

Resumen del Proyecto de investigación conjunta OCDE/AIPCR sobre

“El transporte de mercancías peligrosas a través de los túneles de carretera”

POR JESÚS LEAL BERMALJO,
CENTRO DE ESTUDIOS DE
CARRETERAS DEL CEDEX,
RAFAEL LÓPEZ GUARGA,
UNIDAD DE CARRETERAS DE
HUESCA, DIRECCIÓN
GENERAL DE CARRETERAS,
MIEMBRO DEL COMITÉ DE
TÚNELES C5 DE LA AIPCR,
MIGUEL GONZÁLEZ PORIAL,
CENTRO DE ESTUDIOS DE
CARRETERAS DEL CEDEX

Introducción

El tráfico por carretera a través de los túneles y, especialmente, el tráfico pesado de mercancías se ha visto incrementado de forma continua durante los últimos años. Gracias al desarrollo de las técnicas constructivas, los túneles se han convertido en una solución con gran

rentabilidad en muchos países, no sólo para solventar dificultades orográficas sino también para atravesar zonas urbanas minimizando los impactos ambientales locales. Sin embargo, a pesar de este panorama positivo en materia de construcción y seguridad, los problemas ligados al transporte de mercancías peligrosas en los túneles de carretera no han sido solucionados satisfactoriamente.

Cualquier incidente en el interior de un túnel donde aparezca involucrado un vehículo que transporta mercancías peligrosas puede llegar a ser muy costoso en términos de vidas humanas, medio ambiente, daños al propio túnel y perturbaciones al tráfico. Sin embargo, una prohibición innecesaria del tránsito de mercancías peligrosas por el interior de los túneles podría ocasionar unos costes

adicionales injustificados o perjuicios mayores en las rutas alternativas propuestas, muchas veces densamente pobladas.

Ante esta situación, se decidió emprender un estudio internacional con un enfoque global para la mejora de la seguridad del transporte de mercancías peligrosas por los túneles de carretera y que, de forma paralela, sirviera para facilitar la organización de este transporte, evitando así costes innecesarios.

El estudio que se presenta en este artículo, de título original *“Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels”*, ha sido coordinado conjuntamente por el Comité de Túneles (C5) de la AIPCR y el Programa RTR “Investigación en el dominio del transporte por carretera y su relación con el transporte intermo-



En los túneles se produce un alto porcentaje de mortalidad con relación al número de heridos, si se comparan estas cifras con las de otros accidentes de tráfico, lo que indica su gravedad.

dal" de la OCDE, con la contribución de la Comisión Europea y la financiación especial de doce países industrializados, entre los que se encuentra España.

Los objetivos concretos del trabajo fueron:

- Racionalizar y armonizar los procesos de toma de decisiones para la autorización o prohibición del transporte de mercancías peligrosas por cada túnel, así como promover normativas para lograr la implantación efectiva de dichas decisiones.
- Evaluar y mejorar las medidas de reducción de los riesgos derivados del transporte de mercancías peligrosas, y optimizar su implantación.

El informe se ha estructurado en los siguientes capítulos:

1. Información sobre grandes incendios ocurridos en túneles.
2. Revisión de las actuales normativas nacionales e internacionales.
3. Agrupaciones armonizadas de cargamentos de mercancías peligrosas.
4. Modelo de evaluación cuantitativa del riesgo (*Quantitative Risk Assessment Model- QRAM*).
5. Modelos de apoyo a la toma de decisiones (*Decision Support Model- DSM*).

6. Evaluación de las medidas de reducción del riesgo.

Este artículo presenta una síntesis de los trabajos e investigaciones desarrolladas en los cinco primeros capítulos, es decir, hasta la descripción de los modelos de evaluación cuantitativa del riesgo (QRAM) y de apoyo a la toma de decisiones (DSM), dejando para un artículo posterior la exposición de los resultados obtenidos al aplicar estos modelos sobre diferentes medidas de reducción del riesgo en los túneles.

1. Información sobre grandes incendios ocurridos en túneles

Debido al peligro que pueden causar en los túneles los fuegos en los que estén implicadas las mercancías peligrosas, se realizó un estudio sobre 33 grandes incendios ocurridos desde 1949 en los túneles de carretera de los países de la OCDE, en los que estaban involucrados vehículos pesados o varios ligeros.

Los grandes incendios estudiados fueron agrupados en las siguientes cuatro categorías:

- Fuegos de gasolina, gas o bixulfito carbónico (4 incendios).

- Fuegos de productos plásticos u otros derivados del petróleo (7 incendios).
- Fuegos con daños personales exceptuando los dos tipos anteriores (11 incendios).
- Otros fuegos causados por vehículos pesados, autobuses o múltiples vehículos ligeros (11 incendios).

A las conclusiones derivadas del análisis de estos 33 fuegos no se les puede atribuir el rigor estadístico de una muestra más significativa, pero ofrecen un elemento orientativo de las causas de aparición y de la gravedad de sus consecuencias.

Estos 33 grandes incendios causaron 103 fallecimientos, 101 heridos y 139 afectados por inhalación de humos. Esto significa un alto porcentaje de mortalidad con relación al número de heridos, si se comparan estas cifras con las de otros accidentes de tráfico, lo que indica su gravedad.

Los productos que ardieron como consecuencia de los anteriores accidentes fueron, en muchos casos, materiales no clasificados habitualmente como mercancías peligrosas, como pan, margarina, harinas, papel, pescados, material reciclado, bebidas no alcohólicas, algodón, pinturas, plásticos, aceites de pescado, polietilenos, resinas de pino o fibras de poliéster. La duración de los fuegos varió entre una y cinco horas, con la excepción del Mont Blanc en Francia, donde el incendio duró más de 53 horas, y de Nihonzaka en Japón, donde se superaron los 4 días.

Hay que resaltar que las colisiones entre vehículos y los accidentes de tráfico causaron menos del 50% de estos incendios. La mayoría fueron causados por algún tipo de problema técnico o eléctrico dentro del vehículo.

Parece ser que muchos de los problemas de los vehículos tuvieron su causa en la conducción por pendientes largas y pronunciadas, a menudo a altitud elevada. Por ello, es aconsejable que los vehi-

culos pesados vayan provistos de aparatos para la autodetección y apagado de incendios, y procedan a pasar regularmente unas inspecciones mecánicas y eléctricas, siendo positiva la construcción de suficientes zonas de descanso en las proximidades de los túneles para que los conductores puedan reposar a la vez que permiten el enfriamiento de los motores.

Muchos informes resaltaron que el hecho de tener claras las responsabilidades y que los tiempos de respuesta fueran cortos eran factores esenciales para reducir las consecuencias de los incendios. Por ello, recomendaban la existencia de planes de emergencia y el entrenamiento del personal. El estudio mostró que los bomberos fueron avisados en la mayoría de los casos, y su respuesta normalmente fue rápida y efectiva, aunque ardieran mercancías peligrosas.

Como conclusión se dedujo que, para disminuir el número de incendios en los túneles, la probabilidad de incidentes y accidentes debería ser reducida; y, cuando eventualmente ocurran, deberían ser tratados con rapidez por expertos.

2. Revisión y examen de las reglamentaciones nacionales e internacionales actuales

El estudio de las reglamentaciones nacionales e internacionales actuales en materia de transporte de mercancías peligrosas a través de túneles de carretera se dividió en dos misiones:

- Revisión de la reglamentación existente, mediante una encuesta internacional por correo dirigida a instituciones relacionadas directamente con la gestión y la explotación viaria de 24 países desarrollados.
- Entrevistas para conocer en detalle los problemas de aplicación en algunos países seleccionados (Austria, Francia, Ale-

mania, Holanda, Japón, Noruega, Suiza, Reino Unido y el Estado de California en EE. UU.).

A través de estos estudios detallados, se examinaron las diversas regulaciones concretas de cada túnel, con el fin de identificar los posibles problemas relacionados con los procesos de toma de decisiones, las actuaciones para el cumplimiento de las reglamentaciones, y la explotación y las operaciones de transporte.

Según los resultados del estudio realizado, se ha comprobado que todos los países industrializados siguen, en mayor o menor medida, unas clasificaciones normalizadas para el transporte de mercancías peligrosas por carretera. Así, en Europa se emplea el Código ADR (*European Agreement on the Transport of Dangerous Goods by Road*) o bien unos derivados basados en él, mientras que en la mayoría de los estados de Estados Unidos y provincias de Canadá se emplean unos códigos derivados de los modelos desarrollados por las Naciones Unidas; y, por su parte, Australia y Japón emplean sus propios códigos formalizados.

Sin embargo, esta situación no se repite para el caso de las normativas aplicables al transporte de mercancías peligrosas por túneles, variando aquéllas considerablemente entre los diversos países e, incluso, entre las regiones, siendo común encontrar regulaciones específicas desarrolladas para un solo túnel concreto.

Frecuentemente se establecen regulaciones para túneles con características especiales (túneles bajo el agua, túneles urbanos o de gran antigüedad), variando considerablemente las restricciones impuestas. Entre éstas se pueden ci-



Las restricciones impuestas a los túneles varían considerablemente en función de su equipamiento.

tar la distancia mínima entre vehículos, el límite de velocidad, las limitaciones horarias, la necesidad de escolta, las notificaciones obligatorias de la carga, la cantidad y el tipo de mercancía, los requisitos del vehículo, etc.

En general, la mayoría de los países no emplean métodos de análisis cuantitativo de riesgos (*Quantitative Risk Assessment-QRA*) para decidir acerca de las restricciones al transporte de mercancías peligrosas que se van a imponer en un determinado túnel, sino que basan sus actuaciones en decisiones políticas más o menos subjetivas. No obstante, parece que la tendencia hacia un rigor científico ha cobrado más importancia y va a ser tenida en cuenta en el desarrollo de las futuras regulaciones.

De esta situación normativa se derivan una serie de problemas que dificultan la toma de decisiones, el control y aplicación de la ley, y las operaciones de transporte:

- La práctica actual de autorizar el transporte de todo tipo de mercancías peligrosas por los túneles está en clara contraposición a la regla general que, por principio, recomienda lo contrario en el caso de no realizarse ningún análisis particular.
- La mayoría de las regulaciones desarrolladas son de aplicación

a los túneles de titularidad estatal, existiendo una escasa o nula normativa aplicable a los de otras administraciones.

- La variación de las restricciones entre los diversos túneles que componen un trayecto dificulta su cumplimiento por parte de los transportistas, con el agravante de la falta de información previa a través de los medios apropiados (paneles o señales de tráfico). Además, la obligatoriedad de unos itinerarios alternativos más peligrosos (calles y carreteras secundarias) complica el transporte de las mercancías peligrosas y aumenta el riesgo y las consecuencias de accidente. Por otro lado, no hay normas estrictas para señalar los itinerarios alternativos si en un túnel se prohíbe la entrada de mercancías peligrosas. Por último, no existe mucha información sobre el grado de cumplimiento de las normas de restricciones de circulación en túneles sin un control permanente.

Muchos de estos problemas podrían ser resueltos mediante la introducción de unas señales de carretera normalizadas internacionalmente que comuniquen de forma clara las restricciones en cada túnel y las vías alternativas existentes. Además, una labor de difusión de las normativas permitiría a los transportistas la correcta planificación de las rutas. Esta información se debería suministrar a los transportistas internacionales en los puestos fronterizos o en los peajes.

Por otro lado, se deberían reajustar las reglamentaciones en los túneles para que no entren en conflicto con las de los tramos de carretera a los que pertenecen, teniendo un carácter uniforme en todo el territorio.

Los resultados de este capítulo reafirmaron la necesidad del estudio, que probablemente servirá de base en la elaboración de las futuras normativas para la solución del problema.



La obligatoriedad de unos itinerarios alternativos más peligrosos (calles y carreteras secundarias) complica el transporte de las mercancías peligrosas y aumenta el riesgo y las consecuencias de accidente.

3. Agrupación armonizada de las cargas peligrosas

3.1. Objetivos y principios generales de la agrupación

Como se ha visto en el capítulo anterior, la falta de una normativa internacional armonizada provoca una serie de problemas para el tráfico de mercancías peligrosas a través de los túneles de carretera. Esta armonización no significa que la misma regulación deba ser aplicada a todo tipo de túneles, ni siquiera que dos túneles similares tengan que seguirla; sino que todas las regulaciones deberían ser expresadas de la misma forma en todos los sitios, es decir, referidas al permiso o prohibición de grupos de cargas idénticas. Estos grupos de cargas obedecen a la denominada "agrupación armonizada de cargas de mercancías peligrosas", donde se clasifican las cargas no sólo atendiendo a su naturaleza, sino a la forma en que son transportadas (a granel o en envases) y a la presencia de diferentes mercancías peligrosas en un mismo vehículo.

Con el empleo de estos grupos de cargas se logra referir la normativa a unas bases comunes, dejando a decisión de la autoridad competente sobre el túnel la capacidad de permitir, prohibir o restringir el transporte de cada grupo de mercancías peligrosas.

Dada la importancia de llegar a un consenso internacional en la agrupación final de mercancías peligrosas, para la realización de este capítulo se contó con la colaboración adicional de comités de expertos en el transporte de mercancías peligrosas de las Naciones Unidas y de la Comisión Europea.

3.2. Propuesta de grupos de cargas

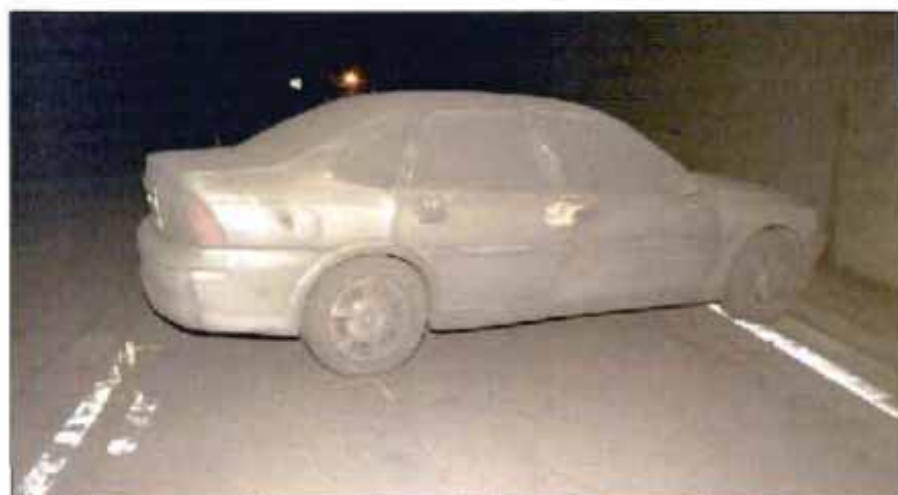
Prohibir el paso por el túnel de mercancías peligrosas que estén autorizadas al aire libre sólo puede estar justificado donde el riesgo de accidentes graves (por ejemplo, con muchas víctimas o daños inaceptables para el túnel) sea mayor en el túnel que al aire libre. Esto significa que las materias peligrosas que no puedan causar muchas víctimas, en principio, no deberían ser consideradas para tal decisión.

Para realizar esta agrupación se han tenido en cuenta las tres eventualidades principales que pueden causar en el túnel un gran número de víctimas y daños para la estructura: las explosiones, las fugas de gases o líquidos volátiles tóxicos, y los incendios.

Dentro de las explosiones cabe distinguir las "explosiones muy grandes", provocadas por incendios de contenedores llenos de LPG (gases licuados del petróleo) a granel que dan lugar a lo que se conoce como "hot BLEVE" (explosión de vapor en expansión procedente de líquidos en ebullición, con aparición de "bola de fuego") y las "explosiones grandes" causadas por incendios de cargas totales de gases comprimidos no inflamables sometidos a elevados calentamientos que provocan el llamado "cold BLEVE" (explosión de vapor en expansión procedente de líquidos en ebullición, sin "bola de fuego"). Las grandes fugas de gases tóxicos pueden estar causadas por pérdidas de gases tóxicos (comprimidos, licuados o disueltos) o de líquidos volátiles tóxicos. Los grandes incendios quedaron ya definidos en capítulo anterior por su importancia en el estudio de riesgos.

Todos estos peligros suelen presentar unas consecuencias más graves en los túneles que en las rutas superficiales y, por lo tanto, pueden justificar la prohibición del tránsito, salvo que se adopten medidas especiales.

En consecuencia, se propone un sistema con cinco grupos (A, B, C, D y E) en orden decreciente de peligrosidad (pues cada grupo se forma a partir del anterior eliminando sucesivamente el tipo de cargas de mayor peligrosidad) y, por tanto, en orden creciente de restricción, pues la prohibición del paso por un túnel de las mercancías pertenecientes a uno de los grupos implica automáticamente la restricción del paso de las mercancías de los grupos anteriores (ya que, como se ha mencionado, cada uno de éstos incluye,



En los túneles se deben evaluar los movimientos del humo desde el foco del incendio.

además de las del grupo que se prohíbe explícitamente, algún tipo de mayor peligrosidad). Esto es, las cargas del tipo E, que sólo incluyen aquellas que no requieren restricción alguna ni placa identificativa en el camión para su transporte, están incluidas en el D, éstas en el C y así sucesivamente hasta las del tipo A, que incorporarían todas las cargas autorizadas en el transporte por carretera, incluyendo las más peligrosas. En la *tabla 1* se muestran las cargas que contiene cada grupo.

Así, a partir de estos grupos cada túnel puede regular el tipo de mercancías peligrosas a las que permite o prohíbe su tránsito, en determinadas horas y bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, estas regulaciones serán del tipo:

Grupo C (paso libre) –
– Grupo B (con escolta)

Esto significa que las cargas del grupo A que no están incluidas en el grupo B tienen el paso prohibido, las del grupo B que no están incluidas en el grupo C tienen autorizado su paso con escolta, mientras que las del grupo C pueden atravesar el túnel libremente.

La descripción particularizada de las mercancías que se pueden incluir en cada uno de los cinco grupos, incluyendo clases a modo de subgrupos, ha sido realizada por diversas instituciones de forma separada. Así, la clasificación de las Recomendaciones del Comité de Expertos en Transporte de Mercancías Peligrosas de las Naciones Unidas es ampliamente reconocida en todo el mundo: pe-

MAYOR RESTRICCIÓN MENOR PELIGROSIDAD ↓	Grupo A	Todas las mercancías peligrosas autorizadas en carretera abierta.
	Grupo B	Grupo A excepto aquellas cargas que pueden provocar una "explosión muy grande" ("hot BLEVE" o equivalente).
	Grupo C	Grupo B excepto aquellas cargas que pueden provocar una "explosión grande" ("cold BLEVE" o equivalente) o un escape tóxico de dimensiones considerables.
	Grupo D	Grupo C excepto aquellas cargas que pueden ocasionar un "gran incendio."
	Grupo E	Grupo de cargas no consideradas peligrosas o, entre las peligrosas, las que no requieran una marca o distintivo especial en el camión.

Tabla 1 Cargas contenidas en cada uno de los grupos.

1- BLEVE: "Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion".



El modelo QRAM permite comparar riesgos en rutas alternativas

ro, al ser multimodal, son más fáciles de emplear otras estrictamente aplicables al transporte por carretera, como la del ADR (Acuerdo Europeo en materia de Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera).

Por último, estos grupos propuestos deben ser coherentes con los empleados en los capítulos siguientes, tanto en el Modelo de Evaluación Cuantitativa de Riesgo (QRAM) como en el Modelo de Apoyo a las Decisiones (DSM). Es decir, el QRAM debe incorporar la representación de unos escenarios o situaciones de posibles accidentes basados en los grupos de cargas descritos, y el DSM debe procesar los resultados del QRAM de forma que las decisiones de permitir o prohibir el paso de ciertas mercancías peligrosas por un túnel se expresen en función de los mismos grupos de cargas.

4. Modelo de Evaluación Cuantitativa de los Riesgos (QRAM)

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, la prohibición o el permiso del transporte de determinadas mercancías peligrosas por un túnel debe ser una decisión que deben tomar las autoridades competentes a partir de un análisis preciso y objetivo de los riesgos, tanto para las personas (ya sean los usuarios de la carretera o los habitantes cercanos) como

para la propia estructura del túnel y para el medio ambiente. Los modelos de evaluación cuantitativa del riesgo (QRAM) son unas herramientas que proporcionan unas estimaciones de los riesgos para diferentes mercancías peligrosas, túneles y escenarios de transporte que cumplen las mencionadas condiciones de objetividad y precisión.

4.1. Descripción del problema

El riesgo viene definido por dos aspectos: la probabilidad de ocurrencia del siniestro y las consecuencias en caso de ocurrencia de dicho siniestro. La cuantificación del riesgo de accidente es difícil de valorar, dado que la probabilidad de ocurrencia de los accidentes de tráfico es relativamente baja, siendo aún menor para la aparición de accidentes de mercancías peligrosas en túneles. Por otro lado, existen numerosos factores que influyen en las consecuencias. Por ello, son necesarios unos modelos cuantitativos de valoración del riesgo, asistidos por ordenador, para abordar el problema.

Este tipo de modelo ha sido empleado durante años para valorar el riesgo del transporte de mercancías peligrosas por carretera, e incluso algunos países como Noruega y Francia han desarrollado su aplicación a los túneles. Sin embargo, se requería un modelo de QRAM global, que abarcara tanto a los túneles como a los tramos de carretera al aire libre. Debido a su complejidad, es-

te modelo ha tenido que ser elaborado a través de la cooperación internacional, lo que permite su aplicación en cualquier país.

4.2. Objetivo de los QRAM

El objetivo del QRAM es la cuantificación de los riesgos derivados del transporte de mercancías peligrosas en rutas determinadas del sistema viario, permitiendo así la comparación entre rutas alternativas con o sin túneles.

Los componentes básicos del modelo de evaluación cuantitativa de los riesgos desarrollado en este estudio son: los indicadores, los escenarios o situaciones posibles de accidente, la evaluación de la probabilidad del accidente, la determinación de las consecuencias de éste (físicas, estructurales y ambientales), la evaluación comparada de las consecuencias entre las soluciones superficial y subterránea, el análisis de sensibilidad e incertidumbre, y la validación.

La metodología seguida en todo QRAM incluye la elección de un número limitado de mercancías y de situaciones o escenarios representativos del accidente, la determinación de los efectos físicos de estos escenarios tanto para la solución superficial como para la subterránea, el cálculo de los efectos fisiológicos de los escenarios de accidente escogidos sobre la población local y sobre los usuarios de la carretera (heridos y muertos), el análisis de las posibilidades de escape del siniestro y de protección, y la determinación de las probabilidades de ocurrencia del accidente.

4.3. Indicadores

Las consecuencias de un accidente con mercancías peligrosas son heridos, muertos, destrucción de edificios y estructuras, y daños ambientales. Para su incorporación en el modelo es necesario simplificar los indicadores, habiéndose escogido para el presente estudio los siguientes: riesgo social, riesgo individual, esti-

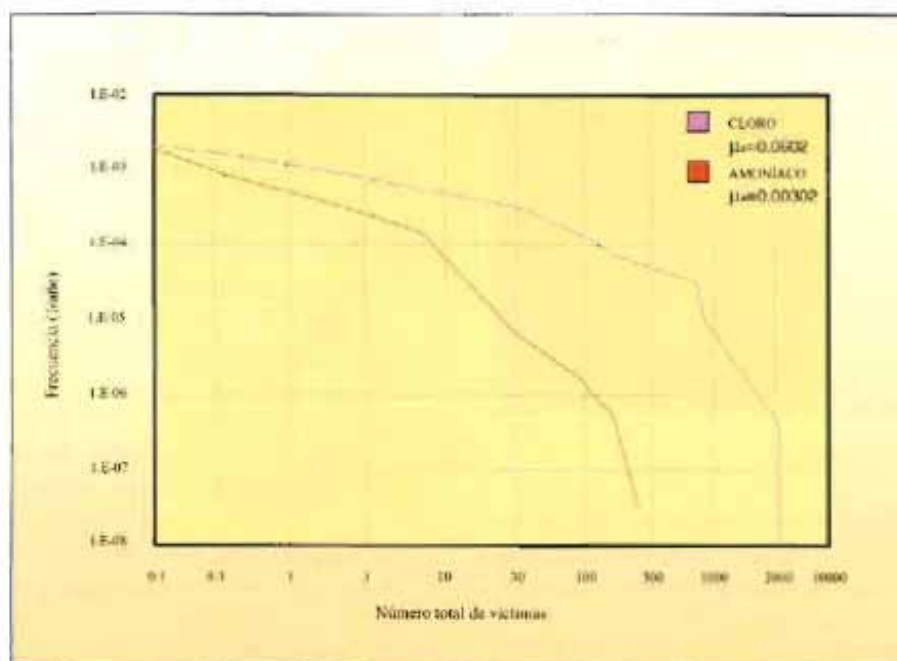


Figura 1. Consecuencias de fugas de cloro y amoníaco en función de su probabilidad de ocurrencia.

maciones del daño estructural y estimaciones del daño ambiental.

- **Riesgo social.** Se analiza a través de las curvas F/N, que relacionan la frecuencia de aparición anual de cada escenario de accidente con el número de víctimas derivado. La figura 1, que muestra las consecuencias de sendas fugas de amoníaco y de cloro a través de una grieta de 50 mm de diámetro, ilustra esta relación entre la frecuencia del accidente y su severidad, presentando en el eje de abscisas el número de víctimas "x" (heridos y muertos), en escala logarítmica, y en el eje de ordenadas las frecuencias anuales de aparición de accidentes con dicho número "x" de víctimas, también en escala logarítmica. Para cada situación, en función de la población, tráfico, tráfico de mercancías peligrosas, condiciones meteorológicas, etc., aparece una curva de riesgo social.

Existe una gran diferencia entre las dos curvas de la figura 1 (un factor del orden de 20), y de ellas se puede vislumbrar la justificación para que el transporte de cloro por carretera esté prohibido en determinados países como Austria o

Noruega, o simplemente permitido en pequeñas cantidades, como en el caso de Francia o Canadá.

- **Riesgo individual.** Representa el riesgo, expresado en térmi-

nos de la probabilidad de resultar herido o muerto, para la población local en cada escenario de accidente. El modelo calcula la distribución espacial (en relación con la distancia a la carretera) del riesgo. La figura 2 muestra la distribución bidimensional del riesgo individual a lo largo de un itinerario, donde los valores desde -2 hasta -14 son las potencias de 10 que describen el riesgo de muerte en caso de permanencia constante en el lugar que describen las coordenadas (x,y).

- **Estimaciones materiales y ambientales.** El modelo calcula una estimación aproximada de los daños materiales o ambientales basándose en lo explicado en el apartado 4.6.

4.4. Situaciones o escenarios de accidente

El conjunto de todas las posibles situaciones de accidente abarcaría la consideración de las diferentes

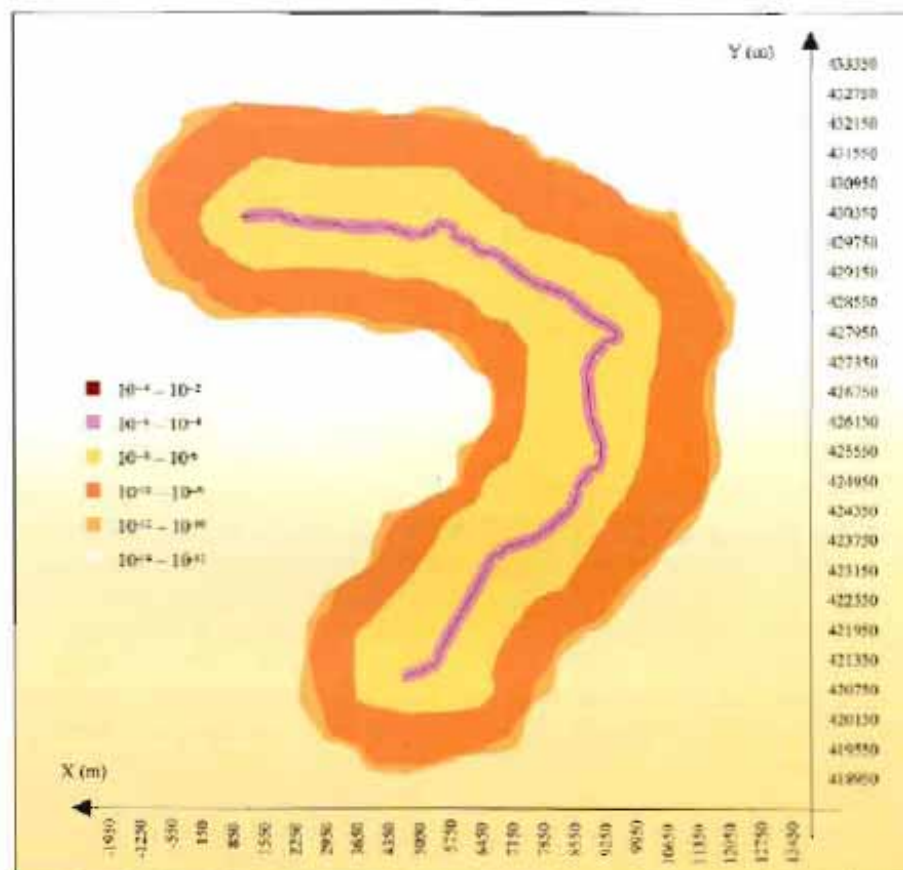


Figura 2. Distribución bidimensional de los riesgos individuales a lo largo de la ruta. Por ejemplo, un punto situado en la franja de color amarillo presentará una probabilidad de muerte anual entre 10^{-4} y 10^{-5} .

Núm.	DESCRIPCIÓN	CAPACIDAD DEL TANQUE	ANCHURA DE FISURA (mm)	VELOCIDAD SALIDA DE MASA (kg/s)
1	Fuego tipo de HGV de 20 MW	-	-	-
2	Fuego tipo de HGV de 100 MW	-	-	-
3	BLEVE de LPG en cisterna	50 kg	-	-
4	Fuego de charco de gasolina	28 toneladas	100	20,6
5	VCE de gasolina	28 toneladas	100	20,6
6	Fuga de cloro	20 toneladas	50	45
7	BLEVE de LPG a granel	18 toneladas	-	-
8	VCE de LPG a granel	18 toneladas	50	36
9	Fuego antorcha de LPG a granel	18 toneladas	50	36
10	Fuga de amoníaco	20 toneladas	50	36
11	Fuga de acroleína en cisterna	25 toneladas	100	24,8
12	Fuga de acroleína a granel	100 litros	4	0,03
13	BLEVE de dióxido de carbono a granel (sin incluir efectos tóxicos)	20 toneladas	-	-
HGV	Vehículo pesado de mercancías (<i>heavy goods vehicle</i>).			
BLEVE	Explosión de vapor en expansión procedente de líquidos en ebullición ¹ .			
VCE	Explosión de nube de vapor (<i>vapour cloud explosion</i>).			
LPG	Gases licuados del petróleo (<i>liquid petroleum gas</i>).			

Tabla 2 Principales características de los 13 escenarios seleccionados.

clases de materias peligrosas existentes, los diversos tipos de accidentes, los tamaños de las grietas, los diferentes estados de carga del vehículo, las condiciones meteorológicas y muchas otras variables. Como ello no es posible, el modelo QRAM ha considerado un número representativo y limitado de situaciones o escenarios de accidente (véase la tabla 2 "Principales características de los 13 escenarios seleccionados"), que pueden ser combinados por el usuario para reproducir su situación. Dos de ellos se refieren a incendios de media y gran intensidad de vehículos pesados sin mercancías peligrosas, y los otros (hasta un total de 13) se refieren a los diferentes grupos de mercancías peligrosas. Estas situaciones o escenarios fueron seleccionados para representar a los diferentes tipos o agrupaciones de mercancías peligrosas del capítulo 3 y para examinar diferentes efectos graves: sobrepresión, temperatura y toxicidad.

A cada escenario se le asocia un "árbol de sucesos", donde quedan incorporados todos los posibles factores causantes del siniestro. Así, para cada tipo de ac-

cidente, la probabilidad de ocurrencia será la suma de las probabilidades de aparición de cada una de las causas.

Como ejemplo, la figura 3 muestra el árbol de sucesos para los escenarios de incendio de vehículos pesados sin mercancías peligrosas, del que se derivaría la siguiente ecuación de probabilidad:

$$P_{\text{incendio}} = P1 + P2 = (P1.1 \times P1.2) + (P2.1 \times P2.2)$$

4.5. Evaluación de la probabilidad del accidente

El objetivo es determinar la probabilidad de ocurrencia de cada uno

de los escenarios de accidente escogidos, en función de las características de cada tramo de carretera en estudio. Para ello, el recorrido se divide en tramos homogéneos, en términos de elementos de la carretera, tráfico, mercancías transportadas, medio ambiente y condiciones meteorológicas.

Una vez definidos los tramos homogéneos, el cálculo de la probabilidad sigue los siguientes pasos:

1. Cálculo de los índices de probabilidad de accidente con vehículos pesados implicados (con y sin mercancías peligrosas) por cada millón de vehi-

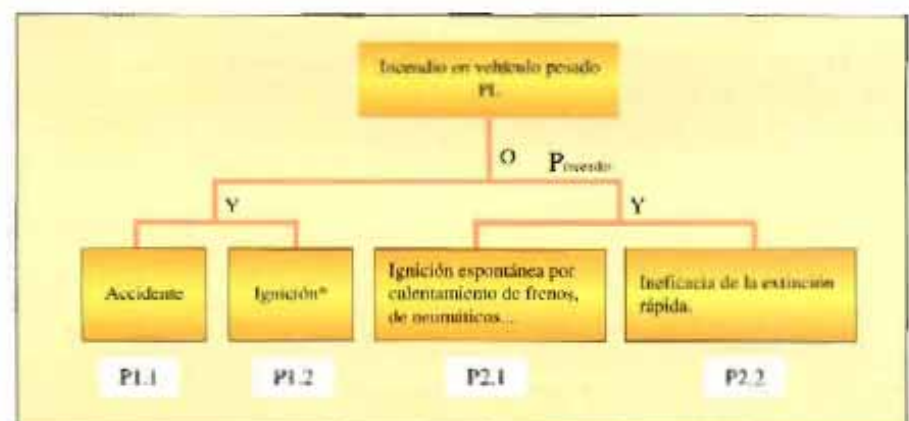


Figura 3. Árbol de sucesos. Escenario de incendio de vehículos pesados sin mercancías peligrosas.

culos-kilómetro, según el país, la zona (urbana/rural), número de calzadas, itinerario en superficie o túnel, y estado superficial del pavimento.

2. Cálculo del tráfico de vehículos pesados y de vehículos con mercancías peligrosas para cada uno de los diversos tramos de carretera considerado. Estos valores del tráfico deben ser introducidos por el usuario y son transformados en un número de vehículos-kilómetro por año.
3. Proporción de los accidentes de vehículos pesados capaces de provocar fuegos de 20 MW y de 100 MW, así como la proporción de vehículos pesados de mercancías peligrosas de cada tipo que pueden causar alguno de los escenarios descritos en el modelo.
4. Cálculo de los índices de cada situación o escenario (sociales, individuales, ambientales y estructurales) y la probabilidad de ocurrencia.

Algunos escenarios pueden ocurrir sin accidente en el sentido estricto de la palabra (p.ej.: sobrecalentamiento de los frenos). Tales incidentes, junto con los accidentes, son denominados "sucesos". Todos los pasos son calculados por el modelo QRAM con la excepción del segundo que, lógicamente, requiere la entrada de datos por parte del usuario.

Al final, el resultado se presenta en una tabla con los escenarios posibles, particularizados según el tipo y cantidad de carga, para los cuales se han obtenido las probabilidades de ocurrencia, tanto para la solución superficial como para la subterránea, en zonas urbanas o rurales.

4.6. Cálculo de los daños personales, estructurales y ambientales

La determinación del alcance físico del siniestro se presenta como paso previo al cálculo de los daños fisiológicos derivados de un accidente con mercancías peligrosas.



En el modelo se han incluido cálculos que tienen en cuenta las posibilidades de escape y de protección.

Así, los efectos físicos de escapes de gases se determinan con unos modelos de la dispersión de gases densos. Las explosiones de una nube de vapor al aire libre se evalúan calculando las dimensiones de la nube de vapor y la masa inflamable de esta nube respecto de la masa total liberada, y en los túneles se calcula la sobrepresión generada por la ignición de la nube. El cálculo de los efectos de los incendios de líquidos al aire libre se basa en los efectos de radiación térmica de fuegos de grandes charcos. En los túneles se deben además evaluar los movimientos del humo desde el foco del incendio. Un BLEVE tiene dos fases: una expansión física tras la ruptura del contenedor, y una reacción química si la materia peligrosa es inflamable.

A partir de estos alcances se calculan los posibles daños personales, estructurales y ambientales.

- **Daños personales.** Dado que el número de heridos no decrece necesariamente con el aumento de distancia al foco causante del siniestro, al contrario de lo que suele ocurrir con los fallecimientos, el mo-

dulo QRAM emplea curvas F/N que relacionan la frecuencia de ocurrencia anual del siniestro con el número de muertos o con la suma de los heridos más los muertos, para poder estimar el número de daños personales, tanto para fuegos como para explosiones o escapes tóxicos.

- **Daños estructurales.** Los daños estructurales suelen causar serios problemas a la integridad del túnel, bien en el revestimiento en caso de túneles excavados, bien en las paredes laterales y techos en el caso de estructuras portantes. Estos daños dependerán del tipo de material empleado y de la temperatura alcanzada durante el siniestro. En general, los materiales usualmente empleados en los elementos estructurales (hormigón en masa, hormigón armado y pretensado, acero) experimentan una reducción temporal de la resistencia a partir de los 200-300 °C, que llega a caer al 50% de la inicial a 500-600 °C, y también una reducción permanente, que se hace significativa, dependiendo del material específico, entre los 300 y los



Los peligros ligados a las mercancías peligrosas suelen presentar unas consecuencias más graves en los túneles que en las rutas superficiales y, por lo tanto, pueden justificar la prohibición del tránsito, salvo que se adopten medidas especiales.

500 °C. A este respecto hay que indicar que los mayores espesores de material en las estructuras de hormigón hacen que se establezca un gradiente de temperaturas entre la superficie del material y la zona interna, lo que sirve de protección a las capas interiores.

Las temperaturas de colapso para los materiales de equipamientos auxiliares son de 180 °C para los termoplásticos (presentes en las vainas de los cables, cajas, enchufes), 100 °C para las bandejas de cables y 250 °C para los cables mismos de los circuitos de iluminación y de comunicaciones, mientras que los aparatos de iluminación no pueden soportar más de 40 °C. Por su parte, los cables del circuito de iluminación de emergencia pueden resistir hasta los 1.000 °C.

Los gastos de reparación serán función de los daños causados en el accidente para cada unidad de obra afectada y vienen presentados en el modelo como porcentajes de los gastos de nueva construcción para la misma tarea.

- **Daños ambientales.** Los indicadores empleados en el modelo QRA son más bien cualitativos, en oposición a los empleados para los daños per-

sonales y estructurales. En general, son referidos a impactos directos sobre el agua superficial y subterránea, sobre la atmósfera y sobre el suelo, que a su vez tendrán impactos derivados sobre los seres humanos, el ecosistema, la fauna y la flora.

Concretamente, los incendios pueden producir la contaminación del aire, debido a los productos de combustión, y de las aguas (superficiales y subterráneas) y del suelo, debido al agua utilizada para apagarlos. Las explosiones de nube de vapor y los BLEVE pueden producir la contaminación del agua superficial y del suelo, debido a los productos de combustión y a la dispersión de éstos en la atmósfera. Los productos de cloro y amoníaco producen un gas tóxico que se dispersa en la atmósfera y contamina el agua superficial y el suelo.

4.7. Evaluación de las consecuencias

Los cálculos de daños para cada alternativa (itinerarios a cielo abierto y en túnel) y cada escenario de accidente proporcionan los resultados del riesgo individual (probabilidad de resultar muerto o herido para la población) y so-

cial (curvas F/N, que relacionan la frecuencia de aparición del siniestro con el número de muertos que puede ocasionar) para cada una de las situaciones, permitiendo su comparación.

Posibilidades de escape/protección. En el modelo se han incluido también unos cálculos que tienen en cuenta las posibilidades de escape y de protección, tanto para las situaciones de carretera a cielo abierto como para los tramos que incluyen túneles. Para la evacuación del túnel se ha tenido en cuenta los tiempos de detección y de alarma (previos al movimiento) y los tiempos de respuesta de los ocupantes.

4.8. Análisis de sensibilidad y validación del modelo

Dado que todos los análisis deterministas conllevan un grado de inseguridad, se han realizado los correspondientes análisis de sensibilidad del modelo, estudiando cómo influye la variación de ciertos parámetros, cuyos valores exactos son muy difíciles de conocer *a priori* (por ejemplo, la velocidad de recorrido, los sistemas de alarma, el tiempo de respuesta), en los resultados de daños e impactos derivados.

La evaluación del modelo de QRAM desarrollado fue realizada por un grupo *ad hoc* de expertos en el campo del análisis de riesgos y la modelización que no estuvieron implicados en su proceso de construcción. Los casos de estudio escogidos para la validación cubrían los distintos escenarios posibles en cuanto al tipo de túnel (un tubo o dos tubos, túnel en roca o falso túnel), medio ambiente próximo, entorno urbano o rural, diferentes sistemas de ventilación y condiciones del tráfico.

Tras ciertos ajustes y después de realizar los análisis de sensibilidad para verificar los resultados calculados, el modelo de análisis de riesgo desarrollado quedó listo para su aplicación. El grupo de validación recomendó la utilización del *software* desarrollado pa-

ra el cálculo y comparación de los riesgos sociales de cada túnel en particular y sus posibles itinerarios de desvío, y para el cálculo de la distribución bidimensional de los riesgos individuales a lo largo de la ruta.

5. Modelo de ayuda a la toma de decisiones (DSM)

El modelo DSM desarrollado es una herramienta de apoyo para facilitar la toma de decisiones sobre los grupos de mercancías peligrosas a las que se debería permitir el tránsito por un túnel determinado bajo ciertas condiciones. Las decisiones deben tomarse en función de los resultados obtenidos con el modelo de Evaluación Cuantitativa de los Riesgos (QRAM) y con la condición previa de que el decisor actúe pensando en la seguridad de los usuarios de la carretera y de la población local en todas las rutas alternativas superficiales o subterráneas consideradas. La estructura del proceso de toma de decisiones puede verse sintetizada en la figura 4.

5.1. Definición del problema de la toma de decisión

El problema de la decisión debe ser analizado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Definición del objetivo global que se desea alcanzar, que es establecer un marco para evaluar los riesgos, así como decidir a qué grupos de mercancías peligrosas de los propuestos en el capítulo 3 se les permitirá el paso por el túnel o por las rutas alternativas. De forma similar, deberá tomarse una segunda decisión con relación a las medidas de mitigación de efectos que haya que instalar en el túnel. Estas dos decisiones están fuertemente relacionadas, pues las medidas de reducción del riesgo influyen

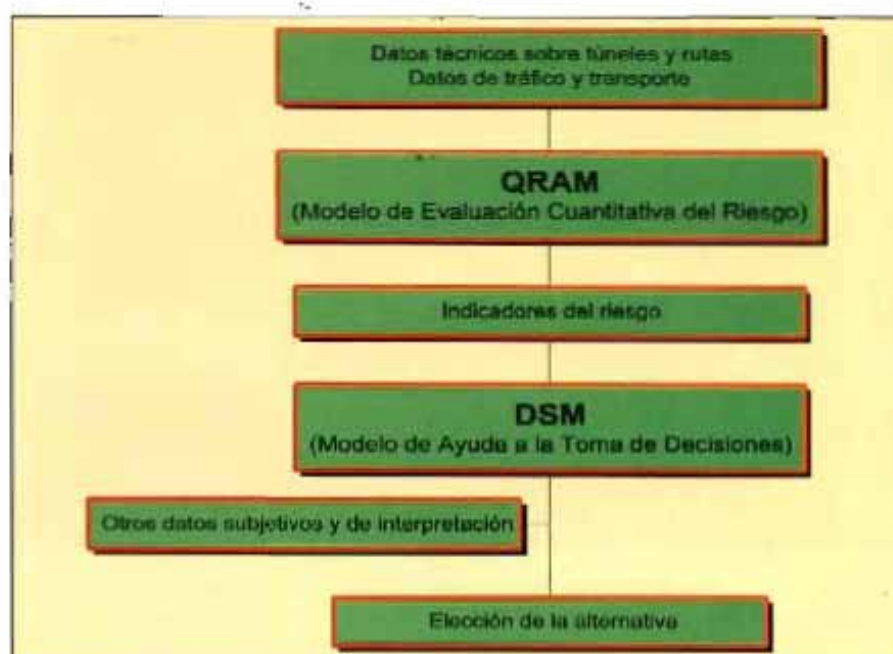


Figura 4. Estructura del proceso de estudio y toma de decisión.

rán sobre qué cargas pueden aceptarse en el túnel; y, a la inversa, las mercancías permitidas influirán en la elección de las medidas.

- Determinación del responsable de la toma de decisiones y de su punto de vista. El responsable debería ser alguna autoridad con competencias sobre el área geográfica completa, es decir, sobre el túnel y las rutas alternativas.
- Descripción del problema de toma de decisión, en términos de las alternativas posibles.
- Elección de un proceso de análisis de alternativas de los tres ofrecidos por el modelo DSM.

El proceso de decisión sobre el tipo de mercancías que pueden atravesar el túnel bajo ciertas condiciones, por minimizar riesgos frente a otras alternativas, incluye los siguientes pasos:

- Aplicación del modelo QRAM al itinerario del túnel y a la ruta alternativa empleando las medidas estándar de reducción de riesgo. Se requieren aplicaciones separadas del modelo para cada periodo de tiempo, espectro de usuarios de la carretera y población local, así como para obtener resultados

sobre el número de muertos y la suma de muertos más heridos. El modelo se aplicará, por tanto, varias veces hasta cubrir todas las posibilidades en función de las agrupaciones.

- Los resultados de estas aplicaciones del modelo QRAM se combinan con los grupos de cargas peligrosas (de A a E). Entonces, la autoridad responsable elige la regulación de cargas que se va a imponer con la ayuda del Modelo de Apoyo a la Decisión (DSM), considerando las prioridades políticas y cualquier otra información.
- El responsable de la explotación y gestión del túnel optimiza las medidas de reducción del riesgo teniendo en cuenta la regulación de mercancías peligrosas elegida. En el caso de que haya mucha diferencia entre las medidas de reducción del riesgo inicialmente previstas en el modelo QRAM y las optimizadas en este paso, fruto de los resultados del modelo DSM y del tipo de cargas elegido, se volvería a aplicar el modelo QRAM teniendo en cuenta estas modificaciones, para asegurarse de que la regulación

TOMA DE DECISIÓN: VARIABLES CONSIDERADAS**Consecuencias derivadas de los accidentes con mercancías peligrosas dentro del túnel**

- Muertos y heridos entre los usuarios de la carretera
- Muertos y heridos entre la población local
- Daños al propio túnel
- Tiempo y recorrido adicionales debidos al desvío del tráfico en caso de accidente
- Pérdida de ingresos de explotación mientras el túnel está cerrado
- Daños al medio ambiente

Consecuencias derivadas de los accidentes con mercancías peligrosas a cielo abierto

- Muertos y heridos entre los usuarios de la carretera
- Muertos y heridos entre la población local
- Daños al medio ambiente

Consecuencias derivadas de desviar el tráfico por la ruta alternativa a cielo abierto

- Tiempo y recorrido adicionales debidos al desvío
- Pérdida de ingresos de explotación por el desvío

Tabla 4. Variables consideradas para la toma de decisión del transporte de mercancías peligrosas.

escogida es la correcta. Este proceso se repetiría hasta que las medidas de reducción del riesgo optimizadas coincidan con las empleadas en el modelo QRAM y, además, el grupo de mercancías optimizado sea igual al grupo previamente propuesto. Se debe tener en cuenta que la convergencia del proceso hasta alcanzar la agrupación y las medidas correctoras asociadas ideales puede no ser sencilla, por exceso de sensibilidad del modelo.

5.2. Datos de entrada del modelo DSM

Los datos de entrada requeridos por el modelo DSM son precisamente los indicadores obtenidos del modelo QRAM de análisis de riesgos. Además, determinados intereses o prioridades de los responsables en la toma de decisiones pueden ser incorporados como datos adicionales o para la ponderación de los indicadores existentes. Estos intereses suelen estar relacionados con aspectos tales como la seguridad, los gastos iniciales y de explotación, las molestias derivadas para los usuarios y la población local, el medio ambiente o los daños materiales derivados de los accidentes. Por ejemplo, una de esas prioridades podría ser consi-

derar menos aceptable que ocurra un accidente con 100 muertos que haya 100 accidentes con un muerto cada uno.

5.3. Elección del método

Los métodos de apoyo a la toma de decisiones tienen un considerable desarrollo teórico y han sido aplicados en diferentes campos. Por ello, se realizó un análisis de las tres familias principales de métodos, los cuales tratan con objetivos múltiples y posiblemente conflictivos, con vistas a su posible aplicación en el modelo DSM.

- Análisis Bayesiano de decisión. Se fundamenta en el análisis de árboles o redes de decisión (diagramas de influencia), ponderándose todos los posibles objetivos y consecuencias según una función de utilidad. En el modelo utilizado cada una

de las variables empleadas se traduce a unidades monetarias. La alternativa que maximice la función de utilidad es la elegida como óptima (mínimo coste total).

- Análisis multivariable o multicriterio. Realiza una evaluación de cada alternativa en función de la consecución de unos objetivos parciales que, una vez sumados con las correspondientes ponderaciones según los responsables de la toma de decisión, apuntan hacia la alternativa elegida como aquella con el mayor valor total. Entre estos métodos se encuentran el AHP (proceso de jerarquía analítica) y el SMART (técnica de clasificación simple multivariable).
- Análisis coste-beneficio. Incorpora dos tipos diferenciados: un primero similar al análisis Bayesiano, que pondera costes y beneficios esperados; y un segundo más clásico, que valora las alternativas desde una perspectiva puramente económica y no probabilista mediante la comparación de los valores actualizados netos de beneficios y costes de cada alternativa.

La elección de un método u otro se reduce a la elección de transformar los objetivos parti-

El responsable de la toma de decisión deberá valorar todas las variables del proceso, ponderando de forma conveniente cada una de ellas

culares a una escala simple, de forma implícita o explícita, según las posibilidades de ponderación ofrecidas por cada método. Dado que podría perderse información importante sobre los diferentes objetivos individuales al realizar las transformaciones implícitas, se recomienda el empleo de los métodos Bayesianos de ponderación directa en la medida de lo posible.

5.4. El programa informático DSM

El modelo DSM desarrollado incorpora las variables de la tabla 4, llamadas atributos, para la toma de decisión en la evaluación del transporte de mercancías peligrosas.

Estas variables empleadas son de naturaleza muy diversa y, por lo tanto, sus unidades difieren, siendo necesaria una valoración cuantitativa que pondere sus variaciones para poder comparar alternativas. De entre las familias de métodos de apoyo a la toma de decisiones presentados anteriormente se ha elegido el Bayesiano, el SMART y el SMART agregado.

Cualquiera de los tres métodos empleados pondera todas las variables del riesgo y apunta hacia una solución como la mejor desde una perspectiva global. No obstante, se imponen unos límites para el riesgo individual (número de muertos con respecto a la población expuesta al riesgo), por encima de los cuales una solución es considerada inaceptable aunque globalmente sea la mejor.

5.5. Recomendaciones para el proceso de toma de decisión

El proceso de toma de decisión presenta una complejidad derivada del número, tipo y peso de las variables que intervienen, por lo que la modelización puede simplificar y racionalizarlo. No obstante, en el caso de que se emplee un método diferente del modelo DSM, el decisor debe tener en



Los daños estructurales suelen causar serios problemas a la integridad del túnel.

consideración una serie de recomendaciones.

La recomendación principal es que el responsable de la elección debe comparar el riesgo de transportar mercancías peligrosas por el túnel con el derivado de su transporte por itinerarios alternativos a cielo abierto. Sin esta comparación, el análisis de qué tipo de sustancias deben ser permitidas o limitadas en su tránsito por el túnel carecería de valor para la sociedad en su conjunto, al omitirse los riesgos derivados de su transporte por las rutas alternativas.

Las variables que se deben emplear en la cuantificación de los riesgos mediante cualquier proceso de toma de decisión no difieren de las descritas para el modelo DSM, provenientes de los resultados del modelo de análisis del riesgo QRAM.

- Curvas F/N que relacionan la frecuencia acumulada de ocurrencia con el número total de muertos o heridos entre los usuarios y población local.
- Número previsto de muertos o heridos entre los usuarios y la población local.
- Daños materiales derivados de posibles accidentes.
- Impactos ambientales derivados de un accidente tanto en

el túnel como en la alternativa superficial.

Además, el responsable de la toma de decisión incorporará una serie de evaluaciones en relación con los siguientes aspectos:

- Gastos directos (coste de inversión inicial y de explotación y mantenimiento de las medidas de reducción del riesgo en el túnel, costes adicionales del transporte de las mercancías peligrosas).
- Molestias derivadas de un accidente para los usuarios de la carretera (pérdidas de tiempo durante la reparación, recorridos nuevos...).
- Molestias a la población local (impacto ambiental del tráfico de mercancías peligrosas excluyendo las posibles consecuencias de los accidentes, impactos psicológicos).

El responsable de la toma de decisión deberá valorar todas las variables del proceso, ponderando de forma conveniente cada una de ellas (lo que reflejará sus preferencias o prioridades) hasta decidir de forma global la solución final. Por último, es importante tener en cuenta que no se deben sobrepasar nunca ciertos umbrales máximos de riesgo individual (muertos) para la población local. ■