



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



INTERDEPENDENCIA DE FLUJOS CUANDO CONFLUYEN EN EVACUACIONES DE TÚNELES FERROVIARIOS

Trabajo realizado por:
Adriana Balboa Marras

Dirigido:
Manuel Daniel Alvear Portilla
José Luis Moura Berodia

Titulación:
**Máster Universitario en
Investigación en Ingeniería Civil**

Santander, septiembre de 2018

TRABAJO FINAL DE MASTER

Resumen

Los procesos de evacuación en túneles son complejos. Conocer la dinámica de la confluencia de flujos de pasajeros (cantidad de personas que pasan por un punto dado en un periodo de tiempo determinado) durante la evacuación, puede tener implicaciones importantes para la seguridad en el interior de los túneles ferroviarios. Por lo tanto, este documento explora la interdependencia entre el flujo procedente del pasillo lateral del túnel y el flujo que sale del tren cuando confluyen. La primera parte del trabajo explica, por un lado, los experimentos desarrollados para la toma de datos analizando ocho configuraciones diferentes de salida de tren. Se empleó una maqueta de una salida de un coche de tren y una pasarela lateral y estuvieron involucrados 77 participantes (edad promedio: 48 años, desviación estándar: 15 años, rango: 18-74 años). Para el análisis de los datos recopilados se propusieron nuevas mediciones y métodos de procesamiento de datos que permiten realizar análisis estadísticos. Por otro lado, se realizaron simulaciones para analizar la manera en que los modelos computacionales desarrollan este tipo de experimentos. En una segunda parte del trabajo se muestran los resultados. Se encontraron evidencias cuantitativas de las preferencias entre flujos. Con la altura de la salida del tren a 0 m, hubo una ligera preferencia a favor de la pasarela, se encontró un pequeño dominio del flujo de la pasarela cuando la salida del tren es de 0.8 m de altura y, por último, resultó que cuando la diferencia de altura con la salida del tren es de 1.2 m el flujo de la pasarela tuvo una clara prioridad. Esto tuvo lugar a pesar de los comportamientos de deferencia observados entre los participantes. Por último, en el desarrollo de las simulaciones, se encontraron limitaciones en el modelo computacional para la representación de los experimentos. Este trabajo tiene como primer objetivo proporcionar un nuevo método para el desarrollo y validación de herramientas nuevas y actuales de modelado de evacuación. Como segundo objetivo, se espera una mejora en la comprensión del proceso de confluencia entre flujos durante la evacuación en túneles ferroviarios.

Abstract

Evacuations in tunnels are complex processes. Understanding the dynamics of the merging flows of passengers (number of people crossing a given point in a given period of time) during the evacuation, can have important implications for safety inside the railway tunnels. Therefore, this document explores the interdependence between the flow from the lateral walkway of the tunnel and the flow from the train exit when they merge. The first part of the document is divided into two sections. On the one hand, the document explains the experiments developed for data collection with the analysis of eight different train exit configurations. A mock-up of a train exit and a lateral walkway was built and 77 participants were involved (average age: 48 years, standard deviation: 15 years, range: 18-74 years). New measurements and data processing methods were proposed for the analysis of the data collection that allow statistical analysis. On the other hand, simulations were carried out to analyze the way of computer models develop this type of experiments. The second part of the work shows the results. Quantitative evidence of preferences between flows was found. With a train exit height of 0 m there was a slight priority of the walkway, a small preference of the walkway appeared when the train is 0.8 m in height and there was a clear priority of the walkway when the height difference with the train exit is 1.2 m. This took place despite the deference behaviors observed among participants. Finally, limitations of the computational model were found for the representation of the experiments during the development of the simulations. The main objective of this work is to provide a new method for the development and validation of new and current evacuation modeling tools. As a second objective, an improvement in the understanding of the merge process of flows during the evacuation in railway tunnels is expected.

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. Memoria sobre la enseñanza y el aprendizaje | 1 |
| 1.1. Trabajo individual | 1 |
| 1.2. Medios de investigación | 1 |
| 1.3. Equipos y herramientas empleadas | 1 |
| 1.4. Reuniones de trabajo | 2 |
| 1.5. Disseminación | 2 |
| 2. Estado del Arte | 4 |
| 3. Metodología | 9 |
| 3.1. Experimental | 9 |
| 3.1.1. Características de los participantes | 9 |
| 3.1.2. Experimentos | 10 |
| 3.1.3. Toma de datos | 13 |
| 3.2. Método | 14 |
| 3.3. Modelado computacional | 24 |
| 3.3.1. Modelo de simulación STEPS | 24 |
| 3.3.2. Simulaciones | 25 |
| 4. Resultados | 30 |
| 4.1. Resultados de los experimentos | 30 |
| 4.2. Resultados de las simulaciones | 33 |
| 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación | 36 |
| Referencias | 39 |
| | |
| ANEXO I | 43 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Configuraciones de las pruebas..... | 10 |
| Tabla 2. Descripción y duración de los descansos entre pruebas..... | 11 |
| Tabla 3. Número y porcentaje de participantes que abandonan las pruebas..... | 12 |
| Tabla 4. Flujos obtenidos en diferentes condiciones..... | 18 |
| Tabla 5. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos de la salida del tren (Hipótesis $H_{1.0}$ y $H_{1.1}$)..... | 19 |
| Tabla 6. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos del pasillo (Hipótesis $H_{2.0}$ y $H_{2.1}$)..... | 20 |
| Tabla 7. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos de la salida del tren cuando confluyen a distintas alturas (Hipótesis $H_{3.0}$ y $H_{3.1}$)..... | 20 |
| Tabla 8. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos de la salida del tren cuando no confluyen a distintas alturas (Hipótesis $H_{3.0}$ y $H_{3.1}$)..... | 20 |
| Tabla 9. Volumen de los pares de muestras..... | 22 |
| Tabla 10. Coeficientes de correlación de Pearson y Spearman..... | 30 |
| Tabla 11. Resultados de las simulaciones y comparativa con los resultados de los experimentos..... | 33 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Modelo ASET vs RSET [1]..... | 5 |
| Figura 2. Distribución de edad..... | 8 |
| Figura 3. Configuración en planta de la maqueta..... | 9 |
| Figura 4. Esquema del alzado de la maqueta..... | 9 |
| Figura 5. Fotogramas de la Prueba 9 cada 10 s..... | 12 |
| Figura 6. Relación entre el flujo específico y la densidad [31]..... | 15 |
| Figura 7. Igualdad de unidades para F_S y \hat{F}_S | 16 |
| Figura 8. Líneas de referencia..... | 17 |
| Figura 9. Esquemas explicativos del proceso de <i>clustering</i> | 22 |
| Figura 10. Configuración de la geometría para altura $h=0$ m..... | 25 |
| Figura 11. Configuración de la geometría para altura $h=0.8$ m..... | 25 |
| Figura 12. Configuración de la geometría para altura $h=1.2$ m..... | 25 |
| Figura 13. Ventana: tipos de ocupantes..... | 26 |
| Figura 14. Ventana: velocidad..... | 26 |
| Figura 15. Simulación ejemplo para altura de la salida de tren a 0 m..... | 27 |
| Figura 16. Simulación ejemplo para altura de la salida de tren a 0.8 m..... | 27 |
| Figura 17. Simulación ejemplo para altura de la salida de tren a 1.2 m..... | 27 |
| Figura 18. Resultados para el subgrupo de 10 personas a $h=0$ m..... | 31 |
| Figura 19. Resultados para el subgrupo de 10 personas a $h=0.8$ m..... | 31 |
| Figura 20. Resultados para el subgrupo de 10 personas a $h=1.2$ m..... | 32 |
| Figura 21. Comparativa de resultados para el pasillo lateral..... | 33 |
| Figura 22. Comparativa de resultados para la salida del tren..... | 33 |

1. Memoria sobre la enseñanza y el aprendizaje

En esta primera parte se detallan las competencias, tanto generales como específicas, reforzadas y adquiridas durante el proceso de aprendizaje llevado a cabo durante el desarrollo del máster de investigación por la alumna autora del presente trabajo. El trabajo ha sido planificado y ejecutado para poder conseguir las competencias descritas en la guía docente correspondiente al TFM de esta titulación.

1.1. Trabajo individual

Entre los objetivos individuales a alcanzar se encontraban la identificación, el análisis y la descripción (científica y técnica) de un problema ingenieril como es la solución de las condiciones de evacuación normalmente recogidas en los trabajos de Ingeniería de Seguridad contra Incendios. Además, se planteó una adecuada organización del trabajo y recursos necesarios para el alcance de los resultados. Estas competencias adquiridas se plasman en la base del desarrollo del presente trabajo, que parte de la identificación de la escasa investigación existente de la relación entre flujos en la evacuación de un tren dentro un túnel. Se establece una hipótesis de partida para comenzar el análisis estableciendo que ambos flujos son dependientes entre sí. Al término del trabajo se alcanzan resultados que se espera sean de interés científico.

1.2. Medios de investigación

La alumna autora de este trabajo ha combinado el desarrollo del máster de investigación con su trabajo en el Grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria, alcanzando así la competencia de trabajo en equipos multidisciplinares establecida. La lectura constante de artículos relacionados con la temática del trabajo publicados en revistas de alto impacto, así como el acceso al avanzado software en cuestión de modelos de simulación y la propia experiencia del Grupo GIDAI han estado presentes en la realización de la investigación.

1.3. Equipos y herramientas empleadas

A lo largo del desarrollo del trabajo, la alumna contó con la experiencia y material del Grupo GIDAI, especialmente con recursos experimentales, así como con licencias de software especializado en la temática. La experiencia que presenta el Grupo GIDAI en lo referente a investigación de evacuaciones de trenes se refleja en todas las publicaciones y aportaciones realizadas a lo largo de los últimos años como en [1, 2].

La alumna adquirió conocimientos de organización, desarrollo y toma de datos en experimentos reales. Igualmente, reforzó y adquirió competencias en materia de análisis de datos empleando software de procesamiento de imágenes como el programa Avidemux. Además, se enfrentó a tomas de decisiones en ciertos puntos del trabajo necesarias para la continuación del mismo, como el desarrollo de un programa con el empleo de modelos computacionales como Visual Studio. Para el desarrollo de las simulaciones realizó un análisis de su conocimiento en diferentes modelos computacionales de simulación con la elección final del modelo STEPS para el desarrollo de las simulaciones. STEPS es un modelo desarrollado Mott Macdonald capaz de simular el movimiento de los ocupantes en distintos tipos de edificios tanto en condiciones normales como en emergencia.

1.4. Reuniones de trabajo

A lo largo del desarrollo del trabajo se han realizado diversas reuniones que podrían categorizarse en tres estados: inicio de la investigación (búsqueda y lectura de bibliografía, así como formato y partes del estudio), seguimiento del trabajo (reuniones periódicas para corroborar el avance y exponer resultados y hallazgos) y término del trabajo (revisión). Estas reuniones sirvieron de base para establecer los objetivos deseados y el plazo y organización para su alcance, así como para evaluar el estado del trabajo a lo largo de su desarrollo.

1.5. Diseminación

Una de las competencias más destacadas que debe adquirir un investigador en su formación es la capacidad de entender, evaluar, transmitir y comunicar sus hallazgos. En este punto, además del presente trabajo, la autora cuenta con la participación en un par de publicaciones en revistas de alto impacto (JCR) y la asistencia a un congreso para presentar una ponencia aceptada en proceso de revisión por pares para su exposición en sesión oral ante la comunidad científica que recoge parte del trabajo descrito en las siguientes líneas.

Publicación 1: Cuesta, A., Abreu, O., Balboa, A. and Alvear, D. *Real-time evacuation route selection methodology for complex buildings*, Fire Safety Journal, IAFSS 12th Symposium 2017, vol. 91, pp. 945-954, 2017.

Publicación 2: Cuesta, A., Abreu, O., Balboa, A. and Alvear, D., *An experimental data-set on merging flows in rail tunnel evacuation*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 70, pp. 155-165, 2017.

Congreso: Pedestrian and Evacuation Dynamics, celebrado en Lund (Suecia) los días 22, 23 y 24 de agosto de 2018, presentando la ponencia titulada *Interdependence of flows when merge in rail tunnel evacuations*.

2. Estado del Arte

El proceso de evacuación consiste en el movimiento realizado por los ocupantes para alejarse de la zona afectada por una emergencia. Un sistema de evacuación es el conjunto de dependencias comunicadas entre sí, ocupadas por un determinado número de personas que pretenden desplazarse hacia un lugar seguro. Puede tratarse de un sistema de evacuación simple, formado por una sola ruta de evacuación, o puede tratarse de un sistema complejo, formado por varios recorridos o rutas de escape. La ruta de evacuación es el recorrido continuo y libre de obstrucciones desde cualquier zona ocupada que permita a los ocupantes abandonar la zona afectada. Dentro de una ruta de evacuación puede haber conexiones horizontales (puertas, pasillo, etc.) y conexiones verticales (escaleras, rampas, etc.).

Se entiende que el proceso de evacuación debe conducir a los ocupantes hacia un espacio exterior seguro. La evacuación es el procedimiento de seguridad más comúnmente utilizado en caso de emergencia, sobre todo en edificios. Puede haber dos tipos de estrategias de evacuación:

1. Evacuación total: estrategia que consiste en conseguir que la totalidad de los ocupantes abandone la estancia o edificio por sus propios medios o asistidos por otras personas, en el mínimo tiempo posible. La consigna en este procedimiento es evacuar todas las partes ocupadas del edificio en su totalidad.
2. Evacuación controlada o selectiva: proceso mediante el cual los ocupantes salen de un edificio bajo el control y la supervisión de los gestores de la emergencia. Este procedimiento requiere un conocimiento de la localización de la emergencia y su evolución. Consiste en evacuar primero a los ocupantes que mayor riesgo corren debido a su proximidad al foco de la emergencia, seguidos del resto de ocupantes.

El proceso de evacuación no está únicamente afectado por los parámetros de movimiento como la velocidad de desplazamiento y distancia de recorrido de los ocupantes. Además, hay otros muchos factores que afectan a las opciones disponibles para evacuar como la configuración del escenario, los procedimientos de emergencia, los factores ambientales o la conducta de los ocupantes. Los factores que influyen en la conducta humana en un proceso de evacuación pueden resumirse en los siguientes:

- Retraso en el inicio de la evacuación: se corresponde con el proceso de reacción conductual ante la situación de emergencia. Tras percibir una indicación de emergencia (alarma) la gente, a menudo, ignora las señales iniciales o pierde el tiempo investigando qué ocurre. Las personas tardan un tiempo en darse cuenta de la situación y decidir comenzar a evacuar.
- Familiaridad con el entorno: se corresponde con el grado de conocimiento del entorno y su geometría (ubicación de las salidas de emergencia, rutas de evacuación, etc.) y a la experiencia personal en simulacros o situaciones reales. Las rutas de entrada conocidas son más susceptibles de ser utilizadas para evacuar.
- Conductas colectivas: la evacuación y la respuesta general ante una emergencia son a menudo una respuesta social. La mayoría de las personas no evacúa de forma aislada y su comportamiento es dirigido habitualmente por la multitud de su alrededor. La gente tiende a actuar en grupo e intentan evacuar con la gente con quien tienen lazos familiares o emocionales.
- La conducta de pánico: el patrón normal de comportamiento tiende a ser altruista y razonable.

En caso de emergencia, la evacuación de los ocupantes ha de transcurrir en el menor tiempo posible. El tiempo necesario para que los ocupantes abandonen un lugar afectado por una emergencia es el RSET y ha de ser inferior al tiempo disponible para la evacuación, ASET, determinado por la propia emergencia.

- ASET (Available Safe Egress Time): es el tiempo disponible para la evacuación de los ocupantes, determinado por el propio desarrollo de la emergencia y por el tiempo de sostenibilidad de la zona. El límite de sostenibilidad viene determinado por los niveles de letalidad producidos por la emergencia.
- RSET (Required Safe Egress Time): es el tiempo necesario para la evacuación de los ocupantes.

El tiempo de evacuación abarca desde el momento en que se origina la emergencia hasta que los ocupantes salen de la zona afectada y acceden a un espacio seguro. La secuencia temporal de respuesta a una emergencia donde RSET tiene que ser siempre inferior a ASET se muestra en el esquema, basado en [3], en la Figura 1.

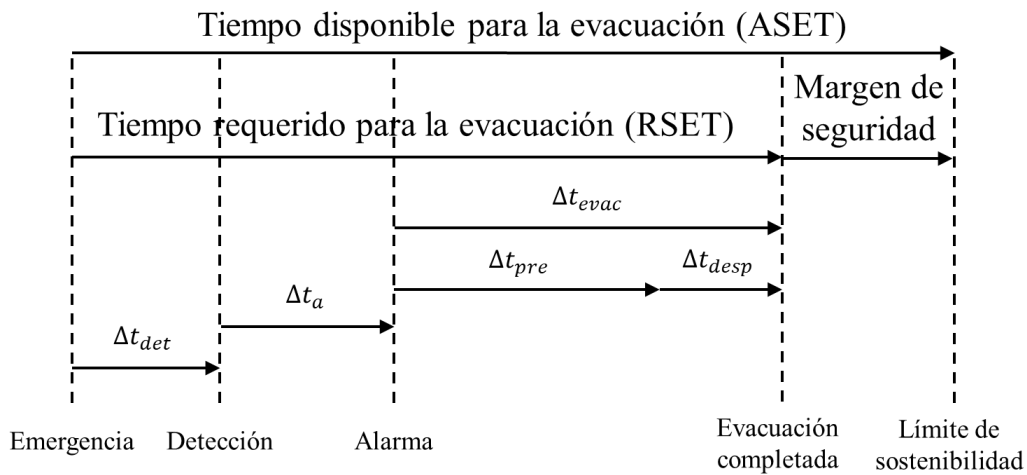


Fig. 1. Modelo ASET vs RSET [3].

El proceso de evacuación está constituido por un conjunto de fases sucesivas que transcurren en el tiempo (Figura 1). Este proceso puede dividirse en intervalos de tiempo cuya suma compone el tiempo total requerido para la evacuación (1):

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{desp} \quad (1)$$

Donde:

- Δt_{det} - tiempo desde la emergencia hasta la detección;
- Δt_a - tiempo desde la detección hasta la activación de la alarma;
- Δt_{pre} - tiempo de pre-evacuación para los ocupantes;
- Δt_{desp} - tiempo de desplazamiento para los ocupantes.

Centrándonos en vehículos ferroviarios (trenes, metros), las evacuaciones que se realizan en el interior de túneles son procesos complejos. Los túneles ferroviarios son espacios únicos cuyas características específicas (como largas distancias hasta un sitio seguro o pasillos laterales sin luz natural) hacen que no sean los mejores lugares para realizar una evacuación [4]. Pueden incrementar el riesgo de los pasajeros en caso de que sea necesaria la evacuación, ya que, debido a las largas distancias, el tiempo disponible para evacuar puede verse reducido. Para reducir esta posibilidad, es necesario desarrollar un diseño apropiado del túnel junto con una estrategia de evacuación efectiva.

De esta manera, pueden incrementarse considerablemente los niveles de seguridad y salvarse muchas vidas. Una forma de evaluar evacuaciones de túneles ferroviarios es mediante el modelado computacional, ya que se aumenta el número de escenarios en el análisis. Por otro lado, la realización de simulaciones resulta menos costosa que los experimentos o simulacros que, en muchos casos, son imposibles de realizar. Si se emplean modelos de simulación con datos fiables, los resultados obtenidos pueden ser coherentes y bastante precisos [5, 6]. Como se puede consultar en [7, 8, 9, 10], el potencial que tienen estos análisis es claro. El problema es que los datos que existen de evacuaciones de trenes son escasos. Después de revisar la literatura se encontraron referencias que describen la conducta de los pasajeros evacuados en túneles ferroviarios incluyendo ratios de flujo de salida como en [11, 12, 13, 14], análisis de las velocidades de desplazamiento en condiciones de humo como en [15, 16] o en un pasillo dentro de un túnel [17]. Otras referencias encontradas, analizan las diferentes estrategias de salida que pueden adoptar las personas evacuadas para acometer las distintas alturas de la salida del tren como en el trabajo de [18]. El comportamiento grupal que puede darse en situaciones de emergencia y evacuación también ha sido analizado en trabajos como [19, 20, 21]. En estos trabajos se estudia la manera en la que las personas se relacionan grupalmente, comparándolas en algunos casos con cómo se comportarían en el mismo entorno individualmente.

Centrándonos más en el problema que se va a desarrollar en este trabajo, las referencias encontradas que analizan la confluencia de flujos de personas se centran en escaleras [22, 23, 24] o en confluencias en configuraciones a la misma altura [25, 26, 27]. Menos atención se ha prestado a las condiciones de confluencia producidas entre el flujo de la salida de un coche ferroviario y el flujo del pasillo lateral a diferentes alturas. Por lo tanto, se conoce muy poco sobre este proceso. Como ya se sugirió en [11], existe una necesidad de conocer y entender la causa y el efecto de la relación entre la densidad de población en el interior del túnel y la capacidad de flujo de la salida del tren. Se espera que el análisis de esta relación tenga una influencia significativa en los futuros cálculos sobre el tiempo requerido por los pasajeros para alcanzar un espacio seguro, en caso de producirse una emergencia en un túnel ferroviario.

Por lo tanto, este documento tiene como objetivo contribuir con los resultados obtenidos al estado del arte, analizando el proceso de confluencia y cómo este impacta en la evacuación de túneles ferroviarios. El alcance del trabajo consiste en proporcionar un método para determinar la interdependencia de flujos cuando se produce su confluencia, mejorando el conocimiento del proceso y su impacto en la seguridad de los pasajeros.

3. Metodología

3.1. Experimental

Realizar experimentos de campo en un entorno real como, por ejemplo, la evacuación de un tren dentro de un túnel ferroviario requiere un coste económico elevado y un gran esfuerzo organizativo (p.ej.: coordinar acciones entre responsables, limitar tráfico ferroviario, etc.). Por ello, se realizaron experimentos de laboratorio en la Universidad de Cantabria (España) con el fin de obtener datos sobre la interdependencia de flujos para su posterior análisis.

3.1.1. Características de los participantes

Para el experimento se reclutaron un total de 77 participantes con edades comprendidas entre los 18 y 74 años (edad media de 48 años y desviación estándar de 15 años) con la idea de representar una muestra de los futuros usuarios del transporte ferroviario. Para el reclutamiento se emplearon las proyecciones demográficas disponibles en Eurostat [28] obteniendo la información demográfica de la Figura 2. No se permitió la participación de menores por cuestiones éticas. De los 77 participantes, 37 eran mujeres (un 48 %) y 40 hombres (un 52 %). Todos los participantes fueron voluntarios reclutados por una compañía subcontratada (bajo la supervisión de la Universidad de Cantabria). Antes de comenzar la realización de los experimentos, los participantes recibieron toda la información acerca del desarrollo y ejecución de las pruebas. Es necesario indicar que al realizarse los experimentos en la época veraniega los participantes no usaron chaquetas ni abrigos. No obstante, se pidió a los participantes que llevaran mochilas y bolsos durante las pruebas a fin de representar las condiciones más realistas posibles. Un 21 % de los participantes llevaron mochilas y un 62 % bolsos.

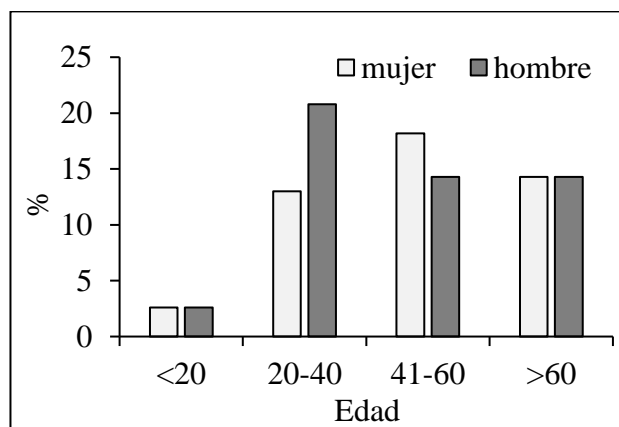


Fig. 2. Distribución de edad.

3.1.2. Experimentos

Para el desarrollo de los experimentos se construyó una maqueta a escala real que simulaba un vagón de tren con una salida hacia un pasillo lateral (túnel ferroviario). Dos rampas laterales daban acceso a un vestíbulo que podía ajustarse a distintas alturas (0, 0.80 y 1.20 m) y contaba con una salida al pasillo lateral formada por una puerta corredera ajustable a distintos anchos basados en trenes de alta velocidad y regionales que operan en España (0.80 y 1.20 m). El pasillo lateral de 12 m de longitud y ancho variable tomado de [29] se ensambló al vestíbulo para obtener una configuración de salida en ángulo recto y se delimitó con unas telas opacas (3 m de alto) para simular las condiciones reales del interior de un túnel (paredes, poca visibilidad). En la Figura 3 se muestra la configuración en ángulo recto de la salida y en la Figura 4 las variables que se pueden modificar en la maqueta para conseguir analizar las distintas configuraciones.

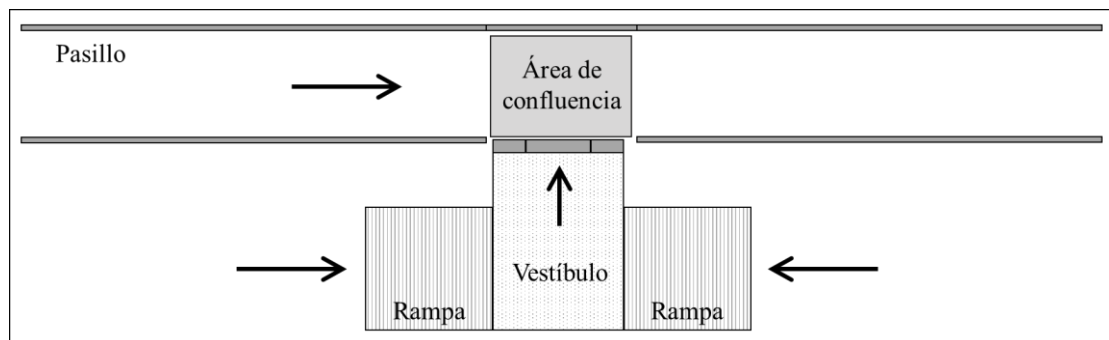


Fig. 3. Configuración en planta de la maqueta.

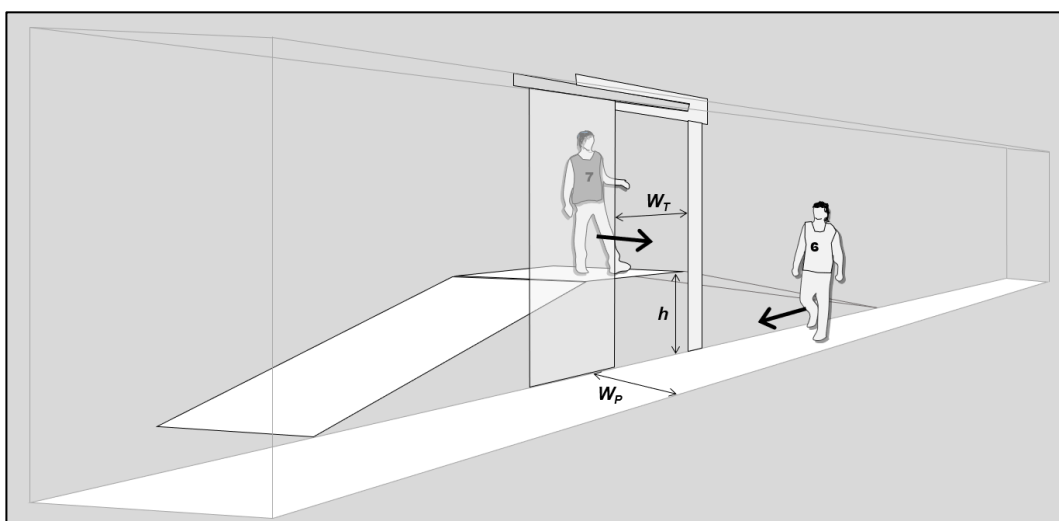


Fig. 4. Esquema del alzado de la maqueta.

En la Tabla 1 se muestran las configuraciones de las pruebas realizadas durante el experimento fruto de la combinación entre las variables modificadas: diferencia de altura (h), ancho de la salida del tren (W_T) y ancho del pasillo lateral (W_P). Gracias a la flexibilidad con la que se construyó la maqueta se configuraron un total de 16 pruebas considerando 8 configuraciones de salida diferentes. Es decir, cada prueba se realizó dos veces. Los participantes se dividieron en dos grupos experimentales: el grupo Rojo con 39 participantes (con chaleco rojo) y el grupo Amarillo con 38 participantes (con chaleco amarillo). Los participantes fueron asignados a cada grupo en base al orden alfabético de sus apellidos. Cada chaleco llevaba un número, para tener identificado a cada participante en todo momento.

| Prueba | Localización inicial | | Variables de interés | | |
|--------|----------------------|----------------|----------------------|-----------|-----------|
| | Grupo Rojo | Grupo Amarillo | h (m) | W_T (m) | W_P (m) |
| 1 | Tren | Pasillo | 0 | 0.8 | 1.2 |
| 2 | Pasillo | Tren | 0 | 0.8 | 1.2 |
| 3 | Tren | Pasillo | 0 | 1.2 | 1.2 |
| 4 | Pasillo | Tren | 0 | 1.2 | 1.2 |
| 5 | Pasillo | Tren | 0 | 0.8 | 0.8 |
| 6 | Tren | Pasillo | 0 | 0.8 | 0.8 |
| 7 | Pasillo | Tren | 0 | 1.2 | 0.8 |
| 8 | Tren | Pasillo | 0 | 1.2 | 0.8 |
| 9 | Tren | Pasillo | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| 10 | Pasillo | Tren | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| 11 | Tren | Pasillo | 0.8 | 0.8 | 1.2 |
| 12 | Pasillo | Tren | 0.8 | 0.8 | 1.2 |
| 13 | Pasillo | Tren | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 14 | Tren | Pasillo | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 15 | Pasillo | Tren | 1.2 | 1.2 | 0.8 |
| 16 | Tren | Pasillo | 1.2 | 1.2 | 0.8 |

Tabla 1. Configuraciones de las pruebas.

Como se explicó anteriormente, cada configuración se repitió dos veces cambiando la posición inicial de cada grupo. Es decir, un grupo se ubicó en el vestíbulo del vagón y el otro grupo formó cola para acceder al pasillo, comenzando la prueba después del sonido de un silbato.

Cuando la prueba concluye, el grupo que inicialmente estaba en el vestíbulo del tren se sitúa haciendo cola para acceder al pasillo y el grupo que inicialmente estaba haciendo cola en el pasillo se sitúa en el vestíbulo del vagón. Al sonido del silbato se realiza la prueba de nuevo. Para evitar que los participantes adquirieran un comportamiento de aprendizaje a medida que realizaban las pruebas, se varió la posición de los participantes en cada grupo (los que comenzaron la prueba al inicio del grupo comenzaban la siguiente en la parte final). Además, cada dos pruebas fue necesario cambiar la altura de la salida del tren, lo que permitió a los participantes contar con un periodo de descanso como se muestra en la Tabla 2. Es importante tener en cuenta esto, ya que la fatiga y el aprendizaje acumulados en el desarrollo de las pruebas podrían ser factores importantes en los resultados del experimento.

| Descanso | Características | Duración (min:s) |
|----------|---|------------------|
| 1 | Después de la Prueba 2 para cambiar el ancho de la salida del tren. | 4:32 |
| 2 | Después de la prueba 4 para cambiar los anchos de la salida del tren y del pasillo lateral. | 22:37 |
| 3 | Después de la prueba 6 para cambiar el ancho de la salida del tren. | 2:31 |
| 4 | Después de la prueba 8 para cambiar el ancho y la altura de la salida del tren. | 32:30 |
| 5 | Después de la prueba 10 para cambiar el ancho del pasillo lateral. | 13:24 |
| 6 | Después de la prueba 12 para cambiar el ancho y la altura de la salida del tren. | 36:30 |
| 7 | Después de la prueba 14 para cambiar el ancho del pasillo lateral. | 13:18 |

Tabla 2. Descripción y duración de los descansos entre pruebas.

En el transcurso de los descansos se preguntó a los participantes si estaban dispuestos a participar en las siguientes pruebas y alguno de ellos, recordemos que gran parte de los participantes eran personas mayores, no formó parte de algunas pruebas. Su mayor preocupación era acometer la diferencia de altura de la salida del tren. En la Tabla 3 se muestra el número de participantes que decidieron no realizar las pruebas. Lo que es interesante de estos resultados es que la decisión de no participar fue gradual. Por un lado, algunas personas se sintieron incapaces de superar la altura antes de probar, mientras que otros se rindieron antes de repetir.

| Grupo | Prueba | h (m) | Participantes que abandonan | |
|----------|--------|-------|-----------------------------|-------|
| | | | # | % |
| Rojo | 9 | 0.8 | 3 | 7.69 |
| | 11 | 0.8 | 4 | 10.26 |
| | 14 | 1.2 | 9 | 23.08 |
| | 16 | 1.2 | 11 | 28.21 |
| Amarillo | 10 | 0.8 | 1 | 2.63 |
| | 12 | 0.8 | 3 | 7.89 |
| | 13 | 1.2 | 10 | 26.32 |
| | 15 | 1.2 | 12 | 31.58 |

Tabla 3. Número y porcentaje de participantes que abandonan las pruebas.

3.1.3. Toma de datos

Para la recopilación de los datos durante los experimentos, se colocó una cámara de vídeo en la parte alta de la maqueta. Así, se obtuvo una visión superior de la zona de confluencia delimitada por la salida del vagón y el pasillo lateral. Las imágenes se recopilaron a una frecuencia de 29.97 fotogramas/s. Para tener una mejor comprensión de la mecánica de la toma de datos se muestra en la Figura 5 el movimiento de los participantes a lo largo de un experimento con fotogramas cada 10 s.

0 s



10 s



20 s



30 s



40 s



50 s



60 s



70 s



Fig. 5. Fotogramas de la Prueba 9 cada 10 s.

3.2. Método

Hoy en día, existen diferentes métodos para medir los flujos de personas durante la evacuación. Las aportaciones más importantes en este campo se atribuyen a [30, 31 y 32]. Pero fue en el año 2002 cuando Nelson y Mowrer derivaron un método usando el flujo hidráulico para estimar el tiempo de evacuación basado en los trabajos anteriores [33].

Como se establece en el trabajo, los supuestos asumidos en los trabajos anteriores fueron: 1) todas las personas involucradas comenzaban la evacuación simultáneamente, 2) el flujo de los ocupantes no se verá afectado por las decisiones tomadas individualmente y 3) las personas involucradas no presentarán discapacidades o movimiento reducido que pueda afectar al flujo de movimiento. La base de estos métodos estaba en la suposición de que la velocidad de movimiento y la densidad de población estaban relacionadas. Además, estas dos variables determinan el flujo de evacuación de personas. Sin embargo, en [33] describen el desarrollo de su trabajo definiendo la densidad (D) y la velocidad de movimiento de cada individuo (S) para obtener la expresión (2), que calcula el flujo de salida:

$$F = S * D \quad (2)$$

Donde:

- F : Flujo de salida (personas/s);
- S : velocidad de movimiento (m/s);
- D : densidad (personas/m²).

Introducen el concepto de flujo específico (F_S), calculado al multiplicar el flujo de salida (F) por el ancho específico de dicha salida. Este flujo específico es definido por otros autores como el flujo de las personas evacuadas que atraviesan un punto por unidad de tiempo por unidad de ancho efectivo [34]. El flujo específico se calcula a través de la ecuación (3) y su relación con la densidad se muestra en la Figura 6 [33].

$$F_S = F * w_e = S * D * w_e \quad (3)$$

Donde:

- F_S : flujo específico (personas/s/m);
- w_e : ancho efectivo (m).

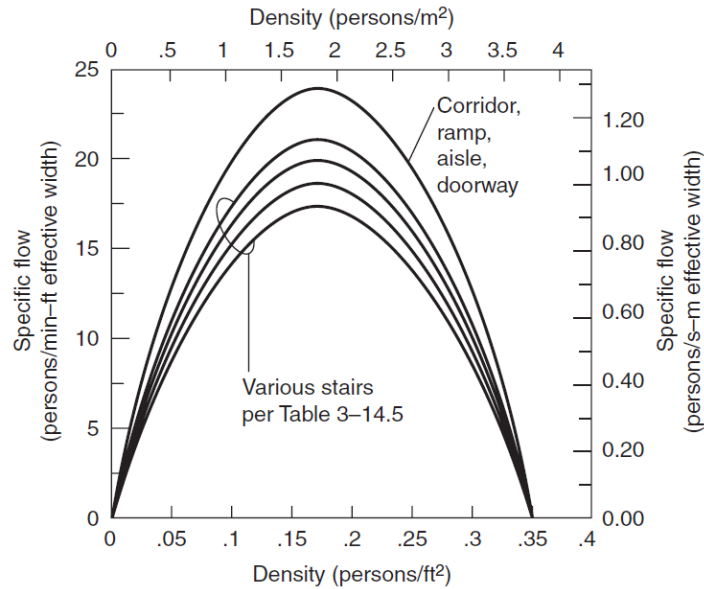


Fig.6. Relación entre el flujo específico y la densidad [33].

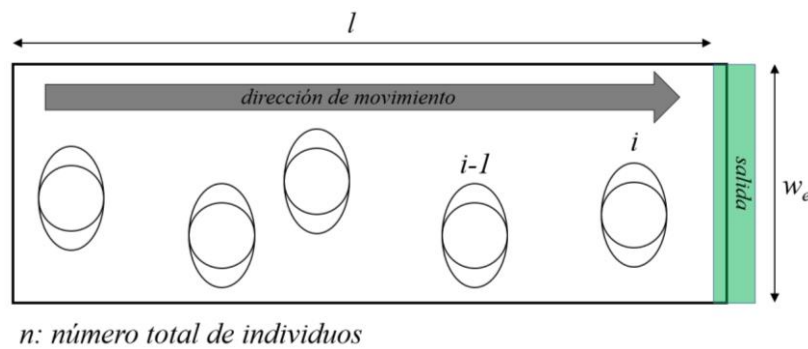
La investigación y desarrollo de Nelson y Mowrer proporciona los datos disponibles más utilizados por la comunidad científica para el cálculo de flujos de personas. Estos datos se han empleado en mayor medida en evacuaciones de edificios y/o túneles. Sin embargo, su empleo para el cálculo de la relación entre dos flujos cuando confluyen presenta una desventaja: el uso de valores constantes (flujos de salida) tiende a promediar las pausas individuales de los pasajeros, lo que conlleva una representación simple del flujo de salida real [35]. Por eso, el proceso de salida del tren podría considerarse como una variable aleatoria que depende de los pasajeros (comportamiento, equipaje, etc.), del diseño del tren (salidas, pasillo) y de cómo los individuos responden a ello [36]. Además, la mayoría de los modelos actuales de evacuación no utilizan variables estocásticas para implementar los flujos, los modelos actuales de evacuación de trenes consideran las distribuciones de probabilidad de tiempo de salida en lugar de valores de flujo simples [6; 35]. Por esta razón, en el presente trabajo se desarrolla un nuevo método de medida para calcular el flujo de salida de pasajeros de un tren, basado en una nueva variable aleatoria denominada flujo específico instantáneo (\hat{F}_S) con la siguiente formulación (4):

$$\hat{F}_S = \frac{1}{\Delta t_{i,i-1} * w_e} \quad (4)$$

Donde:

- \hat{F}_S : flujo específico instantáneo (personas/s/m);
- $\Delta t_{i,i-1}$: intervalo de tiempo entre dos sujetos que atraviesan consecutivamente un punto de referencia (s);
- w_e : ancho efectivo (m).

El flujo específico instantáneo se define como el inverso del intervalo de tiempo entre dos individuos que atraviesan consecutivamente un punto de referencia, dividido por el ancho efectivo. Nótese que el flujo específico instantáneo y el flujo específico tienen las mismas unidades (personas/s m) como se muestra con la ecuación (5) en la Figura 7.



$$F_S = S * D = \frac{l}{n * \Delta t_{i,i-1}} * \frac{n}{l * w_e} = \frac{1}{\Delta t_{i,i-1} * w_e} = \hat{F}_S \quad (5)$$

Fig. 7. Igualdad de unidades para F_S y \hat{F}_S .

Una de las razones del uso de la nueva variable aleatoria es la facilidad para determinar sus valores mediante el cálculo de los intervalos de tiempo. Empleando grabaciones de vídeo, estos intervalos de tiempo son, exactamente, la diferencia entre el momento en que un individuo atraviesa un punto concreto y el momento del siguiente individuo cuando atraviesa el mismo punto (estos momentos se miden en segundos). Además, la ventaja del uso del flujo específico instantáneo es la posibilidad de obtener distribuciones de probabilidad, en lugar de valores constantes o valores medios que se obtendrían con el cálculo del flujo específico original. El problema aparece cuando los intervalos de tiempo entre dos individuos son muy pequeños, dando lugar a valores de flujo muy elevados.

Para solventar este problema, es necesario desechar los valores más extremos (valores atípicos-*outliers*) de las muestras de datos. Existen métodos y programas para este proceso que pueden encontrarse en [37, 38, 39], ya que normalmente las muestras de flujo instantáneo calculadas están sesgadas. En el presente trabajo se empleó el cálculo del *medcouple*, una medida robusta de la asimetría que introduce una corrección en la prueba de Tukey [40] y se basa en el primer y tercer cuartil y el IQR (rango intercuartílico).

Para emplear este método en el experimento realizado, se determinaron dos líneas de referencia: la primera, la salida del tren y la segunda, se situó en el suelo del pasillo lateral a 0.6 m de la salida del tren. En la Figura 8 se muestra la posición de estas líneas de referencia determinando el área de confluencia entre los dos flujos.

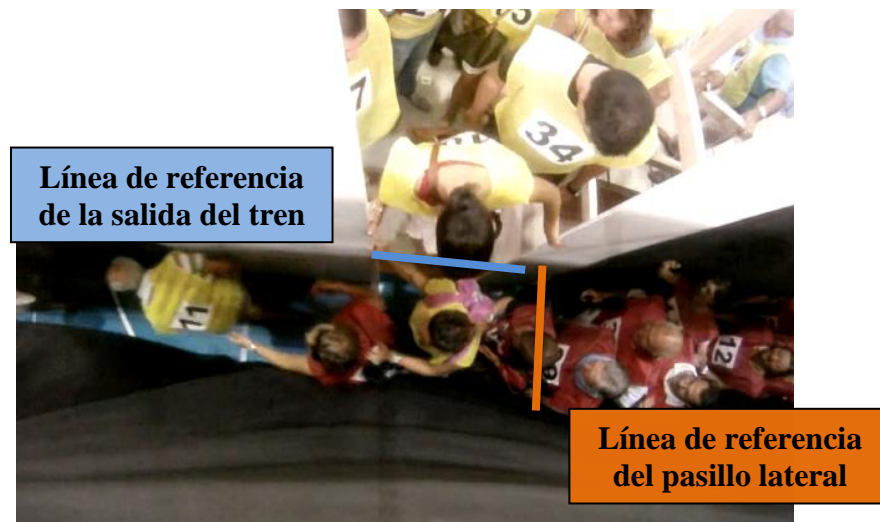


Fig. 8. Líneas de referencia.

Los datos recopilados en el transcurso del experimento (toma de datos explicada en el apartado 3.1.3.) se analizaron manualmente empleando el software de procesamiento de imágenes Avidemux 2.5.2. Para analizar la interdependencia fue necesario estudiar los dos flujos conjuntamente. Este proceso se realizó para cada uno de los 16 test por separado. Se anotó el momento (fotograma) en que todas las partes del cuerpo de cada individuo cruzaban la línea de referencia (diferenciando el lugar de procedencia del participante: tren o pasillo) según iban accediendo al área de confluencia. Estos datos se transcribieron a una hoja de cálculo y se calcularon los intervalos de tiempo entre cada individuo.

Empleando la metodología anterior, se obtuvieron 16 muestras de flujos instantáneos específicos combinados (diferenciando a los participantes del tren y del pasillo). El objetivo del método es determinar la interdependencia existente entre dos flujos cuando convergen en una misma área, lo que supone asumir que el flujo del tren y el flujo del pasillo están relacionados y son dependientes el uno del otro.

Antes de realizar cualquier análisis de la convergencia entre dos flujos, fue necesario determinar una serie de hipótesis de partida. Para ello, se analizó la relación entre los flujos cuando no confluyen (flujo libre) y los flujos cuando confluyen. De las 16 muestras anteriores, se hizo una división de datos diferenciando: los flujos de salida del tren cuando no se produce confluencia, el flujo del pasillo cuando no se produce confluencia, y los flujos de salida del tren y del pasillo cuando existe confluencia. Además, se combinaron los datos de las pruebas repetidas con las mismas características. De acuerdo con esta clasificación, se obtuvieron 10 muestras de datos para el análisis. En la Tabla 4 se muestra la nomenclatura empleada para diferenciar cada muestra de datos (P son los datos del Pasillo y T los datos de la salida del tren) y las características de cada una.

| Nomenclatura | Tipo | h (m) | # | Promedio [per/s m] | D. E.* [per/s m] |
|---------------|-------------------------|-------|-----|-----------------------|---------------------|
| $n_{P,N,0}$ | Pasillo, No confluencia | 0 | 87 | 1.51 | 0.10 |
| $n_{P,C,0}$ | Pasillo, Confluencia | 0 | 228 | 1.44 | 0.15 |
| $n_{P,C,0.8}$ | Pasillo, Confluencia | 0.8 | 126 | 1.09 | 0.11 |
| $n_{P,C,1.2}$ | Pasillo, Confluencia | 1.2 | 104 | 0.95 | 0.10 |
| $n_{T,N,0}$ | Tren, No confluencia | 0 | 55 | 2.59 | 0.50 |
| $n_{T,C,0}$ | Tren, Confluencia | 0 | 217 | 1.71 | 0.21 |
| $n_{T,N,0.8}$ | Tren, No confluencia | 0.8 | 30 | 1.17 | 0.11 |
| $n_{T,C,0.8}$ | Tren, Confluencia | 0.8 | 100 | 0.78 | 0.05 |
| $n_{T,N,1.2}$ | Tren, No confluencia | 1.2 | 13 | 0.90 | 0.19 |
| $n_{T,C,1.2}$ | Tren, Confluencia | 1.2 | 87 | 0.51 | 0.04 |

* *Desviación Estándar*

Tabla 4. Flujos obtenidos en diferentes condiciones.

Las muestras de flujos observadas en las video grabaciones variaron en función de si se produce confluencia o no y de la altura de la salida del tren. Estas observaciones nos permitieron formular las siguientes hipótesis:

- $H_{1.0}$ → El flujo del pasillo no afecta al flujo de salida del tren.
- $H_{1.1}$ → El flujo del pasillo afecta al flujo de salida del tren.
- $H_{2.0}$ → El flujo de personas saliendo del tren no afecta al flujo de personas del pasillo.
- $H_{2.1}$ → El flujo de personas saliendo del tren afecta al flujo de personas del pasillo.
- $H_{3.0}$ → La diferencia de altura no afecta al flujo de salida del tren.
- $H_{3.1}$ → La diferencia de altura afecta al flujo de salida del tren.

Las hipótesis anteriores se comprobaron empleando los métodos de Mann-Whitney_Wilcoxon (MWW) [41, 42] la prueba de Two-sample Kolmogorov-Smirnov (K-S) [43] y la prueba de Welch's t -test [44]. Con un nivel de significación $\alpha = 0.05$ se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 5 para las hipótesis $H_{1.0}$ y $H_{1.1}$, en la Tabla 6 para las hipótesis $H_{2.0}$ y $H_{2.1}$ y en las Tablas 7 y 8 para las hipótesis $H_{3.0}$ y $H_{3.1}$.

| Pares de muestras | | $n_{T,N,0}$ | $n_{T,C,0}$ | $n_{T,N,0.8}$ | $n_{T,C,0.8}$ | $n_{T,N,1.2}$ | $n_{T,C,1.2}$ |
|-------------------|-----------------------------|------------------|-------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| Prueba MWW | Comparación de estadísticas | $5.91 \geq 1.96$ | | $5.21 \geq 1.96$ | | $4.51 \geq 1.96$ | |
| | $H_{1.0}$ | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba K-S | Comparación de estadísticas | $0.57 > 0.21$ | | $0.53 > 0.28$ | | $0.67 > 0.40$ | |
| | $H_{1.0}$ | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba Welch | Comparación de estadísticas | $3.23 \geq 1.99$ | | $6.31 \geq 2.02$ | | $4.13 \geq 2.16$ | |
| | $H_{1.0}$ | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |

Tabla 5. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos de la salida del tren (Hipótesis $H_{1.0}$ y $H_{1.1}$).

| Pares de muestras | | $n_{P,N,0}$ | $n_{P,C,0}$ | $n_{P,N,0}$ | $n_{P,C,0.8}$ | $n_{P,N,0}$ | $n_{P,C,1.2}$ |
|-------------------|-----------------------------|------------------|-------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| Prueba MWW | Comparación de estadísticas | $4.15 \geq 1.96$ | | $6.87 \geq 1.96$ | | $7.42 \geq 1.96$ | |
| | H _{2,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba K-S | Comparación de estadísticas | $0.32 > 0.17$ | | $0.47 > 0.19$ | | $0.50 > 0.20$ | |
| | H _{2,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba Welch | Comparación de estadísticas | $6.25 \geq 1.96$ | | $8.59 \geq 1.96$ | | $7.65 \geq 1.96$ | |
| | H _{2,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |

Tabla 6. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos del pasillo (Hipótesis H_{2,0} y H_{2,1}).

| Pares de muestras | | $n_{T,C,0}$ | $n_{T,C,0.8}$ | $n_{T,C,0}$ | $n_{T,C,1.2}$ | $n_{T,C,0.8}$ | $n_{T,C,1.2}$ |
|-------------------|-----------------------------|------------------|---------------|-------------------|---------------|------------------|---------------|
| Prueba MWW | Comparación de estadísticas | $7.32 \geq 1.96$ | | $11.71 \geq 1.96$ | | $7.40 \geq 1.96$ | |
| | H _{3,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba K-S | Comparación de estadísticas | $0.40 > 0.16$ | | $0.69 > 0.17$ | | $0.50 > 0.20$ | |
| | H _{3,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba Welch | Comparación de estadísticas | $8.29 \geq 1.96$ | | $10.82 \geq 1.96$ | | $7.81 \geq 1.96$ | |
| | H _{3,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |

Tabla 7. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos de la salida del tren cuando confluyen a distintas alturas (Hipótesis H_{3,0} y H_{3,1}).

| Pares de muestras | | $n_{T,N,0}$ | $n_{T,N,0.8}$ | $n_{T,N,0}$ | $n_{T,N,1.2}$ | $n_{T,N,0.8}$ | $n_{T,N,1.2}$ |
|-------------------|-----------------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| Prueba MWW | Comparación de estadísticas | $5.98 \geq 1.96$ | | $5.01 \geq 1.96$ | | $2.63 \geq 1.96$ | |
| | H _{3,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba K-S | Comparación de estadísticas | $0.65 > 0.31$ | | $0.79 > 0.42$ | | $0.49 > 0.45$ | |
| | H _{3,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |
| Prueba Welch | Comparación de estadísticas | $5.54 \geq 2.00$ | | $6.32 \geq 2.00$ | | $2.47 \geq 2.08$ | |
| | H _{3,0} | Rechazada | | Rechazada | | Rechazada | |

Tabla 8. Resultados de las pruebas estadísticas para los flujos de la salida del tren cuando no confluyen a distintas alturas (Hipótesis H_{3,0} y H_{3,1}).

Como se esperaba, la presencia de personas transitando por el pasillo afectó al flujo de salida del tren (se rechaza la hipótesis $H_{1,0}$ empleando las pruebas estadísticas de MWW, K-S y Welch). También se rechaza la hipótesis $H_{2,0}$ usando las pruebas estadísticas de MWW, K-S y Welch, por lo que el flujo de personas saliendo del tren afectó al flujo de personas del pasillo. Por último, se puede establecer que la diferencia de altura de la salida del tren afecta al proceso de evacuación, ya que la hipótesis $H_{3,0}$ se rechaza con las pruebas de MWW, K-S y Welch.

A partir de este punto, los datos empleados para el análisis son únicamente los flujos obtenidos cuando se produce confluencia. Es decir, volvemos a partir de las muestras de flujos instantáneos específicos combinados donde se diferenciaba a los participantes del tren y del pasillo, para cada uno de los 16 test realizados.

El presente trabajo parte de unas hipótesis derivadas de la observación de los experimentos, por lo que nos encontramos ante un método inductivo (método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares). Para el análisis de las muestras combinadas de flujos se decidió emplear un método de *clustering*. Como no es una tarea automática, sino un proceso iterativo, se aplicó un método novedoso mediante grupos. Se llevaron a cabo dos tipos diferentes de *clustering*, dentro de los cuales se seleccionaron varios tipos diferentes de grupos. Para el *clustering A*, los grupos se definieron como conjuntos de personas formados por 6, 8 y 10 participantes. Para el *clustering B*, los grupos se definieron como intervalos de tiempo seleccionando intervalos de 5, 7.5 y 10 s. Una vez separados los datos por grupos se formaron dos columnas diferenciadas, una para los participantes del tren y otra para los participantes del pasillo y se calculó el valor medio de cada columna. De esta manera, se obtuvo el valor medio del flujo instantáneo específico por pares de muestras (tren-pasillo). Teniendo en cuenta que este proceso es complicado de entender de manera textual, en la Figura 9 se muestran dos esquemas gráficos: para el caso del *clustering A* con un grupo de 6 participantes y para el caso del *clustering B* con un grupo de 5 s. Para el resto de los grupos sería la misma dinámica.

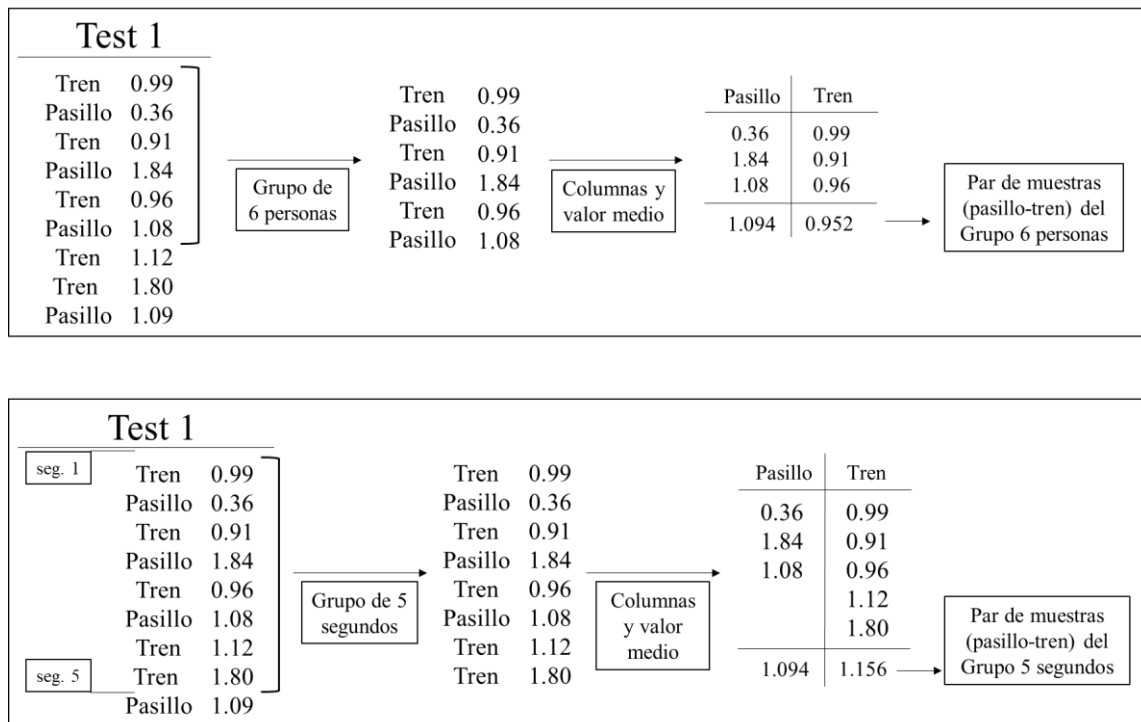


Fig. 9. Esquemas explicativos del proceso de clustering.

Una vez calculados los pares de muestras de los valores medios de todos los test, se juntaron los datos en función de la altura de la salida del tren. Así, se obtuvieron pares de muestras para 0, 0.8 y 1.2 m para los grupos del *clustering* A y del *clustering* B. Los tamaños de cada grupo se muestran en la Tabla 9.

| Clustering | Grupos | h = 0 m | h = 0.8 m | h = 1.2 m |
|------------|--------------|---------|-----------|-----------|
| A | 6 personas | 70 | 35 | 28 |
| | 8 personas | 49 | 23 | 20 |
| | 10 personas | 33 | 15 | 12 |
| B | 5 segundos | 47 | 34 | 28 |
| | 7.5 segundos | 32 | 22 | 18 |
| | 10 segundos | 25 | 19 | 17 |

Tabla 9. Volumen de los pares de muestras.

3.3. Modelado computacional

Un Modelo puede definirse como un esquema teórico de un sistema elaborado para facilitar la comprensión y el estudio de su comportamiento. Es decir, el Modelado Computacional es una simplificación de la realidad. Los modelos de simulación computacional reproducen el movimiento de los ocupantes hacia las salidas y se caracterizan por varios aspectos fundamentales. Uno de estos aspectos es el móvil que puede ser una persona o grupo de personas. Otro es el vector velocidad que depende de las características del móvil y de otros factores externos e internos (densidad de personas, limitaciones, obstáculos, características del entorno, etc.). El último aspecto son las rutas de evacuación, que dependen de factores objetivos y subjetivos como la configuración del edificio, la señalización, la elección de salidas, la interacción entre los ocupantes, etc.

Un problema fundamental de los modelos es la continuidad o discretización en la representación de los componentes. Los ocupantes presentan diversas características y no actúan o responden igualmente ante una emergencia; además, es necesario tener en cuenta otros factores externos a la conducta. Esta conducta humana y factores externos son las variables que mayores dificultades presentan para representarlas en los modelos de simulación.

3.3.1. Modelo de simulación STEPS

En este trabajo se utilizó el modelo STEPS desarrollado por Mott MacDonald [45] para realizar las simulaciones. Es un modelo de conducta parcial cuyo propósito es simular a los ocupantes en condiciones normales o de emergencia en diferentes tipos de edificios. Es un modelo de movimiento que contiene variables como los tiempos de pre-movimiento, las características de los ocupantes, la paciencia y conducta familiar [46, 47].

En cuanto a su estructura, es un modelo de red fina formado por una malla de celdas cuya medida por defecto es 0.5 x 0.5 m. Cada celda solo puede estar ocupada por un agente. El modelo considera a los ocupantes de forma individual y permite incorporar características propias a cada individuo o grupo. Además, permite especificar objetivos, salidas o rutas específicas a cada ocupante o grupo de ocupantes, haciendo que tengan una visión individual del edificio.

Estos objetivos pueden tener asociado un nivel de conocimiento con un rango entre 0 y 1 y se puede asociar el conocimiento a una fracción del grupo de ocupantes. Asignando un valor de 0 a un objetivo ningún ocupante tendrá conocimiento de su existencia, y asignando un valor de 1 todos los ocupantes saben de su existencia. La elección de la salida se realiza de acuerdo a la puntuación asignada a cada una, basándose en la distancia más corta, la familiaridad, el número de ocupantes alrededor y el ancho de paso de la salida.

El movimiento de los ocupantes es función de la disponibilidad de las celdas contiguas, solo se realizará el desplazamiento a aquellas celdas libres. Esta es la principal desventaja. El modelo puede dar resultados de tiempo total de evacuación, número de ocupantes en áreas y el número de personas que abandonan el escenario frente al tiempo.

3.3.2. Simulaciones

En este apartado se describen las simulaciones desarrolladas, detallando las variables implementadas en el modelo, así como los resultados y conclusiones obtenidas. Como se expuso en su descripción, STEPS es un modelo desarrollado con el propósito de simular situaciones en edificios y no está diseñado con el fin de simular eventos en túneles ferroviarios con configuraciones propias de un vehículo ferroviario. Por este motivo, se ha tratado de reproducir los experimentos realizados en la realidad lo más parecidos posible en el modelo, teniendo en cuenta la posibilidad de no obtener resultados similares.

Lo primero para realizar las simulaciones es importar en el modelo los planos configurados anteriormente en formato CAD. Los planos constan de un área para la plataforma del tren de dimensiones 3 x 3 m con una salida de 0.8 m o 1.2 m, dependiendo de la prueba y de un área para el pasillo de 12 m de largo y ancho de 0.8 m o 1.2 m, dependiendo de la prueba. Una vez realizada la importación de geometría se crearon los planos correspondientes por donde los ocupantes transitan. Estos planos están divididos en celdas de 0.4 x 0.4 m. Se determinaron dos zonas de origen en el modelo en las que se ubicaron cada uno de los grupos de participantes según la prueba a simular: una es el tren y otra es al final del pasillo. También, para que los ocupantes se movieran, hubo que establecer una salida por la que evacuasen, por lo que se ubicó una salida al final del pasillo.

En las configuraciones con altura de la salida de tren a 0.8 m y 1.2 m, la conexión con el pasillo lateral se realizó mediante una escalera (el modelo no simula la bajada de los ocupantes del tren saltando o sentándose) para que los ocupantes pudieran descender. Por último, se establecieron las líneas de referencia en la salida del tren y en el pasillo a 0.6 m antes de la salida del tren. En las Figuras 10 a 12 se muestra un ejemplo de la visualización de la geometría en el modelo computacional para cada una de las alturas implementadas.

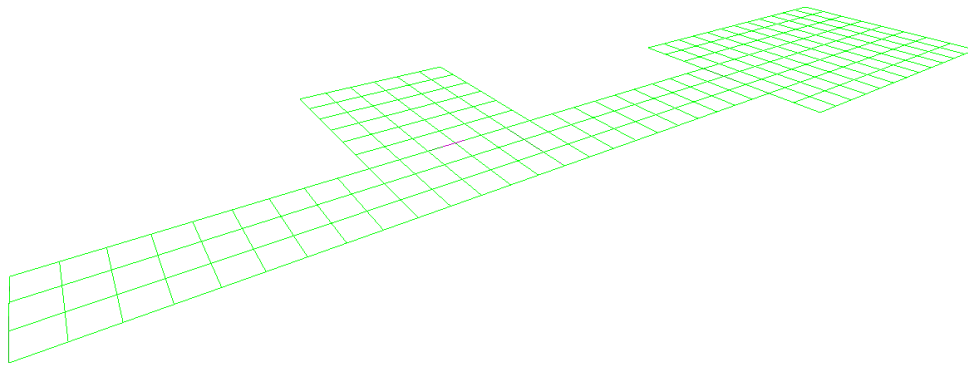


Fig. 10. Configuración de la geometría para altura $h=0$ m.

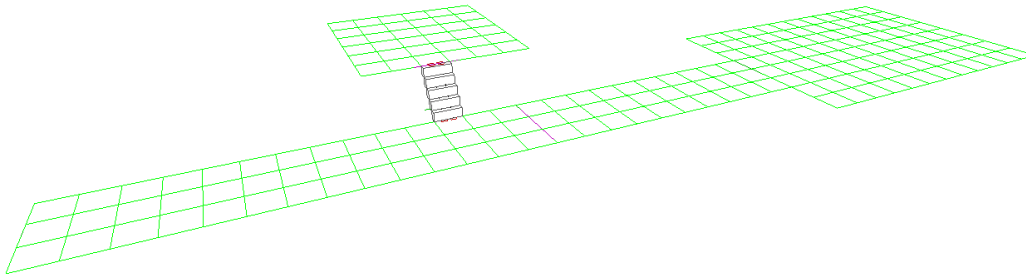


Fig. 11. Configuración de la geometría para altura $h=0.8$ m.

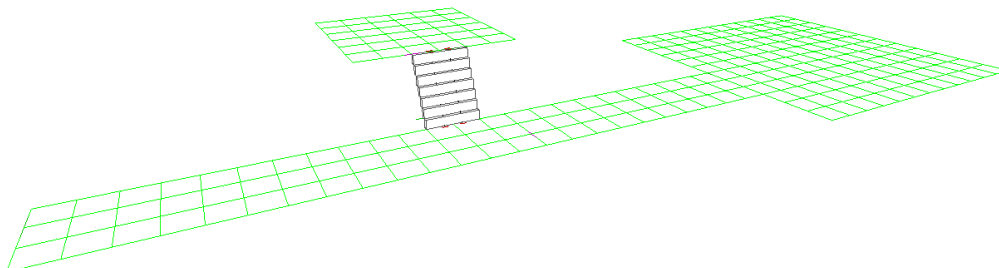


Fig. 12. Configuración de la geometría para altura $h=1.2$ m.

Para realizar las simulaciones hay que implementar una serie de variables como la velocidad de desplazamiento de los ocupantes, sus dimensiones, su ubicación y las variables de salida para el análisis de los resultados.

Las dimensiones y velocidad de desplazamiento de los ocupantes se implementaron por defecto con los datos de STEPS. La velocidad implementada fue la de distribución normal de Fruin, con una media de 1.5 m/s, una desviación estándar de 0.255 m/s, un valor mínimo de 0.65 m/s y máximo de 2.05 m/s [31]. La ubicación inicial de los ocupantes es la plataforma del tren o el final del pasillo lateral, cambiando en cada prueba según lo estipulado en los experimentos. En las Figuras 13 y 14 se muestran las ventanas para introducir estos datos.

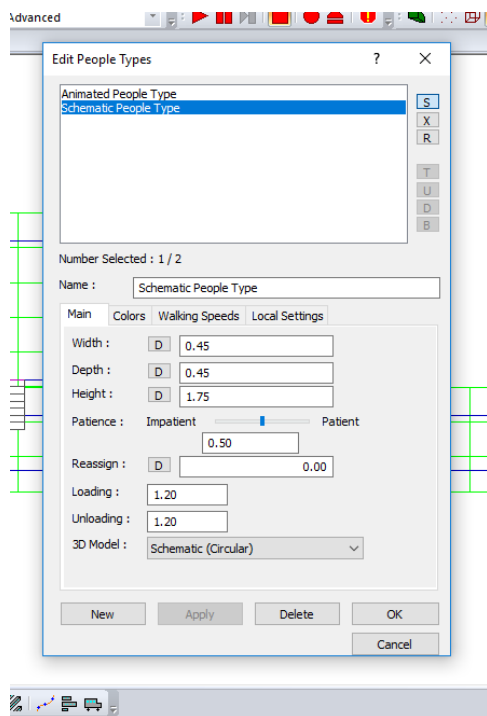


Fig. 13. Ventana: tipos de ocupantes.

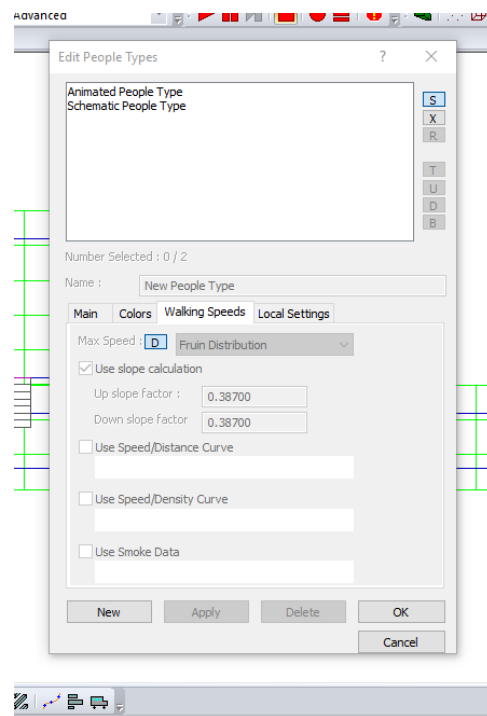


Fig. 14. Ventana: velocidad.

Una vez introducidas todas las variables y asignados los grupos de participantes en su localización de origen se iniciaron todas las simulaciones. En las Figuras 15 a 17 se muestran tres ejemplos de una simulación a cada altura. Las celdas en color rojo indican que los ocupantes no pueden transitar por ellas.

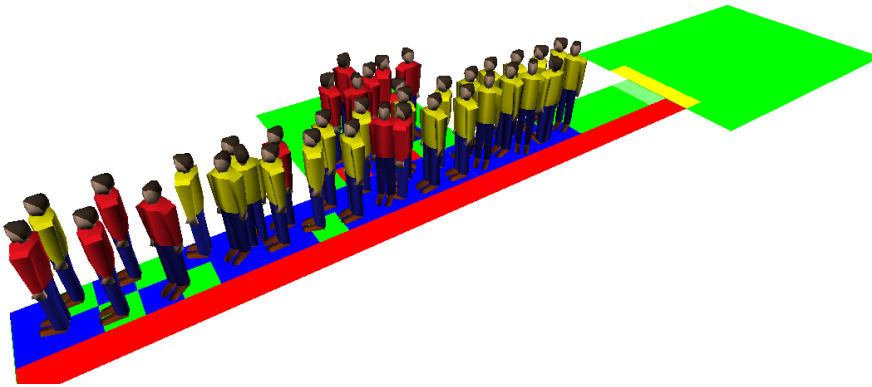


Fig. 15. Simulación ejemplo para altura de la salida de tren a 0 m.

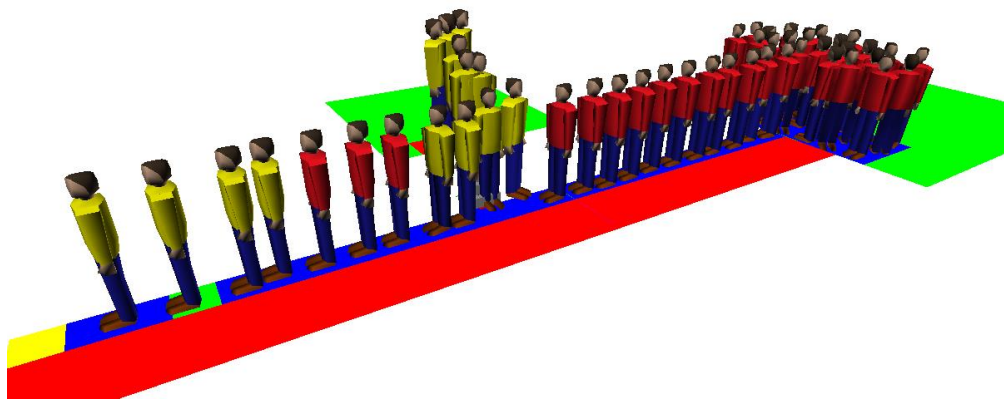


Fig. 16. Simulación ejemplo para altura de la salida de tren a 0.8 m.

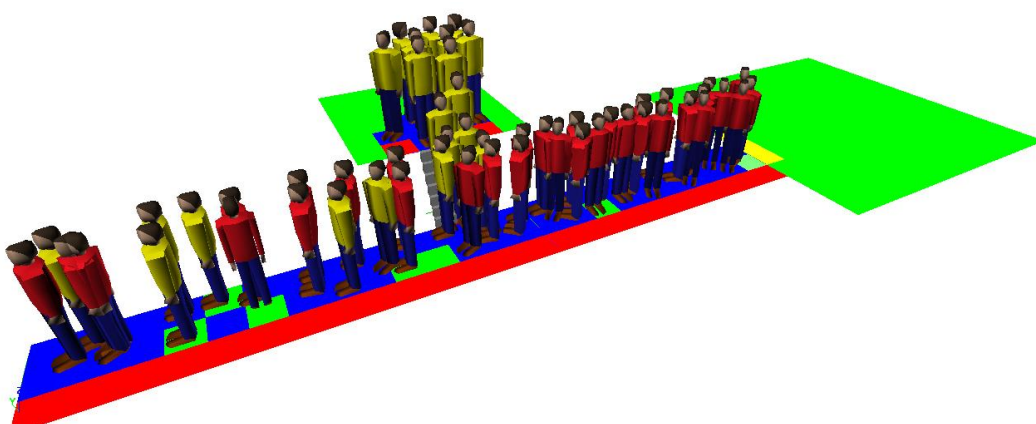


Fig. 17. Simulación ejemplo para altura de la salida de tren a 1.2 m.

El modelo STEPS exporta los resultados en dos tipos de formato diferentes. Un archivo de tipo texto en donde se detallan las características de las simulaciones y posibles errores y otro archivo Excel en donde se encuentran todos los datos de las variables solicitadas. En este caso, las variables a medir fueron el tiempo de evacuación, el número de personas que salen del modelo y el flujo de personas medido en las líneas de referencia cada segundo. Para que las simulaciones se asemejasen lo más posible a los experimentos reales solo se realizó una simulación por prueba.

De todas las variables obtenidas nos centraremos en los resultados constantes del flujo de personas. STEPS mide el flujo específico midiendo la cantidad de personas por tiempo.

4. Resultados

4.1. Resultados de los experimentos

Para analizar los resultados obtenidos, hay que tener en cuenta la asunción inicial en la que se basa la investigación: el flujo de la salida del tren y el flujo del pasillo son dependientes entre sí.

El primer paso para determinar la relación entre ambos flujos fue calcular el coeficiente de correlación entre los pares de muestras de flujos mediante dos métodos: Pearson y Spearman.

Coeficiente de Correlación de Pearson

En estadística, el método de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Se emplea para medir el grado de relación de dos variables cuantitativas y continuas. El valor del índice de correlación varía en el rango [-1,1], indicando el sentido de la relación con el signo:

- Si $r = 1 \rightarrow$ existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa (cuando una variable aumenta, la otra aumenta en proporción constante).
- Si $0 < r < 1 \rightarrow$ existe una correlación positiva.
- Si $r = 0 \rightarrow$ no existe una relación lineal. No implica que las variables sean independientes, todavía pueden existir relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $-1 < r < 0 \rightarrow$ existe una correlación negativa.
- Si $r = -1 \rightarrow$ existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación inversa (cuando una variable aumenta, la otra disminuye en proporción constante).

El coeficiente de correlación de Pearson se calcula con la siguiente fórmula (6):

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (6)$$

Coeficiente de correlación de Spearman

En estadística, el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) es una medida de la interdependencia entre dos variables aleatorias continuas y discretas. Evalúa la relación monótona entre esas dos variables. Para calcular el coeficiente los datos se ordenan. La interpretación del coeficiente es igual que la de Pearson: oscila entre [-1, +1] indicando asociaciones negativas o positivas, respectivamente. Cero significa no correlación, pero no independencia.

El coeficiente de correlación de Spearman se calcula con la siguiente fórmula (7), donde D es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de x-y y N es el número de parejas de datos.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (7)$$

Para realizar el cálculo de ambos coeficientes de correlación se desarrolló un programa en Visual Studio, en el que introduciendo un archivo Excel con los datos de los pares de muestras de los flujos se obtienen sus correspondientes coeficientes de correlación. El código fuente del programa se encuentra en el Anexo I del presente trabajo.

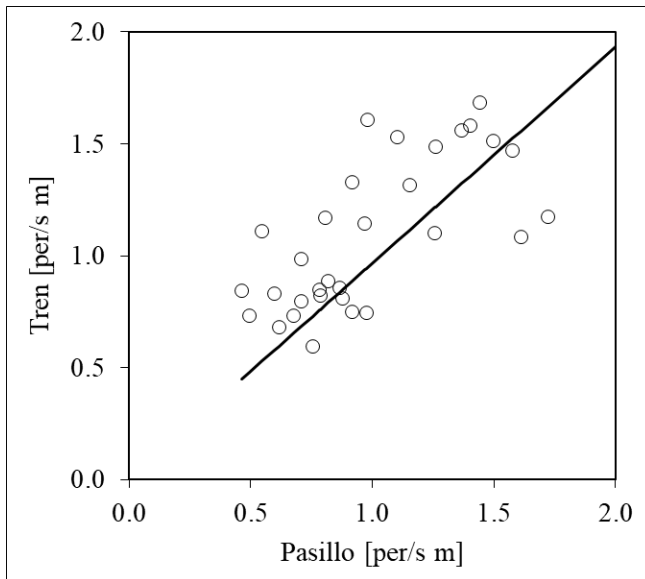
Los resultados de los coeficientes de correlación se muestran en la Tabla 10.

| Clustering | Grupos | h=0 m | | h=0.8 m | | h=1.2 m | |
|------------|--------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| | | Pearson | Spearman | Pearson | Spearman | Pearson | Spearman |
| A | 6 per | 0.41455 | 0.47815 | 0.49134 | 0.48739 | 0.27814 | 0.17734 |
| | 8 per | 0.56803 | 0.66886 | 0.5653 | 0.41217 | 0.52307 | 0.43896 |
| | 10 per | 0.72121 | 0.72895 | 0.73421 | 0.61471 | 0.72589 | 0.3956 |
| B | 5 s | 0.45834 | 0.44257 | 0.33653 | 0.18291 | 0.29427 | 0.09901 |
| | 7.5 s | 0.58662 | 0.55882 | 0.59305 | 0.53854 | 0.62356 | 0.44737 |
| | 10 s | 0.65421 | 0.63282 | 0.63368 | 0.6015 | 0.62873 | 0.37668 |

Tabla 10. Coeficientes de correlación de Pearson y Spearman.

Para que se pueda asumir que las variables tienen una relación lineal entre sí, los coeficientes de correlación de Pearson deben ser superiores a 0.7. De todos los resultados, el único que cumple este requisito es el grupo de 10 personas del *clustering* A.

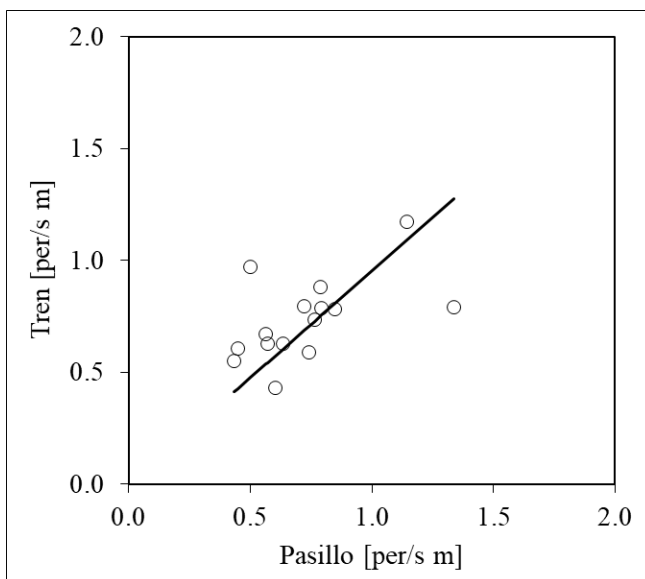
Por ese motivo, este es el tipo de *clustering* que mejor resulta para graficar los datos y analizar su interdependencia. Así, los pares de muestras de flujo del grupo de 10 personas se grafican junto con su línea de regresión. Con el valor de la pendiente podremos determinar la relación entre ambos flujos. Se grafican los pares de muestras correspondientes a las tres alturas de la salida del tren. Los resultados se muestran en las Figuras 18 a 20.



Pendiente de la línea
de regresión:

0.966167

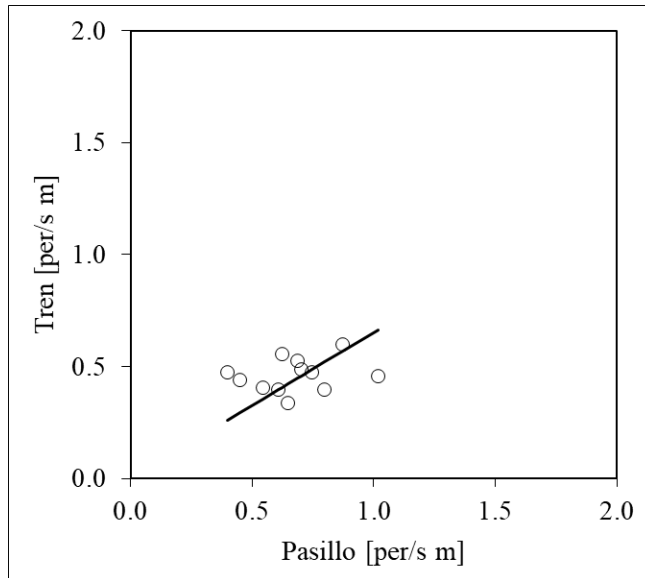
Fig. 18. Resultados para el subgrupo de 10 personas a h=0 m.



Pendiente de la línea
de regresión:

0.952071

Fig. 19. Resultados para el subgrupo de 10 personas a h=0.8 m.



Pendiente de la línea
de regresión:

0.651688

Fig. 20. Resultados para el subgrupo de 10 personas a $h=1.2$ m.

Como se puede ver en las gráficas, las pendientes son menores de 1 y por lo tanto tienden al eje x (eje del pasillo) en todas las alturas. Por esta razón, el flujo del pasillo presenta prioridad frente al flujo de la salida del tren. Además, la pendiente para altura $h = 0$ m es de 0.966167, para una altura de $h = 0.8$ m es de 0.952071 y para la altura de $h = 1.2$ m es de 0.651688, por lo que a mayor altura mayor prioridad del pasillo lateral.

4.2. Resultados de las simulaciones

El objetivo de realizar las simulaciones era poder determinar si los modelos computacionales reflejan la realidad de los experimentos. Por lo tanto, en este apartado se muestran los resultados del modelo STEPS y se realiza una comparación de estos con los resultados de los experimentos.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones se crearon 6 muestras de flujos: para los datos del tren y de la pasarela en función de cada una de las tres alturas. Como con los resultados de los experimentos, se calcularon las medias y desviaciones estándar de cada una de estas muestras, después de quitar los *outliers* correspondientes. Para poder compararlos con los datos obtenidos de los experimentos se graficaron los datos, como se muestra en la Figura 21 (para el pasillo lateral) y en la Figura 22 (para el tren). En la Tabla 11 se muestran los datos numéricos, tanto de las simulaciones como de los experimentos. Todos los datos son los resultados de los flujos cuando se produce confluencia.

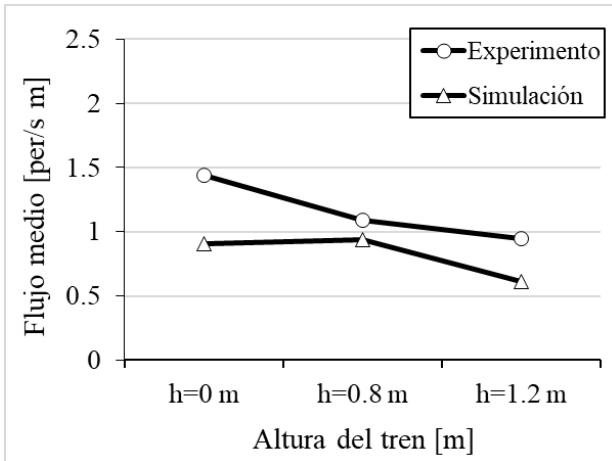


Fig. 21. Comparativa de resultados para el pasillo lateral.

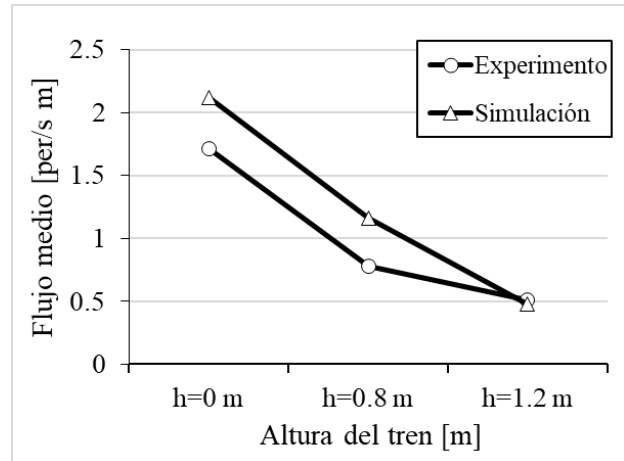


Fig. 22. Comparativa de resultados para la salida del tren.

| Tipo | Origen | h (m) | # | Promedio [per/s m] | D. E.* [per/s m] |
|-------------|---------|-------|-----|--------------------|------------------|
| Experimento | Pasillo | 0 | 228 | 1.44 | 0.15 |
| Simulación | Pasillo | 0 | 103 | 0.91 | 0.40 |
| Experimento | Pasillo | 0.8 | 126 | 1.09 | 0.11 |
| Simulación | Pasillo | 0.8 | 81 | 0.94 | 0.42 |
| Experimento | Pasillo | 1.2 | 104 | 0.95 | 0.10 |
| Simulación | Pasillo | 1.2 | 107 | 0.61 | 0.48 |
| Experimento | Tren | 0 | 217 | 1.71 | 0.21 |
| Simulación | Tren | 0 | 106 | 2.12 | 0.48 |
| Experimento | Tren | 0.8 | 100 | 0.78 | 0.05 |
| Simulación | Tren | 0.8 | 81 | 1.16 | 0.26 |
| Experimento | Tren | 1.2 | 87 | 0.51 | 0.04 |
| Simulación | Tren | 1.2 | 99 | 0.48 | 0.11 |

* Desviación Estándar

Tabla 11. Resultados de las simulaciones y comparativa con los resultados de los experimentos.

Como se puede observar los valores de las simulaciones difieren mucho de los resultados de los experimentos. Tampoco se encuentra un patrón en los resultados: en los datos del pasillo los valores disminuyen respecto a los experimentos y en los datos del tren aumentan, excepto para una altura de 1.2 m que disminuyen.

Por lo tanto, es presumible establecer que el modelo computacional empleado no puede representar los experimentos reales. Para entender el porqué de estos resultados hay que explicar el funcionamiento del modelo STEPS. Los agentes se mueven a través del modelo mediante celdas, siempre y cuando la celda a la que se desplacen se encuentre vacía. Si esta celda está ocupada por otro agente, esperarán hasta que quede libre. Por otro lado, los agentes tienen un objetivo (en este caso la salida al final del pasillo) y se desplazarán por el modelo hasta alcanzarlo. En este desplazamiento tienen prioridad aquellos agentes que se encuentren más cerca de dicho objetivo. Debido a la primera razón, en las pruebas con altura de la salida del tren de 0.8 y 1.2 m los agentes no descienden de manera continua por la escalera puesto que, en la mayor parte del tiempo, las celdas se encuentran ocupadas por los agentes del pasillo. Por la segunda razón, los resultados muestran que la prioridad la tienen los agentes del tren, ya que se encuentran más cerca de la “salida”. También hay que tener en cuenta que en el modelo no se pueden implementar factores reales como comportamientos deferentes. Además de lo anterior, el ancho de la salida del tren y del pasillo influye en el número de agentes que cruzan las líneas de referencia. En 0.8 m de ancho pasa un único agente, mientras que para un ancho de 1.2 m pasan dos agentes.

5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

El conocimiento del proceso de confluencia de flujos durante la evacuación en túneles ferroviarios tiene gran importancia para la seguridad de las personas. Sin embargo, al revisar la literatura, no se encontraron datos sobre la interacción entre el flujo de personas transitando por el túnel y el flujo de los que salen del tren en un túnel ferroviario. El foco de esta investigación tiene como factor principal el análisis de este proceso en diferentes configuraciones de salida del tren. Este trabajo propone un método nuevo para determinar la interdependencia entre ambos flujos. Se emplearon conjuntos de datos obtenidos del desarrollo de experimentos de evacuación en una maqueta de una salida de tren y un pasillo lateral. Se analizaron ocho configuraciones distintas de la salida del tren, modificando la altura de la salida y el ancho de la salida del tren y el pasillo lateral. Los experimentos fueron realizados por 77 participantes, que configuraban una muestra representativa de los futuros usuarios del transporte ferroviario (edad media 48 años) con una proporción razonable de personas adultas (el 29 % tenía más de 60 años).

Los flujos específicos se han usado hasta ahora para describir el número de personas que cruzan un punto en un tiempo dado [34], pero el uso de estos flujos tiende a promediar las dificultades personales y las limitaciones de un flujo de salida [35]. La hipótesis del análisis presentado en este trabajo es que la confluencia de flujos es mutuamente dependiente, por ello se necesitaba obtener valores de movimiento individuales y no valores promedio o valores totales. Además, hay que tener en cuenta que ahora los modelos de simulación requieren distribuciones estadísticas en lugar de valores constantes para generar probabilidades en los resultados [8]. De hecho, los modelos actuales de evacuación utilizan distribuciones para representar el comportamiento de salida de los pasajeros [5, 6, 35]. Por lo tanto, en este trabajo fueron propuestos nuevos métodos de medida para obtener muestras aleatorias de flujo para análisis estadísticos. La nueva variable aleatoria propuesta (flujo instantáneo específico) deriva de una forma directa de medir los flujos mediante intervalos de tiempo entre participantes que cruzan una línea de referencia. Los flujos calculados (para confluencia y no confluencia) se clasificaron y combinaron para obtener un total de 10 muestras de flujo para analizar estadísticamente. Este análisis estadístico confirmó que la presencia de personas en el área de confluencia y la diferencia de altura de la salida del tren afectan a los flujos de la salida del tren y del pasillo.

Para analizar el proceso de confluencia se emplearon únicamente los datos de flujos instantáneos específicos cuando convergen. Las muestras de flujo se transformaron en pares de muestras con un novedoso método de *clustering*, empleando grupos de participantes y grupos definidos por intervalos de tiempo. Se examinaron tres condiciones de salida de tren diferentes, dependiendo de la diferencia de altura para 0, 0.8 y 1.2 m. Por el método de regresión se calculó la pendiente de cada muestra de flujo y se graficó junto con sus correspondientes pares de muestras. De los resultados puede establecerse que, para una configuración de tren con una salida a un pasillo lateral, los ocupantes que transitan por el pasillo tienen prioridad frente a los ocupantes del tren (el grado en que esto se produce es variable). Cuando la diferencia de altura entre la salida del tren y el pasillo es nula, se observó un equilibrio entre la confluencia de flujos (es decir, los participantes del tren y del pasillo accedieron casi equitativamente al área de confluencia). Con una diferencia de altura de 0.8 m, se encontró una dominancia moderada del flujo del pasillo. Finalmente, para una diferencia de altura de 1.2 m hay una prioridad clara del flujo del pasillo sobre el flujo de salida del tren. Además, en los experimentos donde existe diferencia de altura se observó que los participantes del pasillo tuvieron comportamientos deferentes, parar para ayudar a descender a los participantes del tren o reducir su velocidad de desplazamiento. A pesar de estos comportamientos, los resultados demuestran que cuanto mayor es la diferencia de altura de la salida del tren, mayor dominancia tiene el flujo del pasillo.

A la luz de los resultados obtenidos con STEPS, puede afirmarse que el modelo es válido para prescribir este tipo de experimentos, pero no para modelarlos. Las limitaciones que presenta el modelo en cuanto a la implementación de factores que tienen lugar en los experimentos reales limita excesivamente la realización de simulaciones que puedan considerarse como referentes para el análisis. Por esta razón, sería necesario el desarrollo de modelos de simulación que permitan la realización de este tipo de experimentos.

Los resultados derivados de este trabajo pueden tener importantes implicaciones para los diseños futuros de túneles ferroviarios, para los ingenieros de seguridad contra incendios o para la definición de procedimientos de evacuación adecuados. En general, hay una falta de similitud en los requisitos que se usan para diseñar los procedimientos de evacuación en túneles ferroviarios.

Por ejemplo, el ancho mínimo recomendado para el pasillo lateral varía desde 0.80 m [48] hasta los 1.45 m [49]. También existe una falta de definición en cuanto a la altura entre el suelo del tren y el pasillo. Los resultados sugieren un pasillo a la altura del suelo del tren para facilitar una evacuación efectiva. Es importante tener en cuenta que algunos participantes se retiraron de los experimentos donde existía diferencia de altura (un 7.69 % para 0.8 m de altura y un 26.32 % para 1.2 m de altura).

Por último, es probable que las personas evacuadas abandonen el tren a través de varias salidas y podría ser plausible realizar una evacuación controlada dando prioridad a los pasajeros que se encuentren más cerca de la emergencia. De esta manera, se minimizaría el tiempo de exposición al peligro y se reduciría la congestión, como ya se concluyó anteriormente en [11, 13, 50]. Otra estrategia podría ser cerrar ciertas salidas con el fin de reducir los puntos de confluencia, permitiendo el movimiento rápido y seguro de los pasajeros por el interior del tren [5].

Aunque los resultados pueden proporcionar cierto apoyo para futuros análisis, hay algunas limitaciones que deberían abordarse en futuras investigaciones. A pesar de que la maqueta era suficientemente flexible para el desarrollo de distintas configuraciones de salida del tren, ciertos factores no se tuvieron en cuenta como: condiciones de visibilidad, comportamientos colectivos o presencia de humo. Esto puede llevar a una falta de realismo, ya que son factores que pueden afectar a evacuaciones reales. Por lo tanto, es necesario complementar los resultados presentados con futuros trabajos que deberán llevarse a cabo, preferiblemente, en entornos de túneles reales.

Referencias

- [1] Capote, J.A., Alvear, D., Abreu, O., Lázaro, M. and Cuesta, A., *An evacuation model for high speed trains*, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 421-431, 2011.
- [2] Alonso, V., Abreu, O., Cuesta, A. and Silió, D., *A New Approach for Modelling Passenger Trains Evacuation Procedures*, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 160, pp. 284-293, 2014.
- [3] BSI, PD 7974-6, *The Application of Fire Safety Engineering Principles to [the] Fire Safety Design of Buildings, Human Factors: Life Safety Strategies, Occupant Evacuation, Behaviour and Condition*, British Standards Institute, London, 2004.
- [4] Ronchi, E., Colonna, P., Capote, J., Alvear, D., Berloco, N. and Cuesta, A., *The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 30, pp. 74-84, 2012.
- [5] Capote, J., Alvear, D., Abreu, O. and Cuesta, A., *Analysis of evacuation procedures in high speed trains fires*, *Fire Safety Journal*, vol. 49, pp. 35-46, 2012a.
- [6] Capote, J., Alvear, D., Abreu, O., Cuesta, A. and Alonso, V., *A stochastic approach for simulating human behavior during evacuation process in passenger trains*, *Fire Technology*, vol. 48, pp. 911-925, 2012b.
- [7] Cuesta, A., Alvear, D., Abreu, O. and Silió, D., *Real-time stochastic evacuation models for decision support in actual emergencies*, *Fire Safety Science- Proceedings of the 11th International Symposium, New Zealand*, vol. 11, pp. 1063-1076, 2014.
- [8] Cuesta, A., Abreu, O. and Alvear, D., *Future challenges in evacuation modelling*, *Evacuation Modeling Trends*, Ed. Springer International Publishing, pp. 103-129, 2016.
- [9] Wang, W. L. and Jacqueline Lo, T. Y., *A Simulation Study on Passenger Escape in Rail Tunnels*, *Procedia Engineering*, vol. 71, pp. 552-557, 2014.
- [10] Weyenberge, B. V. and Deckers, X., *Development of a risk assessment method for fire in rail tunnels*, *7th International Conference: Tunnel Safety and Ventilation*, Graz, pp. 180-189, 2014.
- [11] Fridolf, K., Nilsson, D. and Frantzich, H., *The flow rate of people during train evacuation in rail tunnels: Effects of different train exit configurations*, *Safety Science*, vol. 62, pp. 515-529, 2014a.
- [12] Fridolf, K., Nilsson, D. and Frantzich, H., *Evacuation of a Metro Train in an Underground Rail Transportation System: Flow Rate Capacity of Train Exits, Tunnel Walking Speeds and Exit Choice*, *Fire Technology*, vol. 52, pp. 1481-1518, 2016.

- [13] Oswald, M., Kirchberger, H. and Lebeda, C., *Evacuation of a high floor metro train in a tunnel situation: experimental findings*, Fourth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, PED 2008, Springer, University of Wuppertal, Germany, pp. 67–81, 2008.
- [14] Norén, A. and Winér, J., *Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels-Data and design for faster evacuations*, Report 5127, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2003.
- [15] Seike, M., Kawabata, N. and Hasegawa, M., *Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 53, pp. 61-67, 2016.
- [16] Frantzich, H. and Nilsson, D., *Evacuation experiments in a smoke filled tunnel*, Proceedings of 3rd International Symposium Human Behaviour in Fire, Belfast, United Kingdom, pp. 229– 238, 2004.
- [17] Lundström, V., Ahlfont, J. and Nilsson, D., *The effect of raised walkway design on evacuation behaviour in rail tunnels*, in IAFSS Fire Safety Science, New Zealand, vol. 11, pp. 1091-1102, 2014.
- [18] Oswald, M., Kirchberger, H. and Lebeda, C., *Evacuation of a high floor metro train in a tunnel situation: experimental findings*, PED 2008, Springer, University of Wuppertal, Germany, pp. 67-81, 2008.
- [19] Nilsson, D. and Johansson, A., *Social influence during the initial phase of a fire evacuation - Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre*, Fire Safety Journal, vol. 44, pp. 71-79, 2009.
- [20] Jones, B. K. and Hewitt, J. A., *Leadership and group formation in high-rise building evacuations*, Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, pp. 513-522, 1986.
- [21] Cuesta, A., Abreu, O. and Alvear, D., *Methods for measuring collective behaviour in evacuees*, Safety Science, vol. 88, pp. 54-63, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.04.021>
- [22] Boyce, K. E., Purser, D. A. and Shields, T. J., *Experimental studies to investigate merging behaviour in a staircase*, Fire and Materials, vol. 36, pp. 383–398, 2012.
- [23] Peacock, R.D., Reneke, P.A., Kuligowski, E.D. et al., *Movement on Stairs During Building Evacuations*, Fire Technology, vol. 53, pp. 845-871, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0603-5>
- [24] Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y. and Nilsson, D., *Modelling pedestrian merging in stair evacuation in multi-purpose buildings*, Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 85, pp. 80-94, 2018.
- [25] Shiwakoti, N., Gong, Y., Shi, X. and Ye, Z., *Examining influence of merging architectural features on pedestrian crowd movement*, Safety Science, vol. 75, pp. 15–22, 2015.
- [26] Peng, Y. and Chou, C., *Simulation of pedestrian flow through a “T” intersection: A multi-floor field cellular automata approach*, Computer Physics Communications, vol. 182, no. 1, pp. 205-208, 2011.
- [27] Lian, L., Mai, X., Song, W., Richard, Y., Rui, Y. and Jin, S., *Pedestrian merging behaviour analysis: An experimental study*, Fire Safety Journal, vol. 91, pp. 918-925, 2017.

- [28] Eurostat population projections: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/People_in_the_EU_%E2%80%93_population_projections .
- [29] European Commission, Commission Regulation (EU) No 1303/2014 of 18 November 2014, *Concerning the technical specification for interoperability relating to 'safety in railway tunnels' of the rail system of the European Union*, Official Journal of the European Union, 2014.
- [30] Predtechenskii, V. M. and Milinskii, A. I., *Planning for foot traffic in buildings*, Stroizdat Publishers, Moscow, 1969, English translation published for the National Bureau of Standards and the National Science Foundation, Amerind, New Delhi, India, 1978.
- [31] Fruin, J. J., *Pedestrian planning and design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [32] Pauls, J. L., *Effective-Width Model for Evacuation Flow in Buildings*, Proceedings of Engineering Applications Workshop, Society of Fire Protection Engineers, Boston, 1980.
- [33] Nelson, H.E. and Mowrer, F.W., *Emergency movement*, in: P.J. DiNenno, et al. (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, third edition, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, pp. 3-367-3-380, 2002.
- [34] Gwynne, S.M.V. and Rosenbaum, E.R., *Employing the hydraulic model in assessing emergency movement*, in: Hurley M.J. et al. (eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, fifth edition, Springer, New York, pp. 2115-2151, 2016.
- [35] Galea, E. R., Blackshields, D., Finney, K. M. and Cooney, D. P., *Passenger Train Emergency Systems: Development of Prototype railEXODUS Software for U.S. Passenger Rail Car Egress*, Final Report, U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2014.
- [36] Gwynne, S.M.V., Kuligowski, E.D., Kratchman, J. and Milke, J.A., *Questioning the linear relationship between doorway width and achievable flow rate*, *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 80–87, 2009.
- [37] Maronna, R.A. and Yohai, V.J., *The behaviour of the Stahel-Donoho robust multivariate estimator*, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 90, pp. 330–341, 1995, DOI:10.1080/01621459.1995.10476517.
- [38] Hubert, M. and Vandervieren, E., *An adjusted boxplot for skewed distributions*, *Computational Statistics and Data Analysis*, vol. 52, no. 12, pp. 5186–5201, 2008.
- [39] Brys, G., Hubert, M. and Struyf, A., *A robust measure of skewness*, *Computational Graphical Statistics*, vol. 13, pp. 996–1017, 2004.
- [40] Tukey, J.W., *Exploratory Data Analysis*, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1977.
- [41] Mann, H.B. and Whitney, D.R., *On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other*, *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, pp. 50–60, 1947.

- [42] Fay, M.P. and Proschan, M.A., *Wilcoxon–Mann–Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules*, *Statistics Surveys*, vol. 4, pp. 1–39, 2010.
- [43] Stephens, M.A., *Edf statistics for goodness of fit and some comparisons*, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 69, no. 347, pp. 730–737, 1974.
- [44] Ruxton, G.D., *The unequal variance t-test is an underused alternative to Student's t-test and the Mann-Whitney U test*, *Behavioral Ecology*, vol.17, pp. 688–690, 2006.
- [45] Mott MacDonald, *STEPS Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian movements User Manual*, unpublished, available with egress model from Mott MacDonald.
- [46] Wall, J.M. and Waterson, N.P., *Predicting Evacuation Times – A Comparison of the STEPS Simulation Approach with NFPA 130*, Mott MacDonald Limited, St Anne House, Wellesley Road, Croydon CR9 2UL, Submitted to Fire Command Studies.
- [47] Hoffman, N.A. and Henson, D.A., *Simulating Transient Evacuation and Pedestrian Movement in Stations*, Mott MacDonald Limited, Presented at the International Conference On Mass Transit Management, Kuala Lumpur, Malaysia, May 1997.
- [48] European Commission, *Concerning the technical specification for interoperability relating to 'safety in railway tunnels' of the rail system of the European Union*, *Official Journal of the European Union*, Commission Regulation (EU), no. 1303/2014, 2014.
- [49] Fire in Tunnels, *Fire Safe Design-Rail Tunnels*, European Thematic Network Fire in Tunnels, Technical report part 2. [Online]. Available: <https://www.iroads.co.il/sites/default/files/imce/fit - fire in tunnels - part 2.pdf>
- [50] Oswald, M., Schjerve, N. and Lebeda, C., *Carriage evacuations in local, public rail transportation systems in case of fire experiments, findings and human behavior*, in: *Advanced Research Workshop on Evacuation and Human Behavior in Emergency Situations*. Santander, Spain, pp. 309–336, 2011.

ANEXO I

```
D:\VS 2017\Correlation\Correlation\Form1.cs 1
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.ComponentModel;
4 using System.Data;
5 using System.Drawing;
6 using System.Linq;
7 using System.Text;
8 using System.Threading.Tasks;
9 using System.Windows.Forms;
10 using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
11
12 namespace Correlation
13 {
14     public partial class Form1 : Form
15     {
16         public Excel.Application xlapp;
17         public Excel.Workbook xlwb;
18         public Excel.Worksheet xlws;
19         public string nal;
20         public CorrelationCoefficients ccf;
21
22         int npar;
23         public double[] x, y;
24
25         public Form1()
26         {
27             InitializeComponent();
28         }
29         private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
30         {
31             if (openFileDialog1.ShowDialog() == DialogResult.OK)
32             {
33                 nal = openFileDialog1.FileName;
34                 textBox1.Text = nal;
35                 xlapp = new Excel.Application();
36                 xlwb = xlapp.Workbooks.Open(nal);
37                 xlws = xlwb.Sheets[1];
38
39                 npar = xlws.UsedRange.Rows.Count - 1;
40                 x = new double[npar];
41                 y = new double[npar];
42
43                 for (int i = 0; i < npar; i++)
44                 {
45                     x[i] = Convert.ToDouble(xlws.Cells[i + 2, 1].Value2);
46                     y[i] = Convert.ToDouble(xlws.Cells[i + 2, 2].Value2);
47                 }
48                 xlwb.Close();
49                 xlapp.Quit();
50                 button2.Enabled = true;
51             }
52         }
53
54         private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
55         {
56             ccf = new CorrelationCoefficients(x, y);
```

```
D:\VS 2017\Correlation\Correlation\Form1.cs 2
57         textBox2.Text = ccf.rpearson.ToString("#0.#####");
58         textBox3.Text = ccf.rspearman.ToString("#0.#####");
59     }
60
61     private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
62     {
63         Close();
64     }
65
66 }
67 }
68
```

```
D:\WS 2017\Correlation\Correlation\CorrelationCoefficients.cs 1
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.Linq;
4 using System.Text;
5 using System.Threading.Tasks;
6
7 namespace Correlation
8 {
9     public class CorrelationCoefficients
10    {
11        public int n;
12        public double[] x, y;
13        public double rpearson, rspearman;
14        public CorrelationCoefficients(double[] x1, double[] y1)
15        {
16            n = x1.Length;
17            x = x1;
18            y = y1;
19            PearsonCoef();
20            SpearmanCoef();
21        }
22
23        public void PearsonCoef()
24        {
25            double s1, s2, s3, s4, s5;
26            s1 = s2 = s3 = s4 = s5 = 0;
27
28            for (int i = 0; i < n; i++)
29            {
30                s1 += x[i];
31                s2 += y[i];
32                s3 += x[i] * y[i];
33                s4 += x[i] * x[i];
34                s5 += y[i] * y[i];
35            }
36
37            double a = n * s3 - s1 * s2;
38            double b1 = Math.Sqrt(n * s4 - s1 * s1);
39            double b2 = Math.Sqrt(n * s5 - s2 * s2);
40            rpearson = a / (b1 * b2);
41        }
42
43        public void SpearmanCoef()
44        {
45            double[] v1, v2;
46            int[] dx, dy;
47
48            v1 = new double[n];
49            v2 = new double[n];
50            Array.Copy(x, v1, n);
51            Array.Copy(y, v2, n);
52            Array.Sort(v1);
53            Array.Sort(v2);
54            Array.Reverse(v1);
55            Array.Reverse(v2);
56            dx = new int[n];
```

```
D:\VS 2017\Correlation\Correlation\CorrelationCoefficients.cs 2
57     dy = new int[n];
58
59     double s = 0;
60     double a;
61     for (int i = 0; i < n; i++)
62     {
63         dx[i] = Array.IndexOf(v1, x[i]);
64         dy[i] = Array.IndexOf(v2, y[i]);
65
66         a = ((double)dx[i] - (double)dy[i]);
67         s += a * a;
68     }
69
70     rspearman = 1 - (6 * s / (n * (n * n - 1)));
71 }
72
73 }
74 }
75
```