimiento requiere el establecer las frecuencias y zonas de impacto para cada uno de los casos particulares resultado de un incidente de acuerdo a los métodos para estimar frecuencias y consecuencias. La información obtenida se utiliza para estimar el riesgo individual para todos los posibles resultados de un

incidente (considerados para cada segmento de la trayectoria) en las localizaciones geográficas de interés alrededor del lugar del incidente, utilizando las ecuaciones 6.2, 6.3 y 6.4. El resultado es una lista de estimaciones de riesgo individual para todas las localizaciones geográficas considerados que se encuentran cercanas al lugar del incidente. Las estimaciones de riesgo para cada segmento pueden incluirse en un mapa y establecer los contornos de riesgo conectando los puntos o áreas que presentan igual riesgo y de esta manera obtener contornos de isoriesgo a lo largo de la trayectoria. Para estimar el riesgo individual se realizan los pasos siguientes (AIChE, 1989):

1. Dividir la trayectoria de manera que los segmentos posean características similares.
2. Se elabora una lista de los grupos de incidentes considerados en el análisis, los resultados de los incidentes y los casos particulares resultado de los incidente para el segmento de la trayectoria considerado. Para elaborar la lista de incidentes se puede considerar que: no necesitan evaluarse los incidentes cuyas afectaciones no se presentan más allá de la carretera, si el propósito es estimar el riesgo a la población adyacente a la carretera; para incidentes mayores o catastróficos de magnitudes similares pueden agruparse y ser representados por un incidente, para esto se deben sumar las frecuencias de los incidentes.
3. Realizar:
  - Análisis de consecuencias:* determinar la zona de afectación y la probabilidad de muerte en cada localización de la zona de afectación para todos los casos específicos resultado del incidente.
  - Análisis de frecuencias:* determinar la frecuencia de todos los casos particulares resultado de los incidentes utilizando la ecuación 6.4.
4. Seleccionar una localización geográfica  $x,y$  de interés próxima a la trayectoria.
5. Determinar el riesgo individual en la localización seleccionada, mediante las ecuaciones 6.2 y 6.3.
6. Registrar cada uno de los riesgos individuales para la localización seleccionada.
7. Repetir los pasos 4, 5 y 6 para cada una de las localizaciones seleccionadas en el estudio.
8. Sumar los riesgos individuales para cada localización de los resultados específicos resultado de los incidentes que afectan a esta localización.
9. Dibujar en un mapa el riesgo individual estimado para cada uno de los casos específicos resultado del incidente, de acuerdo a los diferentes puntos de interés o localizaciones geográficas consideradas. Para elaborar el mapa de contornos de riesgo individual, se procede a seleccionar el caso particular resultado de un incidente que presenta la mayor longitud de su zona de afectación, dibujar en el mapa un círculo de radio igual a la zona de afectación y obtener su frecuencia, a ésta se suma la frecuencia del caso particular resultado de un incidente del siguiente contorno de riesgo (longitud del radio de afectación mayor al primero), de acuerdo a alguna de las ecuaciones siguientes:

$$CRI_r = f_r + CRI_{r-1} \quad \text{Ecuación 6.5a}$$

ó

$$CRI_r = f_{r,d} + CRI_{r-1} \quad \text{Ecuación 6.5b}$$

$CRI_r$ : valor del riesgo individual para el contorno del caso particular resultado del incidente en consideración, en año<sup>-1</sup>.

$f_r$ : frecuencia de ocurrencia del caso particular resultado del incidente  $r$ , en año<sup>-1</sup>.

$f_{r,d}$ : frecuencia con la cual un caso particular resultado de un incidente  $r$  afecta a una localización, considerando una distribución uniforme en la dirección del viento, en año<sup>-1</sup>.

$CRI_{r-1}$ : valor del riesgo individual de el contorno próximo (anterior), es decir la frecuencia para distancias de afectación mayores a  $CRI_r$ .

Para determinar la frecuencia de un caso particular resultado de un incidente que es modificada por la dirección del viento y afecta a una localización particular se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$f_{r,d} = f_r(q_r / 360) \quad \text{Ecuación 6.6}$$

$qr$ : ángulo que incluye a la zona de afectación para el caso particular resultado de un incidente  $r$ , en grados.

10. Dibujar los contornos de riesgo individual conectando los puntos que presentan igual riesgo.
11. Realizar los pasos 1 a 10 para cada uno de los segmentos en que fue dividida la longitud total de la trayectoria.
12. Conectar los puntos que presentan igual riesgo a lo largo de la trayectoria.

Se pueden realizar diferentes simplificaciones al procedimiento anterior, una primera simplificación puede hacerse cuando el objetivo no es obtener un conocimiento completo de la distribución geográfica del riesgo individual. Por ejemplo, cuando se requiere calcular el riesgo individual, en particular de algunas localizaciones específicas; en este caso el procedimiento se aplica solo a las localizaciones de interés, las estimaciones en éstas se obtienen de la misma manera que se obtendrían para un mapa de contornos de riesgo para todas las localizaciones a lo largo de la trayectoria considerada. Una segunda opción para simplificación se basa en las siguientes consideraciones (AIChE, 1989):

- ◆ Los peligros se originan en fuentes puntuales.
- ◆ La dirección del viento es uniforme, es decir la probabilidad en la dirección del viento es igual para cada una de estas.
- ◆ Es posible utilizar una sola velocidad del viento y una clasificación de estabilidad atmosférica.
- ◆ No se consideran factores de mitigación.
- ◆ Las fuentes de ignición están distribuidas de manera uniforme.
- ◆ Los efectos de las consecuencias del incidente son tratadas de manera discreta; es decir, el nivel de efecto dentro de una zona particular de impacto es constante, más allá de esta zona no se presenta un efecto.

Del uso de estas consideraciones simplifica la determinación del riesgo individual y dan por resultado contornos de riesgo de tipo uniforme; de esta manera el trazo de los riesgos individuales a partir del punto de fuga del material, definen el perfil de los riesgos y por lo tanto el mapa de contornos de riesgo.

#### 6.4.2 Evaluación del riesgo social

La determinación del riesgo social se realiza mediante la estimación de las consecuencias y de las frecuencias de manera similar al cálculo del riesgo individual; la información anterior se debe combinar con los datos referentes a población para establecer el número de personas afectadas para cada caso particular resultado de un incidente (AIChE, 1989).

El número de personas afectadas para cada tipo de incidente está dado por:

$$N_r = \sum_{x,y} P_{x,y} r_{f,r} \quad \text{Ecuación 6.7}$$

$N_r$ : número total de muertes (o resultantes para el caso particular resultado de un incidente  $r$  considerado).

$P_{x,y}$ : número de personas en la localización  $x,y$ .

$r_{f,r}$ : probabilidad de que el caso particular resultado de un incidente  $r$  resulte en una muerte en la localización  $x,y$ , definida por la ecuación 6.3 y calculada de acuerdo a los modelos de efecto y consecuencia.

El número de personas afectadas por todos los casos particulares resultado de los incidentes debe determinarse; asimismo la frecuencia, debe ponerse en forma acumulada de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$F_N = \sum_r F_r \quad \text{Ecuación 6.8}$$

para todos los casos específicos resultado de un incidente  $r$  para el cual  $N_r = N$

Donde:

- $F_N$ : frecuencia de todos casos específicos resultado de un incidente que afectan a  $N$  o más personas.  
 $F_r$ : frecuencia del caso específico resultado de un incidente  $r$   
 $N_r$ : número de personas afectados (muertes) por el caso específico resultado de un incidente  $r$

Con la información obtenida con las ecuaciones 6.7 y 6.8 puede presentarse el riesgo social mediante gráficos  $F-N$  (frecuencia-Número de muertes) en donde la frecuencia acumulada,  $F-N$ , se encuentra en función de  $N$ .

#### 6.4.2.1 Procedimiento para el cálculo del riesgo social

El riesgo social debe ser estimado para cada caso específico resultado de un incidente, para esto los incidentes considerados deben desarrollarse para los resultados del incidente y los casos específicos resultado de un incidente, y evaluarse para cada condición meteorológica, dirección del viento, ubicación particular de los puntos de ignición y distribución de la población (homogénea o no homogénea) ha considerarse en el estudio. El procedimiento de evaluación del riesgo social se integra por los siguientes pasos (AIChE, 1989):

1. Se elabora una lista de los grupos de incidentes considerados en el análisis, los resultados de los incidentes y los casos específicos resultado de un incidente para el segmento considerado.
2. Realizar:
  - Análisis de consecuencias*: determinar la zona de afectación y la probabilidad de muerte en cada localización de la zona de afectación para todos los casos específicos resultado del incidente.
  - Análisis de frecuencias*: determinar la frecuencia de todos los casos específicos resultado de los incidentes.
3. Seleccionar un caso específico resultado de un incidente.
4. Determinar el número total de muertes para el caso específico resultado de un incidente de acuerdo a la ecuación 6.7 y utilizando los datos sobre distribución de la población.
5. Realizar los pasos 3, 4 y 5 para cada uno de los casos específicos resultado de un incidente considerados.
6. Hacer un listado de todos los casos específicos resultado de un incidente con la frecuencia correspondiente y el número de muertes.
7. Determinar las frecuencias acumuladas de acuerdo a la ecuación 6.8.
8. Elaborar una gráfica  $F-N$  con los datos obtenidos a partir de los pasos 4 a 7.

La estimación del riesgo social se puede simplificar mediante la reducción del número de casos específicos resultado de un incidente  $r$ , al limitarse el número de condiciones atmosféricas, dirección del viento y la distribución de la población considerada; de esta manera se reduce la cantidad de evaluaciones individuales pero asimismo puede limitarse la precisión de la estimación del riesgo social. Otra simplificación se obtiene al considerar que la probabilidad de afectación (muerte u otra)  $r_{f,r}$  de acuerdo a la ecuación 6.7 puede tener exclusivamente dos valores, uno constante para todas las localizaciones  $x,y$  dentro de la zona de afectación, y cero para las localizaciones  $x,y$  fuera de la zona de afectación. Además, es posible establecer el número de muertes para cada caso específico resultado de un incidente  $r$  a partir de los planos de ubicación de la trayectoria y del trazo de las zonas de afectación, mediante la aplicación de la ecuación 6.7 para cada localización  $x,y$  considerada, asimismo las áreas afectadas donde no existe población pueden descartarse del cálculo del riesgo social (AIChE, 1989).

Una simplificación a la ecuación 7.7 considera que  $r_{f,r}$  tiene solo dos valores, uno constante para todas las localizaciones  $x,y$  dentro del área de afectación y cero para cualquiera de las localizaciones fuera del área de afectación. El valor de  $r_{f,r}$  puede ser cualquier valor que será constante en toda la zona de afectación.

También el número de muertes para cada caso particular resultado de un incidente puede determinarse de manera gráfica mediante los siguientes pasos:

- ◆ La superposición del mapa donde se trazan la zona de afectación para cada caso específico resultado de un incidente  $r$  sobre el mapa de distribución de la población.
- ◆ Cálculo de la población dentro de la zona de afectación.
- ◆ Multiplicar la probabilidad de muerte dentro de la zona de afectación para obtener el número total de muertes  $N_r$ :

$$N_r = P_r r_{f,r} \tag{Ecuación 6.9}$$

Donde:

- $P_r$ : número total de individuos dentro de la zona de afectación para el caso específico resultado de un incidente  $r$ .
- $r_{f,r}$ : probabilidad de muerte dentro de la zona de afectación para el caso específico resultado de un incidente  $r$ .

Realizando estas consideraciones para cada uno de los casos específicos resultado de un incidente se obtiene una serie de valores sobre frecuencias, número de muertes para cada caso específico resultado de un incidente y total de muertes, con los cuales puede elaborarse el gráfico  $F-N$ .

### 6.5 Segunda metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo en el transporte

La siguiente metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo en el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos incluye:

- ◆ Las probabilidades de cada incidente
- ◆ La consecuencia de cada incidente
- ◆ Volumen de transporte

El volumen de transporte puede representarse por el número de envíos (embarques) realizados por unidad de tiempo, o de acuerdo a la distancia total recorrida por los vehículos o unidades. De acuerdo a lo anterior la probabilidad de un accidente y/o incidente deberá estimarse por envío o por unidad de distancia recorrida (Erkut y Verter, 1995).

En el modelo siguiente se asume que la población en la vecindad de la ruta se concentra en un punto o centro de población y por lo tanto cada individuo posee el mismo riesgo debido al transporte de materiales peligrosos. Desarrollando lo anterior, para estimar el riesgo social se tiene:

$$R_{ipm} = (RI_{ipm})(POB_i)(N_{pm}) \tag{Ecuación 6.10}$$

Donde:

- $R_{ipm}$ : riesgo social en el centro de población  $i$  debido al transporte de material peligroso  $m$  en la trayectoria  $p$
- $RI_{ipm}$ : riesgo individual en el centro de población  $i$  debido a un envío o embarque del material  $m$
- $POB_i$ : número de personas localizadas en el centro de población  $i$
- $N_{pm}$ : número de envíos o embarques del material  $m$  que se transporta en la trayectoria  $p$

El problema central para la evaluación del riesgo social en este modelo, es la estimación del riesgo individual  $RI_{ipm}$  para cada centro de población  $i$ . A su vez, existe una multiplicidad de consecuencias que pueden ocurrir de manera simultánea como resultado de un incidente con materiales peligrosos, como son: muertes, lesionados, daños a la propiedad, daño al ambiente, etcétera. Como una simplificación para la evaluación del riesgo puede elegirse la consecuencia menos deseable que en este caso sería la muerte. La selección de la muerte como la consecuencia menos deseable o utilizar una sola consecuencia, es una consideración válida cuando lo que se requiere comparar las posibles alternativas en el transporte y las políticas aplicables. Esta consideración reduce el número de estimaciones y en su caso facilita la adición de los riesgos debidos a diferentes resultados de incidentes contemplados en el análisis (Erkut y Verter, 1995).

El riesgo social debido al transporte de materiales peligrosos puede calcularse como la suma de riesgos impuestos a los individuos localizados en las cercanías de la trayectoria. Lo anterior implica dividir la trayectoria o ruta en secciones para su evaluación, y sumar el riesgo que en forma individual presentan para cada sección.

El riesgo individual debido al transporte de material peligroso ( $RI_{ipm}$ ) puede estimarse como la probabilidad de un incidente durante el transporte multiplicado por la probabilidad de que el individuo experimente las consecuencias de interés (muerte, quemaduras, etc.) como resultado del incidente (incendio, explosión, etcétera).

La trayectoria entre los puntos de origen y destino en el transporte de materiales peligrosos se divide en segmentos (identificados mediante el subíndice  $s$ ) en donde cada división de la ruta posee características homogéneas; dentro de estas características pueden incluirse: tipo de camino, especificaciones de construcción, estado de conservación, etcétera, que afectan a la probabilidad de accidentes cuando el material se transporta por dicho segmento. De esta manera el riesgo individual debido al transporte de material peligroso ( $RI_{ipm}$ ) puede calcularse como la suma de los riesgos asociados a cada segmento de la trayectoria ( $RI_{ism}$ ) para cada uno de los posibles eventos; lo cual puede expresarse como (Erkut y Verter, 1995):

$$RI_{ipm} = \sum_{s \in p} RI_{ism} \quad \text{Ecuación 6.11}$$

Cuando se considera en el análisis más de un evento o resultado del incidente el riesgo individual estará dado por la suma de los riesgos individuales para todos los incidentes determinados para cada segmento a lo largo de la trayectoria. De esta manera, para obtener el riesgo individual en el segmento  $RI_{ism}$  para cada uno de los eventos posibles se tiene:

$$RI_{ism} = \int_{x \in s} P_{sm}(I) P_{ixm}(C/I) dx \quad \text{Ecuación 6.12}$$

Donde:

- $P_{sm}(I)$ : probabilidad de un incidente  $I$  en el segmento  $s$  durante el transporte de material peligroso  $m$ . Referida por unidad de longitud.
- $P_{ixm}(C/I)$ : probabilidad de que un individuo en el centro de población  $i$  experimente la consecuencia  $C$  dado un incidente  $I$  en el transporte del material peligroso  $m$  en el punto  $x$  perteneciente al segmento  $s$ .
- $RI_{ism}$ : riesgo individual en el centro de la población  $i$  debido al transporte del material peligroso  $m$  en el segmento  $s$ .

Es razonable asumir como constante la probabilidad  $P_{sm}(I)$  en el segmento  $s$  si éste es homogéneo. Cuando  $P_{sm}(I)$  está en función de la distancia, la probabilidad en el segmento  $s$  resulta de multiplicar  $P_{sm}(I)$  por la longitud del segmento. Para obtener  $P_{sm}(I)$  se tiene (Erkut y Verter, 1995):

$$P_{sm}(I) = P_s(A)P_{sm}(I / A) \quad \text{Ecuación 6.13}$$

Donde:

- $P_s(A)$ : probabilidad de un accidente  $A$  en el segmento  $s$  que tiene como posibles resultados el incidente  $I$
- $P_{sm}(I/A)$ : probabilidad de un incidente  $I$  dado el accidente  $A$  en el segmento  $s$  durante el transporte del material peligroso  $m$ .

La probabilidad de un accidente  $P_s(A)$  puede sustituirse por  $P_{sm}(A)$  siempre que se tengan las probabilidades de accidente específico para el material  $m$ . La probabilidad de un accidente en el transporte de material peligroso para el segmento  $P_s(A)$  se obtiene de acuerdo a algunas metodologías tomando en cuenta los accidentes que suceden para la clase de camino que presenta el segmento  $s$  de todos los vehículos considerados (camiones sin diferenciación por tipo o uso). Así, cuando se tienen tasas de accidentes en camiones considerando todos los tipos de vehículos y referida a una unidad de longitud recorrida se puede utilizar la ecuación siguiente (Harwood *et al.*, 1990):

$$P_s(A) = TA_s \times L_s \quad \text{Ecuación 6.14}$$

Donde:

- $TA_s$ : tasa de accidentes por vehículo por kilómetro para todo tipo de vehículo en el segmento  $s$  de acuerdo a la clase de camino correspondiente
- $L_s$ : longitud del segmento  $s$  en kilómetros

Cuando se tiene información elaborada a partir de los accidentes en camiones se puede utilizar la siguiente ecuación (Harwood 1990):

$$P_s(A) = TPAC_s \times L_s \quad \text{Ecuación 6.15}$$

Donde:

- $TPAC_s$ : tasa de accidentes en camiones (en accidentes/ vehículo-kilómetro) para el segmento  $s$  de acuerdo a la clase de camino correspondiente

Cuando se incluyen en el cálculo de  $P_{sm}(I)$  los diferentes tipos de resultados de incidentes que pueden resultar cuando a sucedido una liberación del material  $m$ , puede hacerse lo siguiente:

$$P_{sm}(I) = P_s(A)P_{sm}(R / A)P_m(I / R) \quad \text{Ecuación 6.16}$$

Donde:

- $I$ : incidente como resultado de un accidente  $A$
- $P_{sm}(I)$ : probabilidad de un incidente  $I$  en el segmento  $s$  durante el transporte de un material peligroso  $m$
- $P_s(A)$ : probabilidad de accidente.
- $P_{sm}(R/A)$ : probabilidad de liberación del material peligroso  $m$  dado que existió un accidente  $A$  en el segmento  $s$ .
- $P_m(I/R)$ : probabilidad de que suceda el incidente  $I$  donde se involucre al material  $m$ , dado que existió una liberación  $R$ . Ejemplo de incidente  $I$  es, para el caso de un camión que transporta cloro, la liberación de cierto porcentaje del contenido en el aire que ocasiona una nube tóxica.

Para el cálculo de  $P_{sm}(R/A)$  se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$P_{sm}(R / A) = P(R / A)_j = \sum_k P(R / A)_k \times P(k)_j \quad \text{Ecuación 6.17}$$

Donde:

- $P(R/A)_j$ : probabilidad de liberación de material peligroso dado un accidente que involucre a un vehículo que transita por una clase de camino  $j$
- $P(R/A)_k$ : probabilidad de liberación de un material peligroso dado un accidente de tipo  $k$ . Los tipos de accidente  $k$  serían por ejemplo: para accidente en vehículo sin colisión se puede utilizar el valor correspondiente para volcadura, salida de camino, etcétera, según corresponda
- $P(k)_j$ : probabilidad de que un accidente para la clase de camino  $j$  tenga un accidente de tipo  $k$ . Por tipo de accidente  $k$  se entiende, por ejemplo, a un accidente de un solo vehículo sin colisión que resulta en volcadura.

Esta ecuación se utiliza cuando se tienen datos de como los diferentes tipos de accidentes tienen diferentes probabilidades de fuga o liberación; si no se tienen estos datos  $P(k)_j$  es igual a uno, simplificando la ecuación. Otras metodologías propuestas asumen que la liberación de material peligroso dado un accidente poseen la misma probabilidad para todos los diferentes tipos de accidentes. La ecuación anterior indica que la probabilidad de liberación de un material peligroso dado un accidente varía de acuerdo al tipo de accidente considerado  $P(k)_j$ ; asimismo se puede indicar que diferentes clases de camino presentan diferentes probabilidades para los diferentes tipos de accidentes. Por lo tanto la probabilidad de una liberación de material peligroso dado un accidente cambia para las diferentes clases de camino, ya que esto varía con el tipo de accidente y porque la distribución de los tipos de accidentes cambia con las clases de camino (Erkut y Verter, 1995).

Para la estimación de  $P_{ixm}(C/I)$  la probabilidad de que la consecuencia de interés en el análisis ocurra dado que ha sucedido un incidente se dificulta ya que las consecuencias de un incidente dependen del material, volumen liberado, características topográficas de la zona del incidente y las condiciones meteorológicas, y las combinaciones que puedan resultar de estos factores conducen a una gran variedad de eventos diferentes; además, para estimar los efectos sobre las personas expuestas a la sustancia liberada en ocasiones no se tiene un conocimiento adecuado de la respuesta que pueden presentar las personas. Debido a la incertidumbre en la estimación de consecuencias es posible asignar a  $P_{ixm}(C/I)$  un valor de uno si la distancia entre  $i$  y el lugar donde sucede el incidente es menor o igual a  $\lambda$ , donde  $\lambda$  es la distancia calculada de acuerdo a los modelos de efecto y consecuencia, para los cuales la concentración, nivel de sobrepresión, o de radiación para un tiempo de exposición  $t$  provocará la muerte de todas las personas ubicadas dentro del área de impacto generada por  $\lambda$ . Es posible cuando se desea considerar otro tipo de consecuencias diferentes de la muerte, el utilizar otra distancia  $\lambda_1$  calculada de acuerdo a los modelos de efecto y consecuencia, y para el tiempo de exposición  $t_1$  (Erkut y Verter, 1995).

Existen dos opciones para la evaluación de  $P_{sm}(I)$ , la primera requiere el utilizar la longitud del segmento considerado  $L_s$ , la segunda opción es considerar la porción del segmento  $s$  para la cual el centro de población  $i$  se encuentra dentro del área de afectación debido a la liberación del material  $m$ . Asimismo el modelo planteado anteriormente puede tener varias opciones sobre como se distribuye la población en las zonas aledañas al camino o segmento  $s$ , éstas son (Erkut y Verter, 1995):

- ◆ La población puede ser representada por un centro de población  $i$
- ◆ La población se encuentra uniformemente distribuida y la densidad de población es constante dentro del área de afectación
- ◆ La población no se encuentra uniformemente distribuida y no puede ser representada por un centro de población.

Para la evaluación del riesgo individual  $R_{Iism}$  y la estimación de  $P_{sm}(I)$  se han planteado varias soluciones; para la siguiente, figura 6.2, se considera que un segmento  $s$  de la trayectoria atraviesa por un centro de población  $i$  el cual tiene por ingreso al punto  $a$  (punto de origen de un eje cartesiano) y por salida al punto  $d$ , la longitud del segmento es  $ad$ , el área de impacto del incidente es  $i'$  y está determinada por una distancia de afectación  $\lambda$  para este incidente y el material  $m$ , de esta manera el área de afectación  $i'$  está representada por un rectángulo de longitud  $ad$  y ancho de  $2\lambda$  la población fuera de este rectángulo no será afectada. Si se considera a una persona ubicada en el punto  $e$  dentro del área  $i'$  ésta se verá afectada por un incidente que ocurra a una distancia  $\lambda$ , para lo cual el vehículo deberá estar dentro de la cuerda  $bc$  que es la

longitud de una parte del segmento  $ad$ ; de esta manera puede expresarse el riesgo de exposición para las personas en el punto  $e$  como (Erkut y Verter, 1995):

$$RI_{esm} = P_{sm}(I)\ell(b, c) \quad \text{Ecuación 6.18}$$

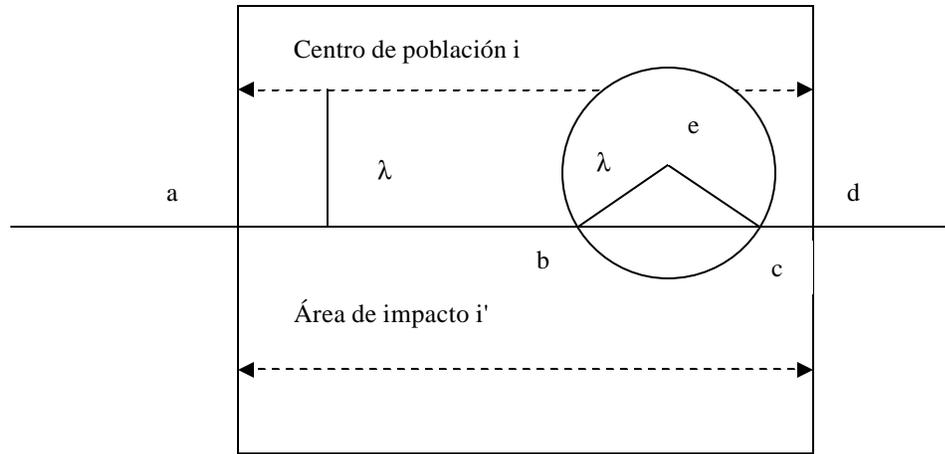


Figura 6. 2 Segmento de camino y área de afectación (Erkut y Verter, 1995)

La longitud  $bc$  puede determinarse por trigonometría como:

$$\ell(b, c) = 2\sqrt{I^2 - y^2} \quad \text{Ecuación 6.19}$$

El riesgo social  $Rism$  en el centro de población  $i$  debido a un envío o embarque del material  $m$  estará dado por la suma del riesgo individual para cada individuo dentro de la zona de afectación  $i'$ :

$$Rism = \int_{e \in i'} RI_{esm} POB_e de \quad \text{Ecuación 6.20}$$

En la ecuación anterior puede sustituirse a la densidad poblacional en el punto  $e$ ,  $POB_e$ , si se considera que la distribución de la población es uniforme:

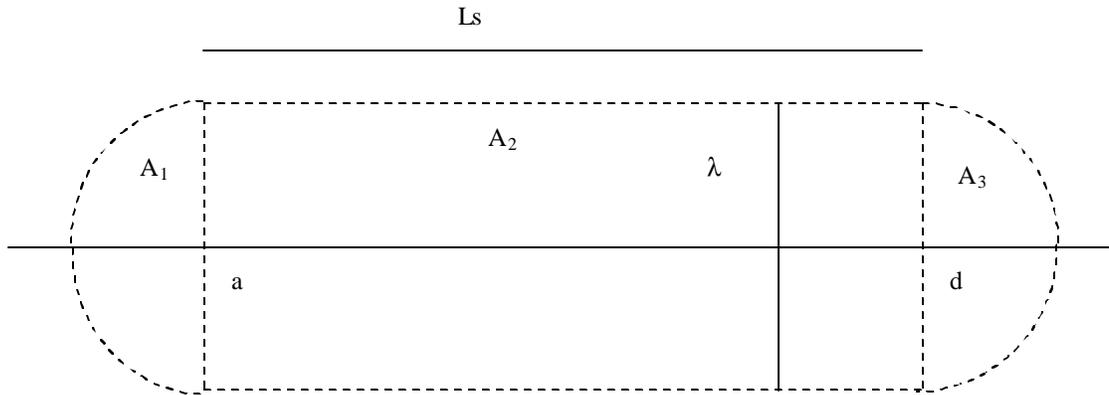
$$POB_e = POB_{i'} / (2I\ell(a, d)) \quad \text{Ecuación 6.21}$$

Donde  $POB_{i'}$  es la población dentro del área  $i'$  y el divisor al área de impacto generado por el segmento  $s$ .

De esta manera sustituyendo e integrando la ecuación se obtiene como solución para el riesgo social en el área de impacto  $i'$  a la siguiente ecuación:

$$Rism = P_{sm}(I)POB_{i'} I (p / 2) \quad \text{Ecuación 6.22}$$

Así el riesgo social debido al transporte del material  $m$  a lo largo de la trayectoria será la suma de  $Rism$  de todos los segmentos que la constituyen y multiplicándolo por el número total de envíos o embarques  $Npm$ .



**Figura 6.3 Población en área de afectación (Erkut y Verter, 1995)**

Otra solución, figura 6.3, para calcular la población en el área de afectación para un segmento  $s$  es el planteado a continuación (Ashur *et al.*, 1997):

$$\text{Área de impacto} = \pi \lambda^2 + 2L_s \lambda \quad \text{Ecuación 6.23}$$

Para determinar el número de personas expuestas dentro del área de impacto en el segmento  $s$  se puede emplear la siguiente ecuación (Erkut y Verter, 1995)

$$N_r = \pi \lambda^2 L_s POB_i' \quad \text{Ecuación 6.24}$$

Donde:

- $L_s$ : longitud del segmento  $s$
- $POB_i'$ : densidad de población en el área de impacto

La densidad de población para el área de impacto se determina de la siguiente manera (Erkut y Verter, 1995):

$$POB_i' = \text{Población total en el área de impacto} / \text{área de impacto}$$

$$POB_i' = \frac{POB}{L_s 2\lambda + \pi \lambda^2} \quad \text{Ecuación 6.25}$$

Por lo que el riesgo social debido al transporte del material en el segmento será:

$$R_{ipm} = RI_{pm} \pi \lambda^2 L_s POB_i' N_{pm} \quad \text{Ecuación 6.26}$$

El riesgo social debido al transporte del material a lo largo de la trayectoria sería la sumatoria de  $R_{ism}$  de todos los segmentos de la trayectoria (Erkut y Verter, 1995).

El riesgo individual  $RI_s$  será:

$$RI_s = P_s(A) P_s(R/A) P(I/R) P(C/I) N_{pm} \quad \text{Ecuación 6.27}$$

Sustituyendo el valor de  $P_s(A)$  y  $P_s(R/A)$

$$RI_s = TAPC_s L_s \left[ \sum_k P(R / A)_k P(k)_j \right] P(I / R) P(C / I) N_{pm} \tag{Ecuación 6.28}$$

Si  $P(C/I)$  es igual a uno para todas aquellas personas ubicadas a una distancia igual o menor a  $\lambda$  (obtenida para cada resultado del incidente) entonces:

$$RI = \sum_{s=1}^n TAPC_s L_s P_s(R / A) P(I / R) P(C / I) N_{pm} \tag{Ecuación 6.29}$$

Para el empleo de las metodologías anteriores se requiere conocer las tasas de accidentes y de diferentes probabilidades; las tablas 6.1, 6.2 y 6.3 contienen valores típicos de tasas de accidentes de camiones obtenidos a partir de registros de accidentes en los Estados Unidos de Norteamérica, así como diferentes tipos de probabilidades de liberación de materiales peligrosos.

**Tabla 6.1 Tasas de accidentes de camiones, tasas de liberación por accidente y probabilidades de liberación**

Clase de camino		Tasa de accidentes de camiones (accidentes por millón de veh-mi)	Probabilidad de liberación dado un accidente	Tasa de liberación por accidente (liberaciones por millón veh-mi)
Tipo de área	Tipo de carretera			
Rural	Dos carriles	2.19	0.086	0.19
Rural	Multicarriles sin división	4.49	0.081	0.36
Rural	Multicarriles con división	2.15	0.082	0.18
Rural	Autopista	0.64	0.090	0.06
Urbana	Dos carriles	8.66	0.069	0.60
Urbana	Multicarriles sin división	13.92	0.055	0.77
Urbana	Multicarriles con división	12.47	0.062	0.77
Urbana	Camino de un sentido	9.7	0.056	0.54
Urbana	Autopista	2.18	0.062	0.14

Fuente: Ashur *et al.*, Transportation Research Records 1602 página 89

**Tabla 6.2 Probabilidad de liberación dado que un accidente ha ocurrido, en función del tipo de accidente**

Tipo de accidente	Probabilidad de liberación
<b>Accidentes sin colisión, un solo vehículo</b>	
Salida de camino	0.331
Volcadura (en la carretera)	0.375
Otro tipo sin colisión	0.169
<b>Accidente con colisión, un solo vehículo</b>	
Colisión con vehículo estacionado	0.031
Colisión con ferrocarril	0.455
Colisión con otro diferente a un automovilista	0.015
Colisión con objeto fijo	0.012
Otro tipo de colisión	0.059
<b>Accidentes con colisión de múltiples vehículos</b>	
Colisión con automóvil de pasajeros	0.035
Colisión con camión	0.094
Colisión con otro vehículo	0.037

Fuente: Harwood Douglas *et al.*, Transportation Research Records 1264 página 17

**Tabla 6.3 Accidentes de camiones por tipo de carga en Estados Unidos, 1984 - 1985**

Tipo de carga	Probabilidad de liberación de material peligroso dado un accidente, en %
Carga general	8.2
Gases a granel	8.1
Sólidos a granel	30.0
Líquidos a granel	18.8
Explosivos	10.0
Vacío	4.5
Otro	11.7
Total	14

Fuente: Harwood *et al.*, Transportation Research Records 1264 página 29

La tabla 6.4 contiene las frecuencias de los contribuyentes mayores en los accidentes en el transporte mediante camiones, en esta tabla se indica que para obtener la frecuencia se debe multiplicar el valor indicado por la tasa de accidentes en camiones ( $R = 5 \times 10^{-6}$  /milla) (Rhyne, 1990).

**Tabla 6.4 Contribuyentes mayores a los accidentes en el transporte en camiones**

<b>Liberación mayor<sup>a</sup></b>		
$R \times 1.1 \times 10^{-2}$	87%	Fallo de tanque por impacto
$R \times 1.7 \times 10^{-3}$	13%	Fallo de tanque por perforación
$R \times 1.3 \times 10^{-2}$	100%	
<b>Liberación mayor con incendio<sup>a</sup></b>		
$R \times 8.6 \times 10^{-5}$	78%	Fallo en el tanque por fuego debido al debilitamiento de las paredes en el accidente (daño en el aislamiento implícito)
$R \times 9.2 \times 10^{-6}$	8%	El contenido del tanque se libera debido al fuego, las paredes calientes se colapsan cuando el nivel del líquido es menor al 50%
$R \times 7.3 \times 10^{-6}$	7%	Tanque volcado e incendiado; líquido fluye por la válvula de relevo con liberación insuficiente de energía
$R \times 3.6 \times 10^{-6}$	3%	Tanque volcado e incendiado; el daño al aislamiento agrava el flujo inadecuado de líquido en la válvula de relevo
$R \times 3.1 \times 10^{-6}$	3%	El fuego provoca que el contenido del tanque se libere más rápidamente debido a daño en el aislamiento, las paredes se colapsan a contenido menor al 50%
$R \times 1.1 \times 10^{-4}$	99%	
<b>Liberación gaseosa<sup>a</sup></b>		
$R \times 1.3 \times 10^{-3}$	68% <sup>c</sup>	Impacto en las válvulas causa la falla
$3.0 \times 10^{-9}$	32% <sup>c</sup>	Apertura de válvula de seguridad durante el transporte normal (el valor está en frecuencia por viaje)
$R \times 1.9 \times 10^{-3}$	100%	
<b>Liberación de líquido<sup>a</sup></b>		
$R \times 9.6 \times 10^{-6}$	96%	El fuego ocasiona falla de la válvula de seguridad, tanque volcado, el fuego es pequeño para causar falla en las paredes
$R \times 3.9 \times 10^{-7}$	4%	Impacto en válvulas, válvula de exceso de flujo defectuosa
$R \times 1.0 \times 10^{-5}$	100%	

<sup>a</sup> Por camión milla

<sup>b</sup> R es la tasa de accidentes para camión

<sup>c</sup> Basado en  $R = 5 \times 10^{-6}$  / milla

Fuente: Rhyne William R. ; Transportation Research Records 1264 página 6

**Tabla 6.5 Tasas de accidentes en ferrocarril**

Clase volumen	Clase de vía	Región							
		Atlántico		Central		Praderas		Montaña	
		B. V.	A. V.	B.V.	A.V.	B.V.	A.V.	B.V.	A.V.
(tasas de accidentes por millón de carrotanques-kilómetro)									
1 (baja)	Sencilla	1.63	25.32	12.99	1.61	6.35	7.83	4.04	5.31
	Múltiple	-	-	-	90.61*	-	-	-	-
2	sencilla	4.67	0.62	1.46	1.37	1.55	7.31	0.84	0.68
	Múltiple	-	-	16.95	-	1.22	-	-	1.16*
3	Sencilla	1.22	4.05	1.04	0.78	0.26	1.41	1.02	1.67
	Múltiple	0.48	1.18	0.11*	0.42	-	1.89	-	-
4 (alta)	Sencilla	-	0.56	-	0.26	0.03	0.06	0.35	0.70
	Múltiple	0.18*	-	0.20	0.47	0.29*	0.06	0.43	0.43

B.V. Baja velocidad

A.V: Alta velocidad

- No incluida en la calibración

\* Inexactitud debida a bajo número de accidentes o baja exposición

Volumen clase 1: menor a 100 millones ton-milla/año

Volumen clase 2: 100 a 1000 millones ton-milla/año

Volumen clase 3: 1000 a 10000 millones ton-milla/año

Volumen clase 4: mayor a 10000 millones ton-milla/año

Baja velocidad: menor a 35 millas por hora

Alta velocidad: mayor a 35 millas por hora

Fuente: Saccomanno *et al.*; Transportation Research Record 1245, página 4

Las tablas 6.5 y 6.6 que contienen información sobre tasas de accidentes y las frecuencias de posibles resultados de incidentes en el transporte ferroviario. Las tasas de accidentes incluidas en la tabla 6.5 aplican solamente a descarrilamientos en la línea principal del ferrocarril e incluyen el número total de carros involucrados en cada accidente. De incluirse los accidentes por colisión en la línea principal y accidentes en cruzamientos se incrementan las tasas de accidentes indicadas en la tabla en un promedio de 0.1 carros involucrados en accidentes por millón de carros-kilómetro, o aproximadamente en 20 % de estas tasas. Las tasas de accidentes fueron calculadas con datos correspondientes a Canadá para el periodo de 1980 a 1985. Las categorías correspondientes a "tipo de vía" se utilizaron como un indicador de la calidad del vía y el estado de mantenimiento de la vía (Saccomanno *et al.*, 1989).

La tabla 6.6 muestra las frecuencias de los contribuyentes mayores en los accidentes en el transporte mediante ferrocarril (carrotanques), en esta tabla el valor asignado a la frecuencia fue multiplicado por la tasa de accidentes en ferrocarril cuyo valor es de  $1.1 \times 10^{-5}$  accidentes/tren milla. La tabla anterior fue elaborada especialmente para el análisis de riesgo en el transporte de gas L.P. y cloro, utilizando para la obtención de las frecuencias, para ambos materiales, arboles de fallas y de eventos; asimismo, se empleó la información disponible en bases de datos e investigaciones específicas sobre el transporte de cloro, gases y líquidos, desarrollados en los Estados Unidos de América (Rhyne, 1990).

**Tabla 6.6 Contribuyentes mayores a los accidentes en el transporte en ferrocarril**

<b>Liberación mayor<sup>a</sup></b>		
8.4 x 10 <sup>-8</sup>	90%	Fallo en el final o del costado del carrotanque por impacto
5.0 x 10 <sup>-9</sup>	6%	Fallo de carrotanque por perforación
3.5 x 10 <sup>-9</sup>	4%	Fallo del carrotanque por aplastamiento
9.2 x 10 <sup>-8</sup>	100%	
<b>Liberación mayor con incendio<sup>a</sup></b>		
1.6 x 10 <sup>-9</sup>	38%	El contenido del carrotanque se libera debido al fuego, las paredes calientes se colapsan cuando el nivel del líquido es menor al 50 %
1.5 x 10 <sup>-9</sup>	36%	El impacto debilita las paredes, entonces el fuego causa la falla de la válvula de relevo de presión (daño en el aislamiento implícito)
5.4 x 10 <sup>-10</sup>	13%	Tanque volcado e incendiado; líquido fluye por la válvula de relevo con liberación insuficiente de energía
3.6 x 10 <sup>-10</sup>	8%	El fuego hace que el contenido se libere rápidamente debido al daño en el aislamiento, las paredes se colapsan cuando el nivel del líquido es menor al 50 %
1.9 x 10 <sup>-10</sup>	5%	Carrotanque volcado e incendiado, el flujo en la válvula de relevo es poco efectivo debido al daño en el aislamiento por el accidente
4.2 x 10 <sup>-9</sup>	100%	
<b>Liberación gaseosa<sup>a</sup></b>		
3.0 x 10 <sup>-9</sup>	64%	Apertura de válvula de seguridad durante el transporte
1.4 x 10 <sup>-9</sup>	30%	El fuego propicia la falla en la válvula de relevo, carrotanque en posición vertical, fuego de corta duración para hacer fallar a las paredes (60-120 minutos)
3.1 x 10 <sup>-10</sup>	6%	Impacto en las válvulas causa la falla
4.7 x 10 <sup>-9</sup>	100%	
<b>Liberación de líquido<sup>a</sup></b>		
4.6 x 10 <sup>-10</sup>	100%	El fuego propicia la falla en la válvula de relevo, carrotanque volcado, fuego de corta duración para hacer fallar a las paredes (aproximadamente 60 minutos)

<sup>a</sup> Por tren milla

Fuente: Rhyne William R.; Transportation Research Records 1264 página 7

Los valores incluidos en las tablas anteriores podrían utilizarse para evaluar el riesgo de acuerdo a las metodologías propuestas en este capítulo con el propósito de ejemplificar su uso. Lo anterior a falta de valores establecidos en México para el transporte terrestre de materiales peligrosos en sus diferentes modalidades. Sin embargo, los valores mostrados en las tablas pueden ser muy diferentes a los que específicamente se obtengan para los vehículos y carreteras de México, debido principalmente a los siguientes factores:

- ◆ Fecha de los registros de accidentes con que fueron determinadas las frecuencias, probabilidades y tasas de accidentes.
- ◆ Características de la red carretera o ferroviaria utilizada para obtener las anteriores, y la existente actualmente en México.
- ◆ Características y edad del parque vehicular utilizado para obtener las frecuencias, probabilidades y tasas de accidentes.
- ◆ Peso y dimensiones de vehículos utilizados para obtener las frecuencias, probabilidades y tasas de accidentes y los correspondientes a México.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los accidentes en el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos son eventos que pueden considerarse poco frecuentes; sin embargo, para un efectivo diseño de medidas para incrementar la seguridad es fundamental disponer de información detallada, precisa y suficiente sobre éstos, las unidades de transporte, las características de carreteras y vías férreas, los volúmenes de tráfico, las consecuencias y otros aspectos relacionados, a partir de la cual se pueda realizar un análisis, comparar alternativas y vigilar el desempeño en términos cuantitativos.

Los registros o bases de datos sobre accidentes documentan las características particulares de cada uno de éstos; los registros de interés en el transporte de materiales y residuos peligrosos son aquellos que contienen información sobre accidentes en las cuales puede determinarse cuando el vehículo accidentado contenía algún material peligroso, así como identificar si sucedió una liberación de material debido a un tipo particular de accidente, los tipos de incidentes y sus consecuencias.

Para las carreteras y vías férreas de México, no se dispone de información suficiente sobre accidentes y volumen de tráfico en el transporte de materiales y residuos peligrosos; sin embargo, con la información que ingresa a las delegaciones estatales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y de la Policía Federal Preventiva, puede elaborarse uno o más registros. De acuerdo al tratamiento estadístico de la información contenida en los registros se podrá obtener el número de accidentes, incidentes, resultados de incidentes y consecuencias; así como las respectivas frecuencias relativas de las anteriores y las correspondientes probabilidades condicionales dado que sucedió un accidente; por ejemplo: el número de accidentes en los cuales ocurre una liberación de material dividido entre el número total de accidentes, proporciona la frecuencia con que ocurre una liberación dado un accidente, a partir de la cual se obtiene la probabilidad condicional de un incidente dado un accidente  $P(I/A)$ .

Los registros sobre accidentes pueden vincularse a uno o más registros que contenga información sobre volúmenes de tráfico, materiales transportados, longitud del camino o vía férrea, ubicación, geometría y tipo de camino o vía férrea; como vínculo puede emplearse un identificador común, como es la referencia al kilometraje de los puntos o segmentos de la carretera o vía férrea; y de esta manera determinar las tasas de accidentes específica de la clase de camino o vía férrea considerada y las tasas de accidentes promedio.

Sin embargo, cuando se contemplan exclusivamente los registros de las carreteras o sus segmentos en donde han ocurrido accidentes, excluyendo aquellas para las cuales no se tiene información, implica una desviación en los valores que afectará la tasa de accidentes, cuando se pretende obtener tasas promedio de accidentes para una clase de camino.

Los registros sobre accidentes pueden utilizarse para identificar sitios (secciones o tramos de carretera) con alta incidencia de accidentes; además, definir de manera separada a las carreteras ofrece la oportunidad de distinguir las secciones o tramos de carretera que posean características similares en su potencial para provocar accidentes y observar las diferencias que persistan a pesar de las similitudes, por ejemplo cuando las secciones de carreteras tienen definidas sus características, se puede hacer una diferenciación con otras secciones en cuanto al número de intersecciones, accesos, rampas, etcétera, y como estos factores influyen o determinan un mayor número de accidentes, y no la clase de camino o las especificaciones de construcción.

Dentro del marco legal que regula el transporte de materiales peligrosos no existe una disposición que obligue al transportista o expedidor a elaborar y entregar a las autoridades correspondientes un reporte detallado sobre accidentes e incidentes. El artículo 42 del *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos* indica que en caso de un incidente con residuos peligrosos se deberá dar aviso inmediato y ratificado por escrito a la *Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales*; en este artículo se establece el contenido que deberá tener el aviso por escrito, para lo cual existe un formato publicado como *Manifiesto para casos de derrame de residuos peligrosos por accidente*. El uso de este formato se hace extensivo a los accidentes con materiales peligrosos; sin embargo el

contenido no es apropiado para la investigación de incidentes en el transporte terrestre. Una de las fuentes principales de información sobre accidentes e incidentes en transportación son los reportes elaborados por la Policía Federal Preventiva cuyo formato no incluye algunos aspectos sobre las condiciones del accidente. Por lo anterior, es recomendable establecer una disposición que obligue al reporte detallado de los accidentes e incidentes con materiales peligrosos, y elaborar un formato con aspectos no considerados actualmente como son: origen y destino del envío, nombre del producto transportado, número de las Naciones Unidas, clase de peligro, tipo de área (rural, urbana), resultado del accidente (fuga, incendio, explosión), entre otros. Asimismo, es posible establecer las condiciones para reportar accidentes e incidentes en operaciones de carga, descarga y almacenamiento temporal, de acuerdo a la cantidad liberada, pérdidas estimadas, existencia de lesionados (sin importar la cantidad su reporte), etcétera.

Las metodologías propuestas en el presente trabajo para la evaluación cuantitativa del riesgo establecen una estructura sistemática en la que no utilizan índices subjetivos e integran las principales componentes del riesgo.

La cuantificación del riesgo en el transporte, además de ayudar en la selección de alternativas para el manejo y a la toma de decisiones, puede utilizarse para una comunicación efectiva del riesgo al público.

El *Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos* en su artículo 118 fracción III establece que es responsabilidad del expedidor, autotransportista y destinatario, dentro de la esfera de sus responsabilidades, *el determinar la ruta de transporte que presente mejores condiciones de seguridad*. Con relación a lo anterior, la aplicación de las metodologías propuestas en este trabajo permiten una evaluación cuantitativa del riesgo a lo largo de la ruta de transporte, que a su vez es un recurso para seleccionar una ruta de transporte segura, entre las diferentes rutas posibles, de acuerdo al riesgo que presentan. Sin embargo, para la aplicación de dichas metodologías en el país es imprescindible determinar las tasas de accidentes adecuadas para los vehículos utilizados y, las frecuencias y probabilidades condicionales necesarias.

Asimismo, para la aplicación de las metodologías es necesario elaborar guías que contemplen opciones a la ausencia de información sobre las condiciones meteorológicas particulares en cada segmento de un camino (ruta) en la evaluación de las consecuencias, para lo anterior es posible considerar las condiciones correspondientes al peor caso y/o establecer escenarios alternativos para la evaluación del riesgo.

Las características propuestas para el escenario del peor caso es una combinación de condiciones que ocurren rara vez y que son poco probables que persistan largo tiempo; por lo cual en los escenarios alternativos se pueden considerar condiciones más probables y menos conservadoras. Además, se debe contemplar que las incertidumbres debidas al modelo de simulación empleado, pueden aumentar las distancias estimadas ya que las condiciones (estabilidad, velocidad del viento y rugosidad) no permanecerán constantes cuando existen grandes distancias de afectación. De esta manera el escenario del peor caso puede sobrestimar el valor de las distancias de afectación, por lo cual puede recomendarse el uso de las distancias obtenidas en los escenarios alternativos para la planeación, preparación y atención de emergencias.

Por último, lo considerado en las metodologías para la evaluación del riesgo en el transporte en carreteras, es aplicable con algunas modificaciones al transporte ferroviario, por lo cual también deberán obtenerse a partir de los registros sobre accidentes, las tasas de accidentes, frecuencias y probabilidades condicionales necesarias.

## BIBLIOGRAFÍA

Abkowitz Mark y Cheng Paul D.M. (1989). "Hazardous materials transport risk estimation under conditions of limited data availability". Transportation Research Records 1245.

American Institute of Chemical Engineers, AIChE (1989). "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis". AIChE. Center for Chemical Process Safety.

American Institute of Chemical Engineers, AIChE (1994). "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash fires and BLEVEs". AIChE. Center for Chemical Process Safety.

American Institute of Chemical Engineers, AIChE (1995). "Guidelines for Technical Planning for On-site Emergencies". AIChE. Center for Chemical Process Safety.

American Institute of Chemical Engineers, AIChE (1996). "Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models". AIChE. Center for Chemical Process Safety.

Ashur Suleiman A., Baaj M. Hadi, Pijawka K. David y Sherman Derar S. (1997). "Environmental impact assessment of transporting hazardous waste generated by maquiladora industry in U.S.-México border region". Transportation Research Records 1602.

Aven Terje y Porn Kurt (1998). "Expressing and interpreting the results of quantitative risk analyses. Review and discussion". Reliability Engineering and System Safety No. 61, páginas 3-10.

Bakowits Mark, Alford Paula, Boghani Ashok, Cashwell Jon, Radwan Essan y Rothberg Paul (1991). "State and local issues in transportation of hazardous materials: toward a national strategy". Transportation Research Records 1313.

Batta Rajan y Chiu Samuel S. (1988). "Optimal obnoxious path on a network: transportation of hazardous materials". Operations Research Vol. 36 January-february 1988.

Bohnenblust Hans y Slovic Paul (1998). "Integrating technical analysis and public values in risk-based decision making". Reliability Engineering and System Safety No. 59, páginas 151-159.

Code of Federal Regulations (1996a). "CFR 49 part 1171.15. Immediate notice of certain hazardous materials incidents".

Code of Federal Regulations (1996b). "CFR 49 part 171.16. Detailed hazardous materials incident reports".

Consejo de Salubridad. "Ley Federal para el Control de Precursores Químicos, Productos Químicos Esenciales y Máquinas para Elaborar Cápsulas, Tabletas y/o Comprimidos". Diario Oficial de la Federación 26 de diciembre de 1997.

Environmental Protection Agency (EPA). "Offsite consequence analysis guidance". Abril de 1999.

Erkut Erhan y Verter Vedat (1995). "A framework for hazardous materials transport risk assessment". Risk Analysis Vol. 15 No. 5.

Frantzych Hakan (1998). "Risk analysis and fire safety engineering". Fire Safety Journal vol. 31, páginas 313-329.

Glickman Theodore S. (1991). "An expeditious risk assessment of highway transportation of flammable liquids in bulk". *Transportation Science* vol. 25 No. 2.

Harwood Douglas W., Viner John G. y Russell Eugene R. (1989). "Characteristics of accident and incidents in highway transportation of hazardous materials". *Transportation Research Records* 1245.

Harwood Douglas W., Viner John G. y Russell Eugene R. (1990). "Truck accident rate model for hazardous materials routing". *Transportation Research Records* 1264.

Leeming D. G. y Saccomanno F. Frank (1994). "Use of quantified risk assessment in evaluating the risk of transporting chlorine by road and rail". *Transportation research Records* 1430 páginas 27-35.

Lupton K. y Bolsdon D. (1999). "An object- based approach to a road network definition for an accident database". *Computers, Environment and Urban Systems* vol. 23, páginas 383-398.

Miaou Shaw-Pin, Hu Patricia S., Wright Tommy, Rathi Ajay K., y Davis Stacy C. (1992). "Relationship between truck accidents and highway geometric design: a poisson regression approach". *Transportation Research Records* 1376.

Neuhauser K. S., Kanipe F. L. y Weiner R. P. (2000). "RADTRANS Technical manual". *Transportation Safety and Security Analysis Department, Sandia National Laboratories*.

Office of Pipeline Safety (OPS). "Risk Management Program Standart, Draft". Septiembre 24 de 1996.

Rhyne William R. (1990). "Evaluating routing alternatives for transporting hazardous materials using simplified risk indicators and complete probabilistic risk analysis". *Transportation Resarch Records* 1264.

Rowe William O. (1983). "Risk Assessment Processfor Hazardous Materials Transportation". *Transportation Research Board. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice* 103.

Saccamanno F. Frank, Shortreed J. H., Van Aerde M. y Higgs J. (1989). "Comparison of risk measures for the transport of dangerous commodities by truck and rail". *Transportation Research Records* 1245.

Saccamanno F. Frank, Yu M. y Frank, Shortreed J. H. (1992). "Risk uncertainty in the transport of hazardous materials". *Transportation Research Records* 1383.

Saccamanno F. Frank y Cassidy Keith (1994). "QRA and decision making in the transportation of dangerous goods". *Transportation Research Records* 1430.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). "Estadísticas". <http://www.sct.gob.mx>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). "Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos". *Diario Oficial de la Federación*, 7 de abril de 1993.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Department of Transportation (USDOT) and Transport Canada. "Guía Norteamericana para respuesta en caso de emergencia 1999".

Secretaría de la Defensa Nacional. "Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos". *Diario Oficial de la Federación*, 11 de enero de 1972.

Secretaría de Gobernación-Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEGOB-SEDUE (1990). "Primer listado de actividades altamente riesgosas". *Diario Oficial de la Federación*, 28 de marzo de 1990.

Secretaría de Gobernación-Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEGOB-SEDUE (1992). “Segundo listado de actividades altamente riesgosas”. Diario Oficial de la Federación, 4 de mayo de 1992.

Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. “Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos”. Diario Oficial de la Federación, 25 de noviembre de 1988.

Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. “Manifiesto para casos de derrame de residuos peligrosos por accidente”. Diario Oficial de la Federación, 3 de mayo de 1989.

Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. “NOM-052-ECOL/1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente”. Diario Oficial de la Federación, 22 de mayo de 1993.

Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. “Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente”. Actualizada al 7 de enero del 2000.

Secretaría de Trabajo y Previsión Social. “Reglamento Federal de Seguridad e Higiene y Medio Ambiente de Trabajo”. Diario Oficial de la Federación, 21 de enero de 1997.

Slovic Paul (1998). “The risk game”. Reliability Engineering and System Safety No. 59, páginas 73-77.

Theodore Louis, Reynolds P. Joseph, Taylor Francis B. (1989). “Accident and emergency management”. Editorial John Wiley and Sons, New York.

U.S. Coast Guard (U.S.CG). <http://www.uscg.mil/hq/g-m/risk/rbdmg/decision.htm>

U. S. Department of Transportation (U.S.DOT). “Guide for preparing hazardous materials incidents reports” Revised January 1990.

U. S. Department of Transportation (U.S.DOT). “Comprehensive Truck Size and Weight Study”. Draft december 30 1998.

U. S. Department of Transportation (U.S.DOT). “Hazardous materials program plan 2000-2001”. [www.fmcsa.dot.gov/safetyprogs/hm.htm](http://www.fmcsa.dot.gov/safetyprogs/hm.htm)

Vatn Jorn (1998). “A discussion of the acceptable risk problem”. Reliability Engineering and System Safety No. 61, páginas 1-19.

Zhang Jianjun, Hodgson John y Erkut Erhan (2000). “Using GIS to assess the risk of hazardous materials transport in networks”. European Journal of Operational Research vol. 121, páginas 313-329.

*“Metodologías para la Evaluación del Riesgo en el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos”*  
Se terminó de imprimir en noviembre de 2002, xxxxxxxxxxxxxxxx, México, D.F. La edición en papel bond de 90 grs. en interiores y portada en cartulina sulfatada de 14 puntos, consta de 300 ejemplares más sobrantes para reposición.



**Coordinación General de Protección Civil  
Centro Nacional de Prevención de Desastres**

Av. Delfín Madrigal No.865,  
Col. Pedregal de Sto. Domingo,  
Deleg. Coyoacán,  
México D.F., C.P. 04360

[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)