

# Modelado y simulación computacional de evacuación en edificios singulares

J.A. Capote, D. Alvear, O.V. Abreu, M. Lázaro y A. Cuesta

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.: 34 942 201826; Fax: 34 942 201873  
e-mail: capotej@unican.es; alveard@unican.es; abreu@unican.es; lazarom@unican.es;  
cuestaar@unican.es

## Resumen

Para valorar la adecuación de los aspectos relacionados con la seguridad de las personas en las edificaciones, es necesario hacer una estimación acertada del tiempo requerido por los ocupantes para desplazarse hacia un espacio seguro. Existen diversas formas de aproximarse al problema de la evacuación de un edificio. Los cálculos analíticos, en base a las prescripciones normativas, plantean una solución rápida al problema mediante el cálculo de los niveles de ocupación, distancia de recorrido y dimensiones de los medios de evacuación. Pero cuando se trata de una edificación singular, estas aproximaciones pueden resultar insuficientes.

En este trabajo se analiza el proceso de la evacuación de los lugares y espacios comunes de una estación ferroviaria de pasajeros integrada por diferentes áreas destinadas al comercio, ocio, servicios de transporte, etc. mediante el Modelado y Simulación Computacional de Evacuación.

Los resultados obtenidos permitieron determinar el impacto de las diferentes condiciones de la edificación y de las características físicas y conductuales de los ocupantes en el cálculo del proceso de la evacuación y su incidencia en los tiempos requeridos por los ocupantes para acceder a un espacio seguro ante una situación de emergencia.

**Palabras clave:** *modelado y simulación computacional de evacuación, conducta humana, situaciones de emergencia.*

## EVACUATION COMPUTER MODELLING AND SIMULATION IN COMPLEX BUILDINGS.

### Summary

To assess the adequacy of the safety aspects of people in the buildings, it is necessary to make an accurate estimate of time required for occupants to move a safe place. There are various ways of approaching the problem of evacuating a building. The analytical calculations, based on the standards regulations and requirements, pose a quick solution to the problem by calculating occupancy capacity, travel distance and dimensions of the means of egress. But when it comes to a complex building, these approaches may be insufficient.

This paper examines the evacuation process of places and spaces of a passenger rail station consisting of different uses (assembly, entertainment, transport services, etc.) through Evacuation Modelling and Simulation.

The results allowed to determine the impact of different geometry conditions of the building and physical and behavioral occupants characteristics in the calculation of the evacuation process and its impact on the required egress safe time in an emergency situation.

**Keywords:** *evacuation computer modelling and simulation, human behaviour, emergency situations.*

## INTRODUCCIÓN

Para que un edificio sea seguro ante una situación de emergencia, la totalidad de los ocupantes, en cualquier instante, deben tener la posibilidad de desplazarse hasta un lugar seguro en el mínimo tiempo con las suficientes garantías de seguridad. Las normativas resuelven el problema desde el punto de vista del diseño en base al cálculo de los niveles de ocupación, distancia de recorrido y dimensiones de los medios de evacuación. Pero en edificios con una arquitectura singular, distribución compleja y con condiciones de muy elevada ocupación, resulta imprescindible el empleo de herramientas que faciliten la estimación de las magnitudes necesarias para conocer el desarrollo del proceso de la evacuación.

Las nuevas Estaciones Ferroviarias, como complejos de edificaciones de características singulares, por su tamaño y distribución espacial interna ofrecen múltiples ventajas y posibilidades funcionales, pero, a la vez, se trata de edificaciones complejas en cuanto a la seguridad en caso de emergencia. La evacuación de una edificación de estas características no viene afectada únicamente por los parámetros de movimiento.

En el cálculo de la distancia de los recorridos de evacuación, las normativas asumen que las personas tomarán la salida más cercana. La elección de la ruta de escape, es uno de los aspectos más complejos del comportamiento humano en situaciones de emergencia. Los individuos seleccionan la ruta a seguir en base al conocimiento del entorno que comprende factores internos (mapa cognitivo de la geometría del edificio) y factores externos (interacción con el entorno y con otros ocupantes). En muchas ocasiones, las rutas de entrada conocidas son más susceptibles de ser utilizadas durante la evacuación<sup>1,2,3</sup>.

Por otro lado, los factores externos a la conducta pueden modificar la ruta preseleccionada por un ocupante. Por ejemplo, las situaciones de grandes aglomeraciones de personas para acceder a las salidas o las manifestaciones del incendio pueden hacer que un individuo modifique la ruta elegida<sup>4</sup>.

La velocidad de desplazamiento en diferentes superficies de un edificio (escaleras, rampas) es un factor a tener en cuenta cuando nos enfrentamos al problema de la evacuación de un edificio. Este parámetro depende de muchos factores, tales como las propias aptitudes físicas de los ocupantes, la densidad de personas en las distintas partes del edificio y la interacción social entre los individuos (conductas altruistas, movimiento colectivo, etc.).

Por otro lado, el procedimiento de emergencia es mucho más fácil si un edificio dispone de adecuada señalización de las salidas, un sistema eficiente de comunicación y un entrenamiento apropiado del personal, ya que la forma en que un individuo es alertado puede influir de forma decisiva en los tiempos totales de evacuación. Si un ocupante recibe información incompleta sobre la situación de emergencia y no percibe directamente la amenaza, puede ignorar las señales, buscar más información o realizar otras actividades diferentes antes de iniciar la evacuación. Resulta, por lo tanto, esencial “que los ocupantes entiendan que no se trata de una falsa alarma y que comprendan la seriedad de la situación”<sup>2</sup>.

Además, la conducta de los ocupantes durante una situación de emergencia puede verse influida por los vínculos sociales y la adopción de determinados roles. Las personas interactúan entre sí transmitiéndose información o pueden estar vinculadas por lazos familiares y/o emocionales.

Las estructuras sociales existentes antes y durante la evacuación afectan de forma significativa las decisiones tomadas y las acciones adoptadas por las personas en respuesta a la situación de emergencia<sup>5,6</sup>. Incluso, se ha demostrado que las actividades realizadas por otras personas afectan en la interpretación de la situación de emergencia de los ocupantes<sup>7,8</sup>. Latane y Darley<sup>9</sup> constataron en sus experimentos que la presencia de otras personas influye de forma determinante en la percepción de la amenaza de los individuos y en la toma de decisiones. La pasividad de otros ocupantes ante las señales iniciales de un incendio refuerzan la interpretación de “no emergencia” de un individuo. Este tipo de conductas se muestran

especialmente en lugares de pública concurrencia, tales como, restaurantes, cafeterías, salas de espera, etc.

El presente Estudio tiene por objeto determinar el impacto de estos factores de la conducta humana a fin de conducir a una interpretación adecuada del fenómeno de la evacuación. Para el desarrollo del presente estudio se analizaron el impacto de los siguientes factores<sup>10-13</sup>:

- Efectos de las obstrucciones en las rutas de evacuación mediante el bloqueo de determinadas salidas que modifican las rutas de evacuación de los ocupantes.
- Premovimiento. El tiempo que transcurre entre la activación de la alarma el momento en que los ocupantes deciden iniciar los movimientos de evacuación.
- Proceso de decisión en la elección de las rutas de evacuación conocidas por parte de los ocupantes, en detrimento de aquéllas por las que nunca han pasado.
- Características de los ocupantes, edad, género, considerando la velocidad de desplazamiento en diferentes superficies del edificio.
- Conductas colectivas y vínculos sociales durante el proceso de la evacuación.

En este tipo de edificaciones complejas el empleo del Modelado y Simulación Computacional permite considerar estos factores en el análisis y estudio de la evacuación y determinar su posible impacto en los resultados del proceso simulado<sup>14</sup>.

## DESCRIPCIÓN DEL COMPLEJO ARQUITECTÓNICO

Para la realización del presente Estudio se seleccionó una Estación Ferroviaria de Pasajeros que se compone de tres niveles: Planta Alta, Planta Baja y el Parking Subterráneo. Cada uno de los niveles del edificio tiene sus propias salidas independientes que comunican directamente con el exterior.

Como se observa en la Figura 1, la Planta Baja (cota 0 m) consta de cinco salidas: dos entradas principales (SPB-1 y SPB-5) y tres salidas de emergencia (SPB-2, SPB-4 y SPB-6).

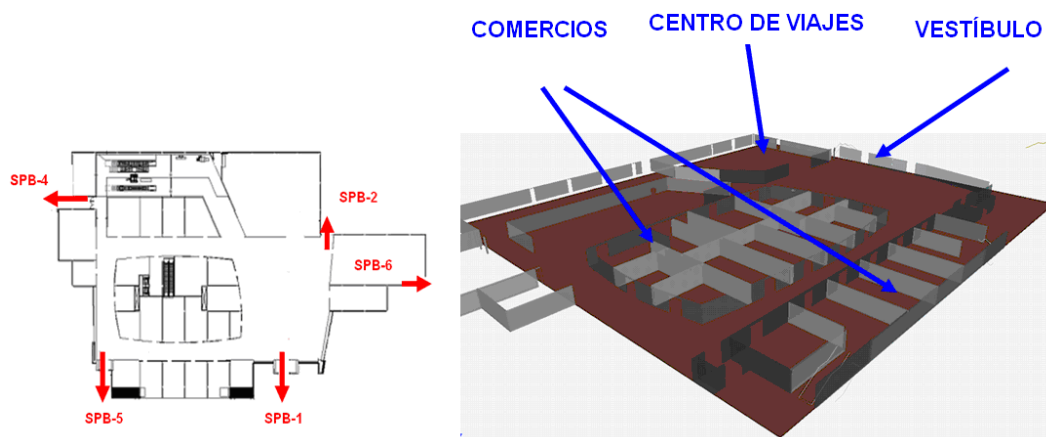


Figura 1. Planta baja de la Estación

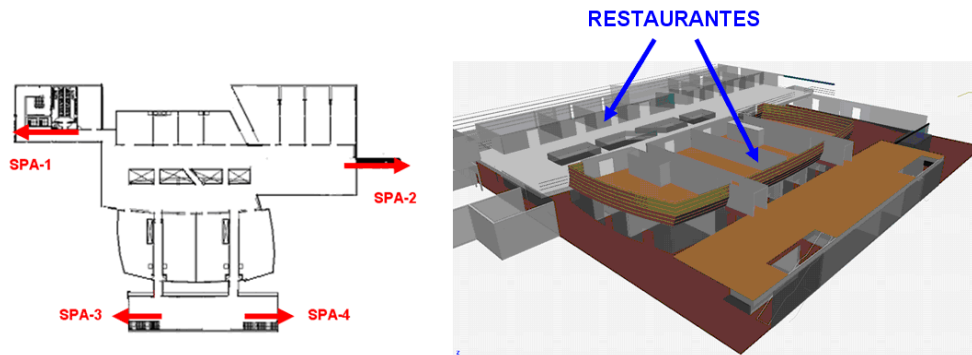


Figura 2. Planta alta

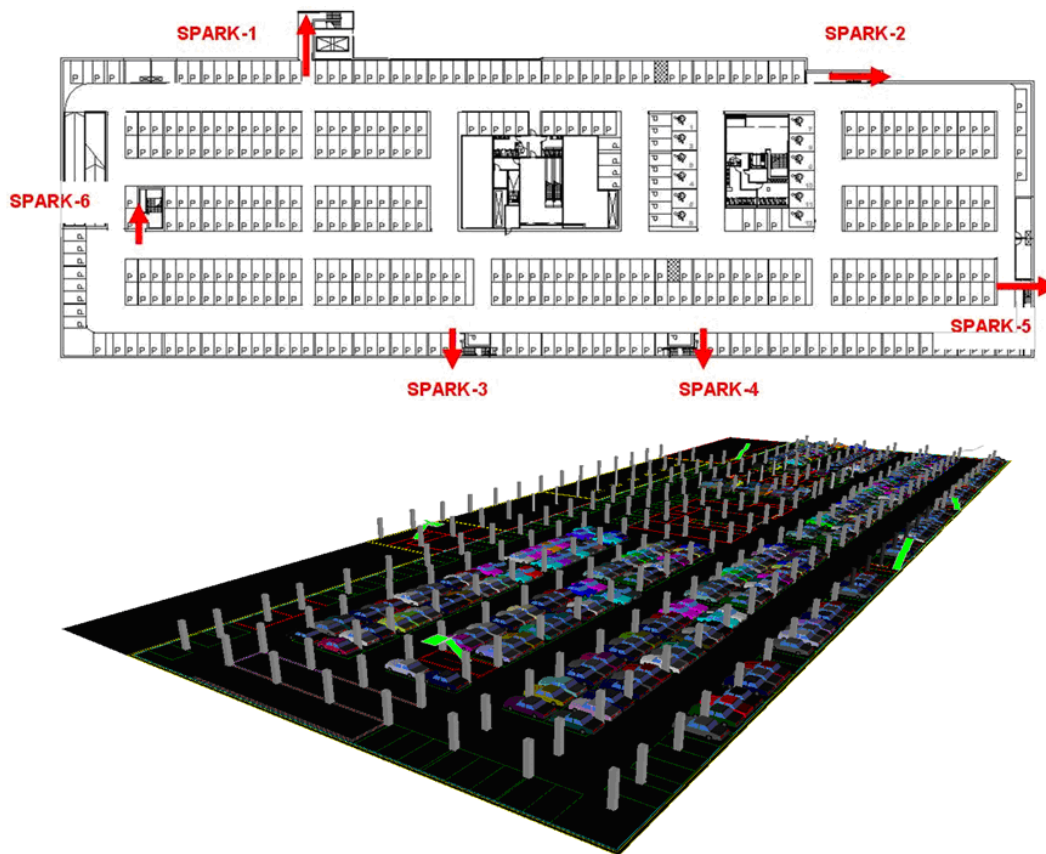


Figura 3. Parking subterráneo de la Estación

La Planta Alta (cota +5.8 m) tiene otras cuatro salidas de emergencia (SPA-1, SPA-2, SPA-3 y SPA-4) que, a través de escaleras, conducen directamente al exterior de la Estación. Como se observa en la Figura 2, la salida SPA-2 permite a los ocupantes un acceso directo al exterior a través de la escalera mientras que el resto de las salidas de la Planta Alta de la Estación tienen corredores previos para el acceso a las escaleras.

En el Parking (cota -3.8 m) hay seis salidas de emergencia disponibles (SPARK-1, SPARK-2, SPARK-3, SPARK-4, SPARK-5 y SPARK-6), que a través de escaleras, comunican directamente al exterior del edificio como se muestra en la Figura 3.

En la Tabla I, se muestran las características de las salidas del edificio.

| Nivel       | Salida  | Número de Vías    | Ancho (m) |
|-------------|---------|-------------------|-----------|
| Planta Alta | SPA-1   | 1                 | 1.5       |
|             | SPA-2   | 2                 | 2.5       |
|             | SPA-3   | 1                 | 2.5       |
|             | SPA-4   | 1                 | 2.5       |
| Planta Baja | SPB-1   | 1                 | 2.4       |
|             | SPB-2   | 2                 | 3.3       |
|             | SPB-4   | 2                 | 3.0       |
|             | SPB-5   | 1                 | 2.4       |
|             | SPB-6   | 1                 | 1.0       |
|             | Parking | Todas las salidas | 1         |

Tabla I. Dimensiones de las salidas de la Estación

Para realizar las simulaciones se consideró una hipótesis conservadora con una ocupación del 100% en función de los distintos usos de todos los recintos y áreas de la Estación. En la Planta Baja (5.589 m<sup>2</sup>) se consideraron 1.945 ocupantes, en la Planta Alta (1.987 m<sup>2</sup>) 1136 y en el Parking (5.250 m<sup>2</sup>) 350 personas. Los ocupantes fueron distribuidos de forma aleatoria por el Modelo en las diferentes áreas del edificio susceptibles de ocupación.

## EL MODELO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL STEPS

Para la realización del Estudio sobre las condiciones de evacuación de los usuarios de una Estación ferroviaria se empleó el Modelo de Simulación Computacional STEPS (Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian movementS) desarrollado por la compañía Mott McDonald (UK)<sup>15</sup>.

STEPS tiene como propósito simular a los ocupantes en una situación normal o de emergencia dentro de diferentes tipos de edificios<sup>16-19</sup>. Se trata de un Modelo con una estructura de red fina en que la geometría del espacio modelado queda dividida en celdas cuadradas con las dimensiones de 0.4 a 0.5 m en cada lado.

Durante la simulación, el Modelo calcula la puntuación de cada celda en relación a las salidas. Los ocupantes se desplazarán a la celda con menor puntuación siempre y cuando no se encuentre ocupada. La puntuación del Modelo se basa en un algoritmo que incorpora el tiempo para llegar al objetivo, el tiempo de cola necesario y la paciencia de los ocupantes del edificio. Se trata de un Modelo que permite reproducir determinados aspectos de la conducta humana: distribución de los tiempos de respuesta y premovimiento, características de los ocupantes, factor de paciencia, conductas colectivas y conocimiento de salidas.

## ESCENARIOS DE EVACUACIÓN

Inicialmente, y con el propósito de contar con un marco de referencia estandarizada, se realizó una simulación con los valores aplicados por defecto del Modelo. Seguidamente se realizaron varias simulaciones en las que se analizaron, de forma independiente, los diferentes factores influyentes en el proceso de la evacuación.

Finalmente se integraron todos los factores en un solo escenario a fin de conocer su interacción e influencia en el proceso de la evacuación simulado.

### Escenario 1

En este primer escenario no se consideraron aspectos de la conducta humana y la simulación se centró en el análisis del movimiento optimizado de los ocupantes desde un punto de origen en el edificio hacia las salidas.

Se consideraron las mismas características físicas y conductuales para todos los ocupantes y se reprodujo una evacuación de la manera más eficiente posible. Para realizar esta simulación, se asumió que todos los ocupantes evacuaron por la salida más cercana y que respondieron de forma inmediata en el mismo instante de activación de la alarma.

### Escenario 2

En determinadas circunstancias, alguna de las salidas de un edificio puede encontrarse bloqueadas por diferentes motivos como la existencia de un incendio próximo a la salida, un fallo en el sistema de apertura, etc.

El Escenario 2 consistió en la realización de diversas simulaciones considerando el evento del bloqueo consecutivo de cada una de las salidas de la Estación. Debido a las características de la estación objeto de Estudio, el bloqueo de una salida sólo tuvo implicaciones en la planta en que se produce el evento, ya que cuenta con salidas independientes en cada uno de los niveles.

### Escenario 3

En este escenario de evacuación se asignaron diferentes tiempos de respuesta a los ocupantes de forma individualizada. Para introducir la conducta de respuesta de forma individualizada a cada ocupante, se asignaron diferentes valores en el inicio de la evacuación de los ocupantes en base a la estimación del tipo de alarma disponible y del nivel de entrenamiento del personal<sup>20</sup>.

Además se consideraron otros tres aspectos para implementar los valores de premovimiento: (1) el acceso visual de cada ocupante respecto a las áreas comunes, (2) las actividades realizadas por las personas en función de su localización en el edificio y (3) el grado de entrenamiento del personal. En la Tabla II aparecen las estimaciones de premovimiento introducidas para el Escenario 3.

| Zonas y locales considerados  | Tiempos de premovimiento asignados (segundos) |                                     |
|---|---|-------------------------------------|
|   | Escenario 3.1 Personal entrenado              | Escenario 3.2 Personal no entrenado |
| Todos los locales comerciales en planta baja (locales independientes)         | 240±60  | 300±60                              |
| Todos los locales de restauración en planta alta y el parking.                | 300±60  | 360±60                              |
| Vestíbulos y áreas comunes de la Estación (espacios diáfanos con visibilidad) | 180±60  | 240±60                              |

**Tabla II.** Estimaciones de los tiempos de premovimiento en la Estación: Escenario 3

### Escenario 4

En el Escenario 4 se consideró que no todos los ocupantes evacuaron por la salida más próxima. Para determinar qué salidas eran las más utilizadas, se consideró la hipótesis de que aquellas salidas que eran de acceso habitual de los ocupantes eran susceptibles de conocimiento para la mayoría de ellos.

El modelo STEPS permite reproducir este parámetro de la conducta humana a través del coeficiente de familiaridad. El coeficiente de familiaridad oscila entre los valores 0 (desconocimiento de la salida) y 1 (conocimiento total de la salida).

Para implementar la conducta en el proceso de decisión de las rutas de evacuación se aplicó un coeficiente 1 para las salidas utilizadas habitualmente por parte de los ocupantes y 0.5 para el resto de salidas de emergencia de la Estación.

En la Planta Baja las salidas con coeficiente 1 fueron la salida SPB-1 y SPB-5 que son las entradas principales del edificio más susceptibles de ser utilizadas por los ocupantes de la Estación, en caso de producirse una situación de emergencia. Asimismo en la Planta Alta se asignó coeficiente 1 para la salida SPA-2 a pesar de tratarse de una salida susceptible de ser utilizada sólo en caso de emergencia por los siguientes motivos:

- Se trata de la salida más cercana a las escaleras mecánicas de comunicación entre plantas utilizadas habitualmente por los ocupantes.
- Es la salida de emergencia con mejor acceso visual para los ocupantes.

Para el caso del Parking se asignó un coeficiente 1 para todas las salidas de emergencia debido a su homogeneidad y a la falta de criterio para asignar mayor peso en la decisión de los ocupantes de una salida sobre otra.

## Escenario 5

La última variable analizada en el Escenario 5 consistió en la implementación de distintas tipologías de ocupantes en base a datos demográficos y sus diferentes magnitudes de locomoción<sup>21,22</sup> (ver Tabla III).

| Tipo de ocupantes | Velocidad de desplazamiento (m/s) |                |            | Porcentaje |
|-------------------|-----------------------------------|----------------|------------|------------|
|                   | horizontal                        | descendente    | ascendente |            |
| Chica             | 1.15±0.20                         | 0.70±0.20      | 0.70±0.20  | 12 %       |
| Chico             | 1.35±0.20                         | 0.70±0.20      | 0.70±0.20  | 12 %       |
| Mujer             | 1.15±0.20                         | 0.70±0.20      | 0.70±0.20  | 30 %       |
| Hombre            | 1.25±0.30                         | 0.70±0.20      | 0.70±0.20  | 30 %       |
| Anciano/a         | 0.80±0.30                         | 0.32±0.12      | 0.35±0.11  | 10 %       |
| Niño              | 0.90±0.30                         | 0.32±0.12      | 0.35±0.11  | Por grupos |
| Discapacitados    | 0.69±0.30                         | No considerado |            | 6 %        |

**Tabla III.** Velocidad de desplazamiento y porcentaje de ocupantes en el Escenario 5

La Estación objeto de estudio, es un edificio complejo que alberga diferentes usos: comercial, restauración, pública concurrencia, etc., donde un porcentaje de los ocupantes pueden acudir acompañados sobre todo en periodos festivos o durante los fines de semana. Esto significa que las acciones realizadas por los miembros del mismo grupo no son independientes y que las personas que acuden a un edificio juntas tienden a evacuar de forma conjunta<sup>23</sup>. Adicionalmente se predefinieron diferentes grupos de ocupantes cuya conducta se definió por un movimiento de agrupación en los primeros instantes de la emergencia y el movimiento colectivo hacia las salidas. Se asumió que un 50 % de los ocupantes no estaban acompañados y que salieron del edificio de forma independiente. Los distintos grupos introducidos en el Modelo y su distribución por las diferentes áreas y zonas de la Estación aparecen descritos en la Tabla IV.

| Grupo      | Nº de componentes | Localización                                 | Porcentaje de la ocupación total |
|------------|-------------------|--|----------------------------------|
| Grupo 1    | 2 ocupantes       | Toda la Estación                             | 30 %                             |
| Grupo 2    | Un adulto+niño    | Áreas comunes vestíbulos y zonas comerciales | 10 %                             |
| Grupo 3    | >3 ocupantes      | Zonas de restauración y parking              | 10 %                             |
| Individuos |                   | Toda la Estación                             | 50 %                             |

**Tabla IV.** Porcentaje y tipos de grupos considerados en el Escenario 5

## Escenario 6

Para reproducir el Escenario 6 se introdujeron en el Modelo todas las variables implementadas en los escenarios anteriores: bloqueo de salidas, distintos tiempos de respuesta en los ocupantes, grado de conocimiento de determinadas rutas de evacuación, distintas tipologías y actitudes colectivas de los ocupantes a fin de determinar la interacción de estas variables en un mismo escenario de evacuación considerado.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos para el Escenario 1 fueron los que dieron un menor tiempo de evacuación, ya que suponían unas condiciones favorables frente a otras hipotéticas situaciones potencialmente adversas o la asunción de diferentes consideraciones respecto a los datos de entrada para definir las características de los ocupantes. Los resultados para el Escenario 1 considerado como caso teórico (pero en absoluto real), indicaron que los 3.431 ocupantes de la Estación emplearon un tiempo de 3 min y 33 s en desplazarse hacia un lugar seguro en el exterior del edificio. Sin embargo la introducción de parámetros relacionados con la hipótesis de determinados eventos como el bloqueo de salidas y con la conducta humana en el proceso de evacuación incrementaron sustancialmente los tiempos de evacuación obtenidos.

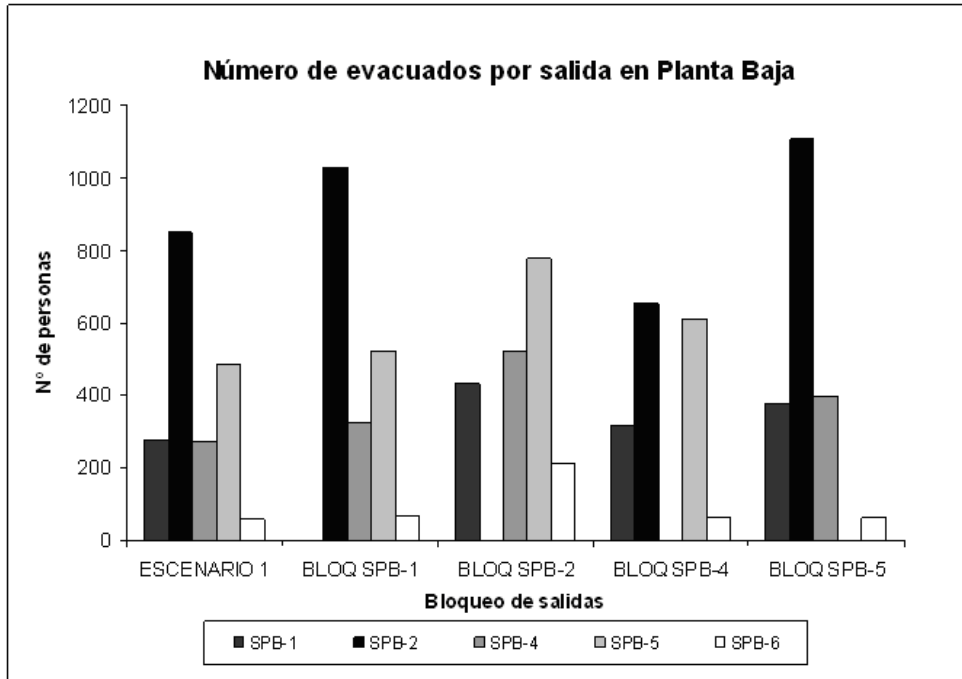
Como se observa en la Tabla V, los tiempos de evacuación obtenidos se incrementaron con la introducción de las diferentes variables relacionadas con la conducta de los ocupantes en el proceso de la evacuación y la hipótesis del bloqueo de determinadas rutas de evacuación.

| Escenario          | Parámetro introducido        | Tiempos de evacuación (min:seg) | Incremento de los tiempos de evacuación |
|--------------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| <b>Escenario 1</b> | Caso teórico                 | 3:33                            | -                                       |
| <b>Escenario 2</b> | Bloqueo de salidas           | 3:35-5:06                       | 30.4 %                                  |
| <b>Escenario 3</b> | Premovimiento                | 7:12-8:05                       | 52.8-56.9 %                             |
| <b>Escenario 4</b> | Coefficiente de familiaridad | 4:58                            | 28.6 %                                  |
| <b>Escenario 5</b> | Tipologías de ocupantes      | 5:49                            | 38.9 %                                  |

**Tabla V.** Tiempos de evacuación obtenidos

Los resultados obtenidos para el Escenario 2 mostraron datos cuantitativos sobre el comportamiento del diseño del edificio bajo la hipótesis del bloqueo de una de sus salidas. Los resultados mostraron que el bloqueo de las salidas de la Planta Baja, no se tradujo en un aumento significativo de los tiempos de evacuación, indicando que las salidas disponi-





**Figura 4.** Número de evacuados por salida en Planta Baja: Escenario 2

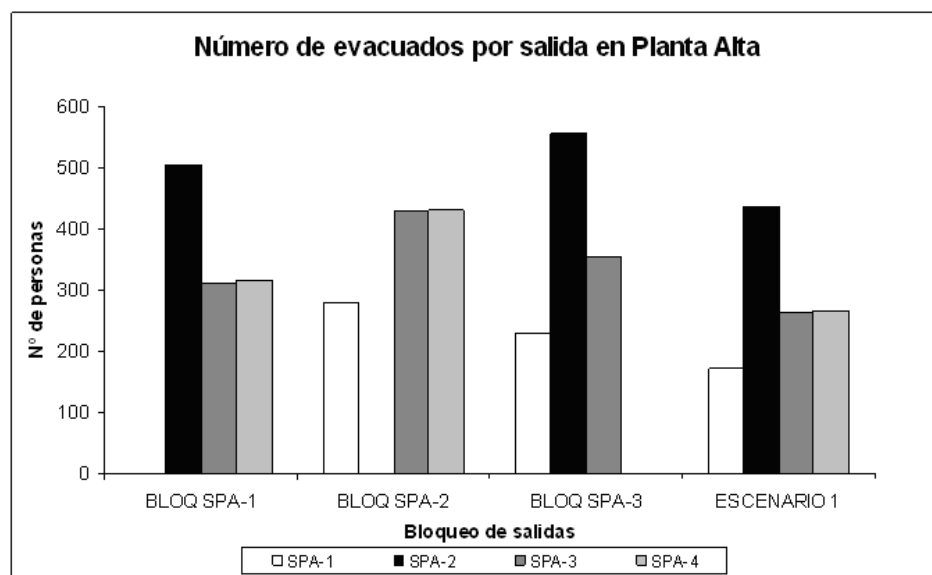
bles tuvieron capacidad suficiente y respondieron adecuadamente al aumento del flujo de ocupantes.

Como se observa en la gráfica de la Figura 4, en el caso del Bloqueo de la salida SPB-5 se produjo un aumento significativo del número de personas en evacuar por la salida SPB-2 en detrimento de la salida SPB-1 que es la entrada principal del edificio. Este comportamiento fue el resultado del criterio de mínimas distancias aplicado por el Modelo y de la implementación de un coeficiente de familiaridad total (conocimiento de todos los ocupantes de la ubicación de las salidas) para todas las salidas del Edificio. De todas formas, esta salida de emergencia (SPB-2) tuvo suficiente capacidad como para resistir el alto incremento de personas solicitantes y esto no repercutió en los tiempos de evacuación del edificio.

Del mismo modo, los resultados obtenidos en el bloqueo de las salidas del Parking no se tradujeron en un aumento de los tiempos de evacuación para este nivel. Sin embargo, el bloqueo de las salidas en la Planta Alta de la Estación se tradujo en un incremento del tiempo para abandonar el edificio.

El caso más significativo se produjo en el bloqueo de la salida SPA-2 donde los tiempos de evacuación se incrementaron un 30.4%. Las condiciones del diseño de la estación fueron el factor determinante en estos resultados.

Para acceder a las escaleras de las salidas SPA-1, SPA-3 y SPA-4, los ocupantes tuvieron que transitar por corredores que limitaron el flujo de personas y supusieron un aumento de la distancia de recorrido de evacuación para acceder a las escaleras de emergencia. Por otro lado, la salida SPA-2 comunica directamente el vestíbulo de la Planta Alta con la escalera de emergencia que conduce directamente al exterior. En este caso, los ocupantes tuvieron



**Figura 5.** Número de evacuados por salida en Planta Alta: Escenario 2

un acceso más directo a este medio de evacuación. Como se muestra en la Figura 5 la mayoría de los ocupantes se dirigieron a la salida de emergencia SPA-2. En el caso del bloqueo de esta salida, la mayor parte de los ocupantes eligió las salidas SPA-3 y SPA-4 produciéndose, consecuentemente, un aumento en los tiempos de evacuación y situaciones de cuellos de botella en los corredores de acceso a estas escaleras de emergencia.

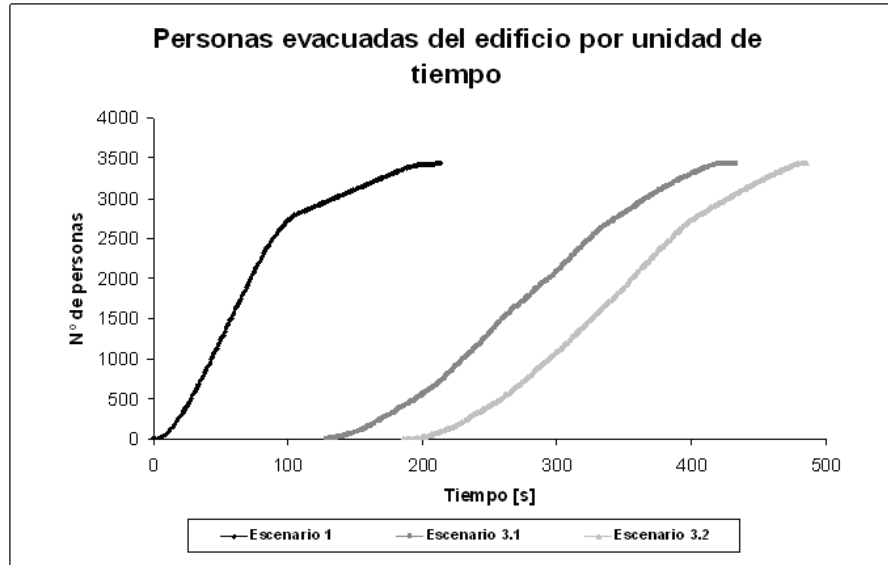
Pero, sin duda y obviamente, el parámetro que mayor repercusión tuvo en los tiempos de evacuación fue el tiempo empleado por los ocupantes una vez oída la alarma para iniciar los movimientos hacia el exterior del edificio.

En los casos anteriores se asignó un tiempo de respuesta 0 asumiendo una respuesta inmediata de todos los ocupantes una vez activada la alarma. Esto produjo una situación de congestión de personas en demanda de las salidas. La distribución de los tiempos de premovimiento a cada ocupante permitió no sólo obtener un dato cuantitativo sobre la influencia de este parámetro, sino que permitió la reproducción de una situación más realista del proceso simulado debido a que los ocupantes respondieron a la señal de alarma en diferentes momentos y de forma individualizada.

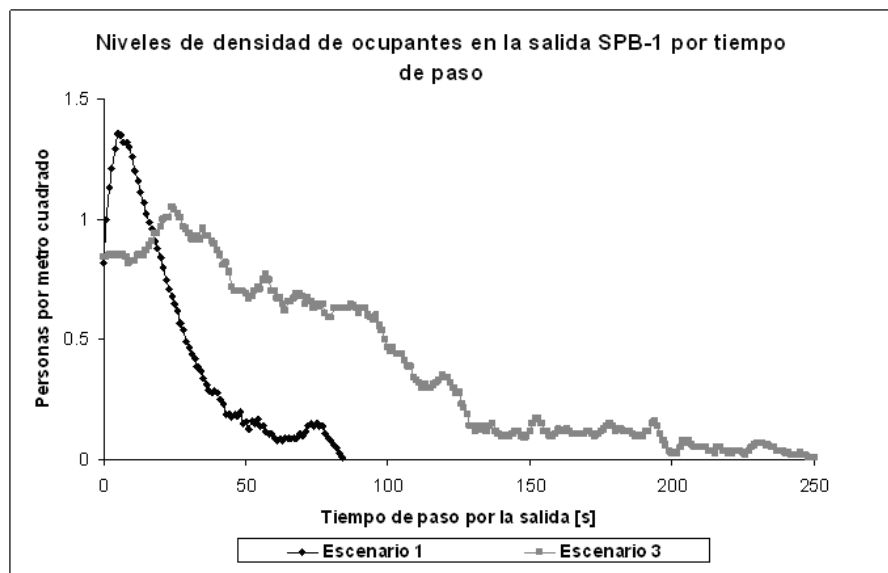
Con la introducción del parámetro de premovimiento el desarrollo del proceso de la evacuación de la Estación sufrió modificaciones sustanciales respecto a la evacuación teórica planteada en el Escenario 1.

En la Figura 6 aparece la comparativa del número de personas evacuadas de la Estación entre el Escenario 1 y los Escenarios 3.1 y 3.2. Las pendientes de las curvas correspondientes a la evacuación con premovimiento son más regulares y continuas, debido a la distribución de los tiempos de premovimiento, frente a la respuesta inmediata de todos los ocupantes implementada en el Escenario 1, en que la pendiente pronunciada indica un proceso de evacuación más rápido y en permanente situación de congestión en las salidas. En el Escenario 1, a partir del segundo 105, la evacuación de la Planta Baja finaliza y la curva se suaviza indicando un ritmo más lento de evacuación correspondiente a los ocupantes de la Planta Alta.

La distribución de los tiempos de premovimiento no sólo afectó los tiempos de evacuación, sino que produjo una situación de tránsito fluido por las salidas de la Estación frente a la situación de congestión permanente provocada por la respuesta inmediata de todos los ocupantes que se agolparon al mismo tiempo delante de las salidas para evacuar el edificio.

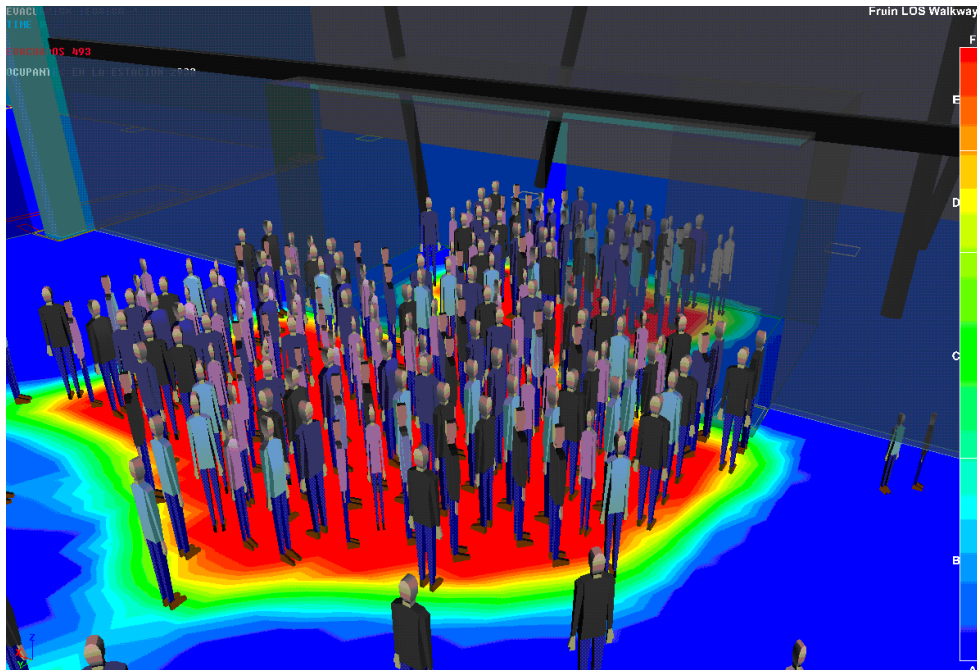


**Figura 6.** Comparativa de la evacuación entre el Escenario 1 y los casos de pre-movimiento



**Figura 7.** Niveles de densidad de ocupantes en la salida SPB-1 para el Escenario 1 y 3

En la Figura 7 se muestra la densidad de ocupantes en las inmediaciones de la salida SPB-1 en una superficie de  $10 \times 10$  m por tiempo de paso. Como se observa en las curvas de la gráfica, los niveles de densidad en el Escenario 1 alcanzan el máximo valor en los primeros instantes de la evacuación, produciéndose una acumulación de personas demandantes de esta salida, para luego ir descendiendo bruscamente a medida que las personas accedían al exterior del edificio. En la curva correspondiente al Escenario 3 también se produce un aumento de los niveles de densidad en los primeros instantes pero éstos son menores registrándose unos valores de  $1$  persona/m<sup>2</sup>.



**Figura 8.** Congestión en la salida SPB-1: Escenario 1

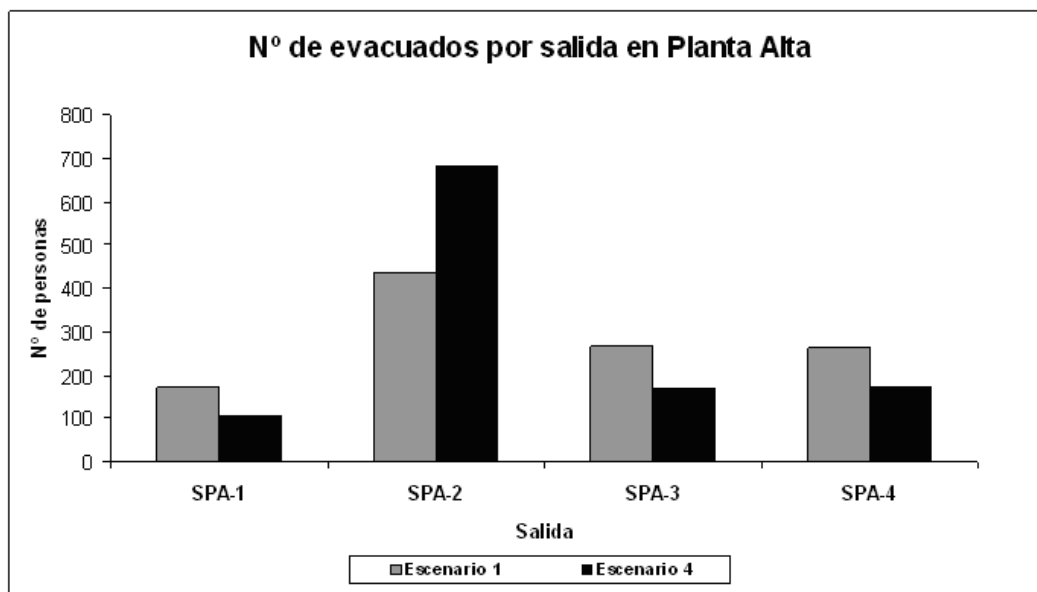
Las oscilaciones de la curva correspondiente al Escenario 3 indican aportes continuados de personas pero con niveles de densidad más bajos. Esto indicó un flujo continuo de personas libre de congestiones. La situación de rápida acumulación de personas en demanda de la salida respondió a la implementación del mismo tiempo de respuesta para todos los ocupantes de la Estación produciéndose cuellos de botella en las inmediaciones de las salidas como se muestra en la Figura 8.

Esta situación puede darse en la realidad, pero bajo situaciones en que todos los ocupantes perciban la amenaza de manera muy directa. El comportamiento más realista en la situación planteada viene producido por la consideración de diferentes tiempos de respuesta permitiendo un flujo continuo por las salidas libre de cuellos de botella. Por otro lado, el número de ocupantes que eligieron esta salida aumentó considerablemente en el Escenario 3 donde no se consideraron retrasos en el inicio de la evacuación.

En el Escenario 1, evacuaron 265 personas por esta salida (SPB-1) mientras que para el Escenario 3.1 fueron 553 y en el Escenario 3.2 evacuaron 697 personas por esta salida. Esto fue debido a que en el Escenario 3.1 y 3.2, los ocupantes no se encontraron con personas en espera de cola para acceder a la salida y, consecuentemente, eligieron salir del edificio por esa ruta mientras que en el Escenario 1, al haber un gran número de personas en espera de cola para salir del edificio por esta salida, muchos ocupantes optaron por escoger una ruta de evacuación alternativa.

A la luz de los resultados obtenidos, la implementación del coeficiente de familiaridad con determinadas salidas para reproducir la conducta de los ocupantes en una situación de emergencia repercutió en los tiempos totales de evacuación.

Los resultados en los tiempos de evacuación para el Escenario 4 se vieron afectados por el uso de determinadas salidas en detrimento de otras. En este caso, en la Planta Baja el diseño del edificio resultó satisfactorio y las salidas elegidas preferentemente por los ocupantes soportaron el aumento de personas solicitantes. Pero al igual que en el Escenario 2 (bloqueo de salidas), la asignación del coeficiente de familiaridad con la salida SPA-2 en



**Figura 9.** Número de evacuados por salida en Planta Alta: Escenarios 1 y 4

la Planta Alta supuso un incremento de los tiempos de evacuación, debido a la acumulación de personas para abandonar el edificio por esta salida, como se muestra en la Figura 9. Los datos sobre el número de personas evacuadas por salida determinaron la influencia que puede tener el proceso de decisión de las rutas de evacuación elegidas por los ocupantes para abandonar el edificio y su impacto en los tiempos totales de evacuación.

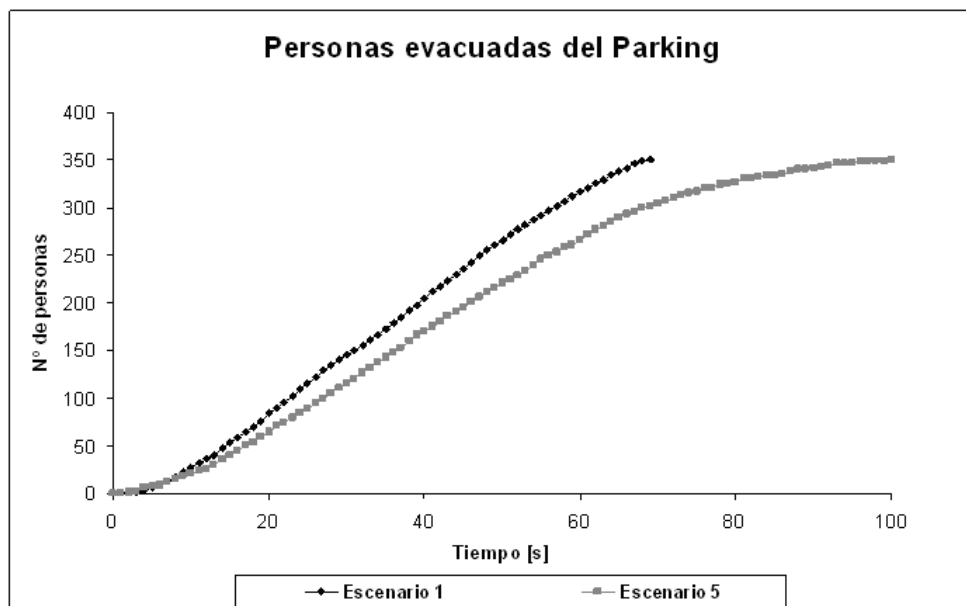
En el Escenario 1 en que se asignó el criterio de mínimas distancias aplicado por defecto por el Modelo, escogieron la salida SPA-2 un total de 438 ocupantes mientras que en el Escenario 4 en que se consideró que la mayoría de los ocupantes conocían esta salida, fueron 682.

La consideración de la variable demográfica, en que se introdujeron diferentes tipos de ocupantes con diferentes aptitudes físicas (Escenario 5), repercutió de forma significativa en el movimiento de las personas a través de las distintas partes del edificio.

El flujo de ocupantes por las diferentes vías de evacuación del edificio, en este caso en que se asignaron diferentes magnitudes de locomoción modificó, sustancialmente los datos obtenidos en el Escenario 1 en que todos los ocupantes se desplazaron de forma homogénea.

Esta diferencia se puede apreciar claramente en el proceso de evacuación del Parking en que los ocupantes tuvieron que superar una altura de evacuación ascendente de 3.8 m. Los tiempos de evacuación del Parking obtenidos en el Escenario 1 fueron inferiores a los tiempos obtenidos en la consideración de distintas tipologías de ocupantes. Los resultados indicaron que en el Escenario 1 los ocupantes evacuaron el Parking en 69 s mientras que los resultados del Escenario 5 aportaron un tiempo superior de 100 s.

La introducción de diferentes velocidades de desplazamiento, tanto horizontal como vertical, reprodujo un comportamiento competitivo en el desarrollo de la evacuación en que las personas con mayores velocidades de desplazamiento evacuaron primero mientras que las personas con menor velocidad quedaron rezagados y fueron los últimos en salir del Parking, como se muestra en la suavización de la curva de la gráfica correspondiente al Escenario 5 (ver Figura 10).



**Figura 10.** Evacuación del Parking: Escenarios 1 y 5

Este tipo de comportamientos puede producirse en situaciones extremas. Pero la conducta de las personas durante la evacuación tiende a ser cooperativa y la mayoría de las personas no evacua de forma aislada. Introducir en el Modelo actitudes colectivas supuso una reconsideración de este fenómeno, reproduciendo la interacción social de los ocupantes y conductas altruistas por parte de aquellos ocupantes con mayores velocidades de locomoción que, al formar parte de un grupo con individuos más lentos, ajustaron su velocidad de desplazamiento a fin de salir del edificio de forma conjunta. Pero el impacto de este movimiento colectivo de los ocupantes hacia las salidas no se tradujo en un aumento de los tiempos de evacuación del edificio. Una de las razones fue que, buscando una hipótesis realista, no se introdujo la variable de conducta colectiva a todos los ocupantes de la Estación considerando un porcentaje del 50% de personas que evacuaron de forma independiente.

Para el desarrollo del Escenario 6 se implementaron en el Modelo las diferentes variables de conducta de los ocupantes aplicadas en los escenarios anteriores en un único escenario, a fin de analizar su interacción en el proceso de evacuación simulado. Para realizar las simulaciones se planteó una hipótesis desfavorable introduciendo el bloqueo de la salida SPB-4 en la Planta Baja de la Estación.

Dentro del Escenario 6 se realizaron dos simulaciones, en las que se introdujeron dos tiempos de respuesta de los ocupantes, considerando la existencia de personal entrenado o no entrenado, tal y como se realizó en el Escenario 3. Los datos obtenidos indicaron un aumento significativo de los tiempos de evacuación respecto al resto de los escenarios anteriormente analizados.

Como se muestra en la Tabla VI, el tiempo en que la última persona sale de cada nivel de la estación se triplicó en el Escenario 6 respecto al tiempo estándar obtenido en el Escenario 1. Resulta significativo el caso de la evacuación del Parking donde 350 personas, con todas las salidas disponibles emplearon entre 8 min y 52 s y 9 min y 57 s en abandonar el edificio. La introducción de características físicas (velocidad de desplazamiento) y conductuales (distribución de los tiempos de respuesta) a cada ocupante de forma individualizada repercutieron en el cálculo de los tiempos de evacuación.

| Tiempos empleados en evacuar por niveles (min:seg) |             |             |         |       |
|--|-------------|-------------|---------|-------|
|  | Planta Alta | Planta Baja | Parking | Total |
| Escenario 6.1                                      | 9:32        | 6:51        | 8:52    | 9:32  |
| Escenario 6.2                                      | 10:41       | 8:04        | 9:57    | 10:41 |

Tabla VI. Tiempos de evacuación obtenidos para el Escenario 6

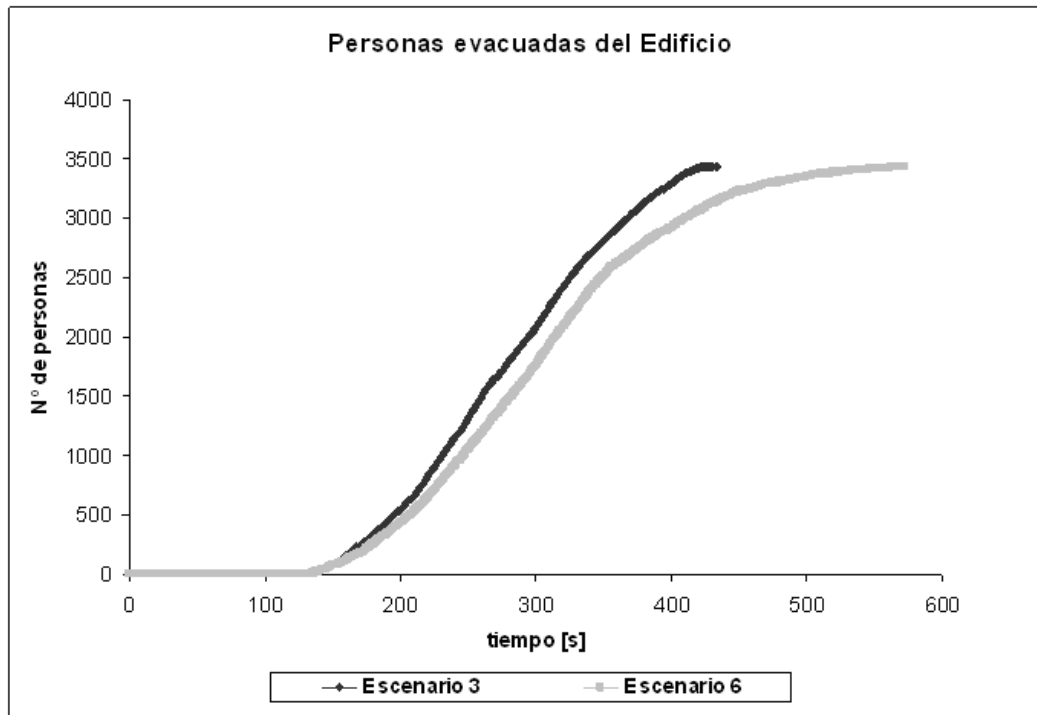


Figura 11. Comparativa de la evacuación entre el Escenario 3 y 6

Los tiempos de evacuación obtenidos en el Escenario 6 aumentaron extraordinariamente respecto a la simulación del Escenario 1. En este caso concreto, se tuvieron en cuenta las estimaciones sobre el retraso en el inicio de la evacuación, por lo tanto el tiempo de evacuación es la suma del tiempo de premovimiento y el tiempo de movimiento de los ocupantes hacia el exterior.

Gran parte del aumento de los tiempos de evacuación respecto a los escenarios anteriores, fue debido a la introducción en el Modelo del parámetro de premovimiento establecido por criterio del propio usuario.

Para analizar cuál es el impacto real de los parámetros considerados cuando se encuentran interactuando de forma conjunta en el mismo escenario se realizó una comparativa sobre el proceso de la evacuación entre el Escenario 3 y el Escenario 6. Los resultados descritos en la Figura 11 indicaron que el resto de los parámetros relacionados con la conducta de los ocupantes: conocimiento de salidas, conductas sociales y diferentes tipologías de personas también contribuyeron de forma significativa al incremento de los tiempos de evacuación obtenidos.

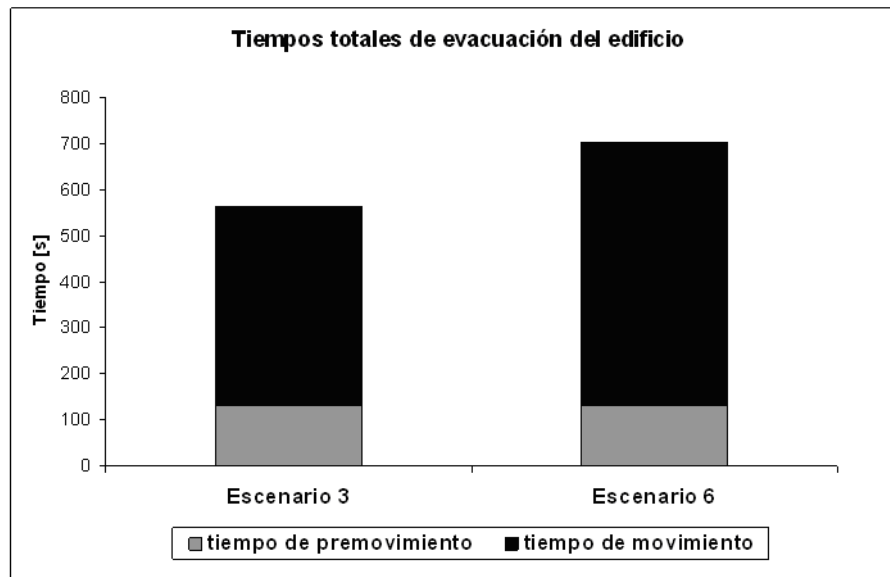


Figura 12. Tiempo total de evacuación: Escenarios 3 y 6

En la Figura 12 se muestra la comparativa de los tiempos totales de evacuación obtenidos de dos escenarios bien distintos. En ambos escenarios se ha introducido el mismo tiempo de premovimiento a los ocupantes. Pero en el Escenario 3 no se introdujeron variables de conducta y los ocupantes fueron considerados como una masa homogénea. Sin embargo, en el Escenario 6 se consideraron las características físicas y psicológicas de cada ocupante de la Estación.

| Tiempos de movimiento de evacuación (s) |             |             |         |       |
|---|-------------|-------------|---------|-------|
|   | Planta Alta | Planta Baja | Parking | Total |
| Escenario 1                             | 213         | 105         | 68      | 213   |
| Escenario 4                             | 298         | 130         | 68      | 298   |
| Escenario 5                             | 347         | 139         | 258     | 347   |
| Escenario 6                             | 563         | 401         | 531     | 572   |

Tabla VII. Tiempos de movimiento de evacuación

El tiempo de evacuación obtenido en el Escenario 3, fue de 7 min y 12 s mientras que el tiempo obtenido para el Escenario 6, fue de 9 min y 32 s. Los resultados mostraron la influencia que puede llegar a tener la conducta humana en el cálculo de la evacuación de un edificio.

Para conocer el grado de influencia de las variables de conducta introducidas en el Modelo en los tiempos totales de evacuación, se procedió a analizar el tiempo de movimiento obtenido por el Modelo en los diferentes escenarios planteados. El tiempo de movimiento es el tiempo empleado por los ocupantes en su desplazamiento hacia las salidas una vez que han tomado la decisión de salir del edificio.

Como se observa en la Tabla VII, las diferentes consideraciones en la caracterización de la conducta de los ocupantes, significan un aumento en los tiempos de evacuación de los diferentes niveles de la Estación. En el Escenario 6 en que aparecen todas las variables de la conducta humana simuladas de forma conjunta, los tiempos de evacuación fueron superiores al resto de escenarios. La interacción de los parámetros sobre el movimiento y conducta humana durante la emergencia, salvo el tiempo de premovimiento introducido por el propio usuario, también repercutieron en el aumento de los tiempos de evacuación.



## CONCLUSIONES

El objeto del Estudio se centró en el análisis del movimiento y conducta humana durante la evacuación de los espacios comunes y recintos de una Estación Ferroviaria de Pasajeros caracterizada como una edificación compleja por contener áreas con diferentes usos y elevados niveles de ocupación. El objetivo fue analizar mediante Modelo de Simulación Computacional de Evacuación, la influencia de diferentes factores que influyen en el proceso de la evacuación.

La consideración del bloqueo de determinadas rutas de evacuación sirvió para analizar el comportamiento del diseño del edificio frente a esta hipótesis desfavorable. Los resultados indicaron que las salidas en la Planta Baja pudieron soportar el incremento del número de personas demandantes sin que se ocasionara un aumento significativo en los tiempos de evacuación. Sin embargo, en la Planta Alta, las condiciones del diseño del edificio condicionaron el proceso de la evacuación bajo la hipótesis del bloqueo de la salida SPA-2, donde se produjo un aumento del tiempo necesario para evacuar el edificio del 30.4%. Para analizar el impacto de los factores relacionados con la conducta humana, se introdujeron diferentes variables de forma independiente en cada escenario de evacuación seleccionado. Los datos obtenidos por el Modelo mostraron un impacto significativo de las variables de premovimiento, caracterización de los ocupantes y el coeficiente de familiaridad mientras que la introducción de conductas colectivas de los ocupantes durante la evacuación no tuvo el impacto esperado en los tiempos de evacuación. Esto fue debido a que, buscando una hipótesis realista, sólo se asignó este tipo de conducta al 50% de los ocupantes de la Estación mientras que el 50% restante realizó los movimientos de evacuación de forma independiente.

La influencia de las conductas sociales puede ser significativa en el proceso de decisión de los individuos durante la situación de emergencia que hace referencia a las rutas de evacuación escogidas o al momento de inicio de la evacuación (por dónde evacuar y cuándo evacuar).

Los resultados indicaron que el tiempo de evacuación obtenido en el Escenario 1 en que no se introdujo ninguna variable de conducta de los ocupantes fue de 3 min y 33 s mientras que el tiempo de evacuación obtenido en el Escenario 6 en que se consideraron diferentes aspectos de la conducta de los ocupantes y la hipótesis del bloqueo de una de las salidas de la Estación oscilaron entre los 9 min y 32 s y 10 min y 41 s. La consideración de los factores de la conducta humana en el proceso de evacuación supuso un incremento significativo del tiempo necesario para evacuar la Estación: un incremento de 28.6% con el coeficiente de familiaridad, un incremento con un rango entre un 52.8% y un 59.9% con la consideración del premovimiento y un incremento de los tiempos de evacuación del 38.9% al considerar distintas tipologías de ocupantes.

Considerar como apropiados los tiempos de evacuación obtenidos en el Escenario 1 supondría una interpretación óptima u optimizada, pero en absoluto realista del proceso de la evacuación. El Modelado de Simulación Computacional es una herramienta que permite realizar estimaciones precisas, si los datos de entrada son los apropiados. Pero sin la aplicación de una teoría sobre el comportamiento humano, los Modelos tienen limitaciones en cálculo de los tiempos de evacuación.

La falta de conocimiento sobre el comportamiento humano en situaciones de emergencia supone aplicar valores por defecto, pero no es seguro que estos valores por defecto aporten una representación adecuada del proceso simulado. Cada situación potencial de emergencia requiere una definición precisa tanto del entorno como de las personas que se encuentran involucradas a fin de desarrollar un análisis lo más realista posible del proceso de la evacuación en una situación de emergencia.

Por eso, cuando nos enfrentamos al problema de la evacuación de un edificio complejo

utilizando herramientas de Modelado y Simulación Computacional, es necesario introducir inputs "reales" y considerar la variabilidad de los mismos en los diferentes escenarios de evacuación.

## REFERENCIAS

- 1 H. Frantzych and H. Benthorn, "Fire Alarm in a Public Building: How do People Evaluate Information and Choose an Evacuation Exit?", *Fire and Materials*, Vol. **23**, N° 6, pp.311-315, (1999).
- 2 G. Proulx, "Movement of People: The Evacuation Timing", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, Third Edition, Chapter 13, pp. 3-342 - 3-366, (2002).
- 3 K. Kang, "Application of Code Approach for Emergency Evacuation in a Rail Station", *Fire Technology*, Vol. **43**, N° 4, pp.331-346, (2007).
- 4 V. Schneider, "Modelling of human response and behaviour in complex surroundings", 3rd International Symposium of Human Behaviour in placeCityFire, country-regionUK, (2004).
- 5 S. Gwynne, E.R. Galea, M. Owen and P.J. CityLawrence, "Escape as a Social Response", The Society of Fire Protection Engineers; Dowden, Hutchinson and Ross: MA, country-regionplaceU.S.A., (1997).
- 6 S. Gwynne, E.R. Galea and P.J. CityLawrence, "The introduction of the social adaptation within evacuation modelling", *Fire and Materials*, Vol. **30**, N° 4, pp. 285-309, (2006).
- 7 G. Proulx, "Evacuation time and movement in apartment buildings", *Fire Safety Journal*, Vol. 24, N° 3, pp. 229-246, (1995).
- 8 C. McPahil, "Stereotypes of crowds and collective behaviour: looking forward", ASA Section on Collective Behaviour and Social Movement ´ Session, placeCityMiami, (1993).
- 9 J.L. placeCityBryan, "Section 3, Chapter Behavioral Response to Fire and Smoke", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edition, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, (2002).
- 10 J. Capote, D. Alvear, O. Abreu, A. Cuesta, "Análisis de los parámetros de entrada en el Modelado de Simulación Computacional de Evacuación", *Montajes e Instalaciones*, N° 424, pp. 96-97, Febrero (2008).
- 11 J. Capote, D. Alvear, O. Abreu, A. Cuesta, "Ventajas y Limitaciones del MSCE", *Cuadernos de Seguridad*, N° 221, pp. 64-70, Marzo (2008).
- 12 R.F. Fahy, "Avaliable Data Input Into Models", *Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies Proceeding*, pp. 62-67, (2005).
- 13 E.D. Kuligowsky, R.D. Peacock, "A Review of Building Evacuation Models", NIST National Institute of Standards and Technology, Technical Note 1471, (2005).
- 14 J. Capote, "Estudio de las Condiciones de evacuación en caso de Emergencia en una Estación de Transporte Masivo de Pasajeros con el Empleo del Modelado y Simulación Computacional", Servicio de Publicaciones de la Universidadla Universidad de Cantabria. ISBN: 84-8102-982-3, (2006).
- 15 Mott MacDonald, "STEPS Simulation of Transient and Pedestrian movements User Manual", unpublished, available with egress model from Mott MacDonald.
- 16 J.M. Wall & N.P. Waterson, "Predicting Evacuation Times-A comparison of the STEPS Simulation Approach With NFPA metricconverterProductID130,"130," Mott MacDonald Limited, St Anne House, addressStreetWellesley Road, Croydon CR 2UL, Fire Command Studies.

- 17 N.A. Hoffman, D.A. Henson & C.W. Pope, "Analysis of Evacuation of Crush Loaded Train in a Tunnel," 3rd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, (1998).
- 18 N.A. Hoffman & D.A. Henson, "Simulating Transient Evacuations in Stations," APTA Rapid Transit Conference, Washington StateDC, (1997).
- 19 B. Meacham *et al.*, "Investigation of Uncertainty in Egress Models and Data", 3rd International Symposium of Human Behaviour in CityplaceFire, UK, (2004).
- 20 British Standards Institute, *Fire Safety Engineering in Buildings, Part 1: Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles*, DD240, London, (1997).
- 21 K.E. Boyce, T.J. Shields and G.W.H. Silcock, "Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and on an incline", *Fire Technology*, Vol. **35**, N° 1, pp.51-67, (1999).
- 22 T. Korhonen and S. Hostikka, FDS+Evac-Technical Reference + User´s Guide, VTT Technical Research Centre of placecountry-regionFinland, (2007).
- 23 S. Heliövaara, "Computational Models for Human Behaviour in Fire Evacuations", Master´s thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, Helsinki University of Technology, (2007)