



5º CONGRESO FORESTAL  
ESPAÑOL

# 5º Congreso Forestal Español

Montes y sociedad: Saber qué hacer.

---

REF.: 5CFE01-457

Editores: S.E.C.F. - Junta de Castilla y León  
Ávila, 21 a 25 de septiembre de 2009  
ISBN: 978-84-936854-6-1  
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Modelización de la probabilidad espacial de ocurrencia de incendios forestales por rayo en la provincia de León

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R.<sup>1</sup>, GÓMEZ-CUARESMA, M.<sup>2</sup>, ÁLVAREZ-TABOADA, M.F.<sup>1</sup>,  
MARCOS, J.L.<sup>3</sup>, RUIZ-PÉREZ, I.<sup>4</sup> CASTEDO-DORADO, F.<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de León. ESTIA, Avda. de Astorga s/n. 24400 PONFERRADA (León).

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad de León. ESTIA, Avda. de Astorga s/n. 24400 PONFERRADA (León).

<sup>3</sup> Departamento de Química y Física Aplicadas, Universidad de León. ESTIA, Avda. de Astorga s/n. 24400 PONFERRADA (León).

<sup>4</sup> Junta de Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente. Centro para la Defensa contra el Fuego (CDF), C/ Comandante Cortizo, 24008 LEÓN.

### Resumen

Los incendios forestales son el principal agente perturbador y destructor del medio natural en la provincia de León. De ellos, los originados por rayos, pese a representar globalmente un porcentaje relativamente bajo con respecto al total de los que se producen en la provincia, en determinados años suponen más de un 20% de la superficie total quemada.

En este trabajo se elaboró un modelo que permite estimar la probabilidad espacial de ocurrencia de incendios forestales por rayo en la provincia de León. La función utilizada para modelizar dicha probabilidad fue la función logística, considerando como variable dependiente la presencia/ausencia de al menos un incendio causado por rayo en una cuadrícula de 9 km<sup>2</sup> en el período 2002-2007. Como variables independientes se ensayaron algunas variables fisiográficas y otras relacionadas con la cubierta vegetal y con las descargas de rayos. Con estas variables se generó una base de datos georreferenciada a partir de la que se hicieron llevaron a cabo análisis espaciales mediante Sistemas de Información Geográfica. Las variables que resultaron más significativas fueron el promedio anual de descargas de rayo, la altitud y el porcentaje de rayos caídos en superficie forestal (arbolada y no arbolada). De acuerdo con los estadísticos de bondad de ajuste, el modelo resultante presenta unas estimaciones de la probabilidad adecuadas, si bien éstas dependen del nivel de precisión con el que se ha localizado el punto de inicio del incendio.

A partir de los resultados arrojados por la función logística se elaboró una cartografía de la probabilidad de ignición asociada a rayos en la provincia, resultando ser más elevada en la parte occidental y en la zona de transición entre el páramo y la zona montañosa de la Cordillera Cantábrica. El resultado de la modelización espacial se considera constante en el tiempo, al depender sólo de variables estructurales. En posteriores trabajos se pretende incluir variables meteorológicas que permitan estimar, asimismo, la probabilidad temporal de riesgo de incendio.

### Palabras clave

Incendios forestales, rayo, regresión logística, probabilidad espacial, SIG, León

## 1. Introducción

La provincia de León es la que más incendios sufre en Castilla y León, concentrando año tras año el mayor porcentaje de incendios y de superficie quemada de toda la Comunidad Autónoma. Los incendios provocados por causas naturales (rayo) representan, de media, un 5% de los totales que se producen en la provincia (TÁRREGA y LUIS, 1992). Sin embargo, en algunos años (p. ej., año 2003) han llegado a representar más del 15% de los mismos, y en otros cerca del 25% de la superficie quemada (p. ej., año 2005). Además, el número de incendios forestales por esta causa ha aumentado considerablemente en los últimos años, lo que podría estar relacionado, en último término, con el despoblamiento rural y una mayor acumulación de combustible en el monte.

Por otra parte, la determinación del riesgo de incendio forestal en una determinada zona es uno de los aspectos principales en la gestión de los ecosistemas mediterráneos (VÉLEZ, 2000). La determinación de la probabilidad de ocurrencia de incendios debidos a la actividad humana es compleja ya que intervienen una gran cantidad de factores, muchos de ellos desconocidos. Sin embargo, en el caso de los incendios originados por rayo, las variables meteorológicas, fisiográficas y de combustible forestal pueden explicar un porcentaje elevado de la probabilidad de ocurrencia (NIETO *et al.*, 2006).

Así, la ocurrencia de rayos está relacionada muy estrechamente con la orografía (e.g., RIVAS-SORIANO *et al.*, 2005). Por esta razón, diversos estudios han estimado la probabilidad de ignición por rayos con variables relacionadas tales como la altitud, la pendiente o la orientación (DÍAZ-ÁVALOS *et al.*, 2001). Asimismo, el número de descargas caídas en una determinada zona, la polaridad de dichas descargas y su intensidad son características que diversos autores han encontrado como significativas a la hora de explicar la probabilidad de incendio por rayo (WOTTON & MARTELL, 2005; LARJAVAARA *et al.*, 2005). Por último, un factor importante en la ocurrencia de este tipo de incendios son las características del combustible forestal, especialmente el tipo formación y su contenido de humedad. En este sentido, algunos autores han encontrado que algunos tipos de coberturas vegetales son más propensas que otras, lo que puede ser debido a diferencias en su grado de inflamabilidad (LATHAM & WILLIAMS, 2001).

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un modelo que permita estimar la probabilidad espacial de ocurrencia de incendios forestales por rayo en la provincia de León, es decir, que sirva para identificar las zonas más propensas a este tipo de siniestros. Para ello se utilizarán variables fisiográficas y otras que se pueden considerar relativamente estables en el tiempo: cubierta vegetal existente y variables relacionadas con la descargas de rayos.

El objetivo último es elaborar, mediante Sistemas de Información Geográfica, una cartografía provincial de probabilidad espacial de incendios por rayo que sirva como ayuda en la gestión de las tareas futuras de prevención, detección y extinción de este tipo de incendios.

## 3. Metodología

### 3.1. Datos utilizados

Los datos de la localización de los datos fueron suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. La base

de datos aportada contenía datos sobre las coordenadas estimadas del punto de caída de los rayos, la intensidad de la descarga, la polaridad y el error de la estimación del lugar de caída. En este sentido, y de acuerdo con NIETO *et al.* (2006), se han seleccionado sólo los rayos con un valor de  $\chi^2$  menor que 2 y aquellos con un radio del semieje mayor de la elipse de estimación inferior a 1,5 km. La época del año con una mayor cantidad de rayos caídos (y un mayor número de incendios por esta causa) en la provincia va de mayo a septiembre (ambos incluidos), por lo que sólo se han considerado los datos correspondientes a estos cinco meses. La base de datos finalmente utilizada constó de 78256 rayos, un porcentaje muy alto de los cuales tienen polaridad negativa, como ya apuntaron RIVAS-SORIANO *et al.* (2005) en su estudio sobre caracterización de rayos para la Península Ibérica.

La determinación de los lugares de inicio del incendio se llevó a cabo utilizando los datos de la Estadística General de Incendios Forestales (EGIF) elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino a partir de los datos suministrados por los partes de incendio. En todos los partes se recoge la información del término municipal y de una cuadrícula de 10×10 km (basada en cartografía a escala 1:250.000) donde se inició el incendio. Además, para algunos incendios, el punto de inicio se identificó mediante coordenadas UTM o nombre de la entidad local menor. En función de la información existente sobre la localización del lugar de comienzo cada siniestro, se distinguieron tres supuestos: incendios en los que se conocían las coordenadas UTM precisas (“tipo 1”), incendios en los que se conocían las coordenadas UTM o el nombre de la entidad local menor (“tipo 2”) y total de incendios (“tipo 3”), que incluyen a los dos anteriores y a aquellos de los que sólo se conoce el término municipal o la cuadrícula 10×10 km. El número de incendios por rayo de “tipo 3” en el período 2002-2007 en los meses de mayo a septiembre ha sido de 298, de los que 86 correspondían al “tipo 1” y 111 al “tipo 2”.

Para determinar el tipo de vegetación y cobertura del suelo existente se ha utilizado la base de datos asociada al Mapa Forestal de España correspondiente a la provincia de León disponible en formato digital a escala 1:50.000. Toda la información existente sobre composición y estructura de formaciones vegetales se ha reclasificado en las siguientes clases: masas arboladas de coníferas; masas arboladas de frondosas; masas arboladas mixtas; masas adehesadas; matorrales y herbazales y zonas agrícolas. A su vez, se consideró como superficie arbolada la correspondiente a masas de coníferas, frondosas, mixtas y zonas adehesadas, y como forestal la suma de la superficie arbolada y la de matorrales y herbazales.

Por último, se ha utilizado también un modelo digital de elevaciones (MDE) con un tamaño de píxel de 25×25m para derivar mapas de altitudes, pendientes y orientaciones. Todas las variables analizadas se han modelizado mediante técnicas SIG y se han representado en una malla con un tamaño de celda de 3×3 km. Se ha considerado este tamaño de celda como el más adecuado ya permite obtener una cartografía con resolución espacial adecuada así como tener en cuenta el grado de error asociado con la localización las caídas de rayos y de los puntos de inicio de los incendios.

Para cada celda de 3×3 km se determinó la ocurrencia o no de al menos un incendio causado por rayo durante el período 2002-07 así como las variables derivadas de la información comentada en párrafos anteriores. Algunas de estas variables, fueron: el número de descargas por hectárea forestal (distinguiendo entre positivas y negativas), la intensidad media de las descargas, el porcentaje de superficie forestal, porcentaje de rayos caídos en cada clase de vegetación, la altitud media, la pendiente media, el porcentaje de rayos caídos en orientaciones de solana, umbría, zonas llanas, pendientes del 0 al 20%, 20-60% y >60%, etc.

### 3.2. Análisis estadístico

Para la determinación de los patrones de ocurrencia espacial se pueden utilizar diferentes procedimientos estadísticos. Así, diversos autores han utilizado metodologías estadísticas complejas como los modelos lineales mixtos generalizados o redes neuronales (VEGA *et al.*, 1996; DÍAZ-ÁVALOS *et al.*, 2001; VASCONCELOS *et al.*, 2001). En este trabajo se utilizó la regresión logística, al ser sus resultados muy similares a los de metodologías de modelización mucho más complejas (p. ej., VASCONCELOS *et al.*, 2001) y ser ampliamente utilizada en la determinación de riesgo de incendio (e.g., proyecto FIREMAP: NIETO *et al.*, 2006; NIETO *et al.*, 2008).

La función logística es un modelo adecuado para expresar la relación entre una variable dependiente binomial y un conjunto de variables independientes y por ello se usa habitualmente para desarrollar ecuaciones de predicción de probabilidades de eventos (HOSMER & LEMESHOW, 2000). Los modelos de regresión logística permiten estudiar si una variable binomial (u ordinal) depende, o no, de otra u otras variables explicativas (no necesariamente binomiales). Para modelos de respuesta binaria (ej., presencia o ausencia), la variable respuesta  $y$  sólo puede tomar dos posibles valores, denotados por conveniencia como 0 y 1. En el marco de este estudio, la función logística se ha aplicado a datos de presencia o ausencia de incendios en cuadrículas de territorio de  $3 \times 3$  km, asignándose el valor  $y = 1$  si ha existido incendio e  $y = 0$  en caso contrario.

La determinación de la bondad de ajuste se basó en la correcta clasificación de las observaciones por parte de la función. Este hecho se ha medido mediante el porcentaje de concordancia, que en este trabajo indica, de entre todas las posibles parejas de celdas con diferente comportamiento frente a la presencia de incendio por rayo que se pueden formar, en qué porcentaje de los casos la probabilidad de incendio estimada con la ecuación es mayor para una celda en la que ha habido incendio que para otra sin ella. Asimismo, se ha calculado un estadístico muy utilizado para la determinación de la precisión del modelo logístico: el estadístico de bondad del ajuste de Hosmer-Lemeshow ( $\chi^2_{HL}$ ) (HOSMER & LEMESHOW, 2000).

El ajuste del modelo logístico se llevó a cabo mediante el procedimiento LOGISTIC implementado en el paquete estadístico SAS/STAT<sup>®</sup> (SAS INSTITUTE Inc., 2004). Para la selección de variables regresoras se utilizó el procedimiento de selección de variables *stepwise* considerando un nivel de significación de 0,05 para la entrada y eliminación de variables.

## 4. Resultados y discusión

En la tabla 1 se muestra el valor de las estimaciones de los parámetros de la función logística, así como sus respectivos errores estándar y su nivel de significación, distinguiéndose los 3 casos comentados en el apartado de material y métodos. En todos los casos, los parámetros han resultado significativos a un nivel de significación del 1%.

Tabla 1. Valores estimados de los parámetros y errores estándar de los mismos y valores de los estadísticos de la bondad de ajuste obtenidos en el ajuste del modelo logístico.

Variable	Estimac. parms.	Error estándar	Signif.	% pares concord.	% pares discord.	$\chi^2_{HL}$	Signif.
Incendios "tipo 1" (86 incendios)							
Término indep.	-4,91	0,688	< 0,001	80,0	19,1	10,69	0,2197
Altitud	-0,00186	0,000505	0,0002				
% sup. coníferas	2,45E-6	5,60E-7	< 0,001				
% rayos sup. forestal	0,00646	0,00120	< 0,001				
Nº de rayos/año	0,0756	0,0278	0,0064				
Incendios "tipo 2" (111 incendios)							
Término indep.	-3,73	0,535	< 0,001	78,1	21,0	12,19	0,1427
Altitud	-0,00222	0,000450	< 0,001				
% rayos sup. forestal	0,00579	0,000915	< 0,001				
% rayos en coníferas	0,00299	0,000853	0,0004				
Nº de rayos/año	0,0689	0,0251	0,0061				
Incendios "tipo 3" (298 incendios)							
Término indep.	-2,85	0,374	< 0,001	71,6	27,7	15,29	0,0537
Altitud	-0,00150	0,000369	< 0,001				
% sup. arbolada	0,0121	0,00409	0,0030				
% rayos sup. forestal	0,00317	0,000651	0,0001				
Nº de rayos/año	0,0730	0,0194	0,0002				

El porcentaje de pares concordantes osciló entre el 71,6 % y el 80,0% en función del grado de precisión en la localización del inicio del incendio. El porcentaje de concordancia del modelo indica que de todas las posibles parejas de celdas de 3×3 km con diferente comportamiento frente a la presencia de incendio por rayo que se pueden formar (135.375, 174.636 y 304.479, para los casos 1, 2 y 3, respectivamente), en más de un 72-80% de los casos la probabilidad de incendio estimada con la ecuación es mayor para una celda con presencia de incendio que para otra sin ella. Todos estos resultados demuestran que la precisión de la función logística es elevada y muy similar, o incluso superior a la obtenida por otros autores (e.g. NIETO *et al.*, 2008). Por otra parte, de acuerdo a los valores del estadístico chi-cuadrado y del valor asociado de probabilidad para el test de bondad de ajuste de Hosmer y Lemeshow  $\chi^2_{HL}$ , para un nivel de significación del 5%, se puede afirmar que no existen diferencias significativas entre los valores de probabilidad de incendio reales y los predichos por el modelo desarrollado.

También es de destacar que los estadísticos de bondad de ajuste empeoran a medida que aumenta la incertidumbre en la estimación del lugar de inicio del incendio. Así, el porcentaje de pares concordantes disminuye en torno a un 10% entre los tipos de incendio 1 y 3, y el valor de chi-cuadrado de Hosmer y Lemeshow es poco significativo para el caso que considera una mayor incertidumbre en la localización ("tipo 3"). Todo ello confirma la importancia de la determinación precisa del punto de inicio en la obtención de un adecuado modelo predictivo.

De las variables seleccionadas para formar parte de la función logística tres son comunes a los tres casos analizados: altitud media de la celda, promedio anual de número de rayos y porcentaje de rayos caídos en superficie forestal para cada celda. El signo del parámetro que afecta a la altitud implica que, a igualdad de valores para el resto de las variables, la probabilidad de incendio por rayo disminuye cuando aumenta aquella. A pesar de que existe una correlación positiva entre las descargas de rayos y la altitud (DISSING &

VERBYLA, 2003), el incremento de la humedad relativa y la precipitación y la disminución de la temperatura con la altitud disminuye la probabilidad de la ignición a causa de los rayos (DÍAZ-ÁVALOS *et al.*, 2001). El número de rayos caídos anualmente y la existencia de incendios por esta causa, como parece lógico, están relacionados positivamente, tal y como también apuntan otros autores (NIETO *et al.*, 2006; WIERZCHOWSKI *et al.*, 2002; PODUR *et al.*, 2003). Sin embargo, la polaridad de esos rayos, no resultó ser un factor significativo, como otros autores afirman (LATHAM & WILLIAMS, 2001).

En cuanto a las características del combustible forestal, y a tenor de los resultados, la presencia de formaciones forestales guarda una relación positiva con la existencia de incendios por rayo, hecho que parece lógico. Más llamativa, sin embargo, es la presencia como significativas de variables relacionadas con la presencia de masas de coníferas (porcentaje de superficie de coníferas en cada celda en incendios “tipo 1” y porcentaje de rayos caídos en masas de coníferas en incendios “tipo 2”), teniendo en cuenta que éstas sólo representan una cuarta parte de la superficie ocupada por masas forestales en la provincia (JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN, 2005). Este resultado podría confirmar el hecho que algunos tipos de coberturas vegetales son más propensas que otras a ser quemadas por el fuego de forma natural (p. ej., LATHAM & WILLIAMS, 2001). En este caso, la mayor probabilidad de ignición podría guardar relación con la presencia en el suelo de una gran cantidad de elementos finos procedentes de especies del sotobosque o de la inflamabilidad de las propias acículas de los pinos.

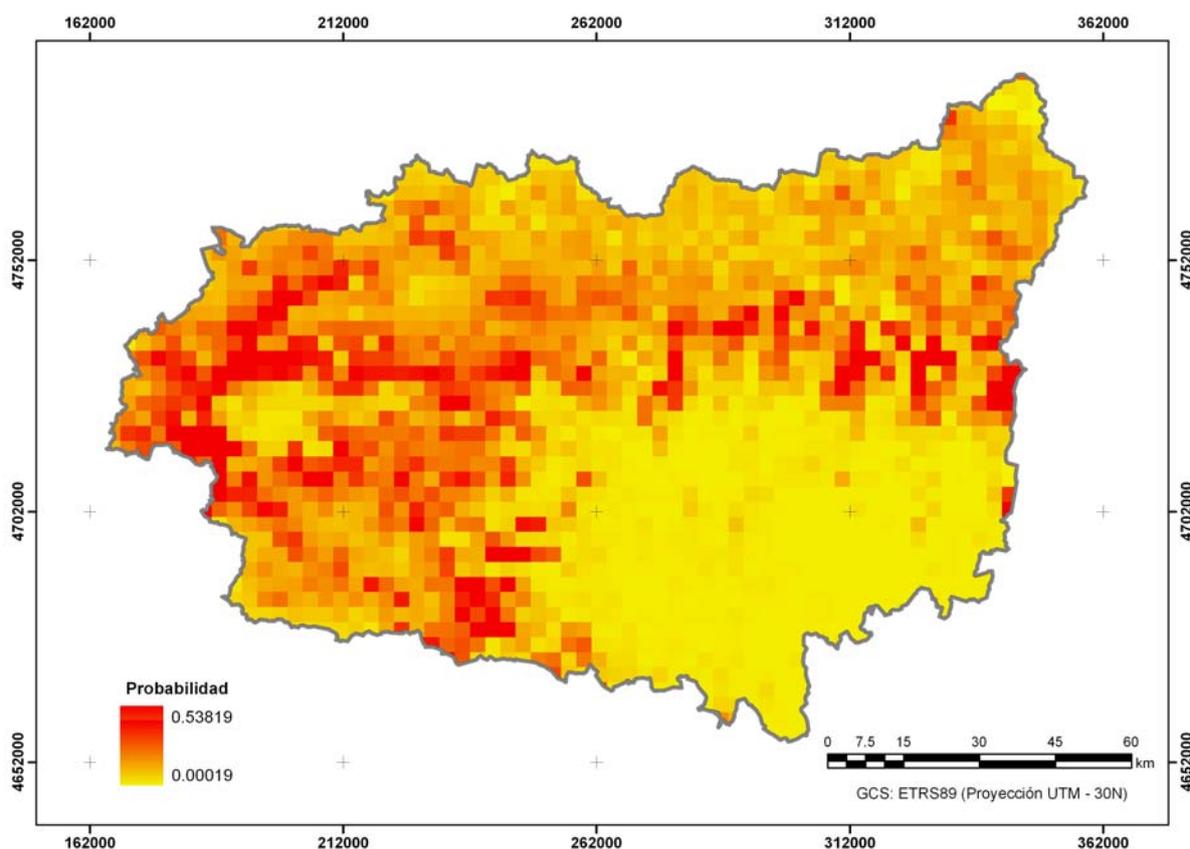


Figura 1. Mapa de la distribución de la probabilidad espacial de ignición por rayo en la provincia de León para el período 2002-2007. Estimaciones realizadas en base a los parámetros correspondientes a los incendios “tipo 2”.

En la figura 1 se muestra la distribución espacial de la probabilidad de ignición debida a rayo en la provincia para el período 2002-2007 utilizando las estimaciones de los parámetros correspondientes a los incendios “tipo 2”. Se ha representado esta opción de entre las tres posibles ya que presenta un compromiso entre la introducción en el modelo del mayor número de datos de incendios y la adecuada precisión en su localización y análisis espaciales. Tal y como se aprecia en la figura 1, las zonas con una mayor probabilidad se encuentran en la parte occidental de la provincia y en la franja existente entre la zona de páramo y la zona montañosa de la Cordillera Cantábrica. A grandes rasgos, estas zonas se corresponden con áreas de baja altitud y con predominio de vegetación forestal densa.

## 5. Conclusiones

La predicción de un fenómeno como los incendios forestales exige responder a dos preguntas con un alto grado de probabilidad. La primera es indicar dónde se producirá un incendio, con el fin de determinar las zonas de peligro; la segunda es establecer cuándo se producirá ese incendio, para poder fijar las épocas de peligro. Los resultados que aquí se presentan tratan de responder a la primera de las preguntas mediante el desarrollo de un modelo logístico de estimación de la probabilidad espacial de riesgo incendio por rayo.

Las variables que resultaron estadísticamente más significativas en la predicción del riesgo fueron la altitud, el porcentaje de rayos que cae en superficie forestal y el promedio anual de rayos. Todas ellas, salvo la altitud, están positivamente correlacionadas con la existencia de incendio. A tenor de los valores de los estadísticos de ajuste y del porcentaje de celdas correctamente clasificadas, el modelo predictivo desarrollado se considera adecuado.

El trabajo permite determinar las zonas donde es más probable la ocurrencia de incendios por rayo en la provincia, delimitando, por lo tanto, las zonas de riesgo para esta causa. Por ello, se espera que sea útil para optimizar la lucha contra los incendios y para disminuir las pérdidas económicas y ambientales derivadas de los mismos. La inclusión en un futuro de variables meteorológicas en el modelo logístico permitirá predecir, además, bajo qué condiciones ambientales es más probable la ocurrencia de estos incendios.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Diputación de León, dentro la “Convocatoria de Ayudas a Proyectos de Investigación con destino a la Universidad de León 2006-2007”, por medio del proyecto “Modelización de la probabilidad espacial y temporal de ocurrencia de incendios forestales por rayo en la provincia de León”. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha suministrado los datos correspondientes a la caída de rayos.

## 7. Bibliografía

DÍAZ-AVALOS, C.; PETERSON, D.L.; ALVARADO, E.; FERGUSON, S.A.; BESAG, J.E.; 2001. Space-time modelling of lightning-caused ignitions in the Blue Mountains, Oregon. *Can. J. For. Res.* 31: 1579-1593.

DISSING, D.; VERBYLA, D. L.; 2003. Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation. *Can. J. For. Res.* 33: 770-782.

HOSMER, D.; LEMESHOW, S.; 2000. Applied Logistic Regression Wiley-Interscience.

JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN; 2005. Castilla y León crece con el bosque. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Serie Divulgativa, 48 pp.

LARJAVAARA, M.; PENNANEN, J.; TUOMI, T.J.; 2005. Lightning that ignites forest fires in Finland. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 171-180.

LATHAM, D.; WILLIAMS, E.; 2001. Lightning and forest fires. En: Johnson, E.A.; Miyanishi, K. (Eds.). *Forest Fires, Behavior and Ecological Effects*, Academic Press.

NIETO, H.; AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; 2006. Estimation of lightning-caused fires occurrence probability in central Spain. En: Viegas, D.X. (Ed.), *Proceedings of the 5th International Conference on Forest Fire Research*, CD-Rom, Elsevier.

NIETO, H.; CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; YEBRA, M.; GARCÍA, M.; SALAS, J.; MARTÍN, M.P.; VILAR, L.; MARTÍNEZ, J.; PADRÓN, D.; MARTÍN, S.; 2008. Propuesta de un sistema espacialmente explícito para evaluar el peligro de incendios forestales. *Serie Geográfica* 14: 109-130.

PODUR, J.; MARTELL, D.L.; CSILLAG, F.; 2003. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976-1998. *Ecol. Modelling*. 164: 1-20.

RIVAS SORIANO, L.; DE PABLO, F.; TOMAS, C.; 2005. Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67: 1632-1639.

SAS INSTITUTE INC.; 2004. SAS/STAT® 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, N.C.

TÁRREGA, R.; LUIS, E.; 1992. Los incendios forestales en León. Universidad de León, 137 pp. León.

VASCONCELOS, M.J.P.; SILVA, S.; TOMÉ, M.; ALVIM, M.; PEREIRA, J.M.C.; 2001. Spatial prediction of fire ignition probabilities. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 67: 73-81.

VEGA, C.; LEE, B.S.; WOODARD, P.; TITUS, M.; 1996. Applying neural network technology to human-caused wildfire occurrence prediction. *AI Applications* 10: 9-18.

VÉLEZ, R. (coord.); 2000. La defensa contra los incendios forestales. Fundamentos y experiencias. Ed. McGraw-Hill. 1360 pp. Madrid.

WIERZCHOWSKI, J.; HEATHCOTT, M.; FLANNIGAN, M.D.; 2002 Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada. *Int. J. Wild. Fire* 11(1): 41-51.

WOTTON, B.M.; MARTELL, D.L.; 2005. A lightning fire occurrence model for Ontario. *Can. J. For. Res.* 35(6): 1389-1401.