

SISTEMA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIÓN PARA EL DESPLIEGUE DE MEDIOS AÉREOS DE DEFENSA CONTRA INCENDIOS FORESTALES

J. VARELA, J. E. ARIAS, J. M. COTOS, I. SORDO y J. A. TRIÑANES
Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Universidade de Santiago de Compostela
C/ Constantino Candeira S/N, Campus Universitario Sur, 15782 Santiago de Compostela
eljpet@usc.es

RESUMEN

La magnitud y las características de la problemática asociada a los incendios forestales en Galicia hacen que los medios aéreos cobren un especial protagonismo en las tareas de vigilancia y extinción. Para monitorizar en tiempo real dichos medios, la Xunta de Galicia incorporó como apoyo operativo en 1999 un sistema de Localización Automática de Vehículos (LAV) basado en GPS, redes de comunicaciones móviles y sistemas de información geográfica. Dicho sistema fue dotado de una completa base de datos cartográfica que ha sido progresivamente ampliada hasta un punto en que su contenido ha de ser integrado sistemáticamente para ofrecer al usuario información significativa. Nuestro propósito es ampliar el sistema LAV con un módulo específico de ayuda a la toma de decisión que introduce el seguimiento de incendios activos y caracteriza el entorno de trabajo a través de índices sintetizados mediante análisis de decisión multicriterio (MCDA).

Palabras clave: Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA), Localización Automática de Vehículos (LAV), Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG), comunicaciones móviles.

ABSTRACT

Given the magnitude and characteristics of the fight against forest fires in Galicia (Spain), the aerial resources play a starring role in tasks such as surveillance or extinguishment. As an operational aid, an Automatic Vehicle Location System (AVL) devoted to the real-time tracking of these aircrafts is hosted by the Government of Galicia (Xunta de Galicia) since 1999. The AVL system, which is based on GPS, mobile communications networks and geographical information systems, manages a wide cartographic database that has progressively grown to a size that requires systematic data integration in order to provide the user with significant information. Our main goal now is to expand our AVL system attaching a dedicated decision support module that will trace the

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

progress of active wildfires and characterize the working environment by means of static hazard indexes computed by Multicriteria Decision Analysis (MCDA) techniques.

Keywords: Multicriteria Decision Analysis (MCDA), Automatic Vehicle Location (AVL), Global Positioning System (GPS), Geographical Information Systems (GIS), mobile communications.

1. Introducción

Los incendios forestales destruyen cada año en Galicia miles de hectáreas de superficie forestal. La aparición del fuego se relaciona directamente con factores meteorológicos o estructurales y, muy especialmente, con la mano del hombre: se estima que cerca de un 90% de los incendios es intencionado. La consecuente degradación medioambiental y las severas repercusiones socioeconómicas exigen una gran cantidad de medios materiales de lucha contra el fuego y una planificación y organización muy complejas (Vélez, 2000). La gestión de efectivos tiene lugar a través de una compleja jerarquía de centros de coordinación de operaciones, siendo especialmente destacable la participación de medios aéreos en las tareas de vigilancia y extinción.

Desde hace ya varios años, la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia viene haciendo un esfuerzo por modernizar su modo de trabajo, fruto del cual se han implantado diversos sistemas de información para servir como apoyo operativo específico. En lo que se refiere a la optimización de recursos destinados a la lucha contra el fuego, la gran prioridad fue la adopción en su día de un sistema de localización de vehículos centrado en los medios aéreos.

2. Antecedentes: Sistema de Información para la Supervisión de Medios Aéreos

El Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad de Santiago de Compostela ha venido desarrollando desde 1999 un sistema de información adaptado al Servicio de Defensa contra Incendios Forestales (SDCIF), la unidad administrativa encargada de la gestión de los medios de lucha contra incendios forestales. Se trata de un sistema de Localización Automática de Vehículos (LAV) dedicado a la monitorización de los medios aéreos de vigilancia y extinción. Los sistemas LAV son, en esencia, aquellos sistemas capaces de conocer la posición de los vehículos de una flota en tiempo real y representarlos sobre un mapa de forma automática o bajo demanda ([figura 1](#)). La especificación inicial de requerimientos por parte de los usuarios ha dado lugar a una serie de prototipos agrupados bajo la denominación SISMA (Sistema de Información para la Supervisión de Medios Aéreos).

Para diseñar el SISMA se tuvo en cuenta la organización jerárquica del SDCIF en Centros de Control y Mando (CCM). Bajo la tutela del CCM de Galicia (CCMG) ubicado en Santiago de Compostela operan cuatro CCM Provinciales (CCMP). El CCMG es el encargado de repartir los medios aéreos disponibles entre los CCMP; por su parte, los CCMP se encargan de asignar a cada

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

aeronave el trabajo que debe desempeñar en cada momento basándose en el estado global de la flota o las tareas pendientes.

2.1. Bloques funcionales

La selección de bloques funcionales que en su día se realizó para construir el SISMA puede ser resumida en los siguientes puntos:

- *Posicionamiento*: sistema de posicionamiento global (GPS), basado en la triangulación de las señales radioeléctricas procedentes de la constelación de satélites Navstar (Hurn, 1989). La instalación de receptores GPS permite a los medios aéreos (más de veinte helicópteros y aviones ligeros asignados a diferentes bases dispersas por el territorio gallego) calcular autónomamente su posición, velocidad y rumbo de forma automática, rápida y precisa (unas pocas decenas de metros sin corrección diferencial) en cualquier lugar descubierto, en cualquier momento del día (Wells, 1986).
- *Comunicaciones fijas*: red de datos de la Xunta de Galicia para enlazar centros de control.
- *Comunicaciones móviles*: el enlace entre los CCM y la flota tendrá lugar a través de la red radio de grupo cerrado de usuarios o "trunking" (Hernando *et al.*, 1998) de la Xunta de Galicia siempre que sea posible. Esta red es la elección natural para cualquier flota del sector público que opere en Galicia. Para asegurar las comunicaciones con los medios aéreos se accederá a una red privada de telefonía móvil digital GSM (Balston y Macario, 1993) sólo en caso de que falle la red primaria.
- *Centros de control*: basados en arquitectura PC y sistema operativo Windows NT.

La [figura 2](#) muestra la arquitectura correspondiente al prototipo del SISMA del año 2001, la evolución de los prototipos de los años 1999 y 2000.

2.2. Ingeniería del sistema

La ingeniería del sistema fue basada en el uso de un modelo de ciclo de vida en espiral, la construcción de varios niveles de diagramas de flujo de datos (véase la [figura 3](#)) o DFD (Kendall y Kendall, 1997), y la elaboración de un modelo Entidad-Relación (Silberschatz *et al.*, 1998) mostrado en la [figura 4](#) e implementado según el modelo relacional de bases de datos. Toda la información generada fue recogida en un diccionario de datos.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

2.3. Plataforma software

En los Centros de Control y Mando (CCM), la plataforma software está constituida por diferentes módulos que se reparten una serie de tareas:

- *Sistema de Información Geográfica (SIG)*: desarrollado sobre ArcView versión 3 personalizado mediante Avenue (ESRI, 1996), se ocupa de la representación gráfica y alfanumérica de la flota, del registro de la actividad de la misma en una base de datos compartida, de la gestión cartográfica, de la interacción con el operario a través de una interfaz gráfica de usuario (IGU) y del manejo de una base de datos local con parámetros de configuración.
- *Servidor de comunicaciones (TServer)*: codificado en lenguaje de programación C++ (Schildt, 1995) en el entorno C++ Builder de Borland (Calvert, 1997), gestiona directamente los terminales de comunicaciones instalados en el centro de control para intercambiar información con la flota. Además, dialoga mediante DDE con el SIG asociado para almacenar la actividad de las unidades móviles.
- *Base de datos relacional*: gestionada por SQL Server de Microsoft, maneja en el CCMG un almacén de información compartido por los cinco CCM. Los SIG de los CCM actualizan y acceden a esta información mediante consultas SQL. En la base de datos remota se almacena toda aquella información de la cual deben ser partícipes todos los puestos de monitorización, como, por ejemplo, características de bases y unidades móviles, posiciones de aeronaves, diarios de transmisión y recepción, y asignación de móviles a bases para posibilitar la visualización selectiva de aeronaves desde los CCM.

La relación entre estos elementos software es ilustrada en la [figura 5](#).

2.4. Base de datos cartográfica

La base de datos cartográfica del SISMA pretende contextualizar las coordenadas crudas (en sí mismas, de poca utilidad) que los medios aéreos emiten a los centros de control; se trata de contar en todo momento con la información precisa para caracterizar el entorno de trabajo en que opera cada aeronave. Las principales capas temáticas que se han reunido en los más de tres años de desarrollo del SISMA son: divisiones administrativas (provincias, municipios, parroquias, núcleos urbanos, distritos forestales), toponimia general, vías de comunicación (carreteras y ferrocarril), red hidrográfica (ríos y embalses), espacios naturales protegidos (parques naturales, Red Natura 2000, etc.), mapa forestal, modelos de combustibilidad, contornos de incendios forestales de los años 1997, 1998 y 1999, infraestructura del SDCIF (bases de medios aéreos, puntos de carga de agua, torres de vigilancia, estaciones meteorológicas, tiempos de vuelo), imágenes de satélite SPOT y Landsat, ortofotos, modelo digital del terreno (elevación, pendiente, orientación e iluminación), curvas de nivel, etc.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

El sistema de coordenadas utilizado es UTM (huso 29) con datum europeo de 1950 (Snyder, 1994). Los formatos vectoriales usados son el fichero de formas de ArcView y la cobertura de ARC/INFO, mientras que los modelos raster empleados son imágenes en formato TIFF y estructuras GRID de ARC/INFO.

2.5. Interfaz gráfica de usuario (IGU)

El usuario del SISMA opera directamente sobre ventanas llamadas vistas, que son colecciones de temas o capas temáticas presentadas en un mapa interactivo sobre el que se superponen las posiciones de las unidades móviles. Una vista se compone de zona de visualización y tabla de contenidos. La [figura 6](#) representa la IGU del SISMA; en ella se pueden apreciar las posiciones de diferentes medios aéreos.

Cada posición geográfica (latitud/longitud) recibida desde una unidad móvil es transformada a coordenadas planas UTM y reflejada, a continuación, en la ventana de posiciones como una nueva entrada y en las vistas mediante varios iconos. A cada aeronave le corresponde un círculo de tamaño fijo, una flecha de rumbo, un texto que lo identifica y una traza que marca sus últimas posiciones.

La barra de menús permite el acceso a todas las funciones del software de la base. Cada uno de ellos agrupa un número variable de opciones relacionadas entre sí. Algunas opciones de los menús, como por ejemplo la posibilidad de destinar una unidad móvil a una base concreta o alterar características de las aeronaves, sólo se encuentran disponibles en el CCMG.

2.6. Resultados

A través del SISMA se obtuvo en 1999 un total de 26.072 posiciones procedentes de 23 unidades móviles, a lo largo de 80 días de trabajo. En el verano de 2000 se recogieron hasta 65.693 posiciones (36% de envíos por trunking, 64% por GSM) de 24 unidades móviles, en 78 días de trabajo. En 2001 el SISMA almacenó 85.921 posiciones (24% por trunking, 76% por GSM) durante 104 días de trabajo. Esta evolución ha sido reflejada en la [figura 7](#).

Una vez que el funcionamiento operativo del SISMA se considera correcto en el SDCIF, pretendemos ahora ampliar el sistema con la presencia de un módulo específico de ayuda a la toma de decisión. Este módulo introducirá en el sistema LAV el seguimiento de incendios activos y caracterizará el entorno de trabajo mediante técnicas de análisis de decisión multicriterio (MCDA).

3. Análisis de Decisión Multicriterio Espacial

El conocimiento acumulado en la base de datos cartográfica dota al usuario del SISMA de un volumen de información que en ocasiones resulta difícil de integrar. Consideramos que la aplicación de técnicas de toma de decisión multicriterio puede ayudar a caracterizar el entorno en que operan los medios aéreos. El término análisis de decisión engloba a un amplio conjunto de

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

procedimientos sistemáticos para analizar problemas que requieren decisiones complejas. La estrategia básica consiste en dividir el problema en partes pequeñas bien definidas, analizar cada parte e integrar de manera lógica todos los fragmentos para obtener una solución significativa que permita la selección entre líneas de acción alternativas. Los problemas de toma de decisión implican, típicamente, un número elevado de posibles alternativas y múltiples criterios de evaluación que entran en conflicto entre sí. Habitualmente, las alternativas han de ser valoradas por diversos individuos y grupos de interés, cada uno de los cuales se caracteriza por distintas preferencias con respecto a las importancias relativas de los criterios de evaluación.

Tradicionalmente, las técnicas de toma de decisión multicriterio (MCDM o MCDA) convencionales han sido no espaciales, en el sentido de que asumen homogeneidad en el área de trabajo. Obviamente, esta premisa es poco realista en muchas situaciones, por lo que las investigaciones en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de la MCDM pueden beneficiarse mutuamente: los SIG ofrecen capacidades únicas en cuanto a manejo automático y análisis de una amplia variedad de datos espaciales, mientras que, por su parte, las técnicas MCDM pueden revelar las preferencias de los tomadores de decisiones e incorporarlas al SIG (Jankowski, 1995).

Desde el punto de vista más rudimentario, un problema de decisión multicriterio espacial implica una serie de eventos o alternativas definidas geográficamente, de entre las cuales se selecciona una o más (tras ser ordenadas), de acuerdo con una serie de criterios de evaluación. Decimos que las alternativas son definidas geográficamente en el sentido de que los resultados del análisis (las decisiones) dependen de su disposición espacial. En terminología SIG, las alternativas serán una colección de puntos, líneas, polígonos o celdas a las cuales se han asociado unos valores.

El análisis de decisión multicriterio espacial puede ser interpretado como un proceso que combina y transforma una serie de datos geográficos de entrada en una decisión resultante (salida). Las reglas o procedimientos de decisión, que involucran el uso de datos geográficos y preferencias del usuario, definen la relación entre los mapas de entrada y el mapa de salida. Lo que hacen es agregar datos geográficos multidimensionales en valores unidimensionales que sirven para tomar las decisiones.

3.1. Fases y componentes de un problema de toma de decisión

Cualquier problema de toma de decisión puede ser estructurado en tres fases principales, no necesariamente encadenadas de manera lineal: *inteligencia o comprensión*, donde se determina el problema o las posibilidades de cambio en la situación actual; *diseño*, donde se identifican las posibles alternativas; y *selección*, donde se determina la mejor alternativa.

En general, un problema MCDM estará compuesto por seis elementos:

- Una *meta* o un conjunto de metas que se pretenden conseguir.
- Los *tomadores de decisiones*, junto con sus *preferencias* respecto a los criterios de evaluación.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

- Un conjunto de *criterios de evaluación (objetivos y/o atributos)* sobre la base de los cuales se valorarán las distintas líneas de acción alternativas.
- El conjunto de *alternativas*, esto es, las variables de decisión.
- El grupo de variables incontrolables o *estados del entorno*.
- El conjunto de *consecuencias* o resultados (salidas) asociadas a cada par alternativa-atributo.

Los objetivos se hacen operativos al asignarles uno o más atributos que, directa o indirectamente, miden su nivel de realización. Desde una perspectiva GIS, los atributos serán representados como capas temáticas y las alternativas serán los elementos geográficos (es decir, puntos, líneas y polígonos para el modelo vectorial y píxeles para el modelo raster) que componen estas capas.

3.2. Estructura de un problema MCDM espacial

La toma de decisiones es un proceso que abarca una secuencia de actividades que comienza con el reconocimiento del problema y termina con una serie de recomendaciones. La secuencia podría ser la siguiente (Malczewski, 1999):

1. *Reconocimiento del problema de decisión*: el tomador de decisiones percibe la existencia de diferencias entre el estado actual y el deseado para un sistema.
2. *Determinación de criterios de evaluación (objetivos y atributos)*: se especifica un conjunto completo y consistente de objetivos que refleje todos los aspectos relevantes del problema, y las medidas (los atributos) necesarias para satisfacer estos objetivos. El grado de consecución de los objetivos, medido a través de los atributos, es la clave para poder comparar las alternativas. Los criterios de evaluación son asociados a entidades geográficas y a relaciones entre entidades, por lo cual pueden ser representados mediante mapas de atributos y mapas de restricción.
3. *Generación y evaluación de alternativas*: sobre la base de los mapas de criterio, se hace un filtrado que decide qué alternativas han de ser tenidas en cuenta y se cuantifican sus valores con respecto a todos los criterios. Estos valores son normalizados para permitir su comparación posterior.
4. *Preferencias del tomador de decisión*: son incorporadas como pesos de importancia relativa que son asignados a los diferentes criterios.
5. *Selección de una alternativa*: mediante una regla de decisión o función de agregación apropiada se ordenan las alternativas por orden de preferencia. Aquí se

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

combinan los criterios de evaluación, las alternativas y las preferencias del usuario mediante reglas de decisión diseñadas para seleccionar la "mejor" alternativa, destacar otras alternativas considerables y clasificar las alternativas en orden descendente de preferencia.

6. *Análisis de sensibilidad*: sirve para valorar la robustez del proceso al determinar cómo afectan cambios pequeños en las entradas del análisis a la línea de acción recomendada (la salida). Ante un resultado manifiestamente insatisfactorio habremos de reformular el problema.
7. *Recomendación*: se basará en el ranking de alternativas y en el análisis de sensibilidad, y podrá incluir la descripción de la mejor alternativa o grupo de alternativas.

La [figura 8](#) ilustra una posible manera de articular estas etapas (encuadradas en cada una de las tres grandes fases identificadas en la sección 3.1).

4. Cálculo de un índice estructural de riesgo de incendio

Como ya se ha indicado anteriormente, la acumulación de capas temáticas en la base de datos cartográfica del SISMA ha producido un efecto no deseado de saturación de información. Es deseable poder sintetizar el gran volumen reunido de datos geográficos relevantes en nuevas capas de información que permitan una rápida caracterización del terreno en que operan los medios de extinción. Éste será uno de los principales objetivos de la campaña de 2002; por lo demás, el prototipo para esta campaña es funcionalmente idéntico al del 2001.

Por otra parte, el SDCIF mantiene en Santiago de Compostela una base de datos (denominada LUMES) con información acerca de los incendios forestales producidos en la Comunidad. Una aplicación basada en formulario posibilita el alta de incendios en tiempo real desde los centros provinciales, por lo que no existe ningún motivo para mantener aisladas la monitorización de la actividad de la flota y la supervisión del progreso de los incendios forestales activos.

Así, nos disponemos a clasificar el territorio gallego calculando, mediante técnicas de MCDM, un índice estructural de riesgo de incendio para contextualizar en tiempo real cada incendio activo. Este índice principal será sintetizado a partir de cinco índices secundarios que reflejarán cinco aspectos distintos de lucha contra el fuego: detección, ignición, propagación, grado de protección y valor intrínseco. En el cálculo de cada uno de los cinco índices intervendrán diferentes criterios que en todos los casos serán estáticos: queremos decir con esto que recogeremos factores ligados al territorio con cierta permanencia temporal para valorar el riesgo permanente asociado a los incendios, renunciando a la evaluación del peligro de incendio puntual. De esta manera, abordaremos un enfoque descriptivo (Barredo, 1996), es decir, no acometeremos recomendaciones de cambio en ninguna de las infraestructuras del SDCIF.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

Los problemas MCDA suelen ser clasificados en dos amplias categorías: toma de decisión multiobjetivo (MODM), donde los objetivos se definen de manera explícita y los atributos se determinan en función de los objetivos, y toma de decisión multiatributo (MADM), donde primero son especificados los atributos y los objetivos van implícitos. El primer bloque incluye procedimientos que se adaptan mejor a problemas de diseño basados en el modelo de representación vectorial, mientras que la segunda categoría está formada por técnicas adecuadas para problemas de selección o evaluación cimentadas en el modelo raster (Malczewski, 1999). Dado que nuestro enfoque es puramente descriptivo, usaremos sólo procedimientos MADM.

Se programarán en ArcView (en lenguaje Avenue) todas las rutinas necesarias con el apoyo de la extensión de análisis espacial (ESRI, 1996bis) y las capas de criterio serán almacenadas en formato GRID (formato de tipo raster, adecuado al enfoque MADM).

4.1. Componentes del problema de toma de decisión espacial

En particular, para nuestro problema de toma de decisión, los componentes de nuestro análisis son:

- *Meta*: calcular el índice estático de riesgo de incendio forestal en la Comunidad Autónoma de Galicia.
- *Objetivos*: determinar los cinco índices base a partir de los cuales obtener el índice anterior.
- *Atributos*: las diferentes capas temáticas que intervienen en cada índice.
- *Alternativas*: todas las áreas de 200 x 200 metros (4 ha) en que dividiremos Galicia.

La [figura 9](#) muestra la organización jerárquica de estos elementos.

4.2. Procedimiento

En relación con el diagrama de la [figura 9](#), la definición del problema ha sido establecida en determinar los cinco índices base e integrarlos en un sexto índice denominado de riesgo. Todos los índices serán medidos de forma que los "peores" lugares reciban puntuaciones más altas. El único mapa de restricción presente será la delimitación administrativa de Galicia reflejada en la Base Cartográfica Numérica 1:200.000 (BCN 200) del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Así, valoraremos un total de 738.944 píxeles de 4 hectáreas de superficie en que subdividimos la región gallega. Los criterios de evaluación que intervendrán en cada índice (al igual que sus importancias relativas) son seleccionados sobre la base de la literatura relevante y a los juicios de los miembros del SDCIF emitidos mediante entrevistas y cuestionarios. La *normalización* de capas para medir todos los criterios en una escala común, permitiendo así su comparación, es llevada a cabo mediante la técnica conocida como rango de puntuaciones (Malczewski, 1999), implementada mediante las siguientes ecuaciones:

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}$$

$$v_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}$$

En estas ecuaciones, v_{ij} es la puntuación normalizada de la alternativa (píxel) i -ésima respecto al atributo (capa) j -ésimo, x_{ij} es la puntuación de partida, y x_j^{\max} y x_j^{\min} son los valores máximo y mínimo para el atributo j -ésimo. De esta manera, los valores de las puntuaciones normalizadas están comprendidos entre 0 (valor menos atractivo) y 1 (valor más atractivo). Se usa la primera ecuación para criterios que han de ser maximizados (criterios de beneficio) y la segunda en caso contrario (criterios de coste). Nuestra elección de valorar los "peores" puntos con índices más altos obligará a considerar como criterios de beneficio a aquellos que intervienen incrementando el riesgo (en este sentido, "benefician" al riesgo), y como criterios de coste a aquellos que actúan de manera opuesta.

Las *preferencias del usuario* serán adquiridas mediante la técnica de comparación de pares, desarrollada por Saaty como parte del procedimiento AHP (Saaty, 1990). Está basada en la comparación de criterios uno a uno usando una escala con valores del 1 al 9 para crear una matriz de proporciones. En la entrada del método se sitúan las comparaciones entre criterios y a la salida se obtienen los pesos relativos. Desde un punto de vista práctico, consiste en la normalización del autovector asociado al máximo autovalor de la matriz construida con las proporciones (o matriz recíproca). Una de las salidas del proceso es la razón de consistencia (RC), parámetro escalar que indica la presencia de juicios inconsistentes. Si RC es mayor que 0,1 se sugiere la revisión de los elementos de la matriz inicial.

La *regla de decisión* en la que nos apoyaremos es la técnica TOPSIS (Malczewski, 1999), construida con métrica 2, derivada de procedimientos basados en punto ideal. Estos métodos ordenan las alternativas según su separación de dicho punto, el cual representa una alternativa hipotética que estaría formada por los niveles ponderados más deseados para todos los criterios. La desviación se mide mediante una métrica (se muestra para distancia euclídea):

$$s_{i+} = \left[\sum_j p_j^2 |v_{ij} - v_{+j}|^2 \right]^{1/2}$$

En esta ecuación s_{i+} es la separación entre la alternativa i -ésima y el punto ideal, p_j es el peso asociado al criterio j -ésimo, v_{ij} es el valor normalizado de la alternativa i -ésima en el criterio j -ésimo y v_{+j} es el valor ideal para el criterio j -ésimo. Otro punto de uso habitual es el punto anti-ideal, que se construye de manera similar (ahora tendremos en cuenta las peores puntuaciones para todos los criterios). La mejor alternativa vendrá dada por la máxima separación del punto anti-ideal, de acuerdo con la expresión:

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

$$s_{i-} = \left[\sum_j p_j^2 |v_{ij} - v_{-j}|^2 \right]^{1/2}$$

Ahora, v_{-j} es el peor valor para el criterio j -ésimo. El método TOPSIS combina las dos anteriores expresiones para identificar la mejor alternativa como aquella que está simultáneamente más cercana al punto ideal y más alejada del punto anti-ideal. La cercanía relativa al punto ideal se calculará de la manera siguiente:

$$c_{i+} = \frac{s_{i-}}{s_{i+} + s_{i-}}$$

Dado el enfoque descriptivo que hemos adoptado en nuestro procedimiento, no procede una recomendación final. Por esta misma razón, podríamos argumentar que no existe una necesidad imperiosa de elaborar un análisis de sensibilidad. El elevado número de alternativas, junto con el tratamiento determinístico dado tanto a los datos cartográficos como a los juicios de los expertos (no contamos con suficiente información para proponer variaciones en las entradas) nos han conducido a descartarlo.

4.3. Cálculos

Obviaremos aquí la determinación de los cinco índices secundarios y mostraremos sólo el cálculo del índice final de riesgo. La comparación de pares establecida por los expertos del SDCIF es mostrada en la [tabla 1](#); los pesos resultantes para los cinco índices (RC de 0,007) aparecen reflejados en la [tabla 2](#).

En la [figura 10](#) se ha representado el índice de riesgo; en ella han sido cartografiados con una tonalidad más oscura los puntos de mayor riesgo.

4.4. Validación

Para validar el índice de riesgo se recurrió a los contornos de los incendios forestales registrados en los ejercicios de 1997, 1998 y 1999. A primera vista, la superposición de índice y fuego ya ofrece una cierta correlación, tal y como se muestra en la [figura 11](#); sólo el norte de la provincia de Lugo evidencia una importante discordancia, atribuible a las especiales condiciones meteorológicas que imperan en esa zona durante el verano.

Para profundizar en esta primera impresión, se procedió a construir histogramas zonales para el índice de riesgo. A modo de ejemplo mostramos en la [figura 12](#) la distribución del índice de riesgo para toda Galicia y para los píxeles afectados por el fuego en 1999.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

4.5. Integración en el SISMA

Finalmente, para representar en tiempo real la localización de los incendios forestales activos se accede a través de SQL a la información contenida en la base de datos LUMES; los fuegos son visualizados usando nuevos iconos, que conviven con los ya existentes que representan las posiciones de los medios aéreos (ver [figura 13](#)).

Los incendios activos son caracterizados con la ayuda de una nueva opción en el menú contextual, de modo que, al pulsar con el botón derecho del ratón sobre el icono de un fuego, podremos obtener un completo resumen acerca del entorno en que éste se está produciendo. También se incluye una opción de configuración según la cual el usuario puede ser automáticamente informado de los detalles de un nuevo incendio forestal, siempre que los índices asociados a éste superan unos umbrales previamente establecidos.

5. Conclusiones

El nuevo módulo de apoyo a la toma de decisión fue incluido en el SISMA para su uso durante la campaña estival de 2002. En la actualidad los expertos del SDCIF se encuentran elaborando el informe oficial acerca de su rendimiento; hasta que este informe esté finalizado nos habremos de conformar con las siguientes conclusiones preliminares:

1. Los expertos han mostrado su satisfacción con la información aportada por los índices de riesgo calculados, así como con la monitorización simultánea de incendios activos y medios aéreos. Percibimos claramente que la conformidad de los usuarios está directamente relacionada con su intervención en el proceso de cálculo de los índices (principalmente, en la selección de criterios de evaluación y en su ponderación mediante comparación de pares).
2. La monitorización en tiempo real de incendios activos está limitada por los retardos con que ocasionalmente se dan de alta en la base de datos LUMES desde los CCMP.
3. Dada la gran incidencia de fuegos provocados, es natural que un índice de riesgo estático posea una utilidad limitada. No obstante, ante la dificultad manifiesta de predecir en qué lugar se producirá el fuego, se ha contrarrestado en buena medida este fenómeno en la construcción del índice de riesgo, limitando intencionadamente la participación del índice de ignición (al cual se asigna un peso relativamente bajo en la comparación de pares).
4. El actual índice estático debe dar paso en el futuro a índices dinámicos calculados con frecuencia diaria (o mayor, si es posible), en los que se tenga en cuenta información meteorológica (principalmente viento, humedad relativa y temperatura) obtenida por un conjunto de estaciones meteorológicas dispersas por toda la Autonomía.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

5. A partir de imágenes NOAA, se actualizará en la base de datos cartográfica el estado de la vegetación calculando índices de vegetación anuales (NVDI). Estas imágenes serán asimismo empleadas para calcular diariamente la temperatura superficial del terreno, teniendo en cuenta la emisividad propia de cada tipo de suelo.
6. Es preciso ampliar el contenido de la base de datos cartográfica en cuanto a infraestructuras del SDCIF (pistas de penetración, cortafuegos, etc.), así como mejorar la calidad y la resolución de algunas de las capas existentes (por ejemplo, la de los puntos de carga de agua) para afrontar estudios a nivel de distrito forestal.
7. Finalmente, unas de las líneas de acción previstas es abordar la recomendación de cambios en el emplazamiento de diversas infraestructuras del SDCIF, como por ejemplo, torres de vigilancia, bases de medios aéreos o cortafuegos. Para ello, se está analizando el uso de procedimientos MODM basados en el modelo de representación vectorial.

Referencias bibliográficas

- Balston, D. M. y Macario, R. C. V. (1993): *Cellular Radio Systems – Mobile Communications Series*. Norwood (Massachusetts), Artech House.
- Barredo Calvo, J. I. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Madrid, Ra-Ma.
- Calvert, C. (1997): *Borland C++Builder Unleashed*. Indianapolis (Indiana), Sams Publishing.
- ESRI (1996): *Using Avenue – Customization and Application Development for ArcView*. Redlands (California), Environmental Systems Research Institute.
- ESRI (1996bis): *Using the ArcView Spatial Analyst – Advanced Spatial Analysis Using Raster and Vector Data*. Redlands (California), Environmental Systems Research Institute.
- Hernando Rábanos, J. M., Montero del Pino, M. y Pérez Fontán, F. (1998): *Ingeniería de Sistemas Trunking*. Madrid, Síntesis.
- Hurn, J. (1989): *GPS – A Guide to the Next Utility*. Sunnyvale (California), Trimble Navigation.
- Jankowski, P. (1995): "Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods", *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 3, pp. 251-273.
- Kendall, K. E. y Kendall, J. E. (1997): *Análisis y diseño de sistemas*. México, Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Malczewski, J. (1999): *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Nueva York, John Wiley & Sons.
- Saaty, T. L. (1990): *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh, Expert Choice.
- Schildt, H. (1995): *C++ – Guía de autoenseñanza*. Aravaca (Madrid), Osborne McGraw-Hill.
- Silberschatz, A., Korth, H. F. y Sudarshan, S. (1998): *Fundamentos de Bases de Datos*. Madrid, McGraw-Hill.
- Snyder, J. P. (1994): *Map Projections – A Working Manual*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1395. Washington, D.C., Government Printing Office.
- Vélez Muñoz, R. (2000): *La defensa contra incendios forestales – Fundamentos y experiencias*. Madrid, McGraw-Hill.

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

Wells, D. et al. (1986): *Guide to GPS Positioning*. Fredericton (New Brunswick), Canadian GPS Associates.

TABLAS

Tabla 1. Comparación de pares para calcular el índice final de riesgo

	ID	II	IC	IP	IV
Índice de detección (ID)	1	1/2	1/4	1/3	1/2
Índice de ignición (II)		1	1/3	1/2	1
Índice de propagación (IC)			1	2	3
Índice de protección (IP)				1	2
Índice de valor intrínseco (IV)					1

Tabla 2. Pesos asociados a los cinco índices secundarios

Índice	Peso
Índice de detección (ID)	0,079
Índice de ignición (II)	0,137
Índice de propagación (IC)	0,402
Índice de protección (IP)	0,244
Índice de valor intrínseco (IV)	0,137

FIGURAS

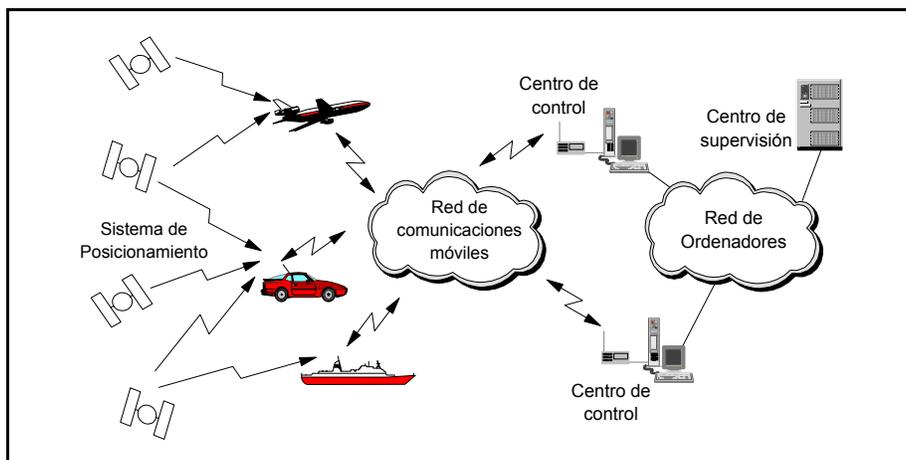


Figura 1. Escenario general de funcionamiento de un sistema LAV

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

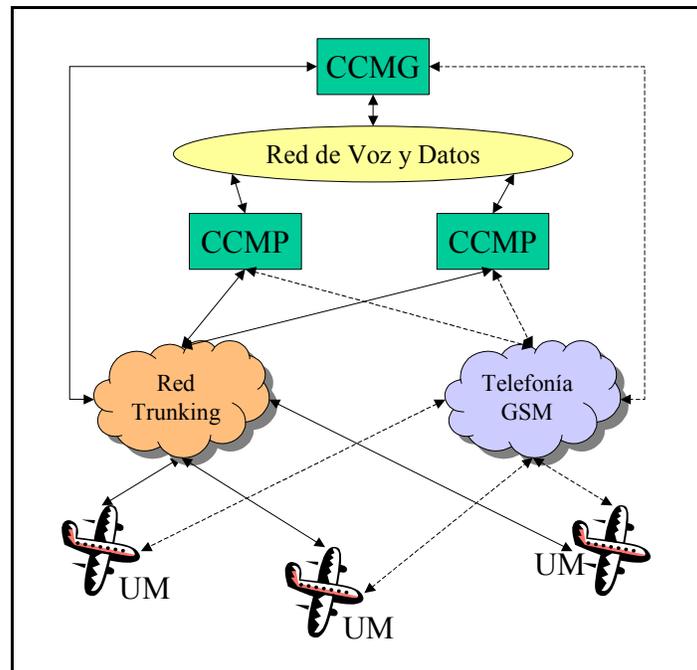


Figura 2. Arquitectura del prototipo del SISMA para el ejercicio de 2001

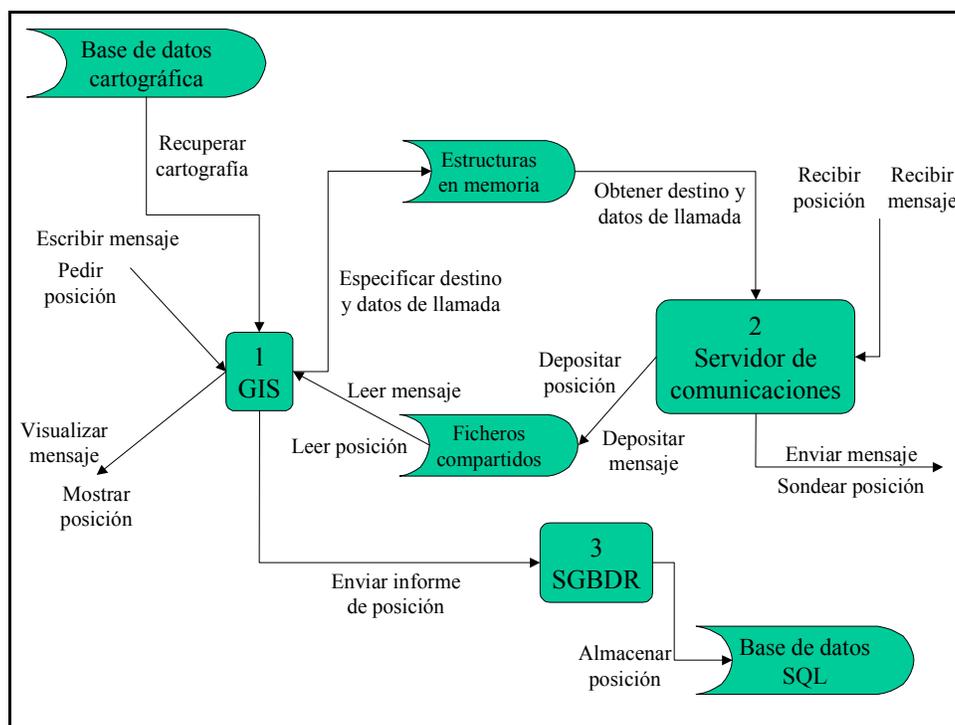


Figura 3. DFD de nivel 1 para el SISMA

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, nº 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

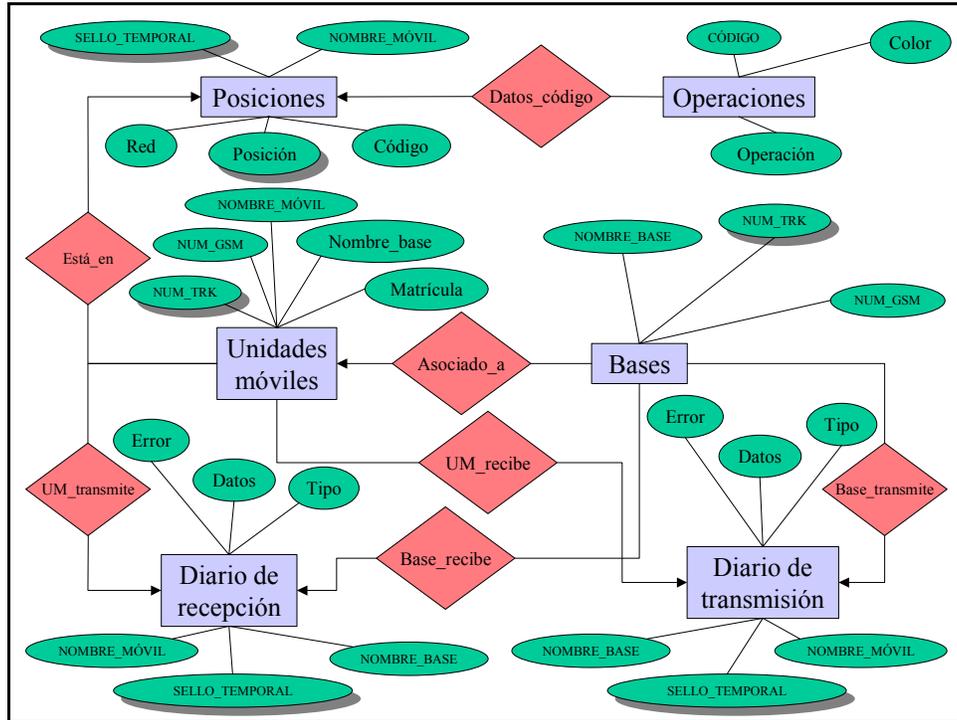


Figura 4. Modelo E-R para el SISMA

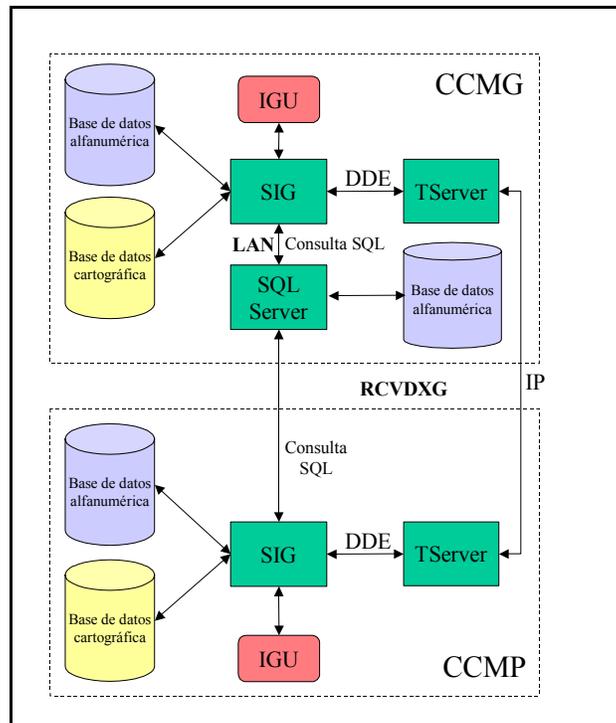


Figura 5. Módulos software en los CCM

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

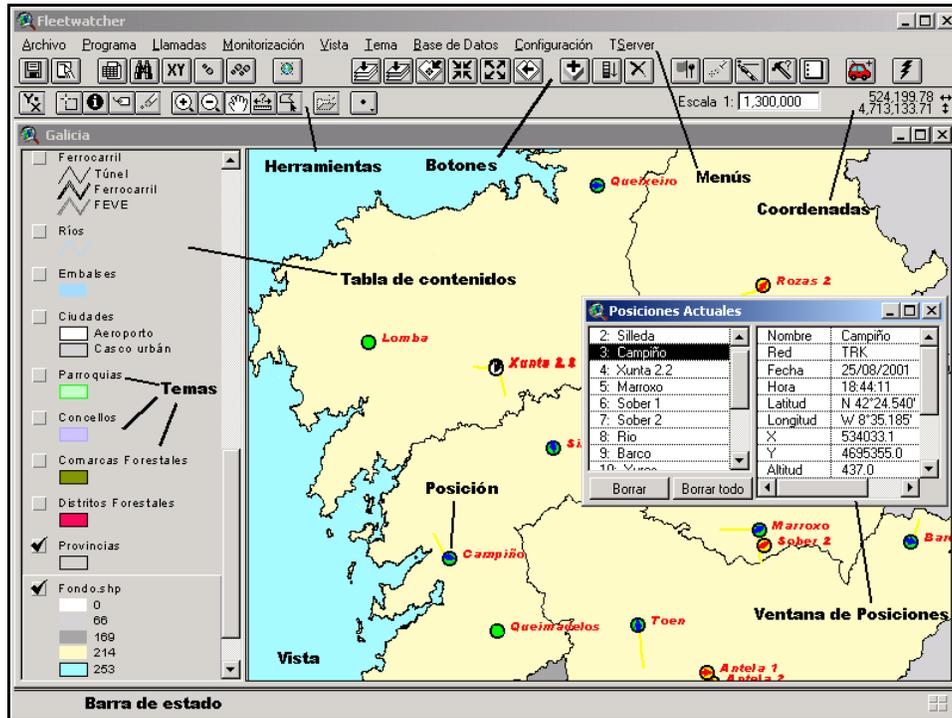


Figura 6. Interfaz gráfica de usuario (IGU) del SISMA en los CCM

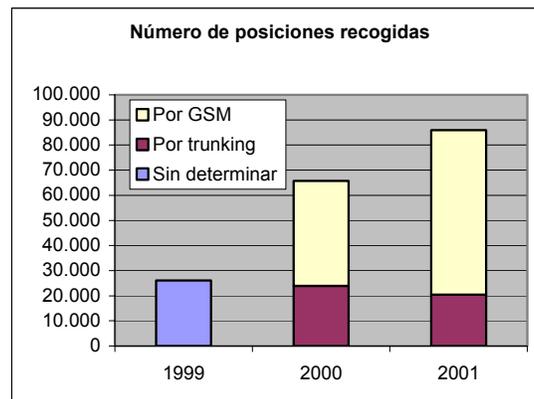


Figura 7. Evolución en el número total de posiciones recogidas por el SISMA

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

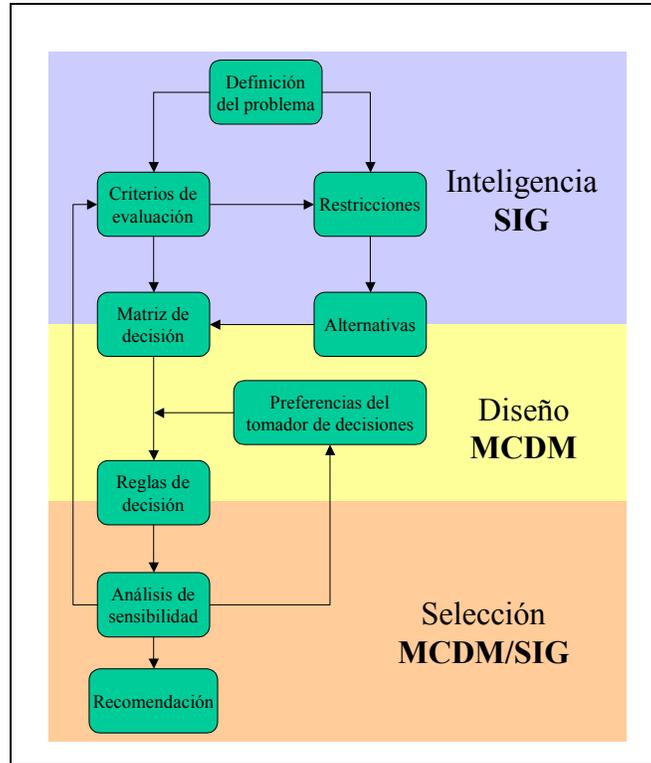


Figura 8. Desarrollo de un problema MCDM
Fuente: Malczewski, 1999

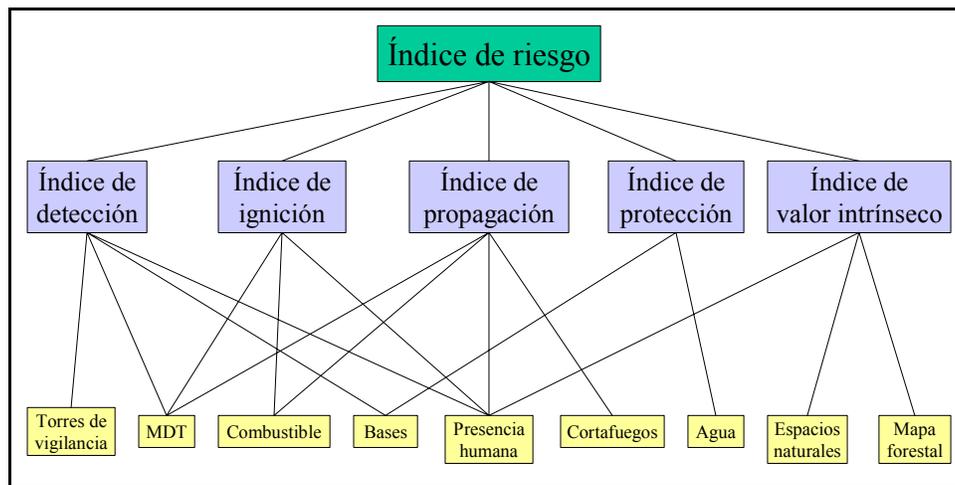


Figura 9. Meta, objetivos y atributos del problema de decisión

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

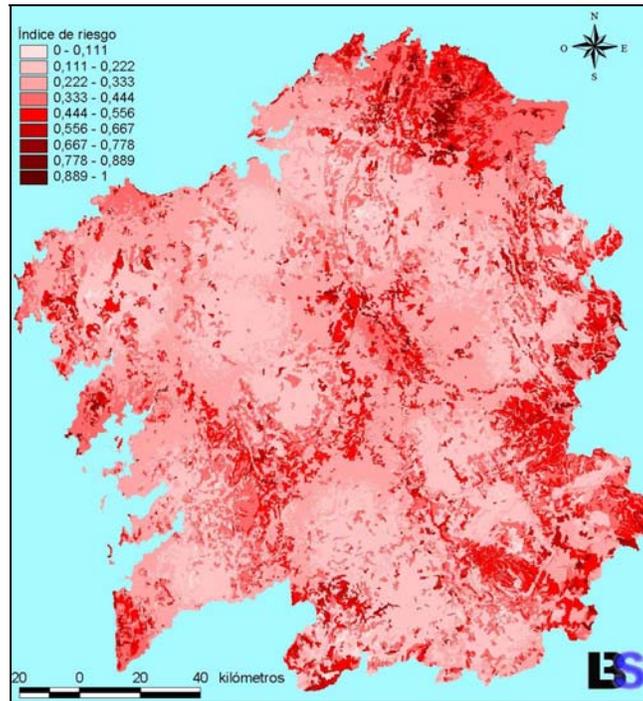


Figura 10. Índice estructural de riesgo de incendio

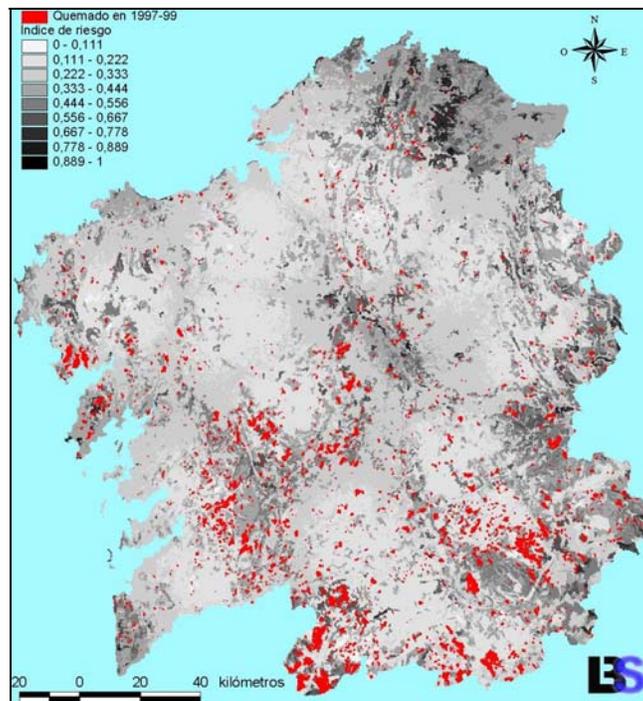


Figura 11. Superposición de índice de riesgo e incendios de 1997, 1998 y 1999

Varela J., Arias, J. E., Cotos, J. M., Sordo, I. y Triñanes J. A. (2002): "Sistema de apoyo a la toma de decisión para el despliegue de medios aéreos de defensa contra incendios forestales", *GeoFocus (Artículos)*, n° 2, p. 78-97. ISSN: 1578-5157

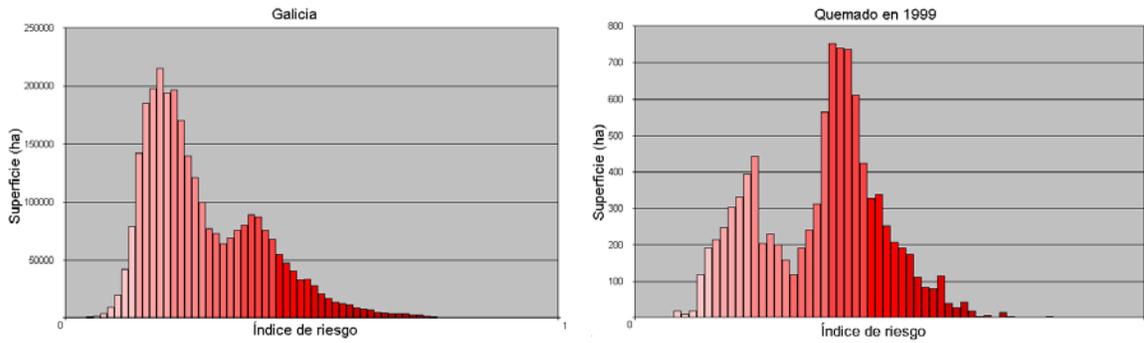


Figura 12. Histogramas zonales para el índice de riesgo

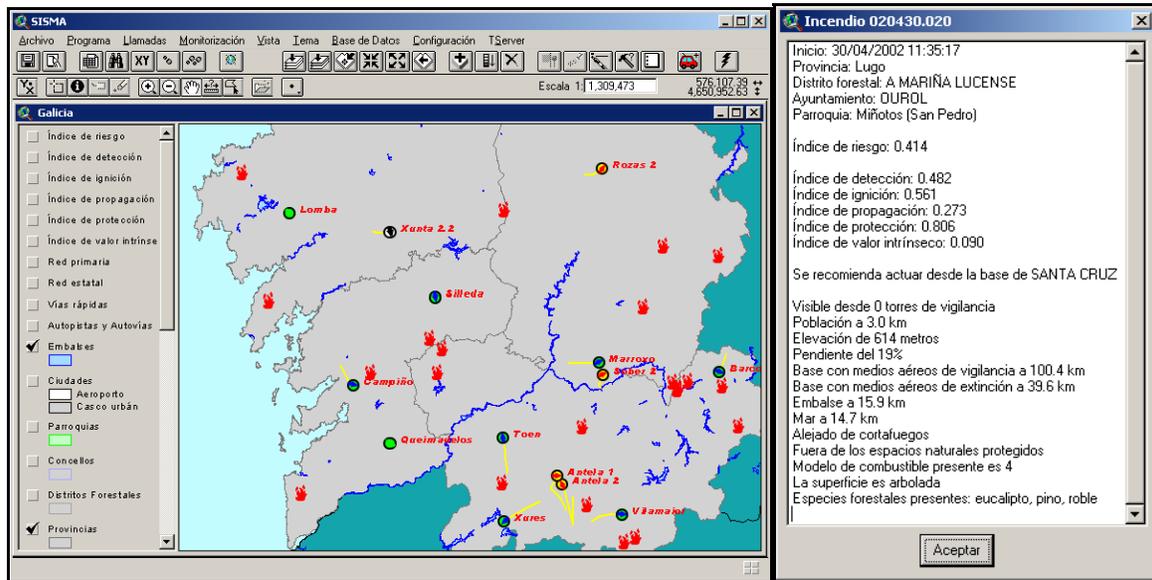


Figura 13. Visualización de incendios forestales en el SISMA