

CAPITULO 9: APORTACIONES, CONCLUSIONES FINALES Y PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

9.1 APORTACIONES REALIZADAS

Labor imprescindible en el desarrollo de toda tesis resulta la recopilación de información sobre los principales aspectos que comprende el problema estudiado, en este caso, la evacuación de edificios. El resultado de dicha recopilación, desarrollado en el capítulo 2, constituye el estado del arte del problema. Tal y como puede observarse se ha realizado una exhaustiva recopilación de información, al tiempo que se han clasificado los documentos en grandes familias o apartados, además se ha formulado una descripción detallada de algunos de los modelos utilizados en el estudio del movimiento de las personas así como del cálculo de magnitudes que caracterizan la evacuación de los edificios. Así mismo, se han analizado las aportaciones de la investigación operativa a la solución del problema y se ha efectuado una amplia referencia de las herramientas que proporciona la simulación, también se ofrece un esbozo de alguno de los planteamientos que se realizan del problema desde las ciencias de comportamiento, y finalmente se hace referencia expresa a las publicaciones de destacados centros de investigación.

En el capítulo 3 se han llevado a cabo varias aportaciones, en primer lugar se ha caracterizado el concepto de **sistema de evacuación**, se han determinado los factores que definen el problema y se ha planteado una solución estructurada en tres fases: La solución del problema de la evacuación de un recinto, la solución de la evacuación del edificio y la validación de los resultados. Un elemento fundamental para obtener la solución del problema parte de estimar correctamente la **función de evacuación**, cuya formulación se realiza a partir de la propuesta realizada por K.Togawa, en la cual las velocidades y los flujos son función de la densidad de ocupación. Con posterioridad, aspectos más concretos de la locomoción humana fueron definidos en los modelos de Predtechenskii & Milinskii basándose en la tasa de ocupación. A partir de estas dos propuestas se modelan flujos de circulación, se estudian confluencias, ramificaciones y retenciones. También se realiza una propuesta para incorporar en un modelo analítico determinados aspectos de comportamiento y poder estimar de forma más precisa las principales magnitudes de locomoción que generan los individuos afectados por el problema, todo ello se ha definido como el **modelado de incorporaciones a la red**. Finalmente se aporta un análisis de las magnitudes y de las representaciones gráficas que proporcionan la información necesaria para tener un conocimiento profundo del problema y facilitar la toma de decisiones.

Las aportaciones del capítulo 4 tienen lugar directamente sobre la solución del problema de la evacuación del recinto, para analizarlas se recurre a un análisis cronológico de

los hechos. Después de utilizarse en numerosas ocasiones el procedimiento gráfico del profesor R. L. Francis, se pensó en la posibilidad de sistematizar la elaboración de las gráficas que utiliza, durante algún tiempo así se hizo, posteriormente se observó que era posible sistematizar este proceso de resolución y se efectuó una **implantación de dicho procedimiento** para su utilización mediante herramientas informáticas estándar. En una fase posterior se observó que el modelo original del profesor Francis impone la condición que la función de evacuación de cada salida j sea una función estrictamente creciente $t_j(x_j) \geq 0$ y $t_j(0) = 0$ si $x_j = 0$, lo que supone una restricción muy severa que limita notablemente el problema, cuando la realidad es que en la mayoría de las situaciones los ocupantes que se dirigen a una salida deben efectuar un determinado recorrido. De la misma forma, a partir del análisis de los factores que caracterizan el problema, se ha observado que son frecuentes las demoras en el inicio de la evacuación, ello requiere incorporar una nueva constante en la función de evacuación. Para resolver estas situaciones en las que consideran recorridos y demoras en el inicio de la evacuación se ha realizado una **generalización de la aplicación**, resultando un procedimiento mucho más realista aplicable a muchas más situaciones que en su versión inicial.

Otras aportaciones realizadas en el capítulo cuatro son la **utilización de diferentes modelos de locomoción** así como la **solución analítica del problema**. En el modelo inicial para obtener las funciones de evacuación se estiman los flujos de salida a partir de un pronóstico de la densidad de ocupación que se va a producir en la salida, a partir de estos valores se obtiene la asignación óptima x_j de cada salida. Puede observarse que el resultado del problema viene condicionado por los valores de los flujos que inicialmente se han determinado, por lo que incorporando funciones que relacionen directamente las variables que intervienen en el problema se evita establecer las condiciones iniciales. La solución se obtiene a partir de las ecuaciones de Nelson&McLennan, ello permite prescindir de las suposiciones previas en las velocidades y los flujos de circulación de las salidas, las funciones de evacuación son función del número de personas x_j que las utilizan y de las características geométricas del recinto. La consideración de los recorridos de evacuación y la utilización de las ecuaciones de Nelson&McLennan supone cambios notables en la forma de las funciones de evacuación $t_j(x_j)$ y en las funciones de evacuación inversas $p_j(z)$, por lo que ha sido preciso realizar una compleja adaptación de los procedimientos de resolución iniciales. Finalmente se ha **desarrollado una heurística** para la solución del problema de la evacuación de un recinto que ofrece estimaciones del tiempo de evacuación y distribuciones óptimas de una forma razonablemente eficaz. Dicha heurística ha sido adecuadamente contrastada y probada en recintos de hasta 8.000 ocupantes. Realmente evita la laboriosa solución analítica y proporciona la solución del problema. El interés de la solución analítica, además de su valor formal, radica en su utilidad para resolver el problema de las distribuciones óptimas en las confluencias en la red dinámica.

El capítulo 5 muestra la necesidad de sistematizar la representación de los edificios desde la perspectiva de sus condiciones de evacuación, en él se aporta una **nueva definición de red**. Las redes de flujo clásicas sitúan los nodos en el centro de las dependen-

cias, lo que puede considerarse su posición natural, sin embargo relajar esta forma de operar para trazar la red, ubicando los nodos en la situación que cumpla los objetivos de la modelización, se ha observado que resulta muy favorable en la representación de un edificio si se opera de la forma adecuada, especialmente cuando los flujos de circulación se producen en un solo sentido. Mediante esta forma de representación es posible tener un mejor conocimiento del proceso de evacuación. También se considera el modelado de incorporaciones a la red, tiempos de circulación variables y se efectúa un análisis dinámico las confluencias y de las ramificaciones. Todas estas aportaciones permiten realizar un estudio más preciso del problema.

En este mismo capítulo, sobre la red estática se estructura un **modelo dinámico para la solución del problema** y paso a paso se verifica su viabilidad, se analizan las configuraciones que habitualmente se producen en los edificios: vías de circulación, confluencias y ramificaciones, se establece el marco adecuado para una utilización interactiva y finalmente se desarrolla una aplicación basada en **una solución heurística** que permite garantizar soluciones pseudo-óptimas. La aplicación desarrollada permite efectuar modificaciones en los parámetros que definen el proceso de evacuación de un edificio: Ocupaciones, capacidades, anchuras mínimas de paso, longitud de recorridos y demoras, obteniendo soluciones inmediatas y representaciones gráficas que aportan un conocimiento detallado de las ocupaciones de cada uno de los recintos, flujos de circulación y llegadas a los destinos en cada periodo.

En el capítulo 6 se ha desarrollado un proceso para validar el modelo y contrastar los resultados obtenidos. En un principio para validar los resultados se utilizó la simple coincidencia de tiempos de evacuación, pero era preciso poder garantizar que los valores calculados guardaban la adecuada similitud con los valores experimentales obtenidos en ensayos y simulacros, dicha existencia propició la investigación de procedimientos de contraste robustos que ofrecieran una garantía y generaran la adecuada confianza en el procedimiento diseñado. Existía además la necesidad de obtener el máximo rendimiento de los simulacros de evacuación, lo que dio lugar a los procedimientos basados en una secuencia de valores. Los procedimientos utilizados inicialmente se basaban en determinar los **intervalos que podían producirse en el tiempo de evacuación** en función de las magnitudes de locomoción y el contraste consistía en observar si los valores de los simulacros estaban comprendidos en dicho intervalo.

Finalmente se han diseñado y probado dos procedimientos, ambos están basados en el **análisis de la función de evacuación inversa y en el análisis de los flujos de salida** y permiten evaluar el modelo con un razonable nivel de seguridad. El procedimiento basado en la función de evacuación inversa consiste en representar dicha función $p(z)$ y la secuencia de salidas registradas $s(z)$ en intervalos regulares de tiempo para seguidamente analizar las diferencias, verificar la estabilidad de las mismas y su normalidad. Se concluye que este procedimiento tiene algunas ventajas respecto al procedimiento de análisis de flujos, ambos procedimientos permiten verificar si las distribuciones óptimas realmente lo son.

Por último en el capítulo 7, se sintetizan algunos de los principios que comporta la organización y gestión de evacuaciones de emergencia. Realmente no constituye ninguna aportación, se incluyen en este trabajo con la finalidad de desarrollar un procedimiento completo y tratar así de ofrecer una perspectiva global del problema, abordar los aspectos analíticos del problema y posteriormente mostrar su posible aplicación.

Capítulo 2	- Recopilación y clasificación de documentos sobre las dimensiones de las personas, la locomoción humana y la evacuación de los edificios
Capítulo 3	- Proceso de identificación de los factores que definen el sistema de evacuación - Formalización de una definición de sistema de evacuación - Formulación de los principios para el estudio del problema - Modelado de incorporaciones a las salidas - Reseña de magnitudes y formatos gráficos para el análisis del problema
Capítulo 4	- Desarrollo en microordenadores de procedimientos gráficos para la solución del problema de la evacuación de un recinto. - Incorporación de diferentes supuestos al modelo tradicional: Demoras en el inicio de la evacuación y recorridos, y resolución mediante procedimientos gráficos y analíticos - Formulación de modelos basados directamente en la densidad de ocupación - Solución heurística del problema y desarrollo de la aplicación EXITR
Capítulo 5	- Justificación de la necesidad de sistematizar la representación de los edificios desde el punto de vista de sus condiciones de evacuación - Definición de una nueva estructura de red para la definición y el estudio del edificio - Desarrollo de los elementos para el estudio de la red dinámica - Procedimiento heurístico para la solución pseudo-óptima del problema - Desarrollo de la aplicación EXITE
Capítulo 6	- Principios para la validación y contraste de los modelos - Aplicación de contrastes basados en cambios en las magnitudes de locomoción - Desarrollo de un proceso de validación a partir de comparar la función de evacuación y las salidas registradas en ensayos y simulacros. - Desarrollo de un proceso de validación a partir del análisis de las diferencias entre los flujos previstos y los realmente registrados - Implantación de procedimientos para verificar las soluciones óptimas a partir de la función de evacuación y el análisis de flujos
Capítulo 7	- Perspectiva global para el estudio y la gestión de la evacuación de los edificios

Figura 9.1 Tabla resumen de las aportaciones realizadas

9.2 PUBLICACIONES REALIZADAS DURANTE EL PERIODO DE ELABORACIÓN DE LA TESIS

Se efectúa una enumeración de las principales publicaciones realizadas en el transcurso del desarrollo de la presente tesis.

1. “Modelos matemáticos para la evacuación de edificios”, Temes d’estadística, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Editorial EPOP, ISBN: 84-89877-00-9, Capítulo V, 1997, 49 p.
2. “Modelos matemáticos para el estudio de la evacuación de edificios: búsqueda bibliográfica”, Departament d’Organització d’Empreses, Universitat Politècnica de Catalunya, D.I.T. 98/5, 31p.
3. “Modelos matemáticos utilizados en el estudio de la evacuación de edificios”, Revista Cuadernos de Seguridad, Enero 1998, pp 41-48.
4. “Utilización de encuestas para la evaluación de simulacros de evacuación”, Document de treball, Dep. d’Estadística, ETSEIT, UPC, Julio 1998, 12 p.
5. “Modelización de la evacuación de edificios mediante redes de flujo”, Anales de Ingeniería Mecánica, Ponencias del XIII Congreso de Ingeniería Mecánica, ISSN 0212-5070, Terrassa 2-4 Diciembre 1998, Tomo 1 pp. 13-19.
6. “Estudio de la evacuación de un recinto industrial”, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Ed. EPOP, Febrero 1999, 162 p.
7. “Referencia de documentos sobre la evacuación de edificios”, Document de treball Gener 00/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2000, 14 p.
8. “Estudio de la evacuación de un edificio mediante el programa EVACNET+”, Document de treball Jun 00/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Junio 2000, 27 p.
9. “Modelos para la optimización de la evacuación de un recinto”, Document de treball Julio 00/1 SCP, Dep. d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2004, 33 p.
10. “Optimización de la evacuación de un recinto mediante nomogramas”, Document de treball Juny 01/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2004, 9 p.
11. “Optimización de la evacuación de un recinto a partir de las ecuaciones de Nelson&McLennan”, Document de treball Set 01/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Septiembre 2001, 23 p.
12. “Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto”, Actas del IV Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-88783-52-3, Universidad de Sevilla, 13-14 Septiembre 2001, p.121-123.
13. “Evacuación de un recinto en el tiempo mínimo”, Revista “Cuadernos de Seguridad” Julio/Agosto 2002, p.79-82.

14. “Aplicación de procedimientos gráficos para la optimización de la evacuación de edificios”, Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Septiembre 2003, p.55-56.
15. “Objetivos equivalentes en el problema de la evacuación de recintos”, Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Sep. 2003, p.57-59.
16. “Evacuación de edificios: Modelos matemáticos para el estudio del movimiento de las personas”, Document de treball Gener 04/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2004, 32 p.
17. “Evacuación de edificios: Modelos matemáticos para la optimización”, Document de treball: Febrer 04/2 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Febrero 2004, 21 p.
18. “Evacuación de edificios: Modelos de Simulación”, Document de treball: Juny 04/3 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Junio 2004, 13 p.
19. “Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto”, Revista Montajes e Instalaciones nº 385 Julio/Agosto 2004, ISSN 0210-184X, p.79-86.
20. “Modeling the Evacuation and Entrance Function in the Problem of Building Evacuation”, Actas del IV Congreso “International Conference on Modelling & Simulation (ICMS’04)”, ISBN 84-688-7867-7, Universidad de Valladolid, 22-24 Septiembre 2004, p.37-39.

En el momento de redactar estas líneas existen varios trabajos en curso de publicación, el pasado mes de Noviembre fue aceptado para su publicación en “The Best Of AMSE 2004 Conferences” el trabajo “Modeling the Evacuation and Entrance Function in the Problem of Building Evacuation”.

9.3 CONCLUSIONES

En esta tesis se refleja la profunda creencia que la seguridad de las personas en los edificios en numerosas situaciones se halla seriamente comprometida; existen muchos edificios en los que si se produjera algún incidente de cierta magnitud la evacuación de las personas presentes resultaría complicada. Mediante determinadas medidas de seguridad complementarias, se logra una siniestralidad reducida y estos edificios son aparentemente seguros, sin embargo el problema de la evacuación no se halla resuelto y si existiera algún siniestro de cierta magnitud las consecuencias inevitablemente serían fatales.

Para mejorar el nivel de seguridad de los edificios sería necesario disponer de un sistema que evaluara de forma objetiva la dificultad que supone su evacuación, y a partir de un determinado nivel de riesgo, establecer las condiciones necesarias para tratar de garantizar la evacuación de todos los ocupantes. Esta garantía empieza por disponer en

cualquier instante de personas capaces de gestionar evacuaciones de emergencia, a partir de un conocimiento adecuado del problema y la forma de abordar las posibles soluciones, si éstas realmente existen, y en caso de advertir que las soluciones no existen o no son viables, actuar responsablemente para evitar las causas que las producen.

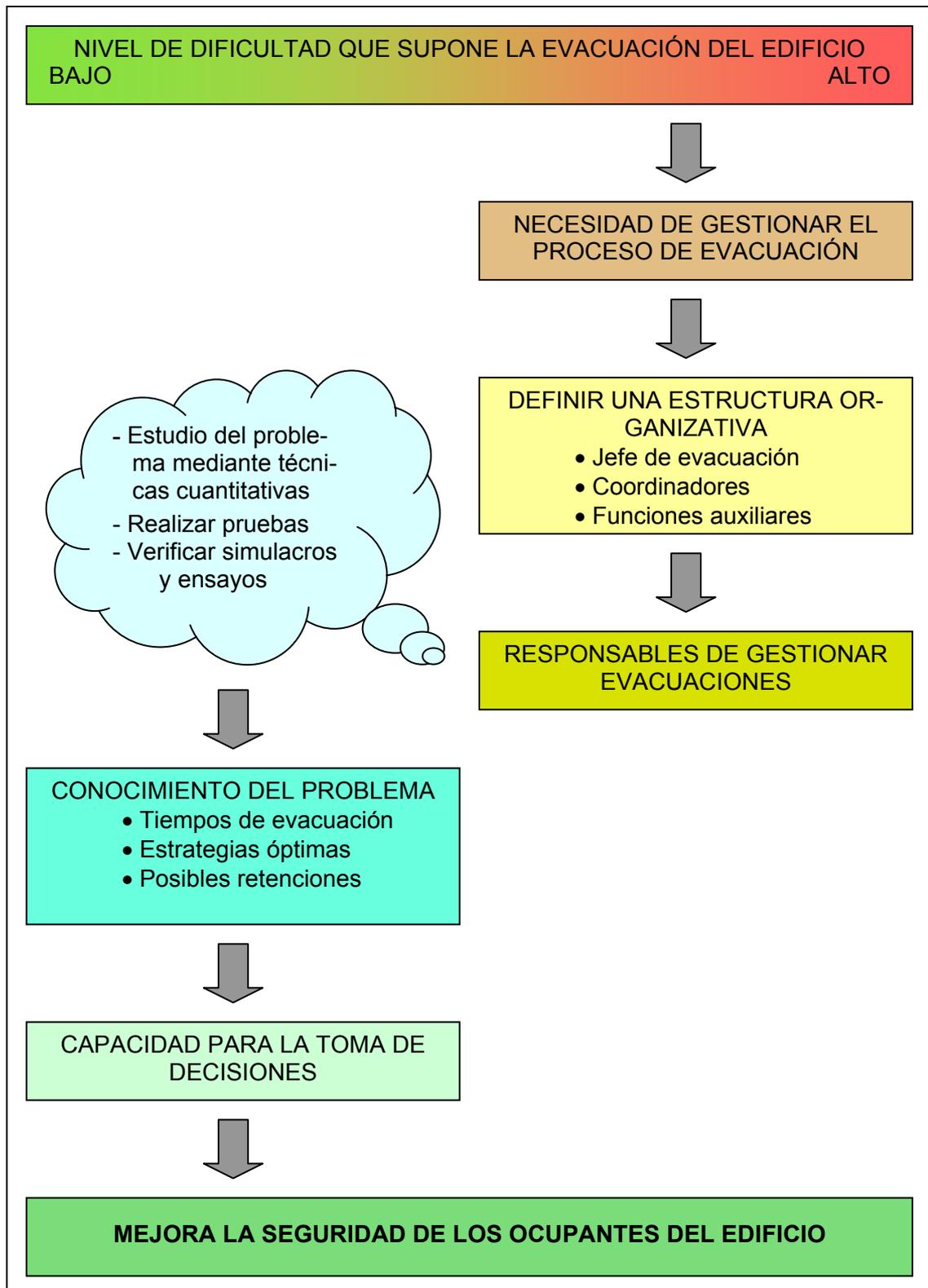


Figura 9.2 Resumen de las conclusiones finales

La organización de la evacuación de un edificio se entiende como una actividad que presenta una cierta complejidad, el método científico y técnicas cuantitativas son herramientas que ayudan razonablemente a conocer el problema. La mayoría de planes de evacuación nunca se probarán, siendo posible que planteamientos fatales resulten completamente inadvertidos. Los responsables de la seguridad y de la evacuación de los edificios deberían conocer para cada situación de ocupación y disponibilidad de medios, de las estimaciones de los tiempos de evacuación y las estrategias óptimas. Realmente no se trata de resolver una situación única, se trata de paso a paso analizar posibles ocupaciones, posibles bloqueos de salidas o ralentizaciones en los desplazamientos y adquirir un valioso conocimiento de la situación.

El análisis de la evacuación de los edificios solamente puede realizarse con los medios adecuados. Se ha demostrado que la evacuación de un edificio es posible estudiarla a partir de modelos analíticos, efectuando un conjunto de supuestos razonables que se resumen en unas simples magnitudes de locomoción, demoras en el inicio de la evacuación y varios aspectos de comportamiento se obtiene la solución del problema. En el proceso de resolución puede observarse la extraordinaria dificultad que inicialmente supone asignar unas magnitudes de locomoción debidamente ajustadas y pronosticar determinados aspectos de comportamiento. El problema tiene multitud de aspectos y es preciso buscar procedimientos de solución flexibles de forma que les sea posible a los usuarios evaluar de forma simple todas estas circunstancias.

Finalmente la adecuada verosimilitud de las propuestas se logra validando los resultados obtenidos. Mediante los procedimientos gráficos desarrollados en esta tesis es posible contrastar de forma rigurosa la coincidencia de los valores teóricos calculados con los resultantes de ensayos y simulacros. Una vez confirmado el valor de las magnitudes fundamentales que definen el problema, las conclusiones que se hayan obtenido en el proceso de análisis del problema tendrán mayor verosimilitud. Para validar los resultados se han establecido diferentes procedimientos, concluyéndose que ofrecen mejores resultados los basados en la función de evacuación inversa. Función que es utilizada para verificar si la distribución realizada hacia cada una de las salidas se corresponde con una asignación óptima.

9.4 PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

A lo largo del proceso de elaboración de la tesis se han observado una serie de posibles trabajos de investigación, en realidad existen muchos apartados en los cuales la investigación habría podido continuar por ser notable su interés, a continuación se indican algunos de ellos.

- 1ª) De forma continuada a lo largo de la presente tesis se han utilizado las magnitudes antropométricas y de locomoción obtenidas en otros países: Japón, Canadá, Estados Unidos, URSS, Reino Unido, Austria, etc... Se considera que sería necesario disponer de alguna experimentación sobre las medidas antropométricas, las ocupaciones, las velocidades y los flujos de circulación en nuestro país.

- 2^a) Ligado con la primera parte del capítulo 3, en el análisis de los factores que determinan el problema de la evacuación del edificio, resultaría muy interesante desarrollar un sistema para evaluar el nivel de riesgo de los edificios en cuanto a sus condiciones de evacuación. Estas investigaciones se deberían programar en tres etapas: Primero proponer un método para evaluar el riesgo en los edificios, a continuación aplicarlo a determinados casos y contrastar con expertos los valores obtenidos, para finalmente realizar los ajustes oportunos y disponer de un método en condiciones de implantación.
- 3^a) En el capítulo 4 al estudiar la evacuación de recintos y edificios no se han considerado medios mecánicos de desplazamiento, no se ha contemplado la existencia de personas desplazándose en ascensores, escaleras mecánicas o rampas móviles, resultaría de gran interés incluir en el desarrollo propuesto dichos elementos. Si bien, existe referencia de documentos que modelizan estas formas de desplazamiento, habría que adaptarlos a los modelos establecidos, efectuando las modificaciones necesarias en la función de evacuación, la función de evacuación inversa y finalmente determinar la forma de establecer las condiciones óptimas para el recinto y el edificio.
- 4^a) Al estudiar la optimización de la evacuación de recintos y edificios se han considerado poblaciones homogéneas. Tendría interés considerar magnitudes de locomoción heterogéneas, la situación más simple es la que se genera al considerar en el problema de la evacuación de un recinto la restricción de paso que se produce si por ejemplo existe una silla de ruedas desplazándose por una vía de evacuación, ello supone una limitación variable de la capacidad de paso de una salida cuyo estudio resultaría de indudable interés.
- 5^a) En la resolución del problema de la evacuación del recinto y de edificios se han utilizado los modelos de locomoción de J. J. Fruins y Nelson & MacLennan, un modelo que está siendo utilizado actualmente en modelos de simulación son las ecuaciones de Predtechenskii & Milinskii, matemáticamente son mucho más complejas. Resultaría de gran interés utilizarlas en los problemas de evacuación de recintos y de edificios.
- 6^a) Se ha observado la existencia de diversos modelos matemáticos y programas que definen la expansión del humo, la propagación de incendios e incluso el efecto de explosiones, de hecho algunos programas de simulación de la evacuación de edificios ya contemplan dichos fenómenos. Parece que podrían incorporarse en la solución analítica del problema de la evacuación, de la forma que se ha planteado en esta tesis, sería posible considerar capacidades variables en las salidas, entonces una investigación a realizar consistiría en plantear la optimización de evacuación de un recinto y posteriormente la de edificios si la capacidad de las salidas fuera variable, la forma más simple sería mediante una función lineal.
- 7^a) En la tesis se han desarrollado un conjunto de aplicaciones que resuelven el problema de la evacuación de edificios, un propósito consiste en integrar todas estas

aplicaciones para que funcionen como una herramienta informática potente que facilite el estudio de la evacuación de edificios de forma generalizada.

- 8ª) Otra cuestión que queda pendiente en el trabajo realizado en la tesis es la utilización de procedimientos de resolución de la red dinámica más eficientes que la heurística empleada. La solución del problema podría mejorar al disponer de procedimientos heurísticos de resolución más eficaces.
- 9º) Un posible trabajo de investigación consiste en determinar directamente las magnitudes de locomoción más verosímiles a partir de los valores de los tiempos de evacuación obtenidos en ensayos o simulacros. Una vez más se debe insistir en la extraordinaria dificultad de conocer las magnitudes de locomoción, una forma de obtener valores con una razonable credibilidad la proporcionaría esta forma de resolución del problema, procedimientos similares se utilizan en análisis de modelos de tráfico.
- 10ª) Finalmente otra posible investigación a desarrollar consistiría en realizar en el sistema de evacuación una especie de análisis modal de fallos y efectos, por un lado sería una propuesta mucho más simple que los análisis que plantea G. Lovas, sin embargo se cree que podrían aportar unos resultados muy interesantes para evaluar con indudable criterio la seguridad la evacuación de los edificios.

Medidas antropométricas y magnitudes de circulación ciudadanos de nuestro país
Sistema para evaluar el nivel de riesgo de los edificios en cuanto a sus condiciones de evacuación
Considerar medios mecánicos de desplazamiento
Optimización de la evacuación de recintos y edificios con poblaciones heterogéneas
Utilizar en los problemas de evacuación las ecuaciones de Predtechenskii & Milinskii
Estudiar la optimización de evacuación con capacidad de las salidas variable
Integrar las aplicaciones desarrolladas en una herramienta informática
Resolución de la red dinámica mediante heurísticas más eficientes
Estimar las magnitudes de locomoción a partir de las magnitudes de los tiempos de evacuación obtenidos en ensayos o simulacros
Análisis del sistema de evacuación mediante técnicas tipo AMFE

Figura 9.3 Tabla resumen de propuestas para futuras investigaciones