

Sistema de Ayuda a la Decisión Aplicado a Situaciones de Emergencia en Tiempo Real

Ángel Iglesias, M. Dolores del Castillo, J. Ignacio Serrano, Jesús Oliva

*Grupo de Bioingeniería (CSIC), Ctra. Campo Real km 0.200,
28500, Arganda del Rey (Madrid), España (e-mail:
[angel.iglesias, lola.castillo, ignacio.serrano, jesus.oliva]@car.upm-csic.es)*

Resumen: Este trabajo propone un Sistema Computacional de Ayuda a la Decisión, el Gestor de Crisis de Fuego (GCF), diseñado para ayudar a una persona a tomar decisiones en tiempo real en situaciones de emergencia, concretamente, en caso de incendio en un edificio. El funcionamiento del GCF se basa principalmente en la estimación del estado final asociado a cada alternativa a través de una red de conceptos y unas funciones de evolución que serán aplicadas al estado inicial. El GCF tiene en cuenta que para mitigar la crisis producida por un incendio pueden ser necesarias varias alternativas ejecutándose simultáneamente. Copyright © 2011 CEA

Palabras Clave: decision support systems, decision making, fuzzy sets, utility functions, knowledge representation.

1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones estudia situaciones donde una persona se enfrenta a un conjunto de opciones o alternativas de las cuales tiene que elegir una dependiendo de un objetivo o de unas preferencias. Tomar una decisión se puede entender como una tarea donde, dado un estado inicial, se desea alcanzar un estado objetivo. Estas tareas proporcionan de antemano el conjunto de alternativas disponibles para solucionar el problema. La dificultad reside en determinar si una decisión será satisfactoria, es decir, si el estado final que se alcanzará con ella coincidirá, contendrá o estará cerca del estado objetivo. Para ello, los estados están definidos por el valor de una serie de características denominadas criterios. A menudo, los seres humanos tomamos decisiones sin saber con exactitud cuál será el estado final que alcanzaremos con una decisión, bien porque no se conocen los resultados posibles que se pueden obtener (el valor de los criterios del estado final), o porque conociendo los resultados se desconocen sus probabilidades. La elección de cada alternativa implica utilizar, por un lado, conocimiento subjetivo dado por experiencias pasadas y creencias personales y, por otro, información percibida directamente del entorno para estimar los valores que tomarán los criterios en el estado final asociado a la alternativa evaluada.

La toma de decisiones como disciplina de conocimiento proporciona una estructura y una guía para razonar de forma sistemática ante una decisión. Dentro de la toma de decisiones se distinguen los sistemas de ayuda a la decisión (Gorry and Scott-Morton, 1971; Mora et al., 2003), que asisten a la persona que tiene que tomar una decisión (gestor de decisiones) a elegir la mejor alternativa disponible. Existen muchas formas de ayudar al gestor de decisiones como, por ejemplo, en la comprensión de la estructura del problema o reduciendo la incertidumbre de los posibles estados finales. De esta forma, estos sistemas incrementan las opciones de alcanzar un estado final cercano al objetivo. Una de las mejores formas de ayudar al gestor de decisiones es proporcionarle una puntuación de las alternativas

disponibles en base al estado final que se alcanzaría con ellas. Así, el gestor de decisiones dispondrá de una lista de alternativas ordenadas según su puntuación y le será más fácil elegir una. A pesar de que este tipo de sistemas de ayuda a la decisión calculan cuál será la mejor alternativa, sus recomendaciones no tienen por qué aceptarse sin más. De hecho, el gestor humano puede elegir cualquier alternativa. En vez de proporcionar soluciones, los sistemas de ayuda a la decisión deben entenderse como una fuente de información sobre la situación, la incertidumbre de los estados finales, los objetivos y las alternativas. La idea principal en el diseño de estos sistemas es la de apoyar al gestor de decisiones, nunca la de sustituirle.

No todas las tareas de toma de decisiones tienen las mismas características y, por tanto, deben tratarse de formas distintas. Hay tareas que son puramente económicas como, por ejemplo, comprar o vender acciones (Yan and Clack, 2007). Otras tareas de toma de decisiones se enmarcan en el ámbito de la medicina y están relacionadas con el diagnóstico de alguna enfermedad (Stylios et al., 2008). En estas situaciones las consecuencias de una mala decisión pueden ser graves para el paciente. Otras tareas como, por ejemplo, la elección del mejor medio de transporte para realizar un determinado trayecto (Iglesias et al., 2008a) no ejercen ningún tipo de presión sobre el gestor humano. Al contrario que en estos dominios, las decisiones en situaciones de emergencia son decisiones complejas que se toman en un tiempo crítico y donde generalmente las consecuencias de una mala decisión son nefastas. En este tipo de situaciones el gestor humano está sometido a un gran estrés. La toma de decisiones en situaciones de emergencia es un campo de investigación que tiene mucho interés debido a que es tal la presión que tiene el gestor que le resulta difícil pensar con claridad para decidir adecuadamente (Iglesias et al., 2010). En este caso, los gestores de la decisión actuarían de una manera más eficiente con un sistema de ayuda a la decisión que les indicara automáticamente todo lo que puede hacerse cuando se ha detectado una emergencia. Las decisiones en situaciones de emergencia, como puede ser un incendio, han de tomarse

rápidamente sopesando todas las posibles alternativas y, a menudo, las personas no son capaces de valorar adecuadamente la situación en un período de tiempo tan corto y tan crítico.

La literatura existente sobre la toma de decisiones en el dominio de las situaciones de emergencia es escasa y en muchas ocasiones difiere de los objetivos buscados en este trabajo. Algunos sistemas, como el descrito en (Hämäläinen et al., 2000), puntúan las alternativas pero no las presentan ordenadas. Este sistema detalla una metodología sobre cómo tratar una emergencia nuclear. La puntuación se basa en la utilidad de las distintas alternativas ponderada mediante unos pesos que integran las preferencias de varios gestores humanos. Otro sistema que puntúa las alternativas sin ninguna ordenación es el descrito en (Aleskerov et al., 2005). Este sistema se utiliza para estimar las posibles víctimas de un terremoto en una determinada zona y, dependiendo del número de víctimas, este sistema ayuda al gestor a decidir a qué zona hay que enviar ayuda más urgentemente.

Existen otros sistemas de ayuda que le sugieren al gestor alternativas genéricas. Un ejemplo es el sistema explicado en (Bonzano et al., 1996), que utiliza razonamiento basado en casos (CBR) (Aamodt and Plaza, 1994) y que ayuda a un controlador aéreo a resolver situaciones de emergencia cuando las trayectorias de dos aviones se cruzan. Las alternativas manejadas por el sistema están definidas por el tipo de maniobra y el avión que tiene que realizarla. Es el gestor humano el que decide cuáles son los detalles de la maniobra (por ejemplo, girar 10 grados a la izquierda).

Existe otro tipo de sistemas de ayuda a la decisión que no puntúan las alternativas. Por ejemplo, el sistema explicado en (Ferguson and Allen, 1998) ayuda a un gestor durante la evacuación de una isla debido a un huracán. Esta ayuda se basa en facilitarle al gestor información de una manera visual, como puede ser el mapa de la isla. Este sistema no funciona de una manera automática, sino que requiere interactuar con el gestor durante la emergencia para facilitarle la información que necesite en cada momento.

Para ayudar al gestor humano en la toma de decisiones se han utilizado también sistemas que realizan estimaciones de los posibles estados finales pero que no sugieren alternativas. En (Overton, 2005), se utiliza una herramienta que integra GIS (Sistema de Información Geográfica) (Church, 2002) para predecir el comportamiento de un río en caso de desbordamiento. Con esta información, el gestor conocerá las zonas que van a sufrir daños y tomará las decisiones oportunas. Otro sistema que utiliza GIS para realizar estimaciones es el descrito en (Bonazountas et al., 2007). Este sistema estima el comportamiento de un incendio forestal. El gestor dispondrá así de una herramienta para predecir hacia dónde se propagará el fuego y qué zonas son las que corren un mayor riesgo. Otro sistema que predice las zonas forestales con mayor riesgo de incendio está recogido en (Iliadis, 2005). En este caso las estimaciones se basan en conjuntos borrosos (Zadeh, 1978) y se realizan a largo plazo. La principal ventaja de los sistemas que utilizan GIS es que realizan razonamiento espacial.

El objetivo de este trabajo es presentar un sistema de ayuda a la decisión, el Gestor de Crisis de Fuego (GCF), para asistir a un gestor humano a tomar decisiones en caso de incendio en un edificio. Este sistema puntúa y presenta de forma ordenada las

alternativas específicas disponibles. Es decir, el GCF sugiere formas de actuación detalladas para que el razonamiento no recaiga exclusivamente sobre el gestor humano. La peculiaridad de este dominio, el de las situaciones de emergencia, exige que el GCF funcione de forma rápida y automática. Su dinámica se basa en la estimación de los posibles estados finales asociados a cada alternativa, pero no se queda en esa etapa como hacen otros sistemas, sino que utiliza esas predicciones para puntuar las alternativas. El GCF tiene la capacidad de utilizar un sistema de coordenadas como, por ejemplo, el “*Universal Transverse Mercator*” (UTM) (Snyder, 1987), que le permite realizar un razonamiento espacial preciso sobre la emergencia en un entorno real. Además, el GCF se puede adaptar fácilmente para emplear distintos métodos de toma de decisiones para puntuar las alternativas (Iglesias et al., 2008b). La responsabilidad final de tomar una decisión siempre la va a tener el gestor humano y será el encargado de aceptar como válida alguna de las alternativas. En teoría, la alternativa que ha obtenido la mayor puntuación es la óptima, es decir, la que cumple los objetivos satisfaciendo las preferencias del gestor humano en el menor tiempo posible y, por tanto, la que debería llevarse a cabo. Sin embargo, en la práctica, el gestor humano puede aceptar cualquier otra que a su juicio sea más adecuada. Cabe destacar que la metodología empleada para el diseño e implementación del GCF puede utilizarse para diseñar otros sistemas de ayuda a la decisión en otros tipos de emergencias. Es decir, la metodología es independiente del dominio debido a la estructura modular del conocimiento sobre el que se asienta. Las siguientes secciones describen las diferentes partes que componen el GCF (el módulo de conocimiento, el método de toma de decisiones y la interfaz gráfica de usuario) así como la dinámica del sistema.

2. MÓDULO DE CONOCIMIENTO

Un Sistema de Ayuda a la Decisión tiene que recoger en primer lugar la estructura del problema. El GCF, en este caso, contiene conocimiento experto acerca de los incendios. Las principales amenazas para los ocupantes de un edificio en caso de incendio son el humo, los gases tóxicos, el calor y las llamas (Mowrer, 2009; Zhang et al., 2010). Los parámetros fundamentales que describen el proceso del incendio comprenden las siguientes características:

- Inflamabilidad de los materiales
- Características geométricas y térmicas del local incendiado
- Producción de humo y propiedades ópticas
- Composición de los productos de combustión, particularmente los tóxicos y corrosivos.

Estas características definirán el estado inicial del edificio cuando el gestor de decisiones tenga que tomar una decisión. Como puede observarse, este conocimiento se compone de dos tipos de información, primero, información que no va a variar con el tiempo, como las características geométricas del local incendiado, y, segundo, información que habrá que actualizar periódicamente como, por ejemplo, los materiales almacenados en cada habitación para que el GCF parta de una información fidedigna.

Un dato muy importante para valorar un incendio es la facilidad con la que se extenderá a otros recintos distintos de donde se inició y que estará condicionado por la resistencia al fuego de los límites de la zona incendiada. La propagación del incendio por el

interior de un edificio puede realizarse por vías horizontales o por vías verticales. En general, la severidad de un incendio va a estar fijada por la cantidad de energía acumulada en el local (carga de fuego) y por la velocidad en que podrá ser cedida al ambiente cuando se inicie su combustión. Las características más importantes a tener en cuenta en la propagación de un incendio son:

- Características de las ventanas y puertas así como sus situaciones relativas y posiciones
- Características y naturaleza de los materiales que están en combustión
- Diseño y situación de la distribución interna del edificio (pasillos, escaleras, etc.)

Además del conocimiento experto acerca del edificio y del incendio, el GCF necesita conocimiento sobre las alternativas de las que dispone el gestor humano para mitigar la crisis. Las acciones que pueden realizarse en caso de incendio son muy variadas (Ray and Singh, 2007). El GCF se centra en dos tipos de acciones que dan una idea general de cómo actuar:

- evacuar a las personas del edificio y/o
- extinguir el fuego.

Todo el conocimiento experto acerca del fuego enunciado en esta sección marca el primer módulo del GCF, el módulo de conocimiento, que se divide a su vez en cuatro partes: el árbol de representación, la base de objetos, el procesador de alternativas y la red de conceptos.

2.1 Árbol de Representación

El árbol de representación recoge los objetos que definen la estructura del edificio y su contenido. Esta estructura en forma de árbol, como muestra la Figura 1, representa el conocimiento acerca del edificio y su contenido y permite recuperar de forma eficiente y en tiempo real las características más importantes de la habitación donde se ha originado el incendio.

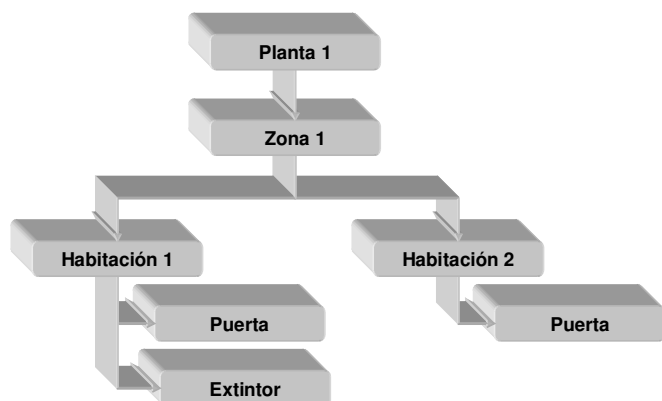


Figura 1. Fragmento de un árbol de representación que contiene dos habitaciones, una de ellas con un extintor.

La Figura 1 muestra un árbol de representación sencillo que contiene una planta de un edificio. La planta representada tiene dos habitaciones agrupadas en la misma zona. El objeto “Zona” permite conocer qué habitaciones están aisladas de otras, es decir, las zonas están separadas entre sí por medio de puertas cortafuegos u otros elementos de compartimentación que impiden la propagación del fuego. Dentro de la zona

representada existen dos habitaciones, ambas con puertas. Además, la habitación 1 tiene un extintor en su interior. El árbol de representación permite conocer fácilmente qué habitaciones pueden verse afectadas si se produce un incendio en alguna parte del edificio. El árbol de representación almacena la información acerca de las relaciones del tipo “*contiene a*” entre objetos y puede utilizarse en otros tipos de emergencias, no sólo en el caso de un incendio.

2.2 Base de objetos

Cada objeto perteneciente al árbol tiene asociados unos atributos característicos que recogen la información relevante para el funcionamiento del GCF. A continuación se muestran los tipos de objeto que pueden pertenecer a un árbol de representación junto con los atributos asociados a cada uno.

- Zona
 - Identificador único.
 - Superficie. Este atributo representa el área que puede aislarse si se ha declarado un incendio dentro de la zona.
 - Coordenadas. Este atributo contiene una lista de coordenadas espaciales que representan el perímetro de la zona.
- Habitación
 - Identificador único.
 - Superficie. Este atributo representa el área de la habitación.
 - Ventilación. La ventilación indica si la habitación tiene algún sistema que impida la concentración de humo y gases nocivos.
 - Toxicidad de los materiales. La información relativa a la toxicidad de los materiales contenidos en la habitación se indica en este atributo.
 - Inflamabilidad de los materiales. Este atributo expresa el grado de inflamabilidad de los materiales contenidos en la habitación.
 - Comunicación Horizontal. Esta característica indica las vías de comunicación de la habitación susceptibles de ser vías de propagación del fuego tales como ventanas o puertas.
 - Tipo de materiales. Un fuego puede ser de distintos tipos dependiendo del material que está en combustión: sólido, líquido, gas, metales pesados, etc. Este atributo determinará el tipo de fuego que podría iniciarse en esta habitación.
 - Coordenadas. Este atributo contiene una lista de coordenadas espaciales que representan el perímetro de la habitación.
- Puerta
 - Identificador único.
 - Coordenadas. Este atributo contiene la localización de la puerta.
- Extintor
 - Identificador único.
 - Tipo. El atributo tipo sirve para indicar qué tipos de fuego puede apagar el extintor.
 - Coordenadas. Este atributo contiene la localización espacial del extintor.
- Detector de humo
 - Identificador único.
 - Coordenadas. Este atributo contiene la localización del detector de humo.

- Otros sensores
 - Identificador único.
 - Coordenadas. Localización del sensor.

Los atributos de cada objeto almacenan la información necesaria para valorar las características de un posible incendio. Además, la localización de los objetos del edificio puede utilizar un sistema de coordenadas como, por ejemplo, el sistema “*Universal Transverse Mercator*” (UTM) (Snyder, 1987), que permitiría al GCF realizar un razonamiento espacial preciso sobre la emergencia con las coordenadas de un entorno real.

Una característica importante de la base de objetos es su flexibilidad. Pueden añadirse otros tipos de objeto que no se tenían en cuenta al principio, como, por ejemplo, el tipo de objeto “*Ventana*”, además de añadir o eliminar atributos de un determinado tipo de objeto. Este aspecto de la base de objetos confiere al GCF la capacidad para abordar otros tipos de emergencias.

A la hora de construir un árbol de representación, el experto en seguridad del edificio es el encargado de asignar los valores de cada atributo. Para facilitarle esta tarea, el GCF le sugiere un conjunto de etiquetas lingüísticas (Zadeh, 1975). Por ejemplo, el atributo “*Toxicidad de los materiales*” puede tomar los valores “baja”, “media” o “alta”.

2.3 Procesador de Alternativas

El tercer componente del módulo de conocimiento es el procesador de alternativas, donde el GCF almacena las distintas opciones que tiene el gestor humano para resolver la emergencia. Existen diversas formas de actuar en caso de incendio pero, por simplificación, el GCF se centra en dos formas generales: evacuar a las personas del edificio y extinguir el fuego utilizando extintores. Estas dos alternativas se consideran genéricas porque no contienen información específica de la acción relacionada con ellas, es decir, no indican ni qué camino hay que seguir en la evacuación, ni qué extintor utilizar, simplemente expresan una idea general de la solución del problema. Cuando se produce un incendio, el procesador de alternativas genera automáticamente todas las posibles alternativas para resolver la emergencia partiendo de estas dos alternativas genéricas. El procesador de alternativas supone que todas las alternativas específicas las realizará un vigilante de seguridad concreto y define automáticamente acciones concretas. Por ejemplo, establece quién va a realizar la acción. Así, por cada vigilante, el procesador de alternativas creará una alternativa específica por cada grupo de personas a evacuar y por cada extintor disponible y, además, calculará la ruta más corta para realizar la acción. Esta generación automática de alternativas le permite al gestor de decisiones tener en cuenta todas las alternativas disponibles en un tiempo mínimo. El procesador de alternativas almacena también información de cada alternativa específica como, por ejemplo, la distancia que tiene que recorrer el vigilante para realizar la acción asociada a la alternativa, que será tenida en cuenta posteriormente a la hora de puntuarlas. El procesador de alternativas puede manejar otros tipos de alternativas genéricas y específicas para adaptarse a otros tipos de emergencias.

2.4 Red de Conceptos

El último componente del módulo de conocimiento es la red de conceptos. La red de conceptos es un formalismo de representación conexionista, como muestra la Figura 2, que

almacena conocimiento causal que permite relacionar los distintos conceptos cuyos valores definen el estado actual del edificio en caso de fuego. Una conexión que une dos conceptos tiene asociado un peso que establece la influencia que tiene un concepto sobre otro. Los conceptos, las conexiones y sus pesos tienen que establecerse mediante un proceso que traduce el conocimiento experto sobre el tipo de emergencia en la red de conceptos. El método para construir la red puede aplicarse en otros tipos de emergencias para diseñar una base de conocimiento adecuada.

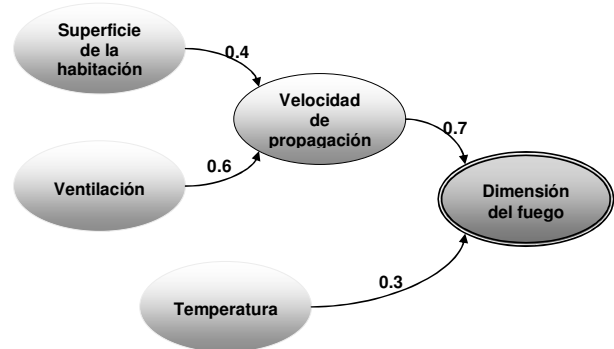


Figura 2. Fragmento de la red de conceptos relacionado con el criterio “*Dimensión del fuego*”.

El GCF define un estado mediante los valores que toman los siguientes criterios: dimensión del fuego, coste material ocasionado por el fuego y riesgo para las personas del edificio. El GCF utiliza estos tres criterios para comparar posibles estados finales alcanzables con la aplicación de las distintas alternativas y saber cuál de ellos es el más satisfactorio. La mejor alternativa será la que produzca el estado final que mejor cumpla con los objetivos, que serán los de minimizar los valores de cada uno de los tres criterios. La red contiene, además de los tres criterios anteriores, conceptos relativos al estado del edificio. La red de conceptos está estrechamente ligada a la información contenida en el árbol de representación ya que obtiene los valores de los conceptos referentes al edificio accediendo a la habitación donde se ha originado el incendio, que está incluida en el árbol de representación. Los valores contenidos en el árbol de representación están definidos por medio de etiquetas lingüísticas, como se comentó en la Sección 2.2. Cada etiqueta lingüística tiene asociado un valor numérico perteneciente al dominio [0,1], que es transparente al experto en seguridad del edificio. Por ejemplo, para el atributo “*Toxicidad de los materiales*” los valores “baja”, “media” y “alta” tienen asociados los valores numéricos 0.2, 0.6 y 1.0, respectivamente. La red propaga los valores de los conceptos mediante sumas ponderadas, como muestra la expresión (1), hasta dar un valor final a los tres criterios: dimensión del fuego, coste material ocasionado por el fuego y riesgo para las personas del edificio.

$$v_j = \frac{\sum_i w_{ij} \cdot v_i}{\sum_i w_{ij}} \quad (1)$$

En la expresión (1), v_j es el valor del nodo j , v_i es el valor del nodo origen i y w_{ij} el peso del arco que une el nodo i con el nodo j . Por construcción, los valores finales de los criterios estarán contenidos en el dominio [0,1].

Cabe destacar que, dependiendo de las características de las alternativas específicas, el estado inicial evolucionará en una dirección u otra. Por ejemplo, una alternativa específica que usa un extintor que está lejos del fuego producirá un estado final con un valor alto del criterio “*Dimensión del fuego*”, ya que el vigilante tardará mucho en llegar al fuego desde que acceda al extintor. Esta evaluación se lleva a cabo dentro del GCF por medio de las funciones de evolución. Estas funciones toman como entrada los valores de los criterios calculados por la red de conceptos para el estado actual junto con las características de una determinada alternativa A_i (estas características son extraídas del procesador de alternativas) y dan como resultado los valores de los criterios que determinan el posible estado final asociado a esa alternativa. Estas funciones recogen el conocimiento experto acerca de las consecuencias de las alternativas. Las funciones de evolución del GCF asociadas a cada uno de los tres criterios son las siguientes:

$$f_{\text{Extinguir}}(\text{Dimensión}) = 0.6 \cdot (d_i + \text{Dimensión}) \quad (2)$$

$$f_{\text{Extinguir}}(\text{Coste}) = 0.5 \cdot (d_i + \text{Coste}) \quad (3)$$

$$f_{\text{Extinguir}}(\text{Riesgo}) = 0.9 \cdot (d_i + \text{Riesgo}) \quad (4)$$

$$f_{\text{Evacuar}}(\text{Dimensión}) = 1.0 \cdot (d_i + \text{Dimensión}) \quad (5)$$

$$f_{\text{Evacuar}}(\text{Coste}) = 1.0 \cdot (d_i + \text{Coste}) \quad (6)$$

$$f_{\text{Evacuar}}(\text{Riesgo}) = 0.1 \cdot (d_i + \text{Riesgo}) \quad (7)$$

Los parámetros de ponderación de la distancia d y de los tres criterios se fijan heurísticamente mediante conocimiento experto acerca de las alternativas. En todas las funciones de evolución, el parámetro d_i representa un incremento en el valor de los criterios debido a la distancia que tiene que recorrer el vigilante de seguridad para llevar a cabo la acción asociada a la alternativa A_i . Por ejemplo, las funciones (2) y (5) determinan el valor del criterio “*Dimensión del fuego*” para las alternativas de extinguir y evacuar respectivamente. Estas dos funciones indican que cualquier alternativa del tipo “Extinguir”, reducirá en un 40% el valor del criterio “*Dimensión del fuego*” mientras que una alternativa del tipo “Evacuar” no lo reducirá en nada. Dependiendo de las características de cada alternativa específica el estado inicial también evolucionará en una dirección u otra. En este caso, la distancia d es una característica de cada alternativa específica que influye directamente en el valor de los criterios.

Cada criterio perteneciente a la red de conceptos tiene asociado un valor entre 0 y 1 que representa las preferencias del gestor humano. Estas preferencias serán utilizadas por el GCF a la hora de puntuar las alternativas específicas de tal forma que si un criterio no tiene ninguna importancia para el gestor humano, su utilidad será multiplicada por cero. Por el contrario, si un criterio es muy importante, su utilidad se multiplicará por la unidad. El gestor humano establece las preferencias antes de la emergencia y éstas determinan una prioridad en los objetivos de minimizar los valores de cada criterio.

3. MÉTODO DE TOMA DE DECISIONES

El método de toma de decisiones puntúa las alternativas dependiendo de los valores que toman los tres criterios: dimensión del fuego, coste material ocasionado por el fuego y riesgo para las personas. Estos valores representan una estimación del estado final. Es muy difícil estimar el

comportamiento y, por tanto, las consecuencias de un incendio. Por ello, el GCF realiza una primera estimación del valor más probable de cada criterio en el estado final y, posteriormente, utiliza conjuntos borrosos para dar un margen a dicha estimación. Los conjuntos borrosos tienen dos ventajas principales. Primero, proporcionan un límite inferior y superior a la estimación de la red dependiendo del conjunto borroso al que pertenezca. Segundo, permiten al GCF asignar fácilmente una probabilidad a priori a cada posible valor, tarea que sería difícil de realizar utilizando únicamente el valor proporcionado por la red. Por tanto, antes de aplicar el método de toma de decisiones el GCF transforma el valor estimado de cada criterio en un número borroso triangular (Kaufmann and Gupta, 1985) definido por una tripleta (a_1, a_2, a_3) donde a_1 es el mínimo valor posible del criterio, a_2 el más probable y a_3 el máximo valor posible. Esta transformación es necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

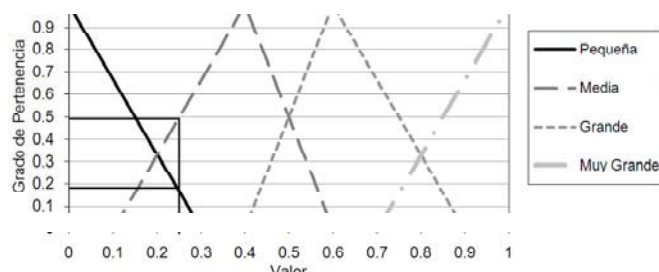


Figura 3. Conjuntos borrosos utilizados para delimitar la estimación del criterio “*Dimensión del fuego*”.

Por ejemplo, como muestra la Figura 3, si el valor del criterio “*Dimensión del fuego*” estimado por la red de conceptos es 0.25, entonces su valor se transforma en el número borroso (0.1, 0.25, 0.6) ya que el grado de pertenencia al conjunto “*Pequeña*” (0.18) es menor que el del conjunto “*Media*” (0.49). De esta manera, los extremos del conjunto “*Media*” (0.1 y 0.6) se eligen para acotar la estimación del valor mínimo y máximo del criterio “*Dimensión del fuego*”. Las funciones de pertenencia para todos los conjuntos tratados por el GCF están definidas por la siguiente expresión:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x - a_1)/(a_2 - a_1), & a_1 \leq x \leq a_2 \\ (a_3 - x)/(a_3 - a_2), & a_2 < x \leq a_3 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (8)$$

donde x es el valor estimado del criterio, a_1 es el valor mínimo posible del conjunto borroso \tilde{A} , a_2 es el valor más probable del conjunto borroso \tilde{A} y a_3 el valor máximo posible del conjunto borroso \tilde{A} . En el caso de que un mismo valor pertenezca a dos conjuntos distintos con el mismo grado, el GCF escoge como valores para acotar la estimación el máximo y el mínimo de los extremos de ambos conjuntos. Por ejemplo, sea un valor estimado de “*Dimensión del fuego*” de 0.5. La transformación producirá el número borroso (0.1, 0.5, 0.9), ya que 0.1 es el mínimo de los extremos de los conjuntos “*Media*” y “*Grande*” y 0.9 es el máximo.

Después de esta transformación, el GCF le asigna una probabilidad a cada valor del número borroso triangular. Estas

probabilidades se han fijado experimentalmente tomando el valor de 0.2 en caso de los extremos y de 0.6 para el valor estimado por la red, que es el valor más probable.

La estructura del GCF permite aplicar distintos métodos de toma de decisiones que proporcionen una puntuación de las alternativas. En este caso, el GCF emplea un método normativo que calcula cuál es la decisión más racional, es decir, la que maximiza la utilidad esperada (Von Neumann and Morgenstern, 1944). El GCF utiliza la siguiente función de utilidad para valorar los estados finales asociados a cada alternativa específica:

$$U_{ij} = \frac{X_{\max_j} - X_{ij}}{X_{\max_j} - X_{\min_j}} \quad (9)$$

X_{\max_j} representa el valor máximo que puede alcanzar el criterio j-ésimo, X_{\min_j} representa el valor mínimo y X_{ij} representa el valor del criterio j-ésimo en el estado final i-ésimo. La utilidad de cada criterio se pondera mediante las preferencias del gestor. Así, si un criterio no tiene ninguna importancia para el gestor humano, su preferencia será cero y, por consiguiente, su utilidad también será cero. Por el contrario, si un criterio es importante, su utilidad se calculará mediante la expresión (9) ponderada por una preferencia distinta de cero (siendo la unidad la preferencia más alta).

El GCF calcula la utilidad esperada de una alternativa, de acuerdo a la expresión (9), mediante la siguiente fórmula:

$$E[\text{Utilidad}(\text{alternativa})] = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M p(\text{Valor}_{ji} | \text{Estado}_i) U_{ij} \quad (10)$$

En la expresión (10), N representa el número de posibles estados finales que puede alcanzar una determinada alternativa. Cabe destacar que cada alternativa específica tiene tres valores diferentes para cada criterio (máximo, mínimo y más probable). Así, cada alternativa puede obtener 27 resultados diferentes (todas las posibles combinaciones de los valores de los tres criterios). M representa el número de criterios que, en el caso estudiado en este trabajo, es tres. Valor_{ji} es el valor del j-ésimo criterio respecto al i-ésimo estado final posible (Estado_i) de la alternativa específica analizada. La función $p(\cdot)$ representa la probabilidad asignada a ese valor del criterio para ese estado final y que, como se ha explicado más arriba, puede ser 0.2 ó 0.6.

Después de aplicar el método de toma de decisiones, el GCF dispone de la lista completa de alternativas posibles puntuadas.

4. INTERFACES GRÁFICAS

Una parte muy importante de cualquier Sistema de Ayuda a la Decisión es la comunicación con el gestor de decisiones. El GCF dispone de dos interfaces gráficas distintas, una para su configuración y otra para la comunicación con el gestor humano durante su funcionamiento. La primera, la interfaz gráfica de configuración, le sirve al experto en la emergencia para interactuar con el GCF. A través de la interfaz gráfica de configuración, el experto humano puede definir la base de objetos que compondrán el árbol de representación junto con todas sus características, los nodos que formarán la red de conceptos y los pesos de sus conexiones. Además, es a través de

esta interfaz donde el experto puede definir qué alternativas genéricas tendrá en cuenta el GCF cuando se dé una situación de emergencia. Otra función de la interfaz de configuración es que permite al gestor humano establecer las preferencias que necesita el GCF para ponderar la utilidad esperada de cada alternativa específica. Esta etapa de configuración es muy importante ya que establece todo el conocimiento experto acerca de la emergencia que será utilizado por el GCF para valorar las alternativas.

La segunda interfaz, la de ejecución, le sirve al gestor humano para comunicarse con el GCF. Mediante esta interfaz, el GCF mostrará al gestor de decisiones la lista de alternativas ordenadas según su utilidad esperada y esperará a que el gestor seleccione una de ellas. En caso de que el GCF haya recibido una falsa alarma de un detector de humos, a través de esta interfaz el gestor humano comunicará al GCF que no existe ninguna emergencia y el GCF volverá a un estado de reposo hasta recibir otra señal de alarma. Dado que la responsabilidad final de tomar una decisión siempre la va a tener el gestor humano, es éste el que debe aceptar como válida alguna de las alternativas. En teoría, la alternativa que ha obtenido la mayor puntuación es la óptima y la que se debería llevar a cabo. Sin embargo, en la práctica, el gestor humano puede aceptar una alternativa que no sea la mejor puntuada pero que a su juicio sea la más adecuada.

5. DINÁMICA DEL SISTEMA

El GCF está conectado a los detectores de humo de todo el edificio, de tal forma que, si se produce un incendio, el detector de humo le enviará una señal al GCF. Cuando recibe una señal de alarma, el GCF identifica qué detector de humo la ha enviado y localiza la habitación donde se ha originado el incendio haciendo uso del árbol de representación. A partir de ahí, extrae la información necesaria de dicho árbol para completar la red de conceptos con los valores correspondientes. Un aspecto fundamental es que el GCF necesita conocer qué vigilantes se encuentran en el edificio. Para ello, cada vigilante deberá disponer de un dispositivo móvil como, por ejemplo, un teléfono móvil o una PDA, desde el cual se da de alta en el GCF cuando comienza su turno y se da de baja al finalizarlo. Cuando el GCF recibe una señal de alarma, éste se comunica con todos los vigilantes dados de alta y les solicita su posición y su disponibilidad. Estas peticiones se realizan automáticamente. Así, el procesador de alternativas dispone de la posición de todos los vigilantes disponibles para solucionar la emergencia. Además de la localización de los vigilantes, el GCF necesita conocer la localización de los ocupantes del edificio. Para ello, el GCF está conectado a diferentes sensores de presencia de personas. Cuando el GCF recibe una alarma, éste crea una lista de los distintos grupos de personas presentes en el edificio y sus localizaciones. Como la posición de los extintores del edificio ya está disponible en el árbol de representación, el procesador de alternativas tiene todo lo que necesita para generar las alternativas específicas y calcular sus características. Cabe destacar que todas estas acciones se producen en tiempo real.

El GCF mostrará al gestor de decisiones la lista de alternativas y esperará a que el gestor seleccione una de ellas. Cuando el gestor humano valida una alternativa, el GCF le envía automáticamente al dispositivo móvil del vigilante asociado a dicha alternativa la orden correspondiente junto con toda la información necesaria para llevarla a cabo (posición del extintor, ruta más corta, etc.). Una vez que el GCF ha enviado la orden al vigilante, vuelve a

generar todas las alternativas posibles teniendo en cuenta que el vigilante que está realizando ya una acción no puede realizar otra más simultáneamente y que los recursos utilizados por éste (como extintores, etc.) no pueden ser utilizados por otro vigilante. El GCF repite el proceso para puntuar las alternativas y se las vuelve a presentar ordenadas según su utilidad esperada al gestor de decisiones. Esta forma de operar del GCF se fundamenta en la idea de que la ejecución de una única alternativa puede ser insuficiente para mitigar totalmente la emergencia y que, para ello, sean necesarias varias alternativas simultáneas.

Una vez finalizada la emergencia, el gestor de decisiones es el encargado de comunicar al GCF que la crisis ha sido resuelta para que termine su ejecución y se ponga a la espera de recibir otra señal de alarma. Durante la emergencia, los vigilantes pueden comunicarse con el GCF para pedirle que reenvíe la última orden que tenían que ejecutar o pueden comunicarle alguna incidencia que les impida llevar a cabo la acción como, por ejemplo, que una puerta está obstruida y no puedan seguir la ruta especificada por el GCF. En ese caso, el GCF actualizará el árbol de representación definiendo la puerta como no disponible y volverá a recalcular las acciones que puede realizar el vigilante con la nueva información. Por ejemplo, la localización actual del vigilante puede ser más adecuada para recoger un determinado extintor que antes del incidente estaba demasiado lejos. De nuevo, es el gestor humano el que tiene que elegir una de las alternativas puntuadas.

La Figura 4 recoge la dinámica general del GCF junto con sus comunicaciones con los distintos dispositivos que intervienen en la emergencia. Estas comunicaciones se realizan en tiempo real y, debido a la naturaleza del problema, tienen que producirse en un tiempo mínimo.

Figura 4. Esquema del GCF y sus comunicaciones con los detectores de humo, los sensores, los vigilantes y el gestor humano.

6. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

El principal inconveniente de los sistemas de ayuda a la decisión en situaciones de emergencia es su validación en situaciones reales. Por ejemplo, es prácticamente imposible provocar un incendio real únicamente para probar el sistema. Por tanto, la validación del GCF se ha realizado en un banco de pruebas con escenarios simulados definidos por un experto en la emergencia. El GCF ha sido implementado en *Java* para que sea lo más independiente posible de la plataforma desde la que opere.

Las pruebas que se han llevado a cabo han permitido establecer

los parámetros de las estructuras de datos, información y conocimiento así como de los procedimientos, que operan sobre ellas, y que conducen a un correcto funcionamiento del GCF en los escenarios simulados. Estas pruebas se han realizado en modo local y en modo integrado. Ambos tipos de pruebas buscan la coherencia y consistencia entre las alternativas propuestas por el GCF, el conocimiento interno de que éste dispone ante el escenario presente de crisis y las preferencias del gestor humano al que asiste el sistema desarrollado.

6.1 Modo local

Las pruebas en modo local, con el GCF residente en un ordenador sin comunicación con ninguno de los sensores ni vigilantes, han consistido en simulaciones de las condiciones en diferentes escenarios y han conducido a determinar los parámetros del módulo de conocimiento y de los procesos que a continuación se detallan:

- Red de conceptos. A partir de conocimiento experto sobre este tipo de crisis en instalaciones críticas se ha establecido el conjunto suficiente y necesario de los nodos que representan los objetos estructurales e infraestructurales de un escenario patrón y el conjunto crítico de criterios que intervienen en la decisión tras la realización de diferentes pruebas. También es necesario determinar la ponderación de las relaciones causales presentes en la red ya que el valor de cada nodo se calcula de acuerdo al valor de los nodos conectados a él. Los pesos w_{ij} se han ajustado utilizando conocimiento experto sobre este tipo de crisis y realizando simulaciones, para diferentes escenarios, que permiten verificar la consistencia del valor de los criterios a partir de los valores de los nodos de los que depende.
- Funciones de evolución. De acuerdo a las alternativas genéricas Evacuar y Extinguir se han evaluado diferentes funciones analíticas que relacionan el valor de los criterios antes y después de la aplicación de cualquier alternativa. Para ello, y considerando de nuevo el conocimiento experto, se ha optado por funciones lineales que toman un valor concreto para cada alternativa específica y para cada criterio a optimizar.
- Preferencias del gestor humano. Se ha estudiado la respuesta del GCF para diferentes preferencias del gestor humano en diferentes escenarios simulados para verificar la coherencia de estas preferencias con la lista de alternativas ordenadas propuesta por el GCF. En este punto es posible volver a considerar, dentro del proceso iterativo que supone el diseño y desarrollo de un sistema basado en el conocimiento, algunos de los pasos previos descritos y modificar el contenido de las bases de conocimiento sobre las que se asienta el sistema.
- Métodos de toma de decisiones. Se han estudiado y probado tres métodos de toma de decisiones, dos de ellos basado en la teoría de la posibilidad y uno en la teoría de la probabilidad. Tras las pruebas realizadas, se ha optado por incorporar el método basado en la utilidad esperada (teoría de la probabilidad) ya que éste era el que daba lugar a la lista ordenada de alternativas que mejor se adaptaba a las preferencias del gestor humano.

- Interfaz. La presentación de la información del sistema y la introducción de los datos para las simulaciones que han permitido estudiar y analizar las diferentes partes del sistema y, de este modo, establecer la estructura y contenido de las mismas se ha llevado a cabo a través de una interfaz diseñada y desarrollada ad hoc para ello.
- Interacción simulada con el resto de componentes. Se han desarrollado los módulos que simulan la relación bidireccional entre el GCF, los sensores y los vigilantes. Todos ellos se ejecutan desde el mismo ordenador.
- Tiempo de ejecución. Se han probado escenarios simulados con diferente número de alternativas disponibles para comprobar la velocidad con la que el GCF genera la lista de alternativas. La tabla 1 recoge los tiempos de cálculo empleados por el GCF desde que le llega una alarma hasta que devuelve la lista de alternativas disponibles. Estos tiempos se han obtenido para un hipotético escenario sobrecargado con cien extintores, cien grupos de personas que pueden evacuarse y diferente número de vigilantes y posibles salidas de evacuación. Los tiempos que aparecen son la media de diez ejecuciones distintas para cada escenario y se han medido en un Pentium IV a 3.00 GHz y con 1.00 GB de RAM.

Tabla 1. Tiempos de cálculo del GCF de las alternativas disponibles en diferentes escenarios simulados

Caso	Vigilantes	Salidas	Alternativas	Tiempo (seg)
1	1	1	200	0.133
2	1	2	300	0.406
3	1	3	400	0.773
4	2	1	400	0.257
5	2	2	600	0.805
6	2	3	800	1.832
7	3	1	600	0.398
8	3	2	900	1.312
9	3	3	1200	3.065

Las simulaciones en modo local se han realizado sobre el hipotético escenario presentado en la Figura 5. Según el objetivo de cada simulación, este escenario se ha modificado añadiendo extintores, grupos de gente, sensores, vigilantes y detectores de humo. El escenario es lo suficientemente grande como para que puedan definirse los extintores y grupos de gente necesarios para que exista una variedad de alternativas disponibles considerable y pueda probarse el funcionamiento del GCF en diferentes condiciones.

Figura 5. Dibujo del escenario base utilizado en las simulaciones en modo local del GCF.

6.2 Modo integrado

Las pruebas en modo integrado, con el GCF residente en un ordenador y varios sensores y dispositivos móviles (vigilantes) conectados a la misma red inalámbrica, han consistido en simulaciones de las condiciones en un único escenario y han conducido a comprobar el correcto funcionamiento de las comunicaciones del sistema.

Se desarrollaron y probaron con éxito las comunicaciones con las que el GCF obtiene información acerca de los sensores y los vigilantes. Además, se desarrollaron y probaron con éxito las comunicaciones con las que el GCF facilita información a los vigilantes.

7. CONCLUSIÓN

Las situaciones de emergencia, como son los incendios, requieren una actuación rápida y precisa para ser mitigadas. En este trabajo se ha presentado el Gestor de Crisis de Fuego – GCF un Sistema Computacional de Ayuda a la Toma de Decisiones que facilita al gestor humano la elección de la mejor o mejores alternativas para mitigar un incendio en un edificio. El GCF utiliza conocimiento experto acerca del incendio, información espacial acerca del edificio y de los objetos contenidos en él y conocimiento experto acerca de las alternativas disponibles para mitigar la crisis. Su funcionamiento se basa principalmente en la estimación del estado final asociado a cada alternativa a través de una red de conceptos que define cómo evolucionará el estado inicial dependiendo de la alternativa considerada. El GCF puntúa cada alternativa calculando su utilidad esperada y, por tanto, necesita una probabilidad asociada a cada posible estado final. Los valores estimados de los criterios proporcionados por la red se delimitan utilizando conjuntos borrosos, que proporcionan una forma sencilla de asignar probabilidades.

El GCF le muestra al gestor de decisiones las alternativas ordenadas según su utilidad esperada y permanece a la espera de que seleccione alguna de ellas. El GCF tiene en cuenta que pueden ser necesarias varias alternativas simultáneas para mitigar la crisis producida por el fuego. El GCF utiliza un sistema heterogéneo de sensores (detectores de humo y sensores volumétricos) y un sistema de gestión de vigilantes que le permiten conocer en todo momento la posición y estado de los vigilantes, la presencia o no de personas dentro del edificio y, por supuesto, si se ha iniciado un incendio en alguna habitación del edificio. Además, la estructura modular y flexible del GCF le permite adaptarse a otro tipo de emergencias utilizando una red de conceptos y el conocimiento experto adecuados. Un aspecto muy importante de la metodología empleada para el diseño e implementación del GCF es que puede utilizarse para diseñar otros sistemas de ayuda a la decisión en otros tipos de emergencias constituyendo, por tanto, una metodología independiente del dominio.

El GCF ha sido validado únicamente en escenarios simulados por la dificultad de hacerlo en escenarios reales debido a la naturaleza del problema que aborda. Las pruebas que se han llevado a cabo han permitido establecer los valores de los parámetros que conducen a un correcto funcionamiento del GCF en los escenarios simulados. La validación del GCF asegura la coherencia y consistencia entre las alternativas propuestas por el sistema, el conocimiento interno de que éste dispone ante el escenario presente de crisis y las preferencias del gestor humano al que asiste el sistema desarrollado. Además, también se han

validado las comunicaciones con las que el GCF obtiene información acerca de los sensores y los vigilantes y las comunicaciones con las que el GCF facilita información a los vigilantes.

El punto más crítico del sistema es la velocidad con la que el GCF produce la lista de alternativas disponibles ya que está diseñado para trabajar en tiempo real, siendo la eficiencia del mismo un aspecto muy importante. El GCF tarda un poco más de tres segundos (3.065) en procesar 1200 alternativas en total. De ellas 400 corresponden a cada vigilante, que en este caso (última fila de la tabla 1) son 3. De las 400 alternativas asignadas a cada vigilante, 100 corresponden a extinguir el fuego utilizando los 100 extintores distintos presentes en el escenario simulado. Las otras 300 corresponden a rutas de evacuación para cada grupo de personas (hay 100 grupos) y las tres salidas distintas que hay disponibles. Resulta muy difícil llegar a un número tan elevado de alternativas disponibles en un escenario real y para un número inferior a 600 alternativas disponibles (filas 5 y 7 de la tabla 1) el GCF tarda menos de un segundo en dar una respuesta. Nótese que el escenario para las simulaciones de los tiempos de cálculo dispone de 100 extintores distintos y 100 grupos de personas que pueden ser evacuados. Este tiempo siempre podrá reducirse empleando un ordenador con una velocidad de proceso más rápida, aunque los tiempos de ejecución obtenidos, como se ha comentado anteriormente, son aceptables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del marco del proyecto HESPERIA (CDTI - Programa CENIT - 2005).

REFERENCIAS

- Aamodt, A. and E. Plaza (1994). Case-based reasoning; Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Communications*, **7**, 39-59.
- Aleskerov, F., A. I. Say, A. Toker, H. L. Akin and G. A. Altay (2005). Cluster-Based Decision Support System for Estimating Earthquake Damage and Casualties. *Disasters*, **29**, 255-276.
- Bonazountas, M., D. Kallidromitou, P. Kassomenos and N. Passas (2007). A decisión support system for managing forest fire casualties. *Journal of Environmental Management*, **84**, 412-418.
- Bonzano, A., P. Cuninghame and C. Meckiff (1996). ISAC: A CBR System for Decision support in Air Traffic Control. In: *Proc. of EWCBR '96, Advances in Case-Based Reasoning* (I. Smith & B. Faltings (Ed.)). 44-57. Springer Verlag Lecture Notes in AI.
- Church, R. L. (2002). Geographical information systems and location science. *Computers & Operations Research*, **29**, 541-562.
- Ferguson, G. and J. Allen (1998). TRIPS: An Integrated Intelligent Problem-Solving Assistant. In: *Proc. of the 15th National Conference on Artificial Intelligence*. 567-572. AAAI Press.
- Gorry, A. and M. Scott-Morton (1971). A framework for Management Information Systems. *Sloan Management Review*, **13**, 55-70.
- Hämäläinen, R. P., M. R. K. Lindstedt and K. Sinkko (2000). Multiattribute Risk Analysis in Nuclear Emergency Management. *Risk Analysis*, **20**, 455-467.
- Iglesias, A., M. D. del Castillo, M. Santos, J. I. Serrano and J. Oliva. A comparison between possibility and probability in multiple criteria decision making (2008a). In: *Computational Intelligence in Decision and Control* (D. Ruan, J. Montero, J. Lu, L. Martínez, P. D'hondt & E. E. Kerre (Ed.)). 307-312. World Scientific. London.
- Iglesias, A., M. D. del Castillo, J. I. Serrano and J. Oliva. A Comparison of Hybrid Decision Making Methods for Emergency Support (2008b). In: *Proc. of the 8th International Conference on Hybrid Intelligent Systems* (F. Xhafa, F. Herrera, A. Abraham, M. Köppen, J. M. Benítez (Ed.)). 162-167. IEEE Computer Society Press. Los Alamitos.
- Iglesias, A., M. D. del Castillo, J. I. Serrano and J. Oliva. An iterative decision support system for managing fire emergencies (2010). In: *Computational Intelligence: Foundations and Applications* (D. Ruan, T. Li, Y. Xu, G. Chen & E. E. Kerre (Ed.)). 820-825. World Scientific. London.
- Iliadis, S. L. (2005). A decisión support system applying an integrated fuzzy model for long-term forest fire risk estimation. *Environmental Modelling & Software*, **20**, 613-621.
- Kaufmann, A. and M. M. Gupta (1985). *Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Mora, M., G. A. Forgionne and J. N. D. Gupta (Ed) (2003). *Decision Making Support Systems: Achievements, Trends and Challenges for the New Decade*. Idea Group Inc. London.
- Mowrer, F. W. (2009). Driving Forces for Smoke Movement and Management. *Fire Technology*, **45**, 147-162.
- Overton, I. (2005). Modelling Floodplain Inundation on a Regulated River: Integrating GIS, Remote Sensing and Hydrological Models. *River Research and Applications*, **21**, 991-1001.
- Ray, S. K. and R.P. Singh (2007). Recent Developments and Practices to Control Fire in Underground Coal Mines. *Fire Technology*, **43**, 285-300.
- Snyder, J. P. (1987). *Map Projections – A Working Manual*. US Government Printing Office. Washington.
- Stylios, C. D., V. C. Georgopoulos, G. A. Malandraki and S. Chouliara (2008). Fuzzy cognitive map architectures for medical decision support systems. *Applied Soft Computing*, **8**, 1243-1251.
- Von Neumann, J. and O. Morgenstern (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton Univ. Press. Princeton.
- Yan, W. and C. D. Clack (2007). Evolving Robust GP Solutions for Hedge Fund Stock Selection in Emerging Markets. In: *Proc. of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation* (D. Thierens, H. G. Beyer & J. Bongard, (Ed.)). 2234-2241. ACM Press. London.
- Zadeh, L. A. (1975). The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-I. *Information Sciences*, **8**, 199-249.
- Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, **1**, 3-28.
- Zhang, J., M. Delichatsios and M. Colobert (2010). Assessment of Fire Dynamics Simulator for Heat Flux and Flame Heights Predictions from Fires in SBI Tests. *Fire Technology*, **46**, 291-306.