

# EL FACTOR HUMANO EN EL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES A ESCALA MUNICIPAL. APLICACIÓN DE TÉCNICAS SIG PARA SU MODELIZACIÓN

Juan de la Riva Fernández, Fernando Pérez Cabello

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza, C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. E-mail: [delariva@unizar.es](mailto:delariva@unizar.es)

## Resumen

La consideración de la causalidad pone de manifiesto la importancia del factor humano en la ocurrencia de incendios forestales en España. El diseño de modelos operativos de riesgo que contemplen el agente causal debe considerar este aspecto que, por su propia naturaleza, resulta difícil de aprehender e integrar. En el proyecto FIRERISK se ha planteado tal reto, cuyos resultados a escala municipal se recogen en este trabajo. Sobre la base de la espacialización de la ocurrencia -variable dependiente- se abordó posteriormente la selección de las independientes, que actúan como predictoras. El elenco de estas variables socio-económicas se confeccionó con apoyo de bibliografía y entrevistas a expertos. Algunas refieren al riesgo de ignición y/o propagación, otras se relacionan con conflictos que pueden desembocar en el inicio intencionado de un incendio y/o facilitar su propagación. A partir de la tipología obtenida -y de la disponibilidad de información- se introdujeron 34 variables en entorno SIG. Se abordaron diversos análisis estadísticos para la determinación de las variables explicativas. Mediante SPSS se llevó a cabo un exhaustivo análisis exploratorio. Los mejores resultados fueron obtenidos con regresión logística, siendo finalmente integrados en un modelo global de riesgo de incendios.

**Palabras Clave:** Fuegos forestales, factores humanos, gestión sostenible, modelado cartográfico, España.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas mediterráneos de montaña son resultado de las relaciones sinérgicas entre las condiciones físicas y una larga historia de gestión humana en un marco espacial dominado por altos niveles de heterogeneidad e inestabilidad (DE LA RIVA, 1997). En este contexto, el fuego es uno de los principales factores ecológicos y, durante un largo período de tiempo, una herramienta tradicional para el manejo de los paisajes mediterráneos. Aun desde su consideración como un elemento natural, los incendios forestales -en su actual magnitud y recurrencia- están degradando la estructura de los ecosistemas afectados, amenazando el bosque y, en consecuencia, las múltiples funciones que este desempeña.

A pesar de los avances técnicos, particularmente en relación con la detección y la extinción, la incidencia de incendios ha aumentado de forma continua en las últimas décadas, al tiempo que la consideración de la causalidad pone en evidencia la importancia del factor humano. Si bien el conocimiento de los aspectos físicos ha avanzado, es evidente la necesidad de una mejor consideración de los causales de naturaleza humana y socioeconómica (LEONE et al., 2003). Los incendios forestales en la Europa mediterránea están ligados a los actuales modos de vida, el incremento de la movilidad, el turismo y las actividades recreativas, que generan un aumento en el número de visitantes en el bosque.

El caso español es especialmente significativo, por cuanto los incendios forestales son la causa principal de deforestación en las últimas décadas. Los rayos explican tan sólo el 4% de los incendios en España, si bien se evidencia una alta variabilidad espacial: las áreas con mayor incidencia por rayo se encuentran en el Prepirineo y el Sistema Ibérico, con valores próximos al 50% (MARTÍNEZ et al., 2004); en todo caso, las condiciones socioeconómicas y culturales continúan transformando la composición y configuración de nuestros paisajes.

## EL MODELADO ESPACIAL DEL PELIGRO DE INCENDIOS

De lo anterior se desprende la necesidad de que los modelos operativos de peligro de incendio contemplen debidamente el factor humano, si bien es difícil de determinar e integrar.

### *Marco conceptual del modelado espacial del peligro de incendios*

El modelado del peligro de incendios debe incluir la consideración de un elevado número de factores, que se asocian a diversos aspectos del riesgo (CHUVIECO et al., 2004):

- El inicio del fuego, que se identifica con el término inglés “*ignition danger*”.
- La propagación de los focos activos (*propagation danger*).
- Los daños potenciales causados por el fuego, en referencia al concepto de vulnerabilidad (en inglés, “*fire vulnerability*”).

Por otra parte, el análisis puede realizarse a dos escalas temporales distintas:

- A corto plazo, ciertamente difícil de estimar en lo relativo a los factores humanos, por cuanto -con frecuencia- se carece de la información necesaria.
- A largo plazo, abordándose los indicadores estructurales o permanentes del riesgo.

Todo ello puede plantearse a diferentes escalas espaciales. En el proyecto FIRERISK los componentes del peligro son considerados desde una perspectiva amplia (Figura 1):

- El riesgo de ignición, que refiere a los agentes causales del fuego, así como a las condiciones del combustible, tanto vivo como muerto.
- El riesgo de propagación, que considera el comportamiento esperado del fuego a través de programas de simulación.

En este trabajo se presenta el análisis del riesgo de ignición a largo plazo en relación con los factores humanos a escala municipal. Esta escala temporal es útil para comprender los patrones espaciales del riesgo de incendios y mejorar las estrategias de prevención. Por cuanto el análisis del riesgo de incendios implica la consideración de un amplio número de variables, el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) se revela muy apropiado, dado que poseen

capacidades para el análisis espacial de las variables de entrada y facilitan su integración en un sistema de referencia común (CHUVIECO et al., 2004).

### **Métodos para la integración de información: el factor humano**

El componente humano del riesgo de incendios es complejo de modelar debido a que no es fácil individualizar y cuantificar ciertas particularidades del comportamiento humano; por otra parte, es patente la dificultad de espacializar algunos hechos, tales como la piromanía, frecuentemente carente de un patrón espacial claro (LEONE et al., 2003). Las diferentes variables humanas consideradas deben ser ponderadas de acuerdo con su importancia en el inicio del fuego y, de esta forma, combinadas en un único índice; su integración puede abordarse mediante diferentes técnicas, siendo las principales (CHUVIECO et al., 2004):

- Modelos cualitativos, con ponderaciones –arbitrarias- basadas en opinión de expertos.
- Índices cuantitativos, con apoyo en evaluaciones multi-criterio u otros métodos.
- Análisis locales de regresión (técnicas de ajuste).

Estas últimas, las técnicas de regresión, gozan de gran difusión en la descripción de la relación entre una variable dependiente –respuesta- y una serie de variables independientes o explicativas. En este contexto, la ocurrencia histórica es la dependiente, mientras que las variables de riesgo son consideradas independientes o predictoras. Los coeficientes obtenidos se interpretan como los pesos o ponderaciones de cada variable en su participación en el mapa sintético de riesgo. Los modelos existentes en la bibliografía a este respecto contemplan desde el uso de regresiones lineales, múltiples, logísticas o las redes neuronales.

### **La regresión logística**

Esta técnica estadística de regresión es una herramienta flexible, por cuanto permite la entrada de variables independientes continuas y/o categóricas, no exigiendo el principio de normalidad. A diferencia de la regresión lineal, la logística presupone la existencia de una variable dependiente binaria (0,1). La regresión logística se basa en la siguiente función:

$$f(z) = 1/(1+e^{-z})$$

Donde  $z$  es obtenida mediante la combinación lineal de las variables dependientes, estimadas a partir de un ajuste de máxima probabilidad:

$$z = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n$$

Donde  $\alpha$  es la constante y  $\beta_n$  el factor de ponderación de la variable  $X_n$ . Los valores de  $Z$  pueden ser interpretados como una función de probabilidad de ocurrencia.  $F(z)$  transforma los valores de  $z$  en una función continua con rango entre 0 y 1.

Operando de esta forma -dado que los modelos se basan en procedimientos de ajuste- la precisión puede ser evaluada cuantitativamente en términos de porcentaje de varianza explicada, lo que permite una mejor comprensión de la magnitud y el sentido interpretativos de cada variable. La limitación principal se relaciona con el carácter local de los modelos.

## **EL ÁREA DE ESTUDIO**

Se seleccionaron dos áreas de estudio de características físicas similares, pero con diferente estructura administrativa y patrón espacial de ocurrencia de incendios diverso (Figura 2): el Prepirineo occidental aragonés y la rama externa de la Cordillera Ibérica zaragozana. En ambos casos se trata de medios de montaña mediterránea que pueden ser calificados como de alto riesgo en relación con los incendios forestales.

## **LA VARIABLE DEPENDIENTE**

Los registros históricos de incendios son la base para el análisis de la ocurrencia; ésta puede ser expresada de diversas formas: número de incendios, superficie quemada, tamaño medio del incendio, etc. (DE LA RIVA et al., 2004b). La ocurrencia, habitualmente obtenida de las bases de datos de la Admón. forestal, puede ser espacializada de diferentes formas: (1) representación simple de los puntos de ignición mediante sus coordenadas  $x/y$ ; (2) derivación de informaciones secundarias mediante procedimientos de agregación y análisis espacial.

En España, como en otros países, la referenciación espacial de los incendios mediante el uso de coordenadas  $x/y$  - UTM, en nuestro caso- no se ha generalizado hasta los últimos años; de esta forma, los datos históricos son registrados en función de una cuadrícula UTM de 10x10 km, así como a nivel administrativo (municipio). Estos registros, debido a la escasa resolución de la cuadrícula, introducen un elevado grado de incertidumbre en la localización, que se ve incrementada y propagada en los procesos de modelado espacial (KOUTSIAS et al., 2004); los problemas se acentúan cuando se utilizan juntamente con otras informaciones geo-referenciadas para la consecución de modelos explicativos causales del riesgo.

Mediante procedimientos sencillos de superposición se pueden convertir los puntos de ocurrencia en una cartografía de carácter areal. Pero esta forma de proceder asume la incertidumbre de los datos, pudiendo generar errores por la inexactitud en su ubicación. El incremento del tamaño de las celdas elimina estos problemas, pero reduce el nivel de detalle, ocasionando una pérdida de variabilidad espacial por excesivo difuminado de la información.

### **El método kernel de estimación de la densidad**

En lugar de superponer sobre los datos originales una cuadrícula regular, un enfoque alternativo consiste en la estimación de la intensidad –la ocurrencia de incendios- a partir de una *ventana móvil* de dimensiones fijas (DE LA RIVA et al., 2004a). De esta forma, en el presente trabajo se utiliza la interpolación de la densidad mediante el método

*kernel*, transformando los datos puntuales en una superficie continua ráster que es posteriormente expresada en unidades superficiales administrativas (municipios). Cada punto de ignición es así considerado no como una localización exacta sino más propiamente como expresión de un cierto grado de incertidumbre; se procede mediante la superposición -sobre cada punto de observación- de una *kernel* o función de densidad normal bivariada, asignando a cada municipio el valor medio de densidad obtenido para su superficie.

El método sigue los mismos principios que el de ventana móvil *-moving window-* excepto que la ventana de dimensiones fijas es reemplazada por una función tridimensional. Se obtienen así estimaciones más realistas, por cuanto se ponderan los puntos de observación de acuerdo a su posición relativa dentro de la ventana. La expresión matemática es:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K \left\{ \frac{x - X_i}{h} \right\}$$

Donde  $n$  es el número de puntos,  $h$  es el parámetro de suavizado o *bandwidth*,  $K$  es la función de densidad *kernel*,  $x$  es el vector de coordenadas que definen la localización para la que se estima la función y  $X_i$  el vector de coordenadas que define la observación  $i$ .

En la aplicación del método, dos parámetros críticos influyen los resultados:

- Si el parámetro de suavizado *-bandwidth-* adopta un valor constante *-fixed mode-* en toda el área o si varía *-adaptive mode-* en función de la concentración de puntos.
- Las dimensiones del *bandwidth*: valores bajos preservan la variabilidad local, mientras que los más altos generan superficies difuminadas o suavizadas en exceso.

En el presente análisis se ha optado por un valor constante, con el objeto de evitar un tratamiento desigual de los puntos de ignición en áreas con diferente número de incendios; se ha utilizado una función de distribución normal, así como diferentes dimensiones para el *bandwidth*, con objeto de evaluar su influencia en las estimaciones obtenidas. El utilizó el programa CrimeStat®, aplicación diseñada para el análisis del crimen (LEVINE, 2002).

Para mejorar la exactitud en la localización de los puntos de ignición, la ocurrencia histórica fue referenciada mediante un diseño aleatorio dentro de las áreas poligonales generadas por la superposición de la cuadrícula UTM de 10x10 km y los límites municipales; tan sólo fue considerada la superficie forestal de estos nuevos polígonos (Figura 3). Se introdujo en el análisis un área más amplia, con objeto de minimizar los efectos de borde. Se evaluó la influencia de la distribución aleatoria de los puntos en el resultado; por otra parte, se ensayaron diferentes métodos para la definición de las dimensiones más adecuadas del *bandwidth* (V. Figuras 4 y 5, para el *bandwidth* óptimo de 3250 m en el Prepirineo).

## LAS VARIABLES INDEPENDIENTES

La selección de las variables predictoras se llevó a cabo tras el estudio de los factores humanos relacionados con los incendios en el área de estudio. Posteriormente, se recopiló y homogeneizó -en una base de datos georeferenciada- la información relativa a las variables que mejor representaban dichos factores. Puede distinguirse dos tipos de variables:

- Estadísticas, recogidas de fuentes oficiales o de documentos no publicados.
- Cartográficas, normalmente obtenidas de instituciones oficiales a diferentes niveles.

Con objeto de generar nuevas variables derivadas que estuvieran más directamente relacionadas con la ocurrencia se realizaron operaciones y análisis espaciales basados en herramientas SIG: correcciones en la digitalización, superposiciones, planimetría, cálculo de corredores y medidas de distancia, cálculo de índices de paisaje, cuantificación de interfaces entre diversos usos del suelo, etc. Aspecto crítico en estos modelos cuantitativos es el acceso a datos fidedignos, principal dificultad de cara a la obtención de un modelo operativo de riesgo por cuanto persiste la escasez de datos periódicos y estandarizados.

### Tipología de causas

Sobre la base de bibliografía previa, opinión de expertos y resultados de proyectos de investigación precedentes, se confeccionó una lista de factores humanos; al propio tiempo, se individualizaron parámetros operativos para su cuantificación (LEONE et al., 2003; MARTÍNEZ et al., 2004). Aunque la lista no es exhaustiva, refleja la situación española y, por extensión, la de los países de la cuenca mediterránea. De la tipología elaborada resultaron un total de 34 variables que fueron introducidas en un SIG. Entre ellas -organizadas según la relación entre las variables propuestas y los incendios- puede destacarse:

- En relación con transformaciones socio-económicas (6 factores, 9 variables): abandono de las actividades tradicionales; despoblación de áreas rurales, abandono de cultivos; incremento del uso recreativo del bosque (V. Figura 6 referida al número de plazas hoteleras); presencia humana (V. Figura 7 referida al potencial poblacional)...
- En relación con las actividades económicas tradicionales (3 factores, 4 variables): prácticas agrícolas y de pastoreo tradicionales (V. Figura 8, interfase cultivo / forestal)...
- Factores que pueden ocasionar incendios por accidente o negligencia (6 factores, 17 variables): estructura del paisaje; presencia de carreteras, pistas forestales (V. Figura 9, referida a pistas y su densidad municipal en zonas forestales), líneas férreas...
- Factores que pueden limitar la ocurrencia de incendios (2 factores, 2 variables): recursos de extinción y vigilancia...
- Factores que pueden generar conflictos y un inicio intencionado del fuego (13 factores, 2 variables): declaración de espacios protegidos; caza; especulación con el precio de la madera; repoblación forestal...

## REGRESIÓN LOGÍSTICA APLICADA

La variable dependiente fue la espacialización ráster de la ocurrencia obtenida del método *kernel* con resolución

de 100 m, computada por municipios al objeto de realizar el análisis exploratorio de la causalidad. Esta variable fue transformada a una escala dicotómica mediante su división en tres grupos de igual número de casos (46 municipios en cada grupo): 1 = alta ocurrencia, 0 = baja ocurrencia, siendo el intermedio no considerado.

La regresión se aplicó con las 34 variables independientes al objeto de seleccionar las que finalmente serían consideradas. Se eliminó el efecto de la colinealidad, al tiempo que algunas variables –aunque estadísticamente significativas- fueron despreciadas por no mostrar un sentido explicativo claro. Se procedió a aplicar la regresión mediante un número de iteraciones máximo de 20, mediante el procedimiento de pasos “hacia adelante” (*Forward stepwise approach*), más exigente que el de pasos “hacia atrás”; se incluyeron –una a una- las variables que presentaban significación estadística ( $P\text{-Value} < 0,05$ ). El modelo obtenido muestra las siguientes características básicas (V. Figura 10):

- El porcentaje global de acierto es del 77,2% (Tabla 1), mayor en el caso de las situaciones de alta ocurrencia (80,4%) que en las de baja (73,9%).
- La prueba de *Hosmer y Lemeshow* confirma la alta calidad del modelo (Tabla 2).
- Las variables finalmente incluidas fueron (Tabla 3): (1) densidad de pistas forestales que atraviesan áreas forestales, (2) interfase agrícola / forestal, (3) número de plazas hoteleras y (4) potencial poblacional. Todas ellas con significación estadística ( $\sigma < 0,05$ ), siendo la primera variable la que reúne una mayor carga explicativa según  $\beta$ .

## CONCLUSIONES

Se pone en evidencia la necesidad de un mejor conocimiento de los factores humanos del riesgo de incendios, si bien se constata la complejidad de individualizarlos, cuantificarlos e integrarlos en modelos operativos. Para este fin, se demuestra la eficacia de los SIG como herramientas muy apropiadas para el modelado del riesgo. Dadas las características de las variables humanas consideradas, la regresión logística se revela como el método más adecuado de exploración del papel explicativo de los factores implicados. En este marco metodológico, la especialización correcta de la variable dependiente –la ocurrencia histórica- es crítica, mostrándose el método *kernel* de estimación de la densidad como una alternativa muy válida. El modelo generado subraya la importancia –en la explicación del riesgo humano de incendios- de las vías de comunicación en el medio forestal, la interfase agrícola / forestal y la mayor presencia de población en los medios afectados.

## Agradecimientos

Trabajo realizado dentro de los proyectos FIRERISK (AGL2000-0842-C04-04) y FIREMAP (CGL2001-06049-C04-04/CLI), financiados por el M<sup>o</sup> de Ciencia y Tecnología.

## BIBLIOGRAFÍA

- CHUVIECO, E.; SALAS, F.J.; DE LA RIVA, J.; PÉREZ CABELLO, F. y LANA-RENAULT, N.; 2004. Métodos para la integración de variables de riesgo: el papel de los sistemas de información geográfica (SIG). En Chuvieco, E. (Ed.): *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*: 143-183. I.E.G. (CSIC). Madrid.
- DE LA RIVA, J.R.; 1997. El hombre como agente de degradación y transformación del monte mediterráneo. En: J.M.<sup>a</sup> García-Ruiz y P. López-García (eds.), *Acción humana y desertificación en ambientes mediterráneos*: 173-204. I.P.E. (CSIC). Zaragoza.
- DE LA RIVA, J.R.; PÉREZ-CABELLO, F.; LANA-RENAULT, N.; KOUTSIAS, N.; 2004a. Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment* 92: 288-294.
- DE LA RIVA, J.R.; PÉREZ-CABELLO, F.; LANA-RENAULT, N.; KOUTSIAS, N.; 2004b. Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales para la estimación del riesgo. Aproximación metodológica a escala regional. En Faus, C. (coord.), *Libro homenaje al prof. Antonio Higuera*: 303-314. Depto. Geografía y Ordenación del Territorio. Zaragoza.
- KOUTSIAS, N.; KALABOKIDIS, K.D. y ALLGÖWER, B.; 2004. Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods. *Natural Resource Modeling*, 17 (4): 359-376.
- LEONE, V.; KOUTSIAS, N.; MARTÍNEZ, J.; VEGA-GARCÍA, C. & ALLGÖWER, B.; 2003. The human factor in fire danger assessment. En: E. Chuvieco (ed.), *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of Remote Sensing Data*: 143-196 World Scientific. New Jersey - London - Singapore - Hong Kong.
- LEVINE, N.; 2002. *CrimeStat II: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (V. 2.0)*. Ned Levine & Ass., National Institute of Justice. Washington.
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; MARTÍNEZ-VEGA, J. y MARTÍN, P.; 2004. El factor humano en los incendios forestales: análisis de factores socio-económicos relacionados con la incidencia de incendios forestales en España. En: E. Chuvieco (ed.), *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*: 101-142. I.E.G. (CSIC). Madrid.

Tabla 1. Porcentaje de acierto

Observados	Ocurrencia	Predichos Ocurrencia			% acierto
		0	1		
		0	37	9	
	1	12	34	73,9	
% global				77,2	

Tabla 2. Test de Hosmer & Lemeshow (hipótesis nula)

Chi-cuadro	3,316
Grados de libertad	8
Significación estadística	0,913

Tabla 3. Variables incluidas en el modelo y significación estadística

--	--	--	--	--

Variable	$\beta$	$\sigma$ (P-value)	Exp( $\beta$ )
Potencial población	0,0021182	0,006	1,002
Numero de plazas hoteleras	0,0191642	0,040	1,019
Interfase agrícola / forestal	0,0453980	0,041	1,046
Densidad de pistas en área forestal	2,0084359	0,006	7,452
Constante	-5,3071582	0,000	0,005

Figura 1. Variables que intervienen en el riesgo de incendios forestales.

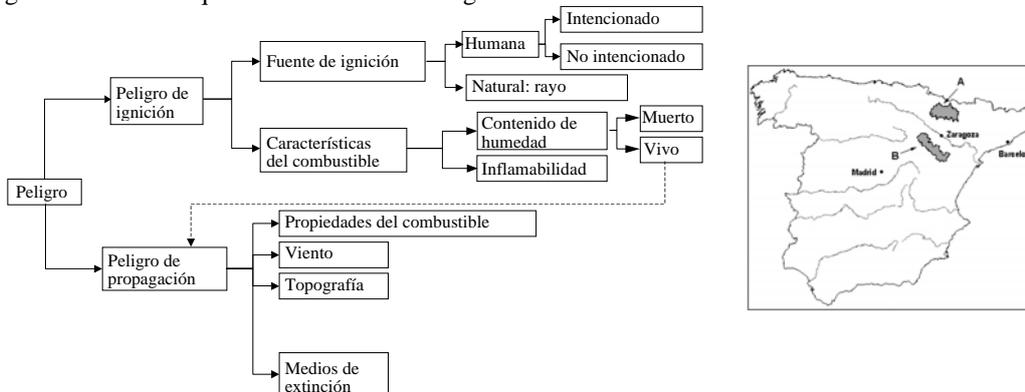


Figura 2: Áreas de estudio.

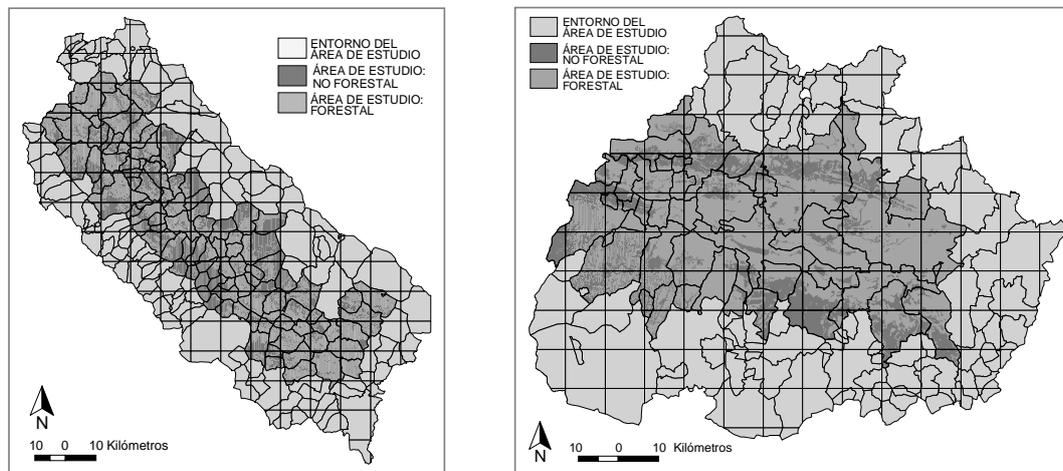


Figura 3. Superficie forestal / no forestal y unidades espaciales de referencia (municipios / cuadrícula 10x10 km): Ibérica zaragozana (izda.), Prepirineo occidental aragonés (dcha.).

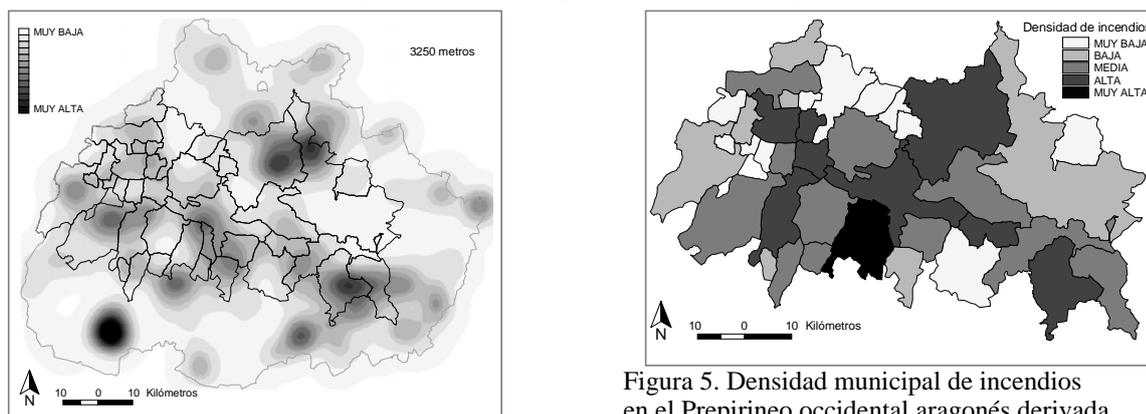


Figura 4. Interpolación kernel (bandwidth de 3250 m) en Prepirineo occidental aragonés.

Figura 5. Densidad municipal de incendios en el Prepirineo occidental aragonés derivada de la interpolación kernel (bandwidth 3250 m).

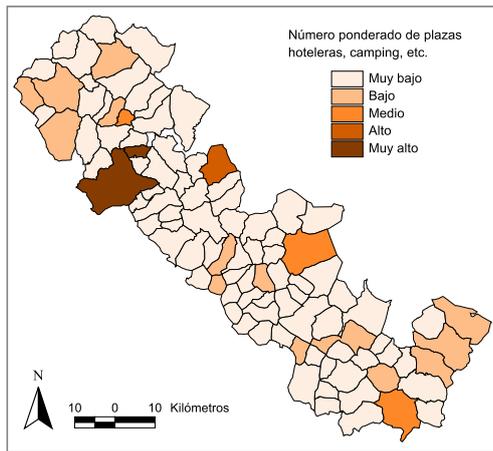


Figura 6. Número de plazas hoteleras por municipio (Ibérica zaragozana).

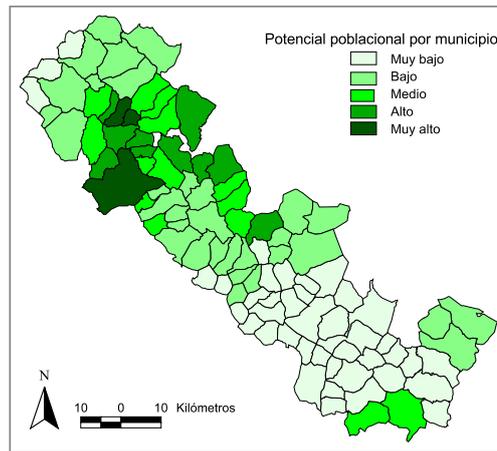


Figura 7. Potencial poblacional por municipio (Ibérica zaragozana).

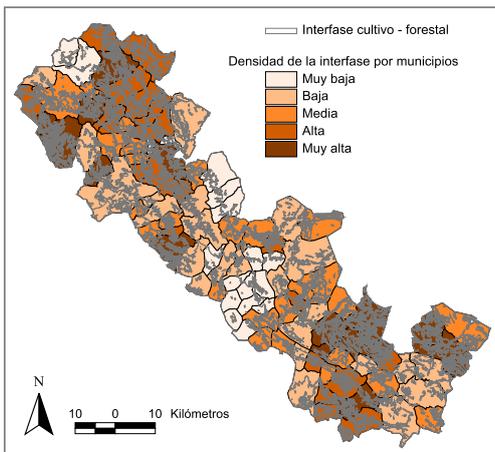


Figura 8. Interfase cultivo / forestal y densidad por municipio (Ibérica zaragozana).

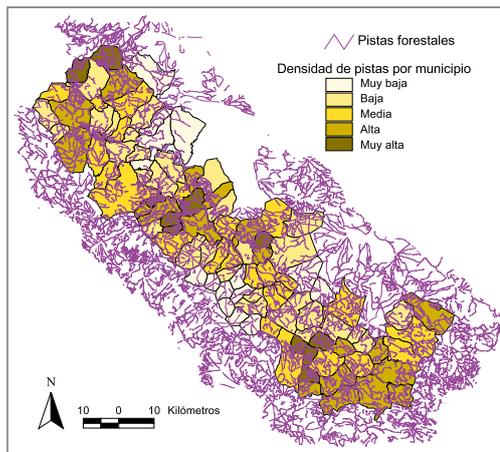


Figura 9. Pistas forestales y densidad por municipio en área forestal (Ibérica zaragozana).

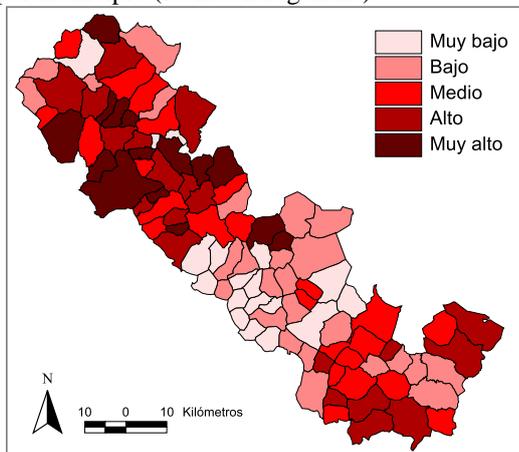


Figura 10. Cartografía final del riesgo humano por municipio (Ibérica zaragozana).