



# XI CONGRESO DE LOS SERVICIOS DE EMERGENCIA

9-11 OCTUBRE 2013 MUSEO MARITIMO RIA DE BILBAO BILBAO

## EVACUACIÓN DE EDIFICIOS: MODELOS Y HERRAMIENTAS

Salvador Casadesús Pursals  
Federico Garriga Garzón

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica de Terrassa  
Universidad Politécnica de Catalunya, ETSEIAT  
c/ Colom 11  
08222 TERRASSA

[salvador.casadesus@upc.edu](mailto:salvador.casadesus@upc.edu), [federico.garriga@upc.edu](mailto:federico.garriga@upc.edu)

### Resumen

En este trabajo se analizan los modelos y herramientas utilizados en el estudio de la evacuación de edificios. En la actualidad el problema de la evacuación de edificios ha sido tratado ampliamente desde diferentes disciplinas, toda esta información se clasifica en siete grandes apartados: Estudio de casos, estudio de las dimensiones de las personas y su locomoción, modelos matemáticos, modelos de simulación, estudios de psicología/ciencias del comportamiento y herramientas para la solución del problema, finalmente debe considerarse que muchos de los trabajos publicados en la actualidad se sitúan dentro de varias disciplinas y debe hablarse de modelos multidisciplinarios. Y un estudio en profundidad de los modelos actuales supone que dentro de cada apartado pueden establecerse diferentes sub-apartados.

### 1. Introducción

El problema de la evacuación de edificios nace con los edificios de grandes dimensiones y la valoración de la vida y la seguridad de las personas. Existen muchas situaciones en las cuales existe una gran concentración de personas: Centros comerciales, edificios de oficinas, recintos deportivos, actividades culturales y de ocio entre otros. En estos casos, los responsables de la seguridad de los ocupantes deben estar preparados para responder a situaciones de emergencia, en la mayoría de casos debe ser posible el desplazamiento de los ocupantes a un lugar seguro de una forma rápida y eficaz, en otros casos la solución es el confinamiento.

Diferentes trabajos proporcionan una visión general de los modelos disponibles para el estudio del problema de la evacuación de edificios. Así S. Gwyne y otros (1999) analizaron las metodologías utilizadas en los estudios de evacuación. En las publicaciones "Pedestrian and Evacuation Dynamics" en diferentes años (desde 2001 hasta 2012) se puede encontrar una completa recopilación de trabajos, en uno de ellos S. A. Tjandra y H. W. Hamacher (2001) en el capítulo "Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of the Art" presentan una interesante clasificación de los modelos de optimización, Paul DeCicco en el texto "Evacuation from fires" de Applied Fire Science in Transition Series pueden verse diferentes trabajos sobre la

locomoción humana y el problema de la evacuación de edificios, Andreas Schadschneider y otros (2008) en “Encyclopaedia of Complexity and System Science” ofrecen un extraordinario documento sobre resultados empíricos, modelado y aplicaciones de la evacuación de edificios y finalmente Z. Xiaoping (2010) en “Modelling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches” proporciona una clasificación de los modelos utilizados en el estudio de este problema. También debe indicarse que una amplia referencia sobre el problema se halla en EVACMOD, en <http://www.evacmod.net/> en estos momentos pueden encontrarse más de 2500 referencias de trabajos sobre la evacuación de edificios.

Los modelos utilizados para la solución del problema de la evacuación también pueden clasificarse por el ámbito de aplicación: Edificios, recintos deportivos, aviones, barcos, trenes o áreas urbanas. Existen aplicaciones informáticas específicas para cada uno de estos casos.

Es posible establecer algunas de las características de los modelos utilizados en el estudio del problema:

- **Microscópicos o macroscópicos.** Los modelos microscópicos contemplan de forma independiente cada uno de los individuos implicados en el proceso de evacuación, de tal forma que las personas pueden tomar ciertas decisiones como la salida a la que quieren dirigirse, las separaciones con otros individuos o la formación de grupos. Mientras que cuando se considera globalmente el grupo de personas, con unas propiedades comunes a todos ellos, se habla de modelos macroscópicos.
- **Discretos o continuos.** Las variables que definen el proceso de evacuación tales como el espacio, el tiempo, las densidades de ocupación, las velocidades o los flujos entre otras, pueden ser discretas o continuas. Así por ejemplo, de los modelos que se describirán más adelante, los autómatas celulares constituyen un modelo discreto mientras que los modelos hidrodinámicos son unos modelos continuos.
- **Determinísticos o estocásticos.** La dinámica del proceso de evacuación puede considerarse determinística o estocástica. Los modelos determinísticos proporcionan unos determinados valores de las variables de forma intangible, mientras que los modelos estocásticos sobre los valores de las variables se halla asociado el azar, se trata pues de valores con una determinada probabilidad. Las magnitudes que rigen el problema de la evacuación tienen una naturaleza estocástica, sin embargo por simplicidad, en muchos casos se opta por la solución determinista.
- **Elementos pasivos o activos.** Puede decirse que la interacción entre los elementos del problema pueden implementarse de formas distintas, en los modelos pasivos las características de los individuos, por ejemplo, la posición que ocupan en un determinado instante, obedece tan solo a la situación que ocupa en el instante actual y la de los individuos ubicados en una zona contigua. Mientras que en los modelos activos, el individuo ubicado en una determinada posición, tiene capacidad de influir sobre los elementos de las celdas inmediatas. De los modelos que se van analizar, los autómatas celulares son modelos basados en elementos pasivos mientras que los modelos de fuerza social son modelos activos.
- **Precisos o aproximados.** Finalmente, en cuanto al realismo de la modelización puede hablarse de modelos precisos y de modelos aproximados. Los modelos precisos tratan de reproducir de forma minuciosa el movimiento de las personas, mientras que modelos más simples representan los individuos como elementos sin ninguna capacidad de decisión y en muchos casos se contemplan valores medios de las magnitudes que definen sus propiedades.

**2. Estudio de casos.** Los estudios de casos han dado lugar a normas y prescripciones técnicas de seguridad que se aplican en la actualidad en muchos países. Este tipo de estudios se inicia en los años setenta, se realiza la investigación de siniestros utilizando el método científico, sus resultados son muy relevantes, sobre todo por que tratan de identificar las causas de los siniestros y determinan aquellos aspectos que podrían haberlos evitado. Son pioneros en estos estudios J. L. Bryan (1983) en Estados Unidos y D. Wood en el Reino Unido (1982). Una referencia obligada es el capítulo 2 del libro “Egress Design Solutions” de J. S. Tubbs y B. Mecham (2006) en el cual se realiza la recopilación y análisis de siniestros acaecidos en cien años (1903-2003). En este apartado, resulta fundamental hacer referencia al esfuerzo realizado en el estudio de los atentados del WTC de New York (1993 y 2001) en el cual han participado diferentes autores en su área de especialización. En el ámbito del control de multitudes deben citarse los estudios sobre los accidentes en las peregrinaciones a La Meca y más recientemente sobre la tragedia del Love Parade de Duisburg (2010) realizados por D. Helbing.

**3. Modelos para el estudio de las dimensiones y la locomoción humana.** En los años ochenta también se inicia el estudio de las dimensiones y del movimiento de las personas, se trata de formulaciones de carácter empírico y experimental con buenos resultados prácticos y son la base de modelos posteriores. Una sólida referencia sobre la circulación de las personas en los edificios se halla en los trabajos desarrollados por J. Fruin (1971) en EEUU, J. L. Pauls (1984) en Canadá y Predtechenskii y Milinskii (1969-1978) en la Unión Soviética. Modelos más recientes sobre locomoción humana se deben a U. Weidmann (1992) y V. Kholshenikov (2007). Actualmente están disponibles multitud de trabajos sobre diferentes aspectos de la locomoción humana: La circulación en escaleras, el paso de puertas, el modelado de flujos en intersecciones o el desplazamiento de personas discapacitadas. Son formulaciones generales que pueden aplicarse a urbanismo, control de multitudes, ingeniería del transporte o seguridad contra incendios.

**4. Modelos matemáticos.** En el ámbito de las matemáticas existe una muy amplia referencia de trabajos que desde diferentes perspectivas estudian el problema.

- **Formulación básica del problema.** En este apartado se sitúan los modelos simples, son formulaciones próximas al ámbito de la construcción y de la seguridad contra incendios. Históricamente, son los primeros modelos que obtenían estimaciones de tiempos de evacuación, se trata de las formulaciones de K. Togawa publicadas por el “Building Research Institute” de Tokio (1955). Propuestas más avanzadas trataban de organizar las personas para conseguir tiempos de evacuación mínimos, en este ámbito se sitúan las publicaciones de S. J. Melinek y S. Booth en el Reino Unido (1975), J. L. Pauls en el Canadá (1976), E. Kendik en Austria (1983) y H. Nelson y H. McLennan (1997) en diferentes ediciones de “Handbook of Fire Protection Engineering” de NFPA/Society of Fire Protection Engineers. En esta publicación además de la obtención de tiempos de evacuación, de una forma simple, resuelven entre otros aspectos, el problema de los flujos en confluencias y en las ramificaciones.

- **Formulación física del problema.** La modelización del movimiento de las personas es posible pensarlo y estudiarlo como un fenómeno físico. Desde este planteamiento, surgen diferentes modelos, se trata de ecuaciones que relacionan las magnitudes inmersas en el problema, ciertamente constituyen una buena modelización, pero resulta compleja su aplicación directa a grandes recintos, incluso en edificios simples, surgen elementos de resolución de gran entidad que los hace poco viables.

- **Modelos basados en la dinámica de fluidos (Fluid-dynamic models FDM).** Estos modelos para modelar el movimiento de las personas toman como referencia la circulación de los fluidos, ecuaciones de derivadas parciales que describen como la densidad de ocupación y la velocidad de desplazamiento varían con el tiempo. L. F. Henderson (1974) estableció una analogía entre la masa de las personas y los principios físicos que rigen la dinámica de los gases, estableciendo una adaptación de las ecuaciones de Maxwell-Boltzmann. G. E. Bradley (1993) formuló la hipótesis que las ecuaciones de Navier-Stokes que modelan el movimiento de los fluidos pueden aplicarse para modelar el movimiento de las personas. R. L. Hughes (2002) estudió la selección del recorrido de evacuación mediante un modelo continuo a partir de la observación del comportamiento de los individuos y la comprensión de la mecánica del movimiento de la multitud, en grandes multitudes utilizó las ecuaciones de movimiento en dos dimensiones, para ello desarrolló un modelo en el cual, mediante unas hipótesis concretas, se opera con los que denomina “fluidos pensantes”.
- **Dinámica del movimiento de las personas.** Son modelos matemáticos de cierta complejidad que abordan el problema de la evacuación de edificios, derivan de modelos de tránsito, que ofrecen una estricta modelización de la locomoción humana. En principio puede resultar curioso que el origen de dichos modelos sea la circulación de los vehículos, sin embargo puede observarse que el desplazamiento de las personas resulta más complejo. Una referencia avanzada de estos modelos se halla en el texto “Pedestrian Dynamics” de Pushkin Kachroo y otros (2008) en el cual se usa la realimentación para el diseño del control de movimiento de las personas.
- **Modelos de optimización.** En principio los modelos de optimización son modelos macroscópicos, utilizan los modelos de locomoción descritos en apartados anteriores. La mayoría de modelos se sitúan en un entorno determinista, existen pocos trabajos en el entorno estocástico. La solución del problema de la evacuación de edificios evoluciona decisivamente al utilizarse redes de flujo, el edificio se representa mediante un grafo formado por nodos y arcos, cuyo desarrollo da lugar a las redes dinámicas de flujo, una red dinámica consiste en la expansión temporal del grafo. En la modelización del edificio mediante una red se plantean diferentes situaciones.
  - **Problema del máximo flujo dinámico (Maximum dynamic flow problems MDF).** Este planteamiento resuelve la situación de maximizar el flujo de llegada al destino en un horizonte temporal T. Normalmente se utiliza en aquellas situaciones en las cuales no existe información fiable del número de personas a evacuar.
  - **Problema de flujo máximo (Universal maximum flow problems UMF).** Es una variante del problema anterior, en la cual, en cada periodo del horizonte T, se trata de encontrar el flujo máximo de llegada al destino, algunos autores hacen referencia a este problema como “Earliest arrival dynamic flow”.
  - **Problema de la ruta más corta (Quickest path problems QPP).** El objetivo de este problema consiste en enviar un determinado número de unidades (en este caso personas) desde una posición inicial (nodo origen) a un nodo final (destino de evacuación) de la forma más rápida posible.

- **Problemas de flujo máximo (Quickest flow problems QFP).** En este caso la situación es similar al problema anterior, corresponde a una situación en la cual existen múltiples nodos origen y destino, entonces el objetivo consiste en enviar el máximo flujo para todos ellos.
- **Problemas multi-objetivo.** Se trata de resolver el problema planteando simultáneamente varios objetivos, situación ciertamente realista en muchos problemas de evacuación de edificios. Se busca la solución óptima considerando que cada objetivo tiene una ponderación.
- **Red dinámica con tiempo de circulación función de la densidad (Dynamic network with density dependent travel time).** Los modelos de locomoción muestran como las velocidades de desplazamiento y los flujos de circulación dependen de las densidades de ocupación. Modelos avanzados resuelven los problemas mediante redes dinámicas que contemplan dicha circunstancia.
- **Modelo continuo en una red dinámica de flujo (Continuous time dynamic network flow model).** Para resolver el problema mediante redes de flujo se opta por la discretización, en este caso se contempla la opción de la solución continua en la red dinámica.

Sobre estas variantes se ha investigado y se sigue buscando la mejor solución del problema. La primera formulación mediante redes de flujo se debe a G. N. Berlin (1980) mientras que la primera formulación para la optimización la realizó R. L. Francis (1981), posteriormente el propio R. L. Francis y otros (1982) plantearon la optimización de la evacuación de edificios incorporando la utilización de redes dinámicas de flujo, poco después, R. L. Francis y T. Kisko (1985) desarrollaron la primera versión del software EVACNET, una aplicación que determina tiempos de evacuación y la distribución óptima de los ocupantes hacia las salidas. Algunos años más tarde, W. Choi, S. Hamacher y S. Tufekcy (1988) consideraron redes de flujo con restricciones de capacidad y arcos con capacidad variable.

En los años noventa, resultan relevantes los trabajos de B. Hope y E. Tardos (1994), presentan algoritmos aplicables a redes dinámicas de flujo para problemas con múltiples nodos origen y destino. Más tarde S. Tjandra y S. Hamacher (2003) publican trabajos que resuelven diferentes situaciones, entre ellas la de flujos dependientes de la densidad de ocupación, estos mismos autores abordan problemas multiobjetivo en los cuales determinan la evacuación óptima de recintos estableciendo prioridades para los ocupantes más próximos a los puntos de mayor riesgo, finalmente existe la publicación de la tesis doctoral de S. Tjandra (2006). Debe indicarse que existen trabajos sobre el tratamiento multiobjetivo del problema de la evacuación de edificios realizados por M. M. Kostreva y T. Getachev (1991).

N. Baumann y M. Skutella (2007) desarrollan un algoritmo polinomial que resuelve el “Earliest arrival flow” con múltiples nodos origen y un nodo destino, también consideran el problema de flujo continuo. N. Kamiyama (2009) presenta una publicación en la cual desarrolla algoritmos para la implementación de la resolución de redes dinámicas. Z. Fang (2011) publica un trabajo para la optimización de grandes recintos deportivos. Le suceden trabajos que aportan soluciones eficaces mediante algoritmos genéticos, “colony ant” o “tabu search”.

Los modelos estocásticos básicamente consisten en el estudio del problema mediante redes de colas, existen autores como J. M. Smith que se han prodigado en esta línea, los primeros trabajos de este autor se inician en el año (1981) hasta la actualidad. Otros autores como G. Lovas (1995) han optado por resolver el problema de las redes de colas mediante simulación.

**5. Modelos de simulación.** Normalmente la solución analítica del problema de la evacuación de edificios no es simple, en muchos casos la simulación puede resultar una herramienta efectiva, su desarrollo es paralelo al de las herramientas informáticas, utilizan la simulación la mayoría de los programas y herramientas disponibles comercialmente en la actualidad para la solución de este problema en todos los ámbitos.

- **Autómatas celulares (Cellular Automata, CA).** Los autómatas celulares han sido utilizados para modelar el movimiento de las personas en el proceso de la evacuación de edificios. Un autómata celular consiste en un sistema dinámico discreto formado por una rejilla regular de celdas, el sistema evoluciona en intervalos de tiempo constante (periodos), en el cual el valor de las variables de cada una de las celdas se actualiza simultáneamente en función del valor de las variables de las celdas vecinas en el periodo anterior siguiendo unas reglas o principios de transición. Los CA son un modelo dinámico en el cual se ha discretizado el espacio y los individuos son considerados como unas partículas con un cierto grado de libertad que ocupan dichos elementos de espacio discretos.

Los primeros modelos de CA son los de "Fukui-Ishibashi model" y el "Blue Adler model" (2000). Dentro de los autómatas celulares los modelos pueden clasificarse en dos categorías. La primera categoría contempla la interacción entre el entorno y los ocupantes, estos modelos muestran el efecto de obstáculos, la magnitud de la anchura de las salida o las características del movimiento de las personas. Por ejemplo, D. L. Zhao (2006) propuso un modelo aleatorio de un CA de dos dimensiones para el estudio de la evacuación de los ocupantes de un recinto en un entorno dinámico. La segunda categoría consiste en modelos que contemplan la interacción entre los ocupantes. A. Kirchner (2003) propuso un modelo estocástico para el estudio de la evacuación de un recinto de una única salida considerando los efectos de las fricciones y obstaculizaciones que se producen entre los ocupantes en el proceso de evacuación. W. F. Fang (2003) propuso un modelo CA basado en el juicio humano para simular el desplazamiento bidireccional de los individuos cuando son críticas las densidades de ocupación.

- **Modelos basados en la dinámica de gases (Lattice gas models LGM).** A finales de los años ochenta se cuestionó que los modelos basados en la dinámica de fluidos fueran una modelización eficaz del movimiento de las personas, las complejas ecuaciones diferenciales se proponía sustituirlas por un modelo numérico que reproducía las características de la dinámica de los fluidos, de forma simple puede decirse que los LGM son un caso particular de los autómatas celulares a los que se aplica a cada partícula los principios físicos de los gases, entre las partículas existen colisiones e interacciones que son las responsables de propagar el movimiento de las mismas.

- **Modelos basados en la fuerza social (Social force models SFM).** Se considera que el movimiento de las personas se debe a las fuerzas sociales y a los objetivos de los individuos, inician estos modelos D. Helbing y P. Molnar (1995). En la actualidad, estos modelos además de contemplar aspectos puramente físicos incorporan interesantes aspectos de comportamiento de las personas, se trata de modelos microscópicos muy desarrollados de extraordinario interés. Según este modelo el movimiento de las personas depende conjuntamente de una serie de efectos psico-sociales y físicos, el primero de ellos consiste en la fuerza generada por las personas que quieren llegar a un determinado destino, el segundo en el efecto que las personas quieren mantener una cierta distancia a otras personas, el tercero en las separaciones a bordes y obstáculos como paredes, puertas o similares y finalmente como

cuarto efecto se considera que las personas pueden ser atraídas por otras personas u objetos. Actualmente existen modelos más avanzados que consideran efectos como el pánico.

- **Modelos basados en agentes (ABM).** Puede decirse que son modelos de cálculo que reproducen estructuras sociales, operan simulando los individuos como agentes virtuales que forman organizaciones sobre los que se aplican ciertos principios de actuación, tratan de reproducir escenarios propios de situaciones de emergencia como la ansiedad e incluso el pánico. Se han utilizado estos modelos para reproducir la actuación de multitudes en diferentes circunstancias.

**6. Psicología/Ciencias del comportamiento.** Indudablemente un aspecto esencial de la seguridad de las personas en los edificios es la posibilidad de desplazarse a un lugar seguro, en este sentido el conocimiento del comportamiento de las personas y la posibilidad de planificar actuaciones sobre la base de un pronóstico fiable de su comportamiento en situaciones críticas facilita la realización de planes de actuación eficaces. Por ello, a menudo se dice que los modelos de comportamiento en el estudio del problema de la evacuación de edificios o recintos densamente ocupados, son una de las opciones más útiles para reducir el número de víctimas en el caso de incidentes.

En este ámbito existen muchas publicaciones, debe destacarse por su situación en el tiempo el texto "Fires and Human Behaviours", excelente recopilación de D. Canter (1980), también resultan fundamentales los trabajos de J. D. Sime, uno de ellos "Crowd psychology and engineering" (1995) y más tarde (1999, 2001) introdujo el modelo ORSET (Occupant response shelter escape times), propuesta integradora en la cual se consideran conjuntamente los aspectos que determinan la evacuación de un edificio. Son numerosas las publicaciones sobre el comportamiento de las personas de G. Proulx, como: "As of year 2000, what do we know about occupant behaviour in fire?", "Occupant behaviour and evacuation" (2001) o "Understanding human behaviour in stress full situations" (2002). Resulta de gran interés, y de extraordinaria utilidad, la publicación "Fire response performance. The critical factors for a safe escape from buildings" de M. Kobes (2010). Finalmente debe hacerse referencia al trabajo "Predicting human behaviour during fires" de E. Kuligowski (2011).

En un entorno más próximo, debe hacerse mención a los trabajos realizador por el grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria, puede citarse "Human behaviour during trains evacuation: data collections an egress modelling" de J. A. Capote, D. Alvear, O. Abreu y A. Cuesta, A. (2011) y más concretamente la tesis doctoral de A. Cuesta presentada el año 2012 con el título "Enfoque metodológico para la caracterización de la conducta humana durante el proceso de evacuación en escenarios singulares", que constituye un estudio riguroso sobre la conducta humana en el proceso de evacuación de trenes.

**7. Modelos multidisciplinares.** En la clasificación realizada en apartados anteriores quedan muchos trabajos importantes y autores relevantes sin citar, posiblemente porque su aportación se halla entre varias disciplinas entre estos autores deben citarse R. Fahy, S. Gwynne, E. Galea, T. Shields, G. Lovas, H. Frantzich o E. Ronchi entre otros, con numerosas y relevantes aportaciones.

En lengua castellana es pionero en el estudio del problema de la evacuación de edificios y en la difusión de metodologías para su resolución J. L. Posada, también resultan muy relevantes los numerosos trabajos A. Capote, D. Alvear, A. Abreu y A. Cuesta del grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria, ya citados en los

modelos de comportamiento, desde 2005 hasta la actualidad existe referencia de numerosas publicaciones, se sitúan en este apartado de trabajos multidisciplinar por sus características de cubrir diferentes aspectos como: Estudio de evacuación de trenes, túneles o la interacción entre humos y movimiento de las personas, modelado de comportamiento o simulación entre otros aspectos.

**8. Herramientas para la solución del problema.** Finalmente se hace referencia a algunas de las herramientas de que disponemos en la actualidad para el estudio de la evacuación, en la mayoría de casos son portentosos programas de simulación. Antes de su enumeración, se citan trabajos que analizan los programas disponibles en el momento de su publicación, así lo hizo J. M. Watts (1987). G. Santos y B. Aguirre (2004) en un documento ciertamente interesante analizan diferentes modelos de simulación, y E. Kuligowski (2005) en la "Technical Note 1471" del NIST clasifica de forma minuciosa los 28 modelos más relevantes, este trabajo sufrió un actualización en el año 2010 dando lugar a "Technical Note 1680".

Algunos de los programas desarrollados a lo largo del tiempo son los siguientes: AENEAS, ALLSAFE, CRISP, EGRESS, EVACNET+, EXITT, EVACSIM, EVI, EXIT-89, EXODUS, GRIDFLOW, LEGION, MAGNETIC MODEL, PATHFINDER, PEDFLOW, PEDGO, PEDROUTE, SIMULEX, SIMWALK, STEPS, TIMTEX, TSEA, WAY OUT.

**9. Modelos singulares.** Desde hace algunos años algunos autores han establecido que la lógica de las multitudes mantiene modelos de comportamiento similares al de otros animales y han realizado investigaciones en este sentido, "Animal dynamics based approach for modelling pedestrian crowd egress under panic conditions" (2011) de N. Shiwakoti es un ejemplo.

## 10. Bibliografía

- Bauman, N./ Skutella, M., (2007) "Computing earliest arrival flows with multiple sources", Dagstuhl Seminar Proceedings 05361, 4 p.
- Berlin, G. N., (1980) "A network analysis of building egress system", ORSA/TIMS meeting Washington, 8 p.
- Blue J. V./ Adler J. L., (2000) "Cellular automata micro simulation of bi- directional pedestrian flows", J. Trans. Research Board, Pag. 135-141.
- Bradley, G. E., (1993), "A proposed mathematical model for computer prediction of crowd movement and their associates risk" In Smith and Dickie editors, "Engineering for crowd safety" pag. 303-311.
- Bryan, J. L., (1983) "A Review of the Examination and Analysis of the Dynamics of Human Behaviour in the Fire at the MGM Grand Hotel, Clark Country, Nevada, as Determined from a Selected Questionnaire Population", Fire safety Journal, (5), pp. 233-240.
- Capote, J. A./ Alvear, D./ Abreu, O. V./ Cuesta, A., (2008) "Análisis de los parámetros de entrada en el Modelado de Simulación Computacional de Evacuación (MSCE)", Revista "Montajes e Instalaciones" nº 424, ISSN 0210-184X, Pág. 96-103.
- Capote, J. A./ Alvear, D./ Abreu, O. V./ Cuesta, A., (2010) "An evacuation model for high speed trains" Proceeding of 5th international conference on pedestrian and evacuation dynamics. Gaithersburg.



- Capote, J. A./ Alvear, D./ Abreu, O. V./ Cuesta, A., (2011) "Human behaviour during trains evacuation: data collections and egress modelling", Proceeding of work shop "Evacuation and human behaviour in emergency situations", Cantabria.
- Capote, J. A./ Alvear, D./ Abreu, O. V./ Cuesta, A.,(2012) "A Stochastic Approach for simulating Human Behaviour During Evacuation Process in Passenger Trains", Fire Technology, February 2012.
- Capote, J. A./ Alvear, D./ Abreu, O./ Cuesta, A./ Alonso, V., (2012) "A Stochastic Approach for Simulating Human Behaviors During Evacuation Process in Passenger Trains", Fire Technology, February 2012.
- Casadesús Pursals, S., (2006) "Consideraciones en torno a los modelos para el estudio de la evacuación de edificios", Tesis doctoral presentada en Universitat Politècnica de Catalunya dirigida por F. Garriga Garzón, disponible en <http://tesis.enxarxa.net>, ISBN: B.52664-2006/84-690-2489-2.
- Casadesús Pursals, S./ Garriga Garzón F, (2009) "Optimal time of building evacuation considering evacuation routes", European Journal of Operational Research, ISSN 0377-2217, Volume 192, Issue 2, Pàg. 692-699.
- Choi, W. / Hamacher, S. / Tufekci, S., (1988) "Modelling of building evacuation problems by network flows with side constraints", European Journal of Operational Research, 35, pp. 98-110.
- Cuesta Jiménez, A., (2012), "Enfoque metodológico para la caracterización de la conducta humana durante el proceso de evacuación en escenarios singulares", Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.
- DeCicco, P., "Evacuation from fires", Applied Fire science in Transition Series, Ed. Baywood Publishing Company, ISBN 0-89503-222-8, 2003, 188 p.
- Fahy, F. R. / Proulx, (1995), G., "Collective common sense: A study of human behaviour during the World Trade centre evacuation", NFPA Journal Vol. 9 No.2 March/April, pp. 59-67.
- Fahy, F. R. / Proulx, G., (1995), "A Study of the New York World Trade centre evacuation", Asiaflam95, Hong-Kong, Interscience Communications Limited, pp. 199-209.
- Fahy, F. R., (1983) "Building fire simulation model", Fire Journal, pp. 93-105.
- Fang W. F./ Yang L. Z, Fan W. C., (2003) "Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model". Physica A,321:633-40.
- Fang, Z./Song, W./ Zong, X./ Li, Q./ Xiong S., (2011) "Hierarchical multi objective evacuation routing in stadium using ant colony optimization approach", Journal of Transportation Geography" 19 pp. 443-451.
- Francis, R. L. / Kisko, T. M., (1985) "EVACNET+: A Computer program to determine Optimal building evacuation plans", Fire Safety Journal 9, pág. 211-220.
- Francis, R. L./ Chalmet, L. G. / Saunders, P. B., (1981) "Network models for building evacuation", Management Science Vol.28, Pàg. 86-105.
- Frantzych, H., Benthorn, L., (1999) "Managing evacuating people from facilities during a fire emergency", Facilities Vol. 17 number 9/10, pág. 325 - 330.
- Fruins, J. J., (1971-1987) "Pedestrian planning and design. Elevator World", Library of Congress Catalog Number 70-159312, 206 páginas.
- Galea, E. R./ Gwyne, S./ Lawrence, P/. Filipidis, L.,(2001) "Modelling occupant interaction with fire conditions using the building EXODUS evacuation model", Fire Safety Journal Vol. 36-4, June 2001, pp.327-357.

- Galea, E. R./ Sharp, G./ Lawrence, P. J., (2008) "Investigating the Representation of Merging Behaviour at the Floor-Stair Interface in Computer Simulation of Multi-Floor Building Evacuation", *Journal of Fire Protection Engineering*, Pág. 291 - 316.
- Gwyne, S., (2009) "Safety in numbers. How human being react to fire", *Magazine Significance*, pág. 14 - 19.
- Gwyne, S./ Galea, E. R./ Owen M./ Lawrence P. J./ Filippidis L., (1999) "A review the methodologies used in the computer simulation from de built environment", *Building and environment* 34, Pag. 741-749.
- Helbing, D./ Farkas I./ Vicsek T., (2000) Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407:487–90.
- Helbing, D./ Farkas, I./ Molnar, P./ Vicsek T., (2002) "Simulation of pedestrian crowd sin normal and evacuation situations. In: Schreckenberg M., Sharma S. D., editors. *Pedestrian and evacuation dynamics*. Berlin: Springer, p. 21–58.
- Helbing, D./ Molnar P., (1995) "Social force model for pedestrian dynamics". *Physical Rev. E*; 51(5):4282–6.
- Henderson, L. F., (1971) "The statistics of crowd fluids", *Nature*, 229:381–3.
- Henderson, L. F., (1974) "On the fluid mechanics of human crowd motion" *Transportation Research*, 8, Pag. 509-515.
- Hope, B. / Tardos, E., (1994) "Polynomial time algorithms for some evacuations problems", *Proceedings of the Fifth Annual SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Pág. 433-441.
- Hughes, R. L., "A continuum theory for the flow of pedestrians". *Transportation Research Part B*; 36:507–35.
- Hughes, R.L., (2002) "The flow of human crowds". *Annual Review of Fluid Mechanics* 2003; 35:169–82.
- Kachroo, P./ Al-nasur, S. J./ Wado, S. A./ Shende, A. (2008) "Pedestrian Dynamics, Feedback Control of Crowd Evacuation", Ed. Springer Verlag, Springer complexity, ISBN. 978-3-540-75559-3.
- Kamiyama, N./ Katoh, N./ Atsushi, T, (2008) "An efficient algorithm for the evacuation problem in certain class of networks with uniform path-lengths", *Discrete Applied Mathematics*.
- Kendik, E., "Determination of the evacuation time pertinent to the projected area factor in the event of total evacuation of high-rise office buildings via staircases", *Fire Safety Journal* 5, 1983, pp. 223-232.
- Kholshenikov, V. V./ Shields, T. H./ Boyce, K. E./ Samoshin, D. A.,(2009) "Recent developments in pedestrian flow theory and Research in Russia, *Fire Safety Journal* 43, Pág. 108-118.
- Kichner, A. (2003) "Friction effects and clogging in a cellular automata model for pedestrian dynamics" *Physical Review* 67.
- Klingsch, W. W. F. / Rogsch C./ Schadshneider, A./ Schreckenberg, M., (2010) "Pedestrian and Evacuation Dynamics" Springer Verlag.
- Köster, G./ Seitz, M./ Treml, F./ Hartmann, D./Klein, W., (2011) "On modelling the influence of group formations in a crowd", *Contemporary Social Science*, Vol. 6. No 3, November 2011, 397-414.
- Kostreva, M. M. / Getachew, T., "Optimisation models in fire egress analysis for residential buildings", *Fire Safety Science: Proceedings of the Third, International Symposium 1991*, Elsevier Applied Science, 1991, pp. 805-814.
- Kuligowski, E., (2012) "Predicting Human Behaviours During Fires", *Fire Technology*, February 2012.

- Kuligowski, E., (2012) "Review of 28 egress models. In: Peacock RD, Kuligowski E D, editors. In: Proceedings of the workshop on building occupant movement during fire emergencies, 10–11 June 2004. p. 68–90.
- Lo, S. M./ Huang, H. C. / Wang, P. / Yuen, K. K., (2006) "A game theory based exit selection model for evacuation", Fire Safety and Disaster Prevention Group, Department of Building & Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong, Fire Safety Journal 41, Pág. 364-369.
- Lovas, G. G., (1994) "Modelling and simulation of pedestrian traffic flow", Transportation Research, Volume 28B, No.6, December, pp. 429-443.
- Lovas, G. G., (1995) "On performance measures for evacuation systems", European Journal of Operational Research 85, pp. 352-367.
- Lovas, G. G., (1998) "Models of way finding in emergency evacuations", European Journal of Operational Research 105, pp. 371-389.
- Lovas, G. G., (1998) "On the importance of Building Evacuation System Components", IEEE Transactions on Engineering Management Vol. 45, No 2 May, pp. 181-191.
- Melinek, S. J. / Booth, S., (1975) "An analysis of evacuation times and movement of crowds in buildings", Building Research Establishment CP 96/75.
- Nelson, H. E./ McLennan, H. A., "Emergency Movement", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 14, Ed. 1996, pp. 3.286-3.295.
- Olenick, S. M./ Carpenter, D. J., (2002) "An updated international survey of computer models for fire and smoke", Journal of Fire Protection Engineering, 13 (2), 87–110.
- Pauls, J. L., (1984) "The movement of people in buildings and design solutions for means of egress", Fire Technology, Vol.20, No.1, 27 páginas.
- Pelechano N./ Allbeck J. M./ Badler N. I., "Controlling individual agents in high- density crowd simulation" In:Metaxas D, Popovic J, Editors Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH / Eurographics symposium on computer animation, San Diego, CA, USA, 3–4 August 2007. p.99–108.
- Predtechenskii, W. M./ Milinskii, A .I., (1969-1978) "Planning for foot traffic flow in buildings", Amerind Publishing Co. New Delhi., National Bureau of Standards, U.S. Dep. Commerce , PB-294 993-T, 238 páginas.
- Proulx. G. (2001) "As of year 2000, what do we know about occupant behaviour in fire?", NRCC-44479, National Research Council Canada
- Proulx. G. (2001) "Occupant behaviour and evacuation", NRCC-44983, National Research Council Canada.
- Proulx. G. (2002) "Understanding human behaviour in stressful situations", NRCC-45663, National Research Council Canada
- Santos, G./ Aguirre, B. E., (2004) "A critical review of emergency evacuation simulation models". In: Peacock RD, Kuligowski ED, editors. Proceedings of the workshop on building occupant movement during fire emergencies, 10–11 June 2004. p. 27–52.

- Schadhneider, A./ Klingsch, W./ Klüpfel, H./ Kretz, T./ Rogsch C./ Scyfried, A., (2008) "Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modelling and Applications", Encyclopaedia of Complexity and System Science, Springer, Berlin, 55 p.
- Schreckenberg, M. / Sharma, S. D., (2001) "Pedestrian and Evacuation Dynamics" Springer Verlag, 453 p.
- Shiwakoti. N./ Sarvi M./ Rose G./ Burd M., (2011) "Animal dynamics based approach for modelling pedestrian Crowd egress under panic conditions", Transportation Research Part B 45, p. 1433-1449
- Smith, J. M., (1982) "An analytical queuing network. Computer program for the optimal egress problem", Fire Technology, pp. 19-37.
- Smith, J. M., (1990) "State dependent queuing models in emergency evacuation networks", Report of Department of Industrial Engineering and Operations Research, December.
- Smith, J. M., (1992), "Multi-objective routing in stochastic evacuation networks. Simulation in Emergency", Management and Engineering, February, pp. 23-30.
- Tjandra, A. S., (2003) "Dynamic Network Optimization with Application to the Evacuation Problems", PhD thesis, Technische Universität Kaiserslautern, Germany.
- Togawa, K., "Study of fire escape based on the observation multitude currents", Japan Building Research Institute, Report 55-14 1955.
- Tubbs, J. S./ Meacham, B. J., (2007) "Egress Design Solutions, A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning" Ed. John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-71956-8, Pag. 53-92
- Waldau, N. / Gatterman, P./ Knoflacher H./ Schreckenberg, M., (2005) "Pedestrian and Evacuation Dynamics" Springer Verlag, 492 p.
- Waldau, N. / Gatterman, P./ Knoflacher H./ Schreckenberg, M., (2011) "Pedestrian and Evacuation Dynamics" Springer Verlag.
- Watts, J., "Computer models for evacuation analysis", Fire Safety Journal 12, (1987), pp. 237-245.
- Weidmann, U. / Uwe, K./ Knoflacher H./ Schreckenberg, M., (2012) "Pedestrian and Evacuation Dynamics" Springer Verlag.
- Weidmann, U./ Buchmueller, S., (2007) "Parameters of pedestrians, pedestrian traffic, and walking facilities", Swiss Federal Institute of Technology - Institute for Transport Planning and Systems, Zurich, p.48.
- Xiaoping, Z., Tingkuan, Z., Mengting, L., (2009) "Modelling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches", Building and environment 44 p. 437-445.
- Yuan, W. F./ Tan, K. H. (2007) "An evacuation model using cellular automata". Physica A;384:549–66.
- Zhao, D. L. / Yang, L. Z. /Li, J., (2006) "Exit Dynamics of occupant evacuation in an emergency". Physica A, 2006; 363, pag. 501–512.