

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS

Luis Gil López

Ingeniero de Caminos, C. y P.

Geoconsult Ingenieros Consultores, S. A.

Introducción

La ponencia adjunta expone una propuesta de metodología de análisis de riesgos, desarrollada por iniciativa y bajo la supervisión de la Subdirección General Adjunta de Conservación y Explotación de Carreteras del Ministerio de Fomento, en el marco de disponer de una metodología común para el conjunto de túneles de la Red de Carreteras del Estado.

1. Marco Normativo

1.1. Antecedentes normativos

La Directiva Europea 2004/54/CE en su Anexo II, punto 2 establece la documentación de seguridad de la que debe disponer cada túnel y que ha de mantenerse permanentemente actualizada durante su explotación. Entre ella y según se señala en su punto 2.3 se encuentra el documento denominado Estudio específico de riesgos o “Análisis de riesgos”.

El Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, transposición al ordenamiento jurídico español de la citada Directiva, establece la misma obligatoriedad de elaborar un análisis de riesgo específico en determinadas circunstancias según se refleja en su anejo II dentro del punto 2.3, de manera análoga a la citada Directiva Comunitaria.

1.2. Ámbito de aplicación

La elaboración de un análisis de riesgos se enmarca dentro de lo establecido al respecto en el Real Decreto 635/2006, por lo que sería aplicable a todos los túneles de la Red de Carreteras del Estado, tanto si se encuentran en servicio como si se encuentran en fase de construcción o de proyecto.

En el caso de túneles transfronterizos, las instalaciones y el régimen de explotación se ajustarán a lo que se decida al efecto por la Comisión técnica mixta internacional que al efecto se designe.

1.3. Casos en los que es obligatorio realizar un análisis de riesgos

De acuerdo con lo establecido en el R.D 635/2006, El Gestor del túnel, debe mantener actualizado el Manual de Explotación, y por lo tanto será el encargado de elaborar y actualizar el estudio de análisis de riesgos incluido en dicho documento.

Según establece el citado Real Decreto, los casos en que se considera obligatoria la elaboración de un análisis de riesgos se engloban en los siguientes supuestos:

- Incumplimiento de requisitos estructurales.
- Excepcionalidad por técnicas innovadoras u otras causas.
- Desviación con respecto a los requisitos mínimos.
- Pendientes superiores al 3%.
- Anchura de carril derecho inferior a 3,5 metros.
- Ventilación insuficiente y necesidad de habilitar salidas de emergencia.
- Transporte de mercancías peligrosas en túneles sin drenaje separativo.
- Existencia de ventilación longitudinal en túneles bidireccionales o unidireccionales congestionados.
- Evaluación de la necesidad de situar equipos de emergencia en el centro de control para el caso de túneles bidireccionales importantes con gran volumen de tráfico.
- Viabilidad del transporte de mercancías peligrosas.
- Posibilidad de autorizar el adelantamiento de camiones en túneles con más de un carril por sentido.

2. Definición y Tipología de análisis de Riesgos

2.1. Definición

Un análisis de riesgos es un documento donde se realiza un estudio pormenorizado de los riesgos asociados a la explotación de un determinado túnel y se concluye con

una evaluación o determinación cuantitativa o cualitativa de los mismos, que debe permitir decidir al explotador bajo qué condiciones se desarrollará la explotación de un túnel en función de la comparación del nivel de riesgo con unos patrones de referencia determinados.

El análisis de riesgos es una herramienta que debe permitir evaluar qué puede ocurrir en determinadas situaciones y qué consecuencias se pueden esperar ante la dotación de unos sistemas de seguridad determinados.

Un análisis de riesgo no debe ser por tanto un documento que describa exclusivamente los procedimientos de actuación del equipo de explotación y de los usuarios ante situaciones de emergencia. Estos protocolos de actuación deben estar recogidos en el Manual de Explotación y constituirán los planes de emergencia interior y exterior del correspondiente túnel.

2.2. Tipología

Una posible clasificación de los análisis de riesgos permite encuadrar estos en dos principales grupos en función del procedimiento empleado y de los resultados obtenidos como consecuencia de su aplicación. Estos son:

- Análisis de Riesgos Cualitativos
- Análisis de Riesgos Cuantitativos.

La metodología expuesta en este documento se basará en la aplicación de un modelo de análisis de riesgos de tipo cuantitativo.

Se proponen dos métodos de análisis diferentes, según se trate de túneles de longitud inferior a 500 metros o de túneles de longitud superior a 500 metros.

Para los primeros, se expone un procedimiento simplificado basado en la comparación del equipamiento e infraestructura con un túnel virtual que se toma de referencia.

Para los segundos, se adopta un método basado en el modelo de evaluación cuantitativa del riesgo (QRA), relativo al estudio de una serie de escenarios de incendio en el que intervienen vehículos pesados (VP) y de mercancías peligrosas (MP).

2.3. Objetivos

Los principales objetivos que persigue la metodología sintetizada en el apartado anterior son los siguientes:

- 1) Determinación del riesgo base para cada túnel.
- 2) Determinación del riesgo comparado entre distintos niveles de equipamiento o prestaciones del túnel en los siguientes aspectos:
 - Modificaciones en el diseño de la infraestructura.
 - Establecimiento de medidas de regulación del paso por el túnel de mercancías peligrosas, como por ejemplo restricciones horarias o formación de convoyes.
 - Análisis de alternativas entre distintas instalaciones a disponer.

2.4. Alcance de un análisis de riesgos

En lo que respecta al alcance del análisis de riesgos debe determinarse de una manera cuantitativa el índice de riesgo asociado a cada túnel para distintos escenarios, delimitándose el número de posibles víctimas, la probabilidad de producirse dicho número de víctimas y los valores o tasas de referencia con los correspondientes criterios de aceptabilidad.

Una vez determinado dicho nivel de riesgo intrínseco a la propia infraestructura, se debe integrar el resultado obtenido con otros condicionantes no evaluados en el modelo y que reflejen los posibles costes indirectos en caso de ocurrencia de un siniestro. Estos sobrecostes están asociados a la importancia estratégica de la vía e incluyen una valoración sobre de posibles interrupciones de tráfico en la misma y los costes asociados a su reparación o posible habilitación de trayectos alternativos.

Por lo tanto, el análisis realizado debe buscar respuesta a los siguientes aspectos:

- IMDs (Intensidades Medias Diarias de circulación) hasta las que son admisibles los niveles de riesgos en el túnel con las condiciones de equipamiento y explotación establecidas.
- Determinación del año horizonte de explotación en condiciones seguras en función de la evolución prevista del tráfico.

Asimismo con esta metodología se considera posible:

- Completar el estudio con un breve análisis de sensibilidad de los parámetros más representativos en el modelo por las características de cada túnel y su influencia en la variación del riesgo asociado a la explotación.
- Finalmente se estima conveniente repetir el análisis de riesgos en un período de tiempo determinado si cambian los datos de explotación, como por ejemplo porcentajes de vehículos pesados y de mercancías peligrosas, o variación de los parámetros deducidos del estudio complementario anterior.

3. Datos de partida a considerar

De acuerdo con lo establecido en el R.D. 635/2006, el Análisis de Riesgos de un túnel deberá tener en cuenta todos los factores que afectan a la seguridad, en particular, la geometría del túnel, el entorno, el equipamiento del túnel, el tráfico y su composición, teniendo presente la posible existencia de vehículos de mercancías peligrosas y el tiempo de llegada de los servicios de emergencia.

Los principales datos que deben tenerse presente son los correspondientes a los siguientes puntos:

- Definición geométrica y funcional de la infraestructura (túnel existente o en proceso de diseño).
- Estudio de tráfico completo y pormenorizado, incluyendo una prognosis del mismo. Es muy recomendable disponer de los datos correspondientes a las intensidades de tráfico en determinados tramos horarios por si fuese necesario restringir el paso de ciertos transportes en determinadas franjas horarias del día.
 - o Debe incluirse la determinación de la composición del tráfico, determinando el porcentaje de vehículos pesados, de autocares, de vehículos de mercancías peligrosas y si fuese posible de los distintos tipos de dichas mercancías que transitaran por el túnel.
- Tasa de accidentalidad asociada al tipo de vía en la que se ubica el túnel. Se contempla la posibilidad de:
 - o Aplicar un índice de accidentalidad global de las carreteras españolas.
 - o Permitir la particularización del índice o tasa de accidentalidad en función de estadísticas asociadas al tipo de vía o carretera de la que el túnel forma parte.
- Características del posible itinerario alternativo, incluyendo poblaciones afectadas, singularidades de la vía, meteorología, tráfico, etc.

4. Metodología y Ejemplos de Aplicación

A continuación se explicará de forma sucinta la forma de proceder según los dos modelos de análisis cuantitativos planteados en función de la longitud del túnel.

Asimismo, se incluye un ejemplo de aplicación práctica correspondiente a cada método mencionado.

4.1. Túneles de longitud inferior a 500 metros

El método adoptado para los túneles clasificados por una longitud inferior a 500 metros, se basa en un procedimiento simplificado por comparación del equipamiento con un túnel virtual de referencia. El modelo se basa en el estudio de cinco escenarios de incendio en el que se pueden ver involucrados distintos tipos de vehículos con diferentes potencias de incendio. Los escenarios son:

- E1: Incendio de uno o dos vehículos ligeros con potencia de fuego inferior a 8 MW.
- E2: Incendio de un vehículo pesado con potencia de fuego de hasta 30 MW.
- E3: Incendio de un vehículo ligero y un autocar. Potencia de incendio 15 MW
- E4: Incendio de un vehículo pesado y un autocar. Potencia de incendio 30 MW
- E5: Incendio de un vehículo de mercancías peligrosas y un vehículo ligero. Potencia de incendio 100 MW.

Cada uno de los escenarios anteriores es ponderado en función de la probabilidad porcentual de producirse dicho tipo de accidente en función del análisis estadístico del tráfico en la red de carreteras españolas.

Método operativo

Los pasos a seguir son los siguientes:

1) Determinación del Índice de Peligrosidad de un túnel virtual (IPtv)

Túnel virtual: es un túnel considerado como modelo de referencia, que presenta la misma longitud que el túnel objeto de análisis, y está equipado con todas las instalaciones y equipamiento que establece el Real Decreto 635/2006 para su categoría. La pendiente de referencia del citado túnel será del 3% y la anchura de sus arcenes se considera no inferior a 1,00 metros.

El índice de peligrosidad del túnel virtual se obtendrá aplicando la siguiente expresión:

$$IP_{tv} = \sum (N^{\circ} \text{ afectados} \times \text{probabilidad porcentual } E_i), \text{ donde:}$$

Nºafectados: es el número de usuarios potenciales víctimas, es decir las personas que quedan atrapadas en el interior del túnel por los efectos del humo del incendio.

E_i: probabilidad porcentual de ocurrencia del escenario i de incendio.

El número de personas atrapadas en cada uno de los cinco escenarios se obtiene mediante el estudio analítico o gráfico de los esquemas de evacuación de los usuarios atrapados junto con la aplicación de un modelo simplificado del comportamiento de la evolución del humo y el proceso de desestratificación del mismo.

2) Determinación del Índice de Peligrosidad básico del túnel real objeto de análisis (IPbtr)

Túnel real: es el túnel objeto del análisis de riesgo. Se considera su geometría real así como los aspectos reales de equipamiento y explotación.

El índice de peligrosidad básico del túnel se obtiene por medio de una fórmula análoga a la del índice de peligrosidad del túnel virtual.

$$IPbtr = \sum (N^{\circ} \text{ afectados} \times \text{probabilidad porcentual } E_i)$$

El significado de las variables es el mismo que el explicado anteriormente.

3) Determinación del Índice de Riesgo asociado al túnel (IRiesgo).

El índice de riesgo ligado al túnel objeto de estudio, se calcula como el cociente entre el IPbtr y el IPTv $\rightarrow$

$$IRiesgo = \frac{IPbtr}{IPTv}$$

4) Obtención del Índice de Peligrosidad modificado del túnel real (IPmtr).

El índice de peligrosidad modificado el túnel real trata de tener en cuenta el equipamiento adicional que pueda incluirse en el túnel real y que no se ha tenido en principio en cuenta al calcular el Índice de Riesgo asociado al túnel. Para contabilizar estas variaciones, se emplearan una serie de factores de ponderación que se definen a continuación:

$$IPmtr = (IPbtr) \times (Ipgeomet) \times (Ipequip) \times (Ipexplotac)$$

Ipgeomet: Índice de ponderación por criterios de diseño geométricos del túnel o infraestructura. Tiene en cuenta las características geométricas de diversos elementos asociados a la geometría del túnel y pondera su afección sobre el índice de accidentabilidad en condiciones normales. Los factores considerados son.

- Anchura de carriles de circulación.
- Existencia o no de arcones con anchura mínima de 1,00 metros.
- Existencia o no de aceras de evacuación.
- Influencia de la pendiente longitudinal (valores superiores al 3%).

Ipequip: Índice de ponderación por criterios asociados al equipamiento del túnel. Los factores considerados son:

- Existencia de centro de control permanente y vigilado con posibilidad efectiva de control de accesos.
- Mejoras sobre equipamiento base.

Ipexplotac: Índice de ponderación por criterios asociados a la explotación del túnel. Los factores considerados son:

- Intensidad de circulación por la vía.
- Permisividad o prohibición de adelantamiento de veh. pesados.
- Existencia o no de sistemas de control de velocidad (radares).

Todos los factores de ponderación actuales son inferiores a la unidad si introducen mejoras sobre las condiciones de explotación básicas y superiores a 1,00 si por el contrario incrementan el riesgo de accidentabilidad de los usuarios.

5) Comparación del resultado obtenido con los criterios de aceptación propuestos en la metodología

Una vez obtenido el IRiesgo, su valor será comparado con los criterios de referencia, enmarcando al túnel en una de las tres posibles clases propuestas según la aceptación del riesgo.

- Túneles seguros con paso permitido de todo tipo de mercancías peligrosas: $IRiesgo < R1$
- Túneles con paso de TMP restringido o con posible regulación horaria de este tipo de mercancía: $R1 < IRiesgo < R2$
- Túneles con peligrosidad elevada: $IRiesgo > R2$

Los valores de R1 y R2 se deben determinar en el proceso de tarado del modelo y señalarán los límites en que se consideran admisible la circulación o no de vehículos con mercancías peligrosas.

Ejemplo de Aplicación Práctica

Con el siguiente ejemplo se tratará de mostrar la forma de operar que tiene el modelo esquematizado anteriormente. Para ello definimos el túnel real, objeto del análisis de riesgos, y el túnel virtual, que sirve de patrón o túnel tipo de comparación.

Túnel real: consideraremos un túnel unidireccional definido de la siguiente manera:

- Túnel unidireccional de longitud de 300 metros y una pendiente de -3%. La sección del tubo es de 70 m²
- La calzada consta de 1 arcén de 1 m + 2 carriles de 3.5 m + 1 arcén de 2.5 m = 10.5 m.
- La posición del incendio es $e_i = 240$ m
- La IMD es de 2.000 veh/día/carril, con una velocidad de circulación limitada a 90 km/h. El 20% de la circulación corresponde a vehículos pesados (VP). Se considera restringido el adelantamiento para los VP dentro del túnel.
- El túnel dispone de iluminación normal. Las salidas de emergencia son las propias bocas del túnel y están debidamente señalizadas. Carece de semáforos

exteriores y de puestos de emergencia en su interior. Cumple con la señalización según Norma 8.1 y 8.2 I.C.

- f) Tamaño de vehículo medio → distancia entre vehículos parados. Se considera en este caso 10 metros.
- g) Velocidad de huida del usuario en zonas sin humo desestratificado $v_u = 1 \text{ m/s}$
- h) Velocidad de huida del usuario en zonas con humo desestratificado $v_{des} = 0.5 \text{ m/s}$.
- i) Velocidad de formación de la cola de vehículos parados $v_c = 0.472 \text{ m/s}$
→ Tiempo de remonte de la cola $T = 240/0.472 = 508.475 \text{ s}$.

Túnel virtual: es un túnel unidireccional que consta de la misma plataforma que el túnel real, y presenta idéntica longitud, pendiente y sección. El incendio se posiciona a 240 m de la entrada. Las características del tráfico coinciden con las descritas anteriormente. Estará equipado, de acuerdo con el R.D 635/2006, con: salidas de emergencia (las propias bocas), iluminación normal, puestos de emergencia, señalización de salidas y puestos de emergencia, señalización según norma 8.1 y 8.2 IC.

Índice de Riesgo asociado al túnel objeto de estudio.

Al no considerarse sistema de cierre en la boca de entrada al túnel, se observa que la cola de vehículos parados llega hasta la misma boca de entrada del tubo.

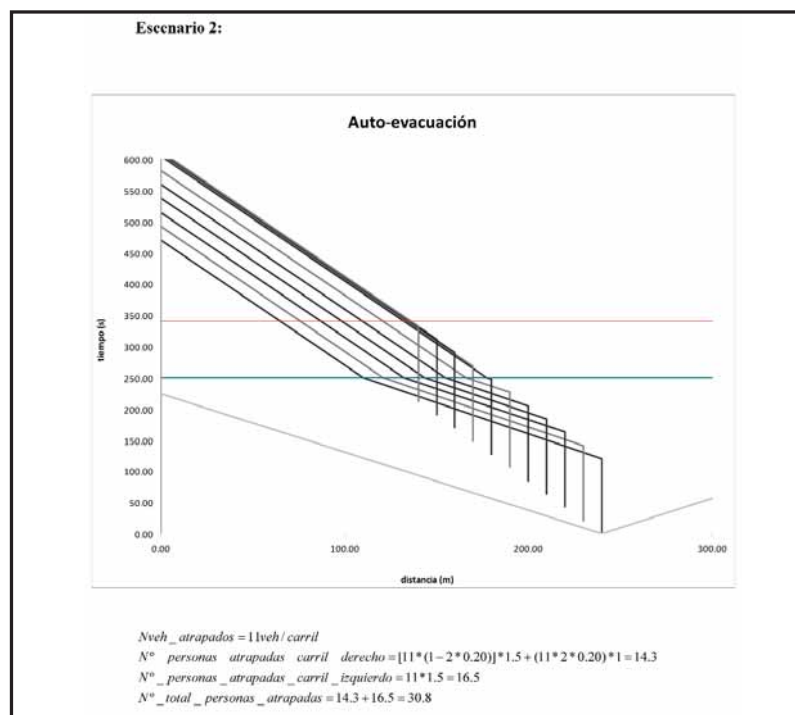
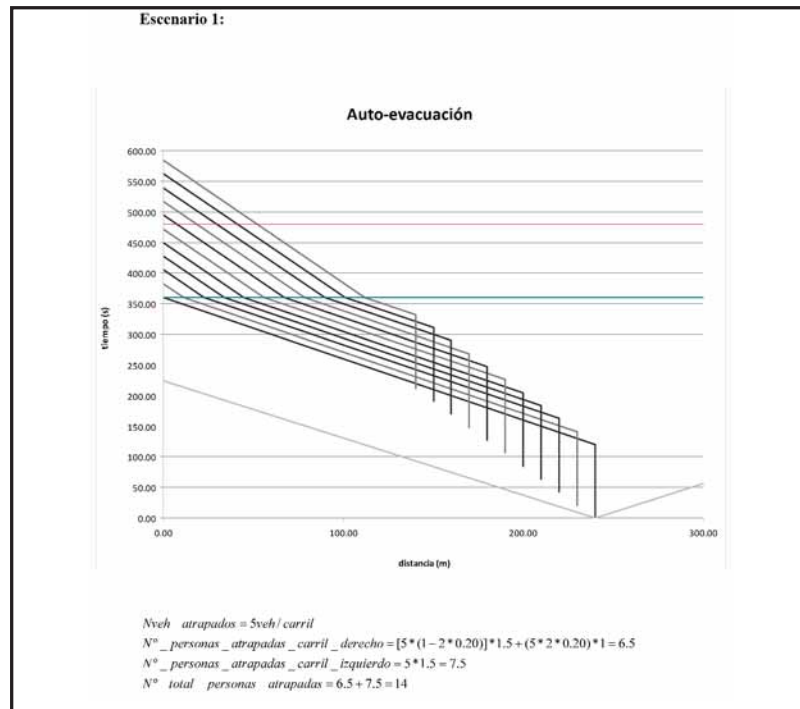
Debemos considerar como evoluciona el humo del incendio (representado por líneas rectas grises) y la cola de formación de vehículos por el interior del túnel para poder marcar un límite en el número de vehículos que llega a entrar dentro del túnel. Se considera que si el humo alcanza la boca de entrada antes de que se llegue a formar la cola teórica de vehículos parados, no entrarán más vehículos en el túnel por divisar desde el exterior el humo del incendio. La limitación del número de usuarios atrapados en el tubo vendría impuesta por el tiempo de desestratificación del humo del incendio.

Las probabilidades porcentuales de ocurrencia de cada escenario de incendio estudiado son las consideradas a continuación:

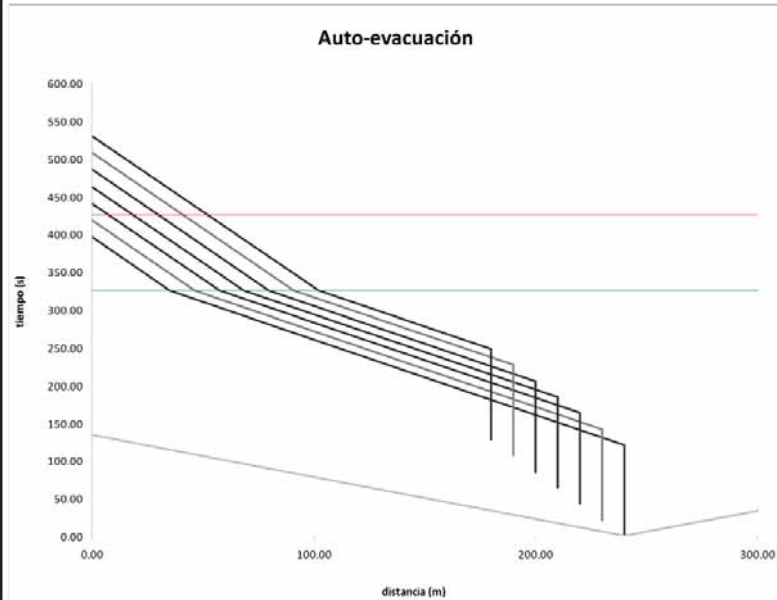
Escenario	E1(8MW)	E2(30MW)	E3(15MW)	E4(30MW)	E5(100MW)
Probabilidad	77.5	15	6.5	4	1.5

Seguidamente se muestran los gráficos de las trayectorias de auto-evacuación junto con el cómputo de personas atrapadas, en el túnel virtual para cada uno de los cinco escenarios estudiados.

Se considerará que un usuario queda atrapado en el interior del túnel, cuando no pueda llegar a finalizar su auto-evacuación en condiciones de seguridad. Esto vendrá determinado cuando el usuario en su huida no alcance la salida del tubo antes de que el humo se desestratifique completamente, es decir, cuando su trayectoria sea cortada por la línea recta horizontal representada en rojo, que marca el instante a partir del cual el humo está completamente desestratificado.



Escenario 3:



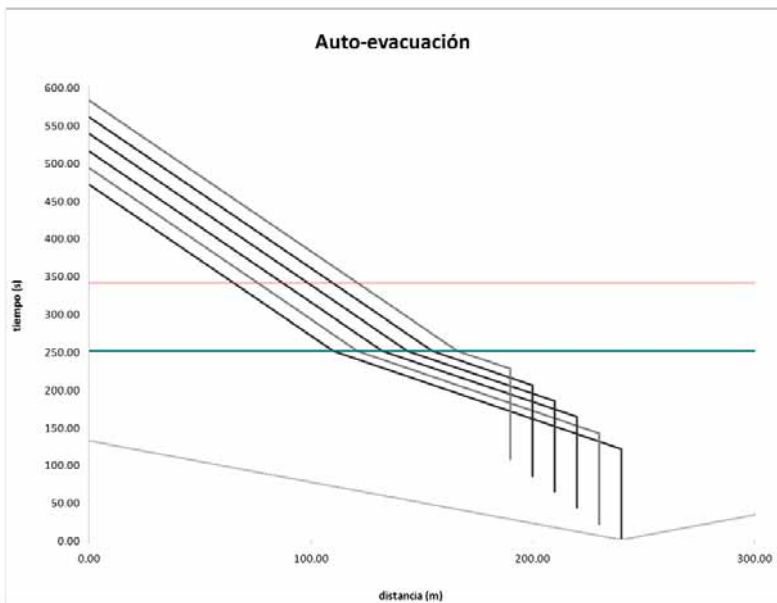
Nveh_atrapados = 5veh / carril

*Nº personas atrapadas carril derecho = $[5 * (1 - 2 * 0.20) - 1] * 1.5 + (5 * 2 * 0.20) * 1 + 1 * 20 = 25$*

*Nº personas atrapadas carril izquierdo = $5 * 1.5 = 7.5$*

Nº_total_personas_atrapadas = $25 + 7.5 = 32.5$

Escenario 4:

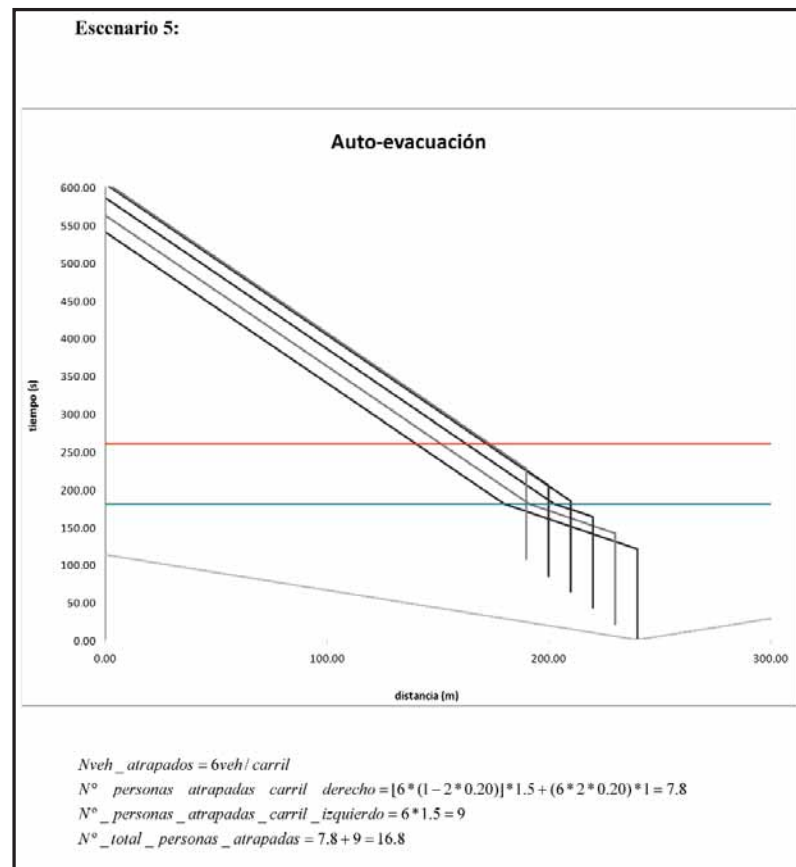


Nveh_atrapados = 6veh / carril

*Nº personas atrapadas carril derecho = $[6 * (1 - 2 * 0.20) - 1] * 1.5 + (6 * 2 * 0.20) * 1 + 1 * 20 = 26.3$*

*Nº personas atrapadas carril izquierdo = $6 * 1.5 = 9$*

Nº_total_personas_atrapadas = $26.3 + 9 = 35.3$



Los resultados que obtenemos para los correspondientes Índices de Peligrosidad y para el Índice de Riesgo asociado el túnel real, son:

- **Índice de Peligrosidad del túnel virtual**

En el caso propuesto, el túnel virtual está dotado de puestos de emergencia con extintores que al aplicar el modelo nos permite introducir una reducción del 10% a la probabilidad de los dos escenarios de menor potencia de incendio.

$$\rightarrow IP_{tv} = \{[(14 * 77.5 + 30.8 * 15) * 0.90] + 32.5 * 6.5 + 35.3 * 4 + 16.8 * 1.5\} / 100 = 17.699$$

- **Índice de Peligrosidad básico del túnel real**

$$\rightarrow IP_{btr} = (14 * 77.5 + 30.8 * 15 + 32.5 * 6.5 + 35.3 * 4 + 16.8 * 1.5) / 100 = 19.246$$

- **Índice de Riesgo preliminar** $\rightarrow I_{Riesgo} = \frac{IP_{btr}}{IP_{tv}} = \frac{19.2465}{17.6995} = 1.0874$

- **Índice Modificado del túnel real**

Calculamos a continuación el índice de peligrosidad modificado del túnel real teniendo en cuenta todos los factores modificadores por los distintos criterios antes expuestos:

- Ip por criterios geométricos : 0.90 (Al presentar arcén derecho de 2,5 m)
- Ip por criterios asociados al equipamiento: 1,00 (No presenta mejoras)
- Ip por criterios asociados a la explotación:
 - Intensidad de tráfico > 2.000 veh => factor: 1.05
 - Restricción adelantamiento de pesados (20%) => factor 0.87
 - Por lo que Ip por criterios de explotación: 0.9135

$$\rightarrow IP_{mtr} = 19.2465 * (0.90 * 1 * 0.9135) = 15.8235$$

• **Índice de Riesgo asociado al túnel real**

$$IR_{Riesgo} = \frac{IP_{mtr}}{IP_{tv}} = \frac{15.8235}{17.6995} = 0.8940$$

Este valor se compara con los criterios adoptados y se establecería así las posibles restricciones o no al paso de vehículos por el túnel.

4.2. Túneles de longitud superior a 500 metros

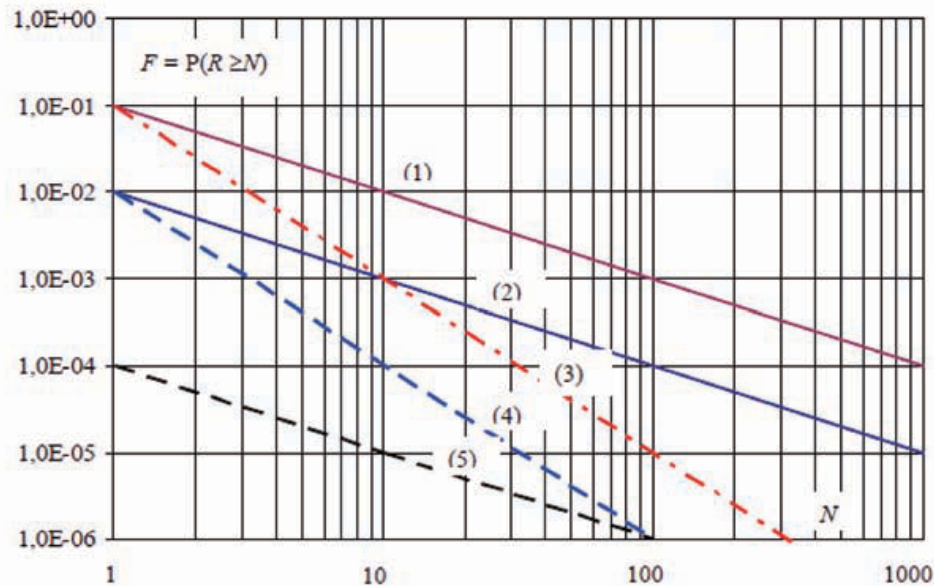
El procedimiento propuesto para el análisis de riesgos en túneles con longitudes superiores a 500 m se basa en el modelo cuantitativo QRAM (Quantitative Risk Assessment Model) desarrollado por la OCDE y la PIARC, pero con ciertos matices y adaptaciones. Este modelo calcula el riesgo social ($F = P(R_{soc} > N)$) por medio de las denominadas curvas F/N (Frecuencia/Nº de víctimas). El riesgo se medirá por medio de dos variables:

- La probabilidad de ocurrencia de un suceso
- Las consecuencias de un escenario crítico acaecido.

En la siguiente figura se pueden distinguir diversas áreas de riesgo en función de los valores adoptados de los parámetros A y k de la expresión $F < F_t = A * N^k$ donde F es la frecuencia acumulativa y Ft un valor de comparación. Las áreas quedan definidas por cada uno de los límites dados por:

- 1 Límite más alto moderado: $A=0.1$ y $k=1$
- 2 Límite más alto severo: $A=0.01$ y $k=1 \rightarrow$ será la recta límite superior adoptada por el modelo.
- 3 Nivel Medio: $A=0.1$ y $k=2$
- 4 Límite más bajo moderado: $A=0.01$ y $k=2$
- 5 Límite más bajo severo: $A=0.0001$ y $k=1 \rightarrow$ será la recta límite inferior adoptada por el modelo.

Figura de los límites para el riesgo social (Vrouwenvelder et al. 2001, Trojevic, 2003)



Escenarios Considerados para el Análisis

Los escenarios básicos que se proponen como más representativos y que deben ser analizados son los mostrados a continuación:

- **Accidente de vehículo pesado (VP) sin incluir transportes de mercancías peligrosas (TMP)**
 1. VP que provoque un fuego de potencia hasta 20 MW
 2. Uno o más VP que provoquen un fuego de potencia hasta 100 MW.
- **Accidente de VP que incluya TMP**
 3. Explosión tipo BLEVE de un contenedor o botella de 50 kg de GLP.
 4. Incendio de charco de carburante derramado por un vehículo de transporte de combustible de 28 t de capacidad con brecha o grieta de 100 mm de apertura longitudinal. Se considera una pérdida de combustible de 20.6 kg/s.
 5. Incendio en antorcha de cisterna de transporte de GLP de capacidad hasta 18 t.

También se pueden contemplar otros escenarios posibles de menor frecuencia de ocurrencia como los siguientes:

- **Accidente de VP que incluya TMP**
 6. Explosión tipo BLEVE debida a una cisterna de transporte de GLP de 18 t de capacidad.

7. Explosión tipo VCE debida a la fuga de GLP de una cisterna de 18 t de capacidad y pérdida de 36kg/s
8. Vertido de amoniaco procedente de un tanque de 20 t de capacidad y pérdida de 36kg/s
9. Vertido de acroleína procedente de un tanque de 25 t de capacidad y pérdida de 24.8kg/s
10. Explosión tipo BLEVE de gas no inflamable (CO₂) debido a una cisterna de 20 t de capacidad.

Índice de Peligrosidad de los Túneles de Carretera en el Ámbito Territorial de España

Tras un estudio realizado sobre 354 túneles de la Red de Carreteras del Estado, de los que se obtuvo los datos referidos a: longitud, IMD por sentido, números de accidentes con víctima, número de muertos, tipo de carretera, tipo de tramo, correspondientes al periodo de cinco años que abarca desde el 2003 al 2007, se extrajo el siguiente valor del índice de peligrosidad asociado a los túneles de carretera → 0.094 Acv/Mveh-km (accidentes con víctima por cada millón de vehículos-kilómetro) ó 9.4 Acv/100Mveh-km (accidentes con víctima por cada cien millones de vehículos-kilómetro).

Este índice de referencia puede ser modificado a través de una serie de factores que en función de la geometría que presente el túnel (pendiente, anchura de carriles, aceras y arcones), alterarán el valor establecido anteriormente. Estos factores serán tales que se puedan evaluar a priori, ya que no está contemplada su influencia en el modelo QRAM.

Ejemplo de Aplicación Práctica

En este ejemplo compararemos dos diseños diferentes para un túnel patrón dado, una con tráfico unidireccional y otro con tráfico bidireccional, observándose claramente como opción más segura la del túnel unidireccional.

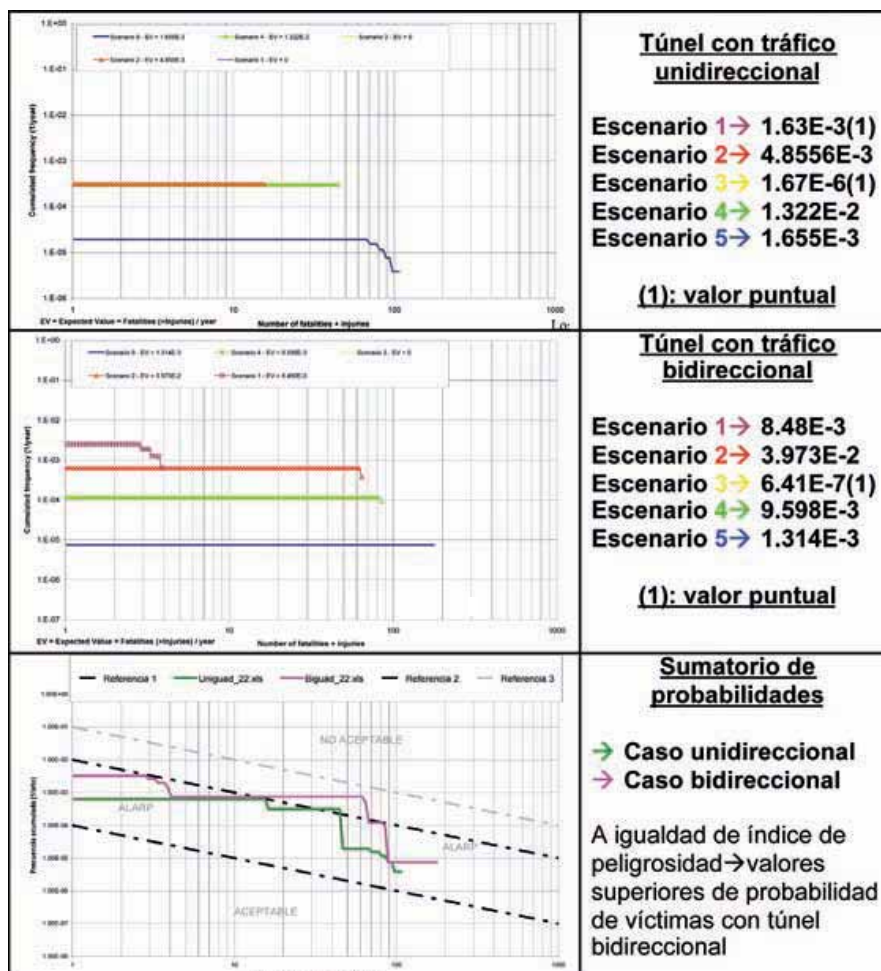
Las características del túnel patrón que se incluirán en el modelo son las siguientes:

V SIMPOSIO DE TÚNELES

SEGURIDAD PARA LOS TÚNELES DEL SIGLO XXI

Longitud	3.148 m
Sección libre interior del túnel/nº carriles	69,60 m ² /2
Pendiente longitudinal	0%
Intensidad media de tráfico diaria (IMD)	21.317
% Vehículos pesados	15,10
% Autobuses	1,45
% Mercancías peligrosas (sobre % pesados)	12
Ocupación de vehículo ligero	2
Ocupación de vehículo pesado	1,1
Ocupación Autobuses	20
Velocidad vehículos ligeros	Túnel unidireccional : 100 Km/h Túnel bidireccional: 80 Km/h
Velocidad vehículos pesados	Túnel unidireccional: 90 Km/h Túnel bidireccional: 80 Km/h
Separación entre galerías de emergencia	400 m
Ventilación sanitaria longitudinal	1,5 m/s
Ventilación de emergencia longitudinal	3,6 m/s
Tiempo cierre de túnel y activación emergencia	2 min

Resultados de las curvas F/N



Ejemplo de Aplicación Práctica

En este ejemplo compararemos dos diseños diferentes para un túnel patrón dado, una con tráfico unidireccional y otro con tráfico bidireccional, observándose claramente como opción más segura la del túnel unidireccional.

5. Agradecimientos

Todo el trabajo aquí reflejado ha sido posible gracias a las aportaciones realizadas por parte de D. Agustín Sánchez Rey, Subdirector General Adjunto de Conservación y Explotación del Ministerio de Fomento Y D. David Luiz Garnández, en el momento de redacción del presente trabajo.