

Modelo de sucesos infrecuentes en túneles de carretera

J.A. Capote · D. Alvear · O.V. Abreu · M. Lázaro · A. Cuesta ·
V. Alonso

Recibido: Mayo 2010, Aceptado: Noviembre 2010
©Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2011

Resumen Los sucesos infrecuentes en túneles de carretera (incendio, accidentes, etc.) conllevan a situaciones de alto riesgo que usualmente ponen en peligro la vida de muchas personas y ocasionan grandes daños materiales. Estos sucesos son tan variados y frecuentemente impredecibles que resulta muy difícil tomar decisiones acertadas en situaciones de escasa y contradictoria información inicial, con rápido cambio e incierto desarrollo.

El desarrollo de un sistema automatizado para la toma de decisiones sobre la seguridad en túneles de carretera permitirá una adecuada gestión de la emergencia y garantizará la minimización de los daños a las personas frente a este tipo de eventos.

Este sistema automatizado constará de tres elementos fundamentales: el modelo de Sucesos Infrecuentes, el modelo de evacuación e intervención y el modelo de toma de decisiones.

El modelo de sucesos infrecuentes se ha desarrollado empleando fundamentalmente métodos de caja negra, del álgebra de Bool y de la teoría de las probabilidades. Para ello se han definido las variables de entrada y salida del modelo, así como los principales parámetros del mismo. Igualmente se obtienen las expresiones matemáticas que relacionan las variables de salida con las de entrada y los parámetros del modelo.

La creación del modelo computacional correspondiente y los programas auxiliares requeridos ha permitido verificar y validar adecuadamente el modelo.

INFREQUENT EVENTS MODEL FOR ROAD TUNNELS

Summary Infrequent Events in road tunnels (fire, accidents, etc.) lead to high-risk situations that can endanger many lives and cause great materials damage. These events are so varied and often unpredictable that it is difficult to make correct decisions due to the lack of initial information and the rapid change in the event progress.

The development of a Decision Support System (DSS) in road tunnels will permit a suitable emergency management and it will ensure the minimization of personal damages in these kind of events.

The system will be formed by three fundamental elements: the Infrequent Events Model, the Evacuation Model and the Decision Model.

The Infrequent Events Model has been developed based on the Black-Box Model, Boolean algebra and Probability Theory defining the inputs, the outputs and the main parameters. The mathematical equations which relate inputs, outputs and main parameters have been obtained. The development of the computational model and the auxiliary programs has permitted to verify and validate the model.

J.A. Capote · D. Alvear · O.V. Abreu ·
M. Lázaro · A. Cuesta · V. Alonso
Grupo GIDAI – Seguridad contra Incendios – Investigación y
Tecnología
E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones
Universidad de Cantabria
Avda. Los Castros, s/n; 39005 Santander (España)
Tel.: 942 201826; Fax: 942 201873
e-mail: capotej@unican.es; alveard@unican.es; abreu@unican.es;
lazarom@unican.es; cuestaar@unican.es; alonsovir@unican.es

1. Introducción

Los sucesos infrecuentes en túneles de carretera (incendio, accidentes, etc.) conllevan a situaciones de alto riesgo que usualmente ponen en peligro la vida de muchas personas y ocasionan grandes daños materiales. Estos sucesos son tan variados y frecuentemente impredecibles que resulta muy difícil tomar decisiones acertadas en situaciones de escasa y contradictoria información inicial, con rápido cambio e incierto desarrollo. El desarrollo de un sistema automatizado para la toma de decisiones sobre la seguridad en túneles de carretera permitiría una adecuada gestión de la emergencia y garantizaría la minimización de los daños a las personas frente a este tipo de eventos. Este sistema automatizado constaría de tres elementos fundamentales: el modelo de sucesos infrecuentes, el modelo de evacuación e intervención y el modelo de toma de decisiones.

Para el desarrollo del modelo de sucesos infrecuentes en túneles de carretera se empleó inicialmente el modelo de caja negra, cuya representación se muestra en la Figura 1.

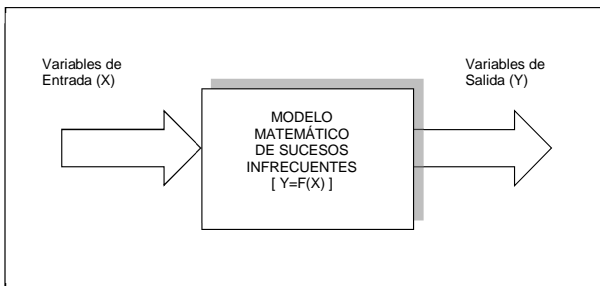


Figura 1. Modelo de caja negra de sucesos infrecuentes

Asumiendo como sucesos infrecuentes aquellos no intencionados que conlleven peligro para la vida humana, o sea los accidentes que pueden ser choques vehiculares, vuelcos o incendios en vehículos aislados.

Y considerando:

$$\left. \begin{aligned} X &= x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n \\ Y &= y_1, y_2 \dots y_j \dots y_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

La expresión (1) caracteriza en general los vectores correspondientes a las variables de entrada y salida del modelo. No obstante, las designaciones posteriores de las variables concretas se realizarán en concordancia con la esencia física y el significado de cada variable para su mayor comprensión.

2. Variables de entrada del modelo

Las variables de entrada del modelo dependerán de la disponibilidad de información en el centro de control sobre el suceso infrecuente ocurrido. En estudios anteriores [1] se realizó un exhaustivo análisis de los sistemas potenciales de información sobre sucesos infrecuentes que usualmente se encuentran en los Centros de Control del Túnel.

De acuerdo a lo expuesto en dichos estudios se infiere que hipotéticamente, el suceso infrecuente puede ser detectado o no por el operador del Centro de Control. Aún así se partirá de la asunción de que en todos los casos el suceso infrecuente es detectado, aunque es innegable que esta detección puede ocurrir con cierto retardo aleatorio con respecto al momento de su ocurrencia.

Esta sería indiscutiblemente una de las variables de entrada al modelo:

τ_{RDSI} - tiempo de retardo de detección del suceso infrecuente.

Esta variable influiría en todo el proceso de evacuación, intervención y toma de decisiones. De hecho hasta que no se conozca el suceso y se concientice como suceso infrecuente de acuerdo a lo establecido, el DSS no comenzará a funcionar. Todas las decisiones, fundamentalmente derivadas de las simulaciones y alternativas brindadas por los modelos de evacuación e intervención, se verán influenciadas por los valores que asuma en cada caso concreto este tiempo de retardo.

El conjunto restante de las posibles variables de entrada corresponde a las características propias del suceso infrecuente, no obstante se deben de tener en cuenta dos factores importantes:

1. En el momento inicial puede existir, y de hecho comúnmente existe, cierto grado de incertidumbre sobre de si se trata de un suceso infrecuente según la definición propuesta o no, y la real magnitud y gravedad del suceso si existiese.
2. Interesarán sólo aquellas características del suceso que puedan influir en los modelos de evacuación, intervención y/o toma de decisiones.

Desde esta óptica es conveniente realizar una agrupación preliminar de estas variables en correspondencia con las posibles situaciones de decisión previsible, y teniendo en cuenta que algunas variables pueden ser incluidas en varios grupos. Esta agrupación puede ser la siguiente:

- a. *Variables que condicionen la alteración de las condiciones normales de circulación del túnel (cierre parcial o total, restricciones de velocidad, etc.)*
- b. *Variables que condicionen el aviso y personificación en el lugar del suceso del personal de explotación.*

- c. *Variables que influyan en la conveniencia de evacuar o no el túnel.*
- d. *Variables que dicten la necesidad de prevenir o convocar a los servicios de emergencia (112).*
- e. *Variables cuantitativas del propio suceso infrecuente que influyan en los modelos de evacuación y/o intervención.*

Es preciso destacar que en la presente investigación sólo se contemplan las variables correspondientes a sucesos infrecuentes de acuerdo con la definición asumida, aunque sin duda pueden tener lugar otras muchas incidencias que conlleven a decisiones similares en cuanto a la alteración de las condiciones de circulación, la prevención o activación del 112 y otras similares.

Estas incidencias pueden ser objetos en la vía, circulación de personas o animales, atascos en el exterior, rotura de vehículos y muchas otras.

Existen protocolos de actuación para estas incidencias y el Sistema (DSS), por la arquitectura abierta que dispone, admitirá la inclusión posterior de algoritmos de decisión para estos tipos de incidencias no contempladas en el estudio inicial.

Las posibles variables de entrada de acuerdo a la clasificación preliminar brindada son las siguientes:

a. *Variables que condicionen la alteración de las condiciones normales de circulación del túnel (cierre parcial o total, restricciones de velocidad, etc.)*

Estas variables, para el caso de accidente vehicular, se limitarán en principio a una variable entera, cuyo valor máximo e interpretación dependerá de si el túnel es unidireccional o bidireccional y de la cantidad de carriles. Se designará como:

$$m_{CAR} = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

donde m_{CAR} - cantidad de carriles obstruidos.

Esta variable puede definirse en principio por la información del DAI, no obstante su confirmación y definición en última instancia se realizaría por el operador del CCT (Centro de Control del Túnel) a través del CCTV.

b. *Variables que condicionen el aviso y personificación en el lugar del suceso del personal de explotación.*

Esta variable está limitada a la constatación, por parte del operador, de la certeza de un suceso infrecuente (accidente vehicular) y consiste en una variable booleana:

$$a_{SI} = true, false \quad (3)$$

donde a_{SI} - ocurrencia de un suceso infrecuente.

A esta variable puede ir asociada otra auxiliar, cuyo posible empleo en el sistema estará condicionado por

su instrumentación concreta, es decir, a una variable aleatoria que represente el tiempo potencial de llegada al lugar del suceso del personal de explotación τ'_{PE} .

La variable a_{SI} puede ser definida por el operador mediante el CCTV y la estimación de τ'_{PE} también puede ser estimada por el operador al comunicarse con el personal de explotación más cercano al lugar del suceso y conocer su ubicación. Esta estimación se realiza mediante la ecuación:

$$\tau'_{PE} = \frac{D_{PE}}{v_{PE}} \quad (4)$$

donde D_{PE} - distancia del personal de explotación disponible (más cercano) hasta el lugar del suceso; v_{PE} - velocidad media de desplazamiento del personal de explotación.

c. *Variables que influyan en la conveniencia de evacuar o no el túnel.*

La decisión de evacuar o no el túnel esta en dependencia de múltiples factores y no todos ellos condicionados por la información inicial disponible del suceso infrecuente. En efecto, esta conveniencia puede ser reafirmada o invalidada por los resultados del propio modelo de evacuación.

Además existen otras variables que pueden influir en esa decisión y que se incluyen en otros grupos de variables (el cierre parcial o total del túnel, la convocatoria de los servicios de emergencia y, por supuesto, las variables cuantitativas que influyan en el modelo de evacuación (intervención).

También se considera la conveniencia de evacuar el túnel por decisión del personal de explotación (incluyendo al operador del CCT), porque todo escenario que aconseje la evacuación lleva aparejada la convocatoria de los servicios de emergencia, a cuya llegada las decisiones son asumidas plenamente por los órganos de Protección Civil. Por lo tanto, esta variable se refiere a la conveniencia de ordenar la evacuación antes de la llegada de esos servicios.

Consideramos que existen dos condicionantes que a priori, y por los datos primarios del suceso infrecuente, pueden influir en la conveniencia de evacuación, y son:

- El desarrollo de un incendio producto del suceso infrecuente.
- El vertimiento o escape de alguna sustancia peligrosa para la vida humana como resultado del accidente.

Las variables correspondientes a estas situaciones se asumirán como variables booleanas:

$$a_{FIRE} = true, false \quad (5)$$

$$a_{VSP} = true, false \quad (6)$$

donde a_{FIRE} - ocurrencia de un incendio producto del suceso infrecuente; a_{VSP} - ocurrencia de un vertimiento (escape) de una sustancia peligrosa producto del suceso infrecuente.

Ambas variables pueden ser definidas por el operador del CCT, bien mediante el CCTV o apoyándose en los datos de los detectores lineales de incendio, los opacímetros y los sensores de CO.

Esto es válido sobre todo para a_{FIRE} pero pudiera ser complicada la determinación de a_{VSP} cuando se produzca un vertimiento de combustible de los tanques de algún vehículo o vehículos involucrados en el accidente o cuando se produzca la fuga de algún gas incoloro, requiriéndose la presencia del personal de explotación en el lugar de los hechos para confirmar lo realmente ocurrido.

d. Variables que dicten la necesidad de prevenir o convocar a los servicios de emergencia (112).

De acuerdo a los protocolos (fichas) de actuación para los operarios de CCT confeccionados según las directrices de la Subdirección General de Conservación y Explotación de Carreteras, la prevención de los servicios de emergencia se realiza en todos los casos que ocurran accidentes (Sucesos Infrecuentes) que conlleven al cierre de al menos un carril del túnel, estando la prevención de estos servicios condicionada por la variable m_{CAR} . Cuando se de la condición de:

$$m_{CAR} \geq 1 \quad (7)$$

se procederá de inmediato a la prevención de los servicios de emergencia.

Para la convocatoria o activación de los Servicios de Emergencia pueden confluír varios factores que pueden ser reflejados a través de variables anteriormente expuestas. En particular influyen en esta decisión el cierre total del túnel, la existencia de incendio o vertimiento (escape) de sustancia peligrosa y la seria sospecha de existencia de heridos en el Suceso Infrecuente.

Esta influencia de factores se puede representar mediante la siguiente relación lógica:

$$a_{ASE} = (m_{CAR} = m_{MAX}) \vee (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP}) \vee (n_{HER} \neq 0) \quad (8)$$

donde a_{ASE} - necesidad de activación de los servicios de emergencia; m_{MAX} - cantidad máxima de carriles del túnel; n_{HER} - cantidad total de heridos en el suceso infrecuente (accidente).

Evidentemente, m_{MAX} es conocido de antemano para cada túnel concreto, mientras que el hecho de que $n_{HER} \neq 0$ debe ser apreciado por el operador del CCT por el CCTV.

e. Variables cuantitativas del propio Suceso Infrecuente que influyan en los modelos de evacuación y/o intervención.

Estas variables se refieren a las características cuantitativas de las personas y el escenario involucrados en el Suceso Infrecuente y en los procesos de evacuación e intervención.

Para definir cuáles pueden ser estas variables es preciso asumir una tipología de escenarios posibles al ocurrir un suceso infrecuente en un túnel.

Los escenarios posibles son los siguientes (Figura 2):

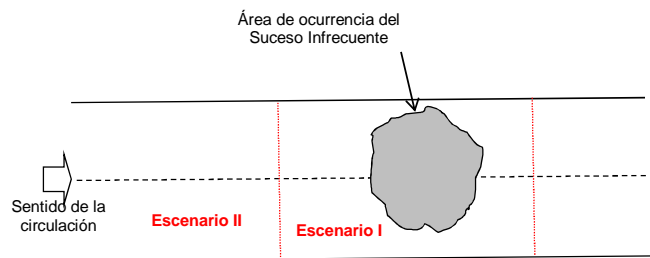


Figura 2. Situación típica de suceso infrecuente en un túnel

1. **Escenario I:** Sección del túnel inmediata al área de ocurrencia del suceso. Esta sección debe incluir, además del área del suceso, donde se encuentran los vehículos y personas directamente involucrados (chocados, volcados y/o incendiados), el área colindante con vehículos y personas con peligro de afectación por el inicio inminente o la propagación del incendio o afectación por sus humos, o potencialmente afectados por el derrame (fuga) de sustancias tóxicas, así como las salidas de emergencia y refugios más cercanos al área del suceso.
2. **Escenario II:** Parte del túnel inmediatamente adyacente al Escenario I, tanto en sentido contrario al de la circulación y como hasta la entrada. Asumiendo que se ha procedido al cierre del túnel se formará un embotellamiento de vehículos con sus ocupantes que presumiblemente deberán ser evacuados para su seguridad, pero que no están en peligro inminente de resultar afectados. Evidentemente este escenario tendrá las obstrucciones de los vehículos estacionados pero existirán espacios más amplios y garantizados para las rutas de evacuación e intervención que las del Escenario I, donde se encontrarán los vehículos chocados (volcados) y/o incendiados. Según el caso, puede darse la necesidad de prever la existencia de varios Escenarios de tipo II en dependencia de la distancia hasta la entrada del túnel o hasta salidas de emergencia intermedias.

De acuerdo a lo descrito, las variables cuantitativas que se analizan, serán las siguientes:

- n_{CCTV} - número de la cámara del CCTV que muestra el suceso infrecuente. Esta variable posibilitará determinar la posición del túnel donde ha ocurrido el suceso. El operador del CCT dispone de esta información a partir de los datos del DAI, que le permiten seleccionar y ampliar la imagen de la cámara señalada.
- $\delta_{CCTV} = 1, 2, 3$ - lugar aproximado del sector del túnel captado por la cámara del CCTV donde ha ocurrido el Suceso Infrecuente. Este sector comúnmente es menor o igual a 150 m y es conocido para cada túnel concreto. Si $\delta_{CCTV} = 1$ significará que el suceso ha ocurrido en la primera mitad del sector más cercana a la cámara. Si $\delta_{CCTV} = 3$ se asumirá que el suceso ha ocurrido en la segunda mitad del sector y, por último, si $\delta_{CCTV} = 2$ indicará que el suceso ha ocurrido aproximadamente en el centro del sector. Esta variable permitirá precisar la ubicación del Suceso Infrecuente en el túnel y será introducida por el operador mediante el análisis de las imágenes del suceso registradas por el CCTV.
- $a_{GSI} = true, false$ - gravedad del Suceso Infrecuente. Esta será una variable apreciativa que indica la gravedad del accidente. Si se considera que la probabilidad de que exista al menos un herido grave como resultado del mismo es elevada (mayor o igual a 0,7), se asumirá el accidente como grave y $a_{GSI} = true$. De lo contrario $a_{GSI} = false$. El valor de ella se introducirá por el operador del CCT de acuerdo a la observación que realice de las imágenes del CCTV.

$$n_{VDI} = n_{VLDI} + n_{VPDI} + n_{VADI} \quad (9)$$

corresponderá al total de vehículos directamente implicados en el accidente (chocados, volcados y/o incendiados), mientras que los miembros de la parte derecha de la expresión (9) corresponderán a la cantidad de vehículos ligeros, pesados (de más de 3,5 t) y autobuses, respectivamente, directamente implicados en el suceso infrecuente. Estas variables pueden ser introducidas por el operador del CCT al observar las imágenes del suceso. En dependencia de las condiciones concretas puede tener mayor o menor exactitud su introducción. En todo caso es preferible sobreestimar que no infra-estimar estas variables.

$$n_{VAT} = n_{VENT} - n_{VSAL} \quad (10)$$

Cantidad total de vehículos atrapados en el túnel como consecuencia de su cierre al ocurrir el Suceso Infrecuente. n_{VENT} corresponderá a la cantidad

de vehículos que han entrado al túnel desde la ocurrencia del suceso y n_{VSAL} , a la que ha salido. Estos datos están a disposición del operador mediante la información que brindan las estaciones de aforo (aforadores) a través de su software de procesamiento.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las variables de entrada del modelo.

3. Variables de salida requeridas

Las variables de salida (Y) del modelo de sucesos infrecuentes pueden estar relacionadas directamente con algunas decisiones que debe asumir el operador del CCT o pueden constituir variables de entrada del modelo de evacuación y/o intervención.

3.1. Variables de salida relacionadas directamente con decisiones

Entre estas variables se pueden considerar las siguientes:

- m'_{CAR} - cantidad de carriles que se cierran a la circulación.
- a'_{APE} - necesidad de aviso al personal de explotación para que acudan al sitio del suceso.
- a'_{PSE} - necesidad de prevenir a los servicios de emergencia.
- a'_{ASE} - necesidad de activar a los servicios de emergencia.
- a'_{EVAC} - necesidad de evacuación inmediata del túnel.

De las variables expuestas la primera es una variable entera y el resto son variables booleanas.

3.2. Variables de salida a emplear como entradas de los modelos de evacuación y/o intervención

La definición de este grupo de variables presenta ciertas dificultades, en particular porque ellas dependen del tipo o tipos de modelos de evacuación que se emplearán. Estas variables aportan datos tanto de las características del escenario de evacuación como de las personas a evacuar. Teniendo en cuenta que, como se explicó en el epígrafe anterior, se considerará la existencia de dos tipos de escenarios (Escenario I y II de la Figura 2), se especificaron las variables de salida para cada uno de estos tipos de escenario:

Tabla 1. Resumen de las posibles variables de entrada del modelo

Variable principal	Variables relacionadas	Descripción
τ_{RDSI}		Tiempo de retardo de detección del suceso infrecuente
m_{CAR}		Cantidad de carriles obstruidos
a_{SI}		Ocurrencia de un suceso infrecuente
τ'_{PE}	D_{PE}	Tiempo potencial de llegada al lugar del suceso del personal de explotación Distancia del personal de explotación disponible (más cercano) hasta el lugar del suceso
	v_{PE}	Velocidad media de desplazamiento del personal de explotación
a_{FIRE}		Ocurrencia de un incendio producto del suceso infrecuente
a_{VSP}		Ocurrencia de un vertimiento (escape) de una sustancia peligrosa producto del suceso infrecuente
a_{ASE}		Necesidad de activación de los servicios de emergencia
	m_{max}	Cantidad máxima de carriles del túnel
	n_{HER}	Cantidad total de heridos en el suceso infrecuente (accidente)
n_{CCTV}		Número de la cámara del CCTV que muestra el suceso infrecuente (accidente)
δ_{CCTV}		Lugar aproximado del sector del túnel captado por la cámara del CCTV donde ha ocurrido el suceso infrecuente
a_{GSI}		Gravedad del suceso infrecuente
n_{VDI}		Total de vehículos directamente implicados en el accidente
	n_{VLDI}	Vehículos ligeros directamente implicados en el accidente
	n_{VPDI}	Vehículos pesados directamente implicados en el accidente
	n_{VADI}	Autobuses directamente implicados en el accidente
n_{VAT}		Total de vehículos atrapados en el túnel como consecuencia de su cierre al ocurrir el suceso infrecuente
	n_{VENT}	Cantidad de vehículos que han entrado al túnel desde la ocurrencia del suceso
	n_{VSAL}	Cantidad de vehículos que han salido del túnel desde la ocurrencia del suceso

3.2.1. Variables de salida para el Escenario I

Las variables de salida para este tipo de escenario serán:

- $a'_{BIDIREC}$ - bidireccionalidad de la posible salida del escenario. Esta variable booleana será verdadera cuando las características del accidente posibiliten la evacuación de las personas que se encuentren en el escenario en ambas direcciones del túnel.
- d'_{I1} - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo del Escenario I.
- d'_{I2} - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Escenario I.

$$n'_{IT} = n'_{IMN} + n'_{IMR} + n'_{IMA} \quad (11)$$

cantidad total de personas a evacuar del escenario.

- n'_{IMN} - cantidad de personas con movilidad normal a evacuar del escenario.
- n'_{IMR} - cantidad de personas con movilidad reducida a evacuar del escenario.
- n'_{IMA} - cantidad de personas con movilidad asistida a evacuar del escenario.

3.2.2. Variables de salida para el Escenario II

En la Tabla 2 se muestra un resumen de las posibles variables de salida del modelo de sucesos infrecuentes.

Las variables de salida para este tipo de escenario serán:

- d'_{II} - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Escenario II.
- n'_{IIV} - cantidad total de vehículos en el Escenario II cuyos conductores y pasajeros deban de ser evacuados.

Una variable que puede ser común para ambos tipos de escenario es el tiempo de retardo en la detección del suceso infrecuente, ya que influye igualmente en los tiempos totales de evacuación:

- τ'_{RDSI} - tiempo de retardo en la detección del suceso infrecuente.

4. Modelo matemático de sucesos infrecuentes

El modelo matemático de sucesos infrecuentes consiste en el conjunto de expresiones que relacionan las

Tabla 2. Resumen de las posibles variables de salida del modelo

Variable principal	Variables relacionadas	Descripción
m'_{CAR}		Cantidad de carriles que se cierran a la circulación
a'_{APE}		Necesidad de aviso al Personal de Explotación para que acudan al sitio del suceso
a'_{PSE}		Necesidad de prevenir a los Servicios de Emergencia
a'_{ASE}		Necesidad de activar a los Servicios de Emergencia
a'_{EVAC}		Necesidad de evacuación inmediata del túnel
$a'_{BIDIREC}$		Bidireccionalidad de la posible salida del Escenario I
d'_{I1}		Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo del Escenario I
d'_{I2}		Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Escenario I
n'_{IT}		Cantidad total de personas a evacuar del Escenario I
	n'_{IMN}	Cantidad de personas con movilidad normal a evacuar del Escenario I
	n'_{IMR}	Cantidad de personas con movilidad reducida a evacuar del Escenario I
	n'_{IMA}	Cantidad de personas con movilidad asistida a evacuar del Escenario I
d'_{II}		Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Escenario II
n'_{IV}		Cantidad total de vehículos en el Escenario II cuyos conductores y pasajeros deban ser evacuados
τ'_{RDSI}		Tiempo de retardo en la detección del Suceso Infrecuente

variables de salida con las de entrada. Para ello se han tomado como base los protocolos de actuación en caso de incidencias refrendados en los manuales de explotación de los túneles de carretera (véase como ejemplo [2]). Estas expresiones asumen la forma siguiente:

1. La cantidad de carriles del túnel que se cierran a la circulación será igual a la cantidad de carriles obstruidos producto del suceso infrecuente:

$$m'_{CAR} = m_{CAR} \quad (12)$$

2. La necesidad de aviso al personal de explotación para que acudan al sitio del suceso está condicionada por la propia ocurrencia de un suceso infrecuente:

$$a'_{APE} = a_{SI} \quad (13)$$

3. La necesidad de prevenir a los servicios de emergencia se define por el cierre de al menos un carril del túnel, siempre que el túnel tenga más de un carril:

$$a'_{PSE} = (m_{CAR} \geq 1) \wedge (m_{MAX} > 1) \quad (14)$$

4. La necesidad de activar a los servicios de emergencia está condicionada por el cierre total del túnel, la

detección de un incendio o de un vertimiento (escape) de una sustancia peligrosa o la sospecha de que haya al menos un herido producto del accidente:

$$a'_{ASE} = a_{ASE} = (m_{CAR} = m_{MAX}) \vee (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP}) \vee (n_{HER} \neq 0) \quad (15)$$

5. La necesidad de evacuación inmediata del túnel se determina por el surgimiento de un incendio en el mismo o el vertimiento o escape de una sustancia peligrosa, como resultado del suceso infrecuente:

$$a'_{EVAC} = (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP}) \quad (16)$$

6. La bidireccionalidad de la posible evacuación inmediata del túnel se define por la obstrucción total o parcial del mismo. Si la obstrucción es total la bidireccionalidad será falsa:

$$a'_{BIDIREC} = m_{CAR} < m_{MAX} \quad (17)$$

7. La distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo del Escenario I de evacuación puede calcularse mediante las expresiones que se detallan a continuación:

Inicialmente se calcula la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del suceso infrecuente:

$$d_{SI} = d_{CAM}(n_{CCTV}) + \delta_{ZM} + \frac{\delta_{CCTV} + 1}{6} \cdot \Delta_{CAM} \quad (18)$$

donde d_{SI} - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar aproximado de ocurrencia del Suceso Infrecuente; $d_{CAM}(n_{CCTV})$ - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la cámara del CCTV con número n_{CCTV} ; δ_{ZM} - distancia de la zona muerta de la cámara (ver Figura 3); Δ_{CAM} - distancia entre las cámaras del túnel. Las distancias hasta cada una de las cámaras del túnel se pueden calcular mediante la expresión:

$$d_{CAM}(i) = d_{CAM1} + i \cdot \Delta_{CAM} \quad \text{para } 0 \leq i \leq m_{CAM} \quad (19)$$

donde:

d_{CAM1} - distancia desde la boca del túnel hasta la primera cámara del CCTV;

m_{CAM} - cantidad total de cámaras en el túnel.

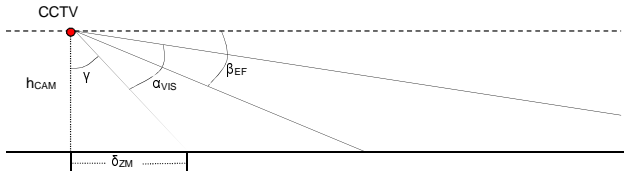


Figura 3. Zona muerta de la cámara del CCTV

De la Figura 3 se infiere que:

$$\delta_{ZM} = h_{CAM} \cdot \tan(\gamma) = h_{CAM} \cdot \cot\left(\beta_{EF} - \frac{\alpha_{VIS}}{2}\right) \quad (20)$$

donde: h_{CAM} - altura de la cámara desde el plano de la calzada; β_{EF} - ángulo del eje focal de la cámara con respecto al plano horizontal; α_{VIS} - ángulo de visión de la cámara.

Entonces

$$d'_{I1} = \begin{cases} d_{GALi} & \text{si } A_G = (i \geq 1) \wedge \\ & [(d_{SI} - d_{GALi}) < (d_{SI} - d_{GALj})] \wedge (j < i) \\ 0 & \text{si } \overline{A_G} \end{cases} \quad (21)$$

donde: d_{GALi} - distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la i -ésima galería. Las galerías se numerarán comenzando por 1 a partir de la boca

del túnel. j - número de cualquier otra galería del túnel.

La expresión (21) indica que se elegirá la distancia d'_{I1} igual a la distancia hasta la galería inmediata anterior contracorriente al lugar de ocurrencia del suceso infrecuente, si existiese. De lo contrario esta distancia se asumirá igual a cero (entrada del túnel). Las distancias hasta las distintas galerías del túnel se pueden calcular mediante la expresión:

$$d_{GALj} = d_{GAL1} + j \cdot \Delta_{GAL} \quad \text{para } 0 \leq j \leq m_{GAL} \quad (22)$$

donde d_{GALj} - distancia hasta la primera galería del túnel; Δ_{GAL} - distancia entre las galerías; m_{GAL} - cantidad total de galerías del túnel.

8. La distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Escenario I de evacuación se calculará mediante la expresión:

$$d'_{I2} = \begin{cases} d_{GALk} & \text{si } A_{G1} = \wedge a'_{BIDIREC} \\ L_T & \text{si } \overline{A_{G1}} \wedge a'_{BIDIREC} \\ d_{SI} + \frac{\Delta_{CAM}}{3} & \text{si } -a'_{BIDIREC} = false \end{cases} \quad (23)$$

donde:

$$A_{G1} = (k \geq 1) \wedge [(d_{GALk} - d_{SI}) < (d_{GALj} - d_{SI})] \wedge (j > k) \quad (24)$$

d_{GALk} - distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la k -ésima galería; L_T - longitud del túnel.

La expresión (24) refleja que la distancia d'_{I2} será, para los casos de posibilidad de evacuación bidireccional, igual a la distancia hasta la galería inmediata posterior contracorriente del lugar de ocurrencia del suceso, si existiese tal galería, o igual a la longitud del túnel en caso contrario.

Si la evacuación tiene que ser unidireccional se asume la distancia d'_{I2} igual a la distancia hasta el suceso infrecuente más un margen espacial igual al tercio de la distancia entre cámaras del CCTV.

9. La cantidad total de personas a evacuar del Escenario I es un estimado pesimista que ha de realizarse sobre la base de la cantidad de vehículos directamente implicados en el accidente y sus tipos. El carácter pesimista de este estimado supone asumir valores máximos razonables que impliquen tiempos de evacuación simulados igualmente máximos razonables. Por ello la expresión de esta variable puede ser:

$$n'_{IT} = k_{VL} \cdot n_{VLDI} + k_{VP} \cdot n_{VPDI} + k_{VA} \cdot n_{VADI} \quad (25)$$

donde k_{VL} - ocupación de pasajeros asumida por vehículo ligero; k_{VP} - ocupación de pasajeros asumida por vehículo pesado; k_{VA} - ocupación de pasajeros asumida por autobús.

10. *Las cantidades de personas a evacuar con diferentes tipos de movilidades del Escenario I también deben consistir en estimados pesimistas.*

Aquí hay que diferenciar dos situaciones: considerando que el suceso infrecuente es grave o considerando que no lo es. Esto se asume con las probabilidades bayesianas, siendo para el caso de que se considere que el suceso es grave:

$$\left. \begin{aligned} n'_{IMN} &= P(MN|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMR} &= P(MR|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMA} &= P(MA|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

donde $P(MN|A_{GSI})$ es la probabilidad de mantener una movilidad normal después del accidente si la hipótesis de gravedad del suceso es cierta; $P(MR|A_{GSI})$ la probabilidad de mantener una movilidad reducida después del accidente si la hipótesis de gravedad del suceso es cierta; $P(MA|A_{GSI})$ la probabilidad de mantener una movilidad asistida después del accidente si la hipótesis de gravedad del suceso es cierta.

Evidentemente, si se considera falsa la hipótesis de gravedad del suceso infrecuente, que por definición presume la ausencia de heridos graves, la expresión (26) tomará la forma siguiente:

$$\left. \begin{aligned} n'_{IMN} &= P(MN|\bar{A}_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMR} &= P(MR|\bar{A}_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMA} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Por otra parte, relacionando las probabilidades condicionales empleadas en las expresiones (26) y (27) con las probabilidades de ocurrencia de heridos leves, graves y fallecidos cuando tiene lugar un accidente grave en un túnel de carretera, se tiene que:

$$P(MR|A_{GSI}) = P(HL|A_{GSI}) \quad (28)$$

donde $P(HL|A_{GSI})$ es la probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta.

De igual forma:

$$P(MA|A_{GSI}) = P(HG|A_{GSI}) + P(F|A_{GSI}) \quad (29)$$

donde $P(MA|A_{GSI})$ es la probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas graves

si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta. $P(F|A_{GSI})$ - probabilidad de que los implicados en un accidente fallezcan si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta.

En la expresión (29) está implícito el enfoque pesimista del modelo desde el punto de vista de la evacuación, ya que consideramos que tanto los heridos graves como los fallecidos, se incluyen en la categoría de potenciales evacuados con movilidad asistida.

En consecuencia:

$$P(MN|A_{GSI}) = 1 - \frac{P(HL|A_{GSI}) + P(HG|A_{GSI}) + P(F|A_{GSI})}{P(HG|A_{GSI}) + P(F|A_{GSI})} \quad (30)$$

Por otra parte:

$$P(MR|\bar{A}_{GSI}) = P(HL|\bar{A}_{GSI}) \quad (31)$$

donde $P(HL|\bar{A}_{GSI})$ es la probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es falsa.

Y finalmente:

$$P(MN|\bar{A}_{GSI}) = 1 - P(HL|\bar{A}_{GSI}) \quad (32)$$

11. *La distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Escenario II se asume igual a la distancia hasta la cámara del CCTV que ha captado el suceso infrecuente, o sea:*

$$d'_{II} = \begin{cases} d_{CAM}(n_{CCTV} & \text{sid}'_{II} \neq 0 \\ 0 & \text{sid}'_{II} = 0 \end{cases} \quad (33)$$

12. *La cantidad de vehículos en el Escenario II cuyos conductores y pasajeros deban ser evacuados se puede calcular de manera simple, restando a la cantidad de vehículos atrapados en el túnel desde la ocurrencia del suceso, el total de vehículos directamente implicados en el accidente:*

$$n'_{IIV} = n_{VAT} - n_{VDI} \quad (34)$$

13. *El tiempo de retardo en la detección del suceso infrecuente evidentemente será igual a la variable de entrada homóloga:*

$$\tau'_{RDSI} = \tau_{RDSI} \quad (35)$$

En el modelo matemático descrito se han empleado un conjunto de parámetros que se consideran conocidos. En la Tabla 3 se relacionan estos parámetros.

Tabla 3. Resumen de los parámetros del modelo

Parámetro	Descripción
m_{MAX}	Cantidad máxima de carriles del túnel
d_{CAM1}	Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera cámara del CCTV
Δ_{CAM}	Distancia entre las cámaras del túnel
m_{CAM}	Cantidad total de cámaras del CCTV en el interior del túnel
h_{CAM}	Altura de las cámaras desde el plano de la calzada en el interior del túnel
β_{EF}	Ángulo del eje focal de la cámara con respecto al plano horizontal
α_{VIS}	Ángulo de visión de la cámara
d_{GALj}	Distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la j-ésima galería
d_{GAL1}	Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera galería
Δ_{GAL}	Distancia entre las galerías del túnel
m_{GAL}	Cantidad total de galerías del túnel
L_T	Longitud del túnel
k_{VL}	Ocupación de pasajeros asumida por vehículo ligero
k_{VP}	Ocupación de pasajeros asumida por vehículo pesado
k_{VA}	Ocupación de pasajeros asumida por autobús
$P(HL A_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta
$P(HG A_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas graves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta
$P(F A_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente fallezcan si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta
$P(HL \bar{A}_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es falsa

5. Implementación del modelo matemático de sucesos infrecuentes

Se ha desarrollado un modelo computacional de sucesos infrecuentes sobre la base del modelo matemático anteriormente descrito empleando el lenguaje orientado a objetos C# sobre el marco de trabajo de destino *NET Framework 3.5 SP1*. Para ello se ha empleado la herramienta de desarrollo *Microsoft Visual C# 2008 Express*.

El modelo consta de dos clases principales agrupadas en el espacio de nombres *sucesoinfrecuente*. Estas clases son:

- *ParamsSI*
- *ModSI*

La clase *ParamsSI*, contiene como variables los parámetros definidos en el modelo matemático y posee un constructor sobrecargado que admite una variable de tipo *string* como parámetro, pudiendo de esta forma cargar todos los valores de los parámetros requeridos por el modelo y asignándolos a las variables del objeto de clase creado.

Se desarrolló un programa que permite introducir las variables de la clase y guardarlas en forma de un archivo de datos. La ventana principal de este programa se muestra en la Figura 4.

La clase *ModSI*, tiene como entidades las correspondientes variables de entrada y de salida descritas en el

modelo matemático de sucesos infrecuentes, además de una variable de clase *ParamsSI* destinada a contener los parámetros del modelo. Posee un constructor sobrecargado que admite un parámetro de tipo *string* al que se le pasan los parámetros del escenario que se ha de simular, lo que posibilita crear el objeto de tipo *ParamsSI* llamando al constructor sobrecargado de esa clase que fue descrito anteriormente. La clase *MosSI* posee un método principal denominado *Procesamiento*, que es el encargado de instrumentar todas las expresiones y procesos que permiten obtener las variables de salida a partir de las variables de entrada y los parámetros del modelo, contenidos en la clase. Se verificó el funcionamiento del Modelo empleando un programa especialmente desarrollado para ello, cuya ventana principal (Figura 5) permite introducir cualquier combinación de variables de entrada y muestra en otra ventana las variables de salida (Figura 6).

6. Caso de aplicación del modelo

Para la comprobación del correcto funcionamiento del modelo de sucesos infrecuentes se procedió a su aplicación en el túnel de Lantueno ubicado en la Autovía A – 67, Cantabria – La Meseta. Se trata de un túnel unidireccional de dos carriles, con una longitud de 670 m, que dispone de una sola galería de evacuación ubicada a 350 m de la boca de entrada.

Introducción de Parámetros del Modelo de Sucesos Infrecuentes

Parámetros del Modelo de Sucesos Infrecuentes

Cantidad máxima de carriles del túnel:	<input type="text" value="2"/>	Ángulo de visión de la cámara [grados]:	<input type="text" value="120"/>	Ocupación de pasajeros por vehículo pesado:	<input type="text" value="1"/>
Cantidad de cámaras del CCTV del túnel:	<input type="text" value="5"/>	Cantidad de galerías del túnel:	<input type="text" value="1"/>	Ocupación de pasajeros por autobús:	<input type="text" value="40"/>
Distancia hasta la primera cámara del CCTV [m]:	<input type="text" value="2"/>	Distancia hasta la primera galería del túnel [m]:	<input type="text" value="350"/>	Probabilidad de heridas leves si suceso grave:	<input type="text" value="0.3"/>
Distancia entre las cámaras del túnel [m]:	<input type="text" value="130"/>	Distancia entre las galerías del túnel [m]:	<input type="text" value="0"/>	Probabilidad de heridas graves si suceso grave:	<input type="text" value="0.25"/>
Altura de las cámaras en el interior del túnel [m]:	<input type="text" value="2.5"/>	Longitud del túnel [m]:	<input type="text" value="670"/>	Probabilidad de fallecimiento si suceso grave:	<input type="text" value="0.15"/>
Ángulo del eje focal de la cámara [grados]:	<input type="text" value="29"/>	Ocupación de pasajeros por vehículo ligero:	<input type="text" value="2"/>	Probabilidad de heridas leves si suceso no grave:	<input type="text" value="0.3"/>

Figura 4. Ventana de introducción de los parámetros del modelo

Comprobación del Modelo de Sucesos Infrecuentes

INTRODUCCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Elija ante todo el archivo de parámetros del Modelo de Sucesos Infrecuentes:

Variables booleanas:

¿Ha ocurrido un SI?	¿Hay incendio?	¿Hay Vertimiento?	¿Hay herido(s)?	¿El SI es grave?
<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No	<input checked="" type="radio"/> Si <input type="radio"/> No

Variables numéricas:

Cantidad de carriles obstruidos:	<input type="text" value="1"/>	Vehículos ligeros implicados en el SI:	<input type="text" value="4"/>	Total de vehículos atrapados:	<input type="text" value="62"/>
Número de la cámara que muestra el SI:	<input type="text" value="2"/>	Vehículos pesados implicados en el SI:	<input type="text" value="1"/>	Retardo en la detección del SI [s]:	<input type="text" value="90"/>
Lugar aproximado del SI en el sector:	<input type="text" value="2"/>	Autobuses implicados en el SI:	<input type="text" value="0"/>		

Figura 5. Ventana de introducción de las variables de entrada del modelo

Resultados del Modelo de Sucesos Infrecuentes

Decisiones:

- Aviso al Personal de Explotación
- Prevención de los Servicios de Emergencia
- Activación de los Servicios de Emergencia
- Necesidad de evacuación inmediata
- Bidireccionalidad del Escenario I

Resultados numéricos:

Cantidad de carriles a cerrar:	<input type="text" value="1"/>	Personas con movilidad reducida Esc. I:	<input type="text" value="4"/>
Distancia hasta el inicio del Escenario I [m]:	<input type="text" value="0"/>	Personas de movilidad asistida Esc. I:	<input type="text" value="5"/>
Distancia hasta el fin del Escenario I [m]:	<input type="text" value="350"/>	Distancia hasta el fin del Escenario II [m]:	<input type="text" value="132"/>
Total de personas a evacuar (Escenario I):	<input type="text" value="10"/>	Vehículos a evacuar del Esc. II:	<input type="text" value="57"/>
Personas con movilidad normal Esc. I:	<input type="text" value="2"/>	Retardo en la detección del SI:	<input type="text" value="p"/>

Cerrar

Figura 6. Ventana que muestra las variables de salida del modelo

Los parámetros concretos que definen la geometría y otras características del túnel en el que se va a centrar la aplicación práctica del modelo, coinciden con las mostradas en la Figura 4.

6.1. Casos de Estudio

Se consideraron dos localizaciones diferentes para el suceso infrecuente detectado por el operador:

- Caso 1.** Zona próxima a la salida del tubo (Zona 3), asumiendo que la detección del suceso viene dada por la cámara número 5.
- Caso 2.** Zona intermedia del túnel (Zona 2), asumiendo que la detección del suceso viene dada por la cámara número 3.

6.2. Variables de entrada

Para el Caso 1 se adopta una asunción pesimista, en la que como resultado del cierre del túnel tras la detección de un suceso infrecuente, quedan atrapados la máxima cantidad posible de vehículos. Considerando la longitud establecida en el archivo de datos de 670 m y asumiendo una media diaria de circulación de vehículos pesados del 12 %, se estableció como variable de entrada 136 vehículos retenidos en el embotellamiento producido por el incidente tras el cierre del túnel, de ellos 120 vehículos ligeros y 16 vehículos pesados.

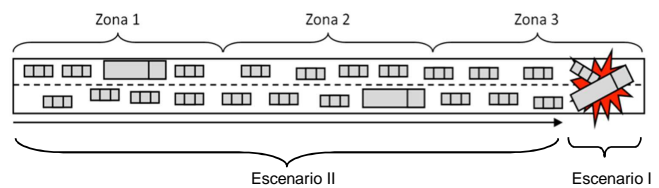


Figura 7. Layout del Caso 1

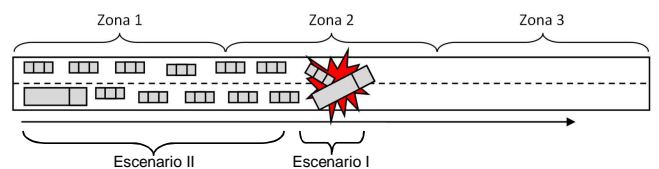


Figura 8. Layout del Caso 2

Para el Caso 2, donde el incidente fue localizado en la zona central del túnel, se asumió una circulación media diaria de 20000 vehículos con igual porcentaje de vehículos pesados que en el caso anterior, de modo que se consideró un total de 76 vehículos atrapados en el Escenario II: 67 vehículos ligeros y 9 vehículos pesados.

Con respecto al resto de las variables de entrada del modelo se han considerado 5 situaciones para cada uno de los casos anteriormente, adoptando diferentes características del suceso en cuanto a la existencia de incendio, vertido, heridos, gravedad, etc. Con ello quedan conformados en total 10 casos de estudio cuyas variables respectivas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de entrada para la aplicación del modelo de sucesos infrecuentes

Caso	Incendio	Vertido	Heridos	Grave	Carr. Bloqu.	Vehículos implicados		Vehículos atrapados
						Lig.	Pes.	
1.1	SI	SI	SI	SI	2	2	0	136
1.2	NO	SI	SI	SI	2	1	1	136
1.3	SI	NO	SI	SI	2	4	1	136
1.4	NO	NO	SI	SI	2	5	2	136
1.5	NO	NO	NO	NO	1	1	0	136
2.1	SI	SI	SI	SI	2	0	2	76
2.2	NO	SI	SI	SI	2	3	0	76
2.3	SI	NO	SI	SI	2	2	2	76
2.4	NO	NO	SI	SI	2	6	1	76
2.5	NO	NO	NO	NO	1	0	1	76

Tabla 5. Resultados de los casos de aplicación. Propuesta de decisiones

DECISIONES	CASOS									
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Aviso al P.E.*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Prevención S.E.+					x					x
Activación S.E.	x	x	x	x		x	x	x	x	
Necesidad de Evacuación	x	x	x			x	x	x		
Bidireccionalidad					x					x
Carriles a cerrar	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1

* P.E = Personal de Explotación. + S.E = Servicios de Emergencia

6.3. Resultados obtenidos

El modelo de sucesos infrecuentes ofrece dos tipos de resultados: la propuesta de decisiones a adoptar por el operador, encaminadas a minimizar las consecuencias de la emergencia, y una información numérica adicional sobre el suceso detectado. De esta última la más importante es la cantidad de personas a evacuar del Escenario I según la afectación a su movilidad tras la ocurrencia del accidente.

Estos datos numéricos no influyen directamente en las decisiones que propone el modelo de sucesos infrecuentes, pero resultan determinantes para realizar un análisis más profundo del proceso de evacuación y rescate. Actualmente, se están desarrollando modelos estocásticos de evacuación específicos para cada uno de los escenarios previstos en los túneles de carretera. Los resultados numéricos obtenidos por el modelo de sucesos infrecuentes servirán de entrada al modelo de evacuación del Escenario I. Esto permitirá realizar la estimación del tiempo total de evacuación de cada escenario del túnel, ofreciendo al operador una mayor información sobre la gravedad y el alcance del suceso infrecuente. El modelo de evacuación se implementará en el

desarrollo del sistema de ayuda a la toma de decisiones para la gestión de la emergencia.

En Tabla 5 se muestran las decisiones propuestas del sistema, para cada una de los casos considerados.

Como puede verse en la Tabla 5, las decisiones que el modelo obtuvo como resultado para cada uno de los casos, coinciden con las definidas en el epígrafe correspondiente al modelo matemático.

La decisión de aviso al personal de explotación se propuso en todos los casos considerados debido a que, tal como se definió previamente, el aviso viene determinado por la confirmación por parte del operador de la ocurrencia de un suceso infrecuente.

La prevención a los servicios de emergencia solo se activó para los casos 1.5 y 2.5 en los que como dato de entrada se asumió que el suceso infrecuente no era grave, al contrario que en el resto de los casos donde se consideró un incidente grave y la decisión propuesta por el modelo fue el aviso a los servicios de emergencia.

Tal como se estableció en el modelo matemático, el sistema propone decretar la evacuación total en aquellos casos en los que las personas atrapadas en el embotellamiento producido por el cierre del túnel se encuentren en potencial peligro, es decir, los casos en los que se detecta incendio o vertido de sustancias peligrosas (ca-

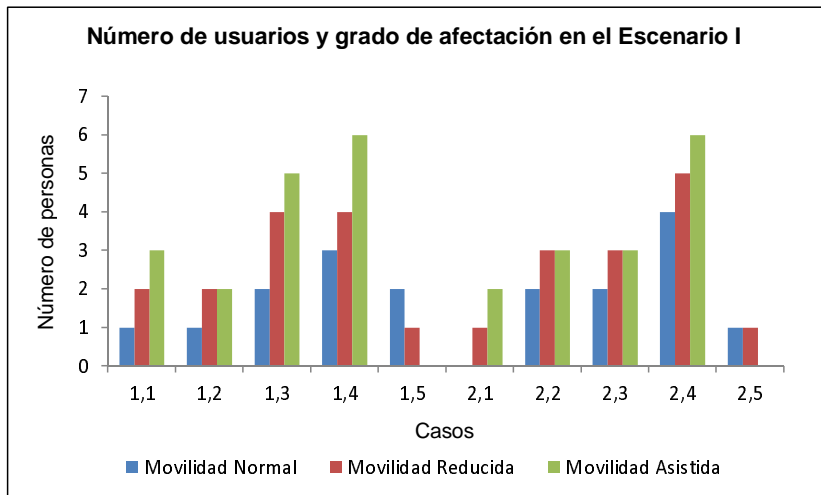


Figura 9. Resultados numéricos sobre las personas directamente involucradas

casos 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2 y 2.3). La bidireccionalidad solo fue activada para los casos en los que un solo carril resultó bloqueado a causa del incidente (casos 1.5 y 2.5).

La Figura 9 muestra, para cada uno de los casos analizados, los resultados obtenidos sobre la cantidad de personas directamente involucradas en el accidente, agrupadas según la movilidad que presentan tras la ocurrencia del Suceso Infrecuente (movilidad normal, movilidad reducida o movilidad asistida). Como era de esperar, estas cantidades son proporcionales al número y tipo de vehículos implicados en el accidente y a las características propias del suceso.

El Caso 1.4, con un total de 13 personas a evacuar (3 personas con movilidad normal, 4 personas con movilidad reducida y 6 personas con movilidad asistida), y el Caso 2.4, con 15 personas a evacuar (6 personas con movilidad asistida, 5 personas con movilidad reducida y 4 personas con movilidad normal), resultan los dos casos con mayor número de afectados a causa del incidente. Esto se debe a que se han considerado estos casos con el mayor número de vehículos involucrados en el suceso (5 vehículos ligeros y 2 vehículos pesados para el Caso 1.4 y 6 vehículos ligeros y 1 pesado para el Caso 2.4).

Por otro lado, los casos con menor número de personas directamente implicadas, son aquellos en los que el número de vehículos involucrados en el accidente es menor, como son el Caso 1.5, con un total de 3 personas (2 personas con movilidad normal y 1 persona con movilidad reducida), el Caso 2.1, con 3 personas a evacuar (2 personas con movilidad normal y 1 persona con movilidad reducida) y el Caso 2.5 con un total de 2 personas en el Escenario I (1 persona con movilidad normal y 1 persona con movilidad reducida).

La gravedad del incidente es determinante a la hora de estimar la afectación de las personas directamente implicadas. Para los casos 1.5 y 2.5, donde se considera un suceso no grave, los resultados muestran que no existen personas con movilidad asistida, al contrario del resto de los casos donde se consideró la ocurrencia de un suceso grave, registrándose heridos que requieren asistencia.

7. Conclusiones

El modelo de sucesos infrecuentes desarrollado permite simular adecuadamente este tipo de eventos en los túneles de carretera.

El modelo se ha concebido en base a la necesidad de su inclusión en un sistema automatizado de toma de decisiones de seguridad en túneles de carretera, considerando como uno de los principales factores la importancia de su fácil integración en este tipo de sistema computarizado.

El modelo se ha desarrollado empleando fundamentalmente las herramientas del método de caja negra, el álgebra booleana y la teoría de probabilidades. Se han definido las variables de entrada, de salida y los parámetros inherentes al modelo y se han establecido las relaciones matemáticas entre ellas.

La creación del modelo computacional correspondiente y los programas auxiliares requeridos ha permitido verificar adecuadamente el modelo, empleándose para ello los datos de accidentes en diferentes túneles a nivel mundial.

Esta implementación pertenece a la primera fase de un proyecto, cuyo resultado final será una herramienta de ayuda a la toma de decisiones para el personal técni-

co que se encuentra en el centro de control de un túnel para el caso de que ocurra un Suceso Infrecuente.

Se procedió a realizar un caso de aplicación en el cual se representaron diferentes situaciones de potenciales accidentes en el túnel de carretera seleccionado. Los resultados indicaron que el modelo de sucesos infrecuentes, puede ser empleado como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en caso de emergencia. Además de constituir un soporte a la toma de decisiones, aporta información relevante sobre el Suceso Infrecuente (número de personas y grado de afectación a causa del incidente).

Las siguientes etapas, correspondientes a un módulo de evacuación e intervención y el módulo final de selección y propuesta de las decisiones se están desarrollando en la actualidad.

Referencias

1. Análisis de los sucesos infrecuentes, sus escenarios e impactos. Informe intermedio del trabajo de investigación "Sistema Automatizado para la toma de decisiones (DSS) de seguridad en túneles de carretera ante sucesos infrecuentes mediante modelado y simulación computacional". Ref. 2007-030-22ICCP. Abril 2009.
2. Secretaria de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. Manual de explotación túnel de Lantueno 1. Clave 52-S-21200. Noviembre de 2008
3. Minister of the Interior, and Ministry of Equipment, Transportation and Housing, "Task force for technical investigation of the 24 March 1999 fire in The Mont Blanc vehicular tunnel - Report of 30 June 1999" (English translation)
4. SAFET TUNNEL, Project Documents. <http://www.crfproject-eu.org/>
5. Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels. <http://www.uptun.net/>
6. Fire in Tunnels. Best Practice for Safe Operation and Fire Response Management FIT Network – Work Package 4. Fire in Tunnels. 2004
7. Capote J., Alvear D., Lázaro M., Espina P. (2006) "Estudio del comportamiento del movimiento de humos en caso de incendio en un túnel ferroviario. Incidencia medioambiental y en la evacuación de las personas". Informe resumen de la investigación 7. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. ISBN: 84-8102-983-1
8. Capote J., Alvear D., Lázaro M., Espina P. (2007.) "Estudio de la influencia de los sistemas de ventilación en las solicitudes térmicas en caso de incendio en un túnel ferroviario". Informe resumen de la investigación 9. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. ISBN: 84-8102-983-1
9. European Parliament and Council Directive 2004/54/EC on Tunnel Safety in the European Road Network. 2004
10. Kuligowsky E.D. (2005) "Review of 28 egress models". NIST SP 1032. January 2005. (National Institute of Standards and Technology). *Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies Proceeding*. pp 68-90
11. Fahy R.F. (2005) "Avaliable data input into models". NIST SP 1032. January 2005. (National Institute of Standards and Technology). *Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies Proceeding*. pp. 62-67
12. Santos G., Aguirre B.E. (2005) "Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models". NIST SP 1032. January 2005 (National Institute of Standards and Technology). *Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies Proceeding*. pp. 27-52
13. Shields T.J., Boyce K. (2004) "Towards developing an understanding of human behaviour in fire tunnels". *3rd International Symposium on Human Behaviour in Fire*. (UK)
14. Worm.E., "Human behaviour influencing tunnel safety", Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management. Head of Centre for Tunnel Safety. <http://www.tunnelsafety.nl>
15. Capote J., Alvear D., Abreu O., Lázaro M., Espina P., Cuesta A. (2007) "Modelado y simulación computacional de la evacuación en túneles ferroviarios". Informe resumen de la investigación 10. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. ISBN: 84-8102-506-4
16. Jim T., Yamada T. (1989). "Experimental study of human behavior in smoke-filled corridors". *Fire Safety Science- Proceedings of the Second International Symposium*. Hemisphere Publishing Corp. Washington DC. pp. 511-519
17. Park J.H., Kim H., Whang J., Park J., Lee D. (2005) Development of an agent-based behaviour module for evacuation models- focused on the behaviours in the dark". *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg Eds. Springer. pp. 347-356. ISBN 354047062.
18. Capote, J., Alvear, D., Abreu, O., Cuesta, A. (2008) "Análisis de los parámetros de entrada en el modelado de simulación computacional de evacuación". *Montajes e Instalaciones*. 424:96-97 Febrero 2008
19. Capote J., Alvear D., Abreu O., Cuesta A. (2008) "Ventajas y limitaciones del MSCE". *Cuadernos de Seguridad* 221:64-70. marzo 2008
20. Heylighen F. Web Dictionary of Cybernetics and Systems. Principia Cybernetica Web. <http://pespmc1.vub.ac.be/ASC/IndexASC.html>
21. Sanders B.D. (2001) Black box methods for least squares problems. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation*. Ontario
22. Boole G., Corcoran J. (2003) *The Laws of Thought*. Prometheus Books. New York
23. Jaynes E.T. (2003) *Probability theory: The logic of science*. Cambridge University Press. Cambridge
24. Laskey K.B. (2009) Bayesian inference and decision theory. Department of Systems Engineering George Mason University Virginia
25. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. 2006
26. Capote J.A., Alvear D., Abreu O., Lázaro M., Cuesta A. (2009) "Modelado de simulación computacional de evacuación en edificios singulares". 25(3):227-245