

# MODELADO DEL PELIGRO DE IGNICIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN GALICIA (ESPAÑA)\*

## MODELING THE DANGER OF IGNITION OF WILDFIRES IN GALICIA (SPAIN)

Alejandro Gómez-Pazo<sup>1</sup> y Javier Salas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Correo electrónico: alejandrogomezpazo@gmail.com.

<sup>2</sup> Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá, Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares (España).

### Resumen

Este estudio propone un modelo de peligro de ignición de incendios forestales para Galicia, la comunidad autónoma española con más incendios registrados anualmente, producidos en su mayoría por causas humanas.

El modelo se basa en el propuesto por Chuvieco *et al.* (2014), mejorando la resolución espacial de 1.000 a 500 m, creando capas específicas de causalidad humana y natural y manteniendo los métodos de obtención del estado hídrico del combustible vivo y muerto. El proceso se ha automatizado mediante Python.

Las causalidades se modelizaron mediante técnicas de Regresión Logística Ponderada Geográficamente (GWLR), obteniendo una fiabilidad global del 75% para la humana y de un 94% para los incendios de origen natural. Estas variables se combinan mediante un criterio probabilístico para obtener el peligro de incendio debido al agente causal. La nueva capa se integra con el peligro asociado al contenido de humedad del combustible (vivo y muerto) para obtener el peligro de ignición de incendios forestales. La validación del modelo se realizó con los focos de calor de MODIS del verano del 2013, obteniendo un acierto del 60%, donde las zonas de baja peligrosidad que presentan focos de calor se corresponden con áreas de elevados valores de ocurrencia humana.

Palabras clave: Peligro de ignición; incendios forestales; Regresión Logística Ponderada Geográficamente (GWLR); Galicia.

### Abstract

This study proposes a model of danger of ignition of wildfires in Galicia, the Spanish region with more fires recorded annually caused mostly by human causes.

The model is based on the one proposed by Chuvieco *et al.* (2014), improving the spatial resolution from 1000 to 500 m, creating specific layers of human and natural causality and keeping methods of obtaining the status of the living and dead fuel. The process has been automated using Python.

The causalities were modeled by GWLR, obtaining an overall reliability of 75% for human and 94% for naturally occurring fires. These variables are combined using a probabilistic approach for obtained the danger of ignition due to the causal agent. The new layer is integrated with the danger associated to the moisture content of the fuel (alive and dead) for obtained the danger of ignition of wildfires. The model validation was performed from the hot spots of MODIS in the summer of 2013, obtaining a 60% success where low danger areas with hot spots are related to high values of human occurrence.

Keywords: Danger of ignition; wildfires; Geographically Weighted Logistic Regression (GWLR); Galicia.

## 1. Introducción

El estudio de los incendios forestales es de gran importancia en la actualidad por las grandes pérdidas naturales, materiales y humanas generadas. En el caso de la Unión Europea destacan los países mediterráneos (Portugal, España, Francia, Italia y Grecia), donde desde 1980 se superan los 26.000 incendios forestales anuales, produciéndose 35.938 en el año 2013 (Schmuck *et al.*, 2014). En España, según la información del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, en el 2013 se produjeron 10.797 siniestros (conatos e incendios forestales), que originaron unas pérdidas económicas de 23.158.099 euros y unos gastos derivados de la extinción de 4.603.082 euros. Con estas cifras se comprende mejor la influencia de los incendios no sólo a nivel ambiental, sino también en términos económicos. Además, a estas pérdidas materiales hay que añadir las pérdidas humanas

Resulta clave comprender los factores que causan y condicionan estos eventos, para evitar que se produzcan más incendios o minimizar sus efectos. Esto hace que en las últimas décadas se asista a una

---

\* Datos procesamiento artículo

Recibido: 6 de octubre de 2016

Revisado: 17 de enero de 2017

Aceptado final: 24 de enero de 2017

gran proliferación de estudios sobre el riesgo de incendio forestal, cobrando especial relevancia la denominada “geografía de los riesgos”, y constituyéndose en un tema de investigación cada vez más extendido entre los geógrafos. La representación, análisis, integración y modelización de variables de marcada impronta espacial, de carácter físico y humano, que conlleva la cartografía de riesgo de incendio forestal, se inscribe perfectamente en el ámbito de estudio de esta disciplina. En este contexto, la integración de territorio y sociedad realizada por la geografía resulta clave para entender los riesgos potenciales a los que pueden estar expuestos los territorios.

La FAO define el riesgo de incendio como la probabilidad de que se inicie un incendio determinado por la presencia y las actividades de los agentes causantes (Chuvienco *et al.*, 2010). En el riesgo de incendio se puede diferenciar el peligro, definido por la causalidad (humana y rayos), y la propagación, donde se tiene en cuenta el contenido en humedad del combustible vivo y muerto, los tipos de combustibles, la pendiente y el viento. La otra variable principal dentro del riesgo es la vulnerabilidad, donde se consideran el valor ecológico y socioeconómico del área de estudio.

Los modelos de riesgo de incendio forestal son de vital importancia en la planificación de los recursos para evitar y mitigar los efectos, ya que el conocimiento de las zonas de mayor probabilidad o los lugares donde los efectos serán más severos permitirá una mejor actuación para reducir las pérdidas (Chuvienco *et al.*, 2014). En este contexto, el presente trabajo propone un modelo de peligro de ignición, componente del riesgo de incendio, para Galicia. La periodicidad y escala del mismo pueden ser de gran utilidad para el diseño de labores diarias de los servicios forestales de prevención y vigilancia, ya que pone de manifiesto que zonas tienen mayor probabilidad de incendiarse en un día determinado.

Se propone un modelo de carácter local, ya que su generación se realiza a partir de técnicas de regresión; no obstante, la metodología empleada para su realización es perfectamente extrapolable a otras zonas con la simple modificación de las variables de entrada, que deben ajustarse al área de interés. De igual manera, en el caso de los agentes causales, el modelo está ajustado para un tiempo determinado, si se produce un cambio en los patrones de actuación de estos agentes, debería realizarse una actualización de esos parámetros.

El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un modelo de peligro de ignición para Galicia, realizado a partir de la metodología propuesta por Chuvienco *et al.* (2014) para el cálculo del riesgo de incendio forestal. En el proceso se generan dos subíndices, uno de la causalidad y otro del estado del combustible. La causalidad presenta dos capas que se generan en exclusiva para este estudio, la ocurrencia humana, adaptando las variables al territorio gallego, y los incendios por causas naturales (rayos). Para el estado del combustible se utilizará la propuesta del citado estudio sin modificaciones.

Con este estudio también se trata de mejorar la resolución espacial de trabajos precedentes, reduciéndola a 500 metros. Tras la consecución del modelo se realiza la validación del producto a partir de los focos de calor de MODIS para el verano de 2013, seleccionando fechas entre julio y septiembre, los meses de mayor ocurrencia de incendios forestales en Galicia.

### 1.1. Estado de la cuestión

Desde comienzos de siglo los estudios sobre incendios forestales empleando las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) han ido en aumento, analizando diferentes regiones (de la Riva *et al.*, 2004; Romero-Calcerrada *et al.*, 2010; Chuvienco *et al.*, 2010; Nieto *et al.*, 2012) o incluso realizando estudios a nivel supraestatal (Oliveira *et al.*, 2014). Habitualmente no se analizaba el factor humano en la causalidad de los incendios, lo que se puede deber a su difícil definición. La causalidad humana es fundamental en estos estudios, dado que en la mayoría de los incendios tienen un papel fundamental. Esta importancia ha llevado a la aparición en fechas más recientes de estudios que focalizan su atención en los factores humanos, tratando de responder a cuáles son las variables más relacionadas con los incendios forestales (Martínez *et al.*, 2009; Chuvienco *et al.*, 2010; Rodrigues *et al.*, 2014).

La problemática de los incendios forestales se ha estudiado de distintos modos, desde una forma meramente descriptiva se evolucionó hasta construir modelos para predecir las áreas de mayor riesgo de incendio. Recientemente los modelos estadísticos han ganado peso en estos estudios, partiendo desde aproximaciones más sencillas en forma de regresiones logísticas hasta los modelos en los que se tiene en cuenta la variabilidad espacial de los parámetros del estudio. También se puede destacar la utilización de redes neuronales (del Hoyo *et al.*, 2007), estadísticas multivariante (Kalabokidis *et al.*, 2007) o el análisis mediante densidades kernel (Martínez *et al.*, 2009).

Entre la diversidad de aproximaciones, destaca la importancia que ha tenido el empleo de técnicas de regresión ponderada geográficamente (GWLR) (Fotheringham *et al.*, 2002), donde la variación espacial de los factores ayuda a la mejor comprensión de la ocurrencia de los incendios. Dentro de las posibilidades de estas técnicas destaca su variante en forma de regresión logística, empleada para la mejor comprensión de las causas humanas en los incendios forestales (Chuvienco *et al.*, 2010). Algunos autores recomiendan tener precaución en su aplicación ante las posibles deficiencias por la aparición de valores irreales localmente. Esta técnica se considera una buena aproximación para estudios sobre el

peligro de ignición de regiones de un tamaño considerable, donde el espacio influye de forma muy importante en las probabilidades de que tenga lugar un incendio forestal.

En la mayoría de los casos el estudio de los incendios forestales en Galicia ha consistido en el análisis de los patrones espaciales de ocurrencia (Fuentes-Santos *et al.*, 2013) y en la realización de modelos para su predicción y extinción (Alonso-Betanzos *et al.*, 2003). También abundan los estudios sobre la influencia de los incendios forestales en la vegetación y el riesgo de erosión de los suelos post-incendio (Vega *et al.*, 2015). No obstante, en el caso gallego no existen estudios que analicen el peligro de ignición o riesgo de incendio a escala autonómica.

## 1.2. Área de estudio

La Comunidad Autónoma de Galicia (Fig. 1) cuenta con una superficie de 29.574,4 km<sup>2</sup>, que se dividen en cuatro provincias (A Coruña, Lugo, Pontevedra y Ourense). En el aspecto demográfico nos encontramos con un territorio caracterizado por el envejecimiento poblacional y el abandono rural en detrimento de las ciudades.

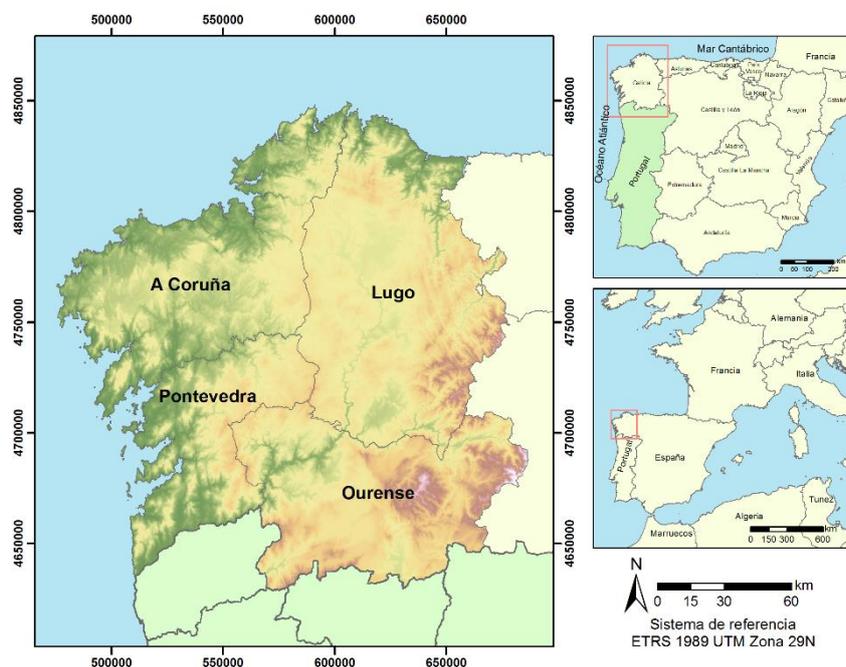


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

El elevado número de incendios por causas humanas que existe para el territorio español se agrava en Galicia (Martínez *et al.*, 2009; Chuvieco *et al.*, 2014). La importancia de los incendios producidos por causas humanas hay que relacionarla con las personas que usan el fuego en búsqueda de beneficios (cambio de uso del suelo o abaratamiento del terreno), los conflictos de interés (relacionados con la propiedad del territorio) o razones políticas (problemas entre las figuras de protección y las poblaciones locales) (Vilar del Hoyo 2008). Los conflictos con las poblaciones locales son muy importantes en el origen de un elevado número de incendios forestales (Fuentes-Santos *et al.*, 2013). En Galicia esta problemática se relaciona con la importancia que tienen los montes mancomunales<sup>1</sup> y las zonas protegidas, que en muchas ocasiones son rechazadas por la población local al entenderlas como lesivas para sus actividades y/o intereses. En el caso de los montes mancomunales, cabe destacar que una cuarta parte de la superficie de Galicia se encuentra bajo esta figura. Además, esta superficie es gestionada por unas 2.800 comunidades de montes, lo que dificulta la gestión e intensifica los enfrentamientos.

En Galicia se producen el 70% de los incendios forestales registrados en España (Martínez *et al.*, 2009), registrándose en el 2015 un total de 2.859, que calcinaron una superficie total de 11.929 hectáreas (Xunta de Galicia, 2016). Esta cifra no es anómalamente elevada, ya que en los últimos diez años se han producido más de 50.000 incendios forestales. Otra de las características de los incendios forestales

<sup>1</sup> Se trata de superficies forestales que son gestionadas por grupos de ciudadanos, generalmente vecinos de la zona, agrupados en comunidades.

gallegos es su reducida extensión, destacando los de menos de 1 hectárea, que suponen más del 50% del total, lo que se relaciona con la fragmentación del territorio, caracterizado por parcelas de un tamaño por debajo de lo habitual en el conjunto español (Fuentes-Santos *et al.*, 2013).

El período de mayor ocurrencia de incendios forestales se produce en los meses de verano (julio-septiembre), cuando las condiciones meteorológicas facilitan la ignición (Molano *et al.*, 2007). Además, el ejecutivo gallego declara un periodo de un mes de alta probabilidad de incendios entre los meses de febrero y abril.

Los incendios forestales en Galicia muestran una tendencia creciente entre 2001 y 2005, aumentando la superficie calcinada entre 2002 y 2006, momento a partir del cual se reduce la superficie afectada. Se estima que en el periodo 2001-2005 los incendios forestales arrasaron el 8% de la superficie forestal de Galicia, valor que se eleva hasta un 14% en la provincia de Ourense (Balsa-Barreiro *et al.*, 2014). La mayor importancia de los incendios forestales en Ourense se relaciona con las condiciones climáticas que presenta esta provincia en los meses de verano, con una gran sequedad que aumenta el peligro de ignición y propagación (Martí *et al.*, 2011).

Uno de los hechos al que se le acostumbra otorgar una gran influencia en la causalidad y número de incendios producidos es la pérdida de peso del sector agro-forestal, que dificultó la persistencia de la población más joven en las zonas rurales. El abandono del campo lleva a una superficie forestal cada vez más descuidada y que corre un mayor peligro ante la ignición, produciéndose unos incendios con unas dimensiones mayores y más peligrosos. Además, en muchas ocasiones este abandono complica las labores de extinción al disponer de menos medios humanos y técnicos por la escasa población de estas zonas rurales.

## 2. Métodos y técnicas

Siguiendo la propuesta de Chuvieco *et al.* (2014), este estudio se centra exclusivamente en el peligro de ignición adaptando las variables al territorio gallego (Fig. 2).

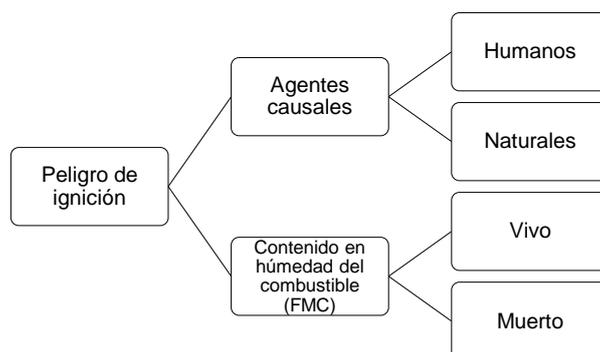


Figura 2. Esquema del flujo de trabajo.

El modelo resultante es la combinación de dos subíndices, agentes causales y contenido de humedad del combustible. El primer subíndice se genera mediante la combinación de los agentes causales humanos y naturales elaborados en exclusiva para este estudio, y el segundo mediante la relación del contenido de humedad del combustible vivo y muerto, ya calculados en trabajos precedentes. Para analizar el peligro de ignición forestal en el espacio gallego se optó por dividir el mismo en una malla con píxeles de 500 metros de lado. En el proceso de elaboración de los distintos índices y cartografía se recurrió a la utilización de ArcGIS y programas estadísticos como GWR 4.0 y R.

### 2.1. Causalidad humana

El modelo requería contar con la espacialización del componente humano de causalidad, que se realizó mediante la técnica de Regresión Logística Ponderada Geográficamente (GWLRL). Con esta técnica la información se relaciona con la de su entorno más inmediato, teniendo un peso inversamente proporcional en función de la distancia que separa los puntos (Fotheringham *et al.*, 2002). En la elaboración se necesita seleccionar el número de vecinos que se tendrán en consideración para realizar el modelado. En el caso del modelo final de la ocurrencia humana el número óptimo de vecinos ha sido 300, cifra en la que el valor del Akaike Information Criterion (AIC), que es un indicador de calidad relativa de un modelo, es el más bajo.

La variable dependiente de tipo binario hace referencia a la alta o baja ocurrencia de incendios. Los datos necesarios para la consecución de esta variable han sido extraídos de la base de datos de incendios en España para el período 1974-2012 MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente), empleando los valores de los incendios que se originaron debido a causas humanas en el territorio gallego. Al encontrarse los datos de origen distribuidos en cuadrículas de 10x10 km y con referencia al municipio en el que ha tenido lugar el incendio, se realizó en primer lugar una distribución de puntos aleatorios sobre la superficie forestal de cada municipio en función del número de incendios de cada uno, para de este modo conseguir la mejor aproximación posible a la realidad.

La definición de alta/baja ocurrencia se ha realizado mediante el análisis estadístico del número de incendios totales en cada una de las cuadrículas del área de estudio. De este modo, se ha tomado como alta ocurrencia aquellas zonas donde la cifra total de incendios para el período analizado superaba el valor marcado por el tercer cuartil de la muestra, fijado en 25 incendios para la ocurrencia humana.

Las variables independientes seleccionadas para explicar la ocurrencia de incendios forestales causados por la actividad humana proceden de un análisis de estudios precedentes (Martínez *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2014; Chuvieco *et al.*, 2010) en los que se tiene presente la influencia humana en la explicación de los incendios forestales. Además, se ha realizado una aproximación al contexto gallego, en el que su idiosincrasia propicia que algunas de las variables empleadas para los estudios a nivel español carezcan de importancia, al tiempo que existen otras como las explotaciones mineras o los montes mancomunales, que dada la importancia que tienen en Galicia se ha considerado que pueden explicar el peligro de ignición (Tabla 1).

**Tabla 1.** Variables seleccionadas para la ocurrencia humana.

Variable	Fuente
Interfase artificial-forestal (IAF)	SIOSE 2011. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Interfase cultivo-forestal (ICF)	SIOSE 2011. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Interfase pasto-forestal (IPF)	SIOSE 2011. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Montes de mancomún (MCOM)	Consellería de Medio Rural, Xunta de Galicia
Explotaciones mineras (E_MIN)	BTN-100. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Zonas protegidas (Z_PRO)	BTN-100. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Agricultura extensiva (A_EXT)	Instituto Galego de Estatística (IGE)
Carreteras (CARR)	BTN-100. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Líneas de ferrocarril (FFCC)	BTN-100. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Senderos (SEND)	BTN-100. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Líneas eléctricas (L_ELE)	BTN-100. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
Ganaderos > 55 años (GAN55)	Censo Agrario 2009 (INE)
Tasa de paro (PARO)	SEPE, Ministerio de Empleo y Seguridad Social
Ocupados en el sector primario (OC_P)	Instituto Galego de Estatística (IGE)
Densidad de población (DEN_P)	Instituto Galego de Estatística (IGE)
Variación de población 1991-2011 (VAR_P)	Instituto Galego de Estatística (IGE)

A partir de las variables definidas se procedió a analizar su multicolinealidad, para así descartar aquellas variables cuyo comportamiento fuese semejante y que por lo tanto no fueran necesarias para la elaboración del posterior modelo. En este caso se ha optado por el empleo del índice de correlación de Spearman's Rho (Rodríguez *et al.*, 2014), obteniendo como resultado las variables que se descartarían en un primer momento por presentar unos valores fuera del rango (0,5) – (-0,5).

Posteriormente se procedió a la elaboración de un primer modelo mediante GWR 4.0, empleando para la modelización el 60% de los registros, apartando el 40% restante para realizar posteriormente la validación del modelo. Con los resultados obtenidos se analizaron los valores de *t* de Student descartando las variables que presentaran en la mayoría del territorio valores entre -2 y 2, seleccionando así para el modelo final las variables que mejor se adaptan, comprobando su relación con los incendios forestales.

Con el modelo final ya generado se procedió a la calibración y validación de los resultados. En primer lugar, la calibración se ha realizado con la propia muestra del 60% escogida para la elaboración del modelo, mientras que en un segundo momento se llevó a cabo la validación con la muestra del 40% apartada inicialmente. Con este último procedimiento se conoció la fiabilidad global del modelo generado.

## 2.2. Causalidad natural

De manera semejante al componente humano, se requería la espacialización del agente causal relacionado con los factores naturales. En este contexto se ha analizado la importancia de los rayos para poder modelizar el peligro de ignición natural realizando un análisis estadístico mediante GWLR. La selección de las variables independientes se ha basado en el trabajo de Pacheco *et al.* (2009), adaptando las mismas a la información disponible para Galicia.

En este caso se ha trabajado con los incendios registrados como naturales en la base de datos ministerial. Estos incendios se han distribuido aleatoriamente en las zonas forestales de los municipios correspondientes. Para transformar la información en una variable binaria se han dividido los registros en alta y baja ocurrencia, siendo los primeros los que se encuentran por encima del valor del tercer cuartil de la muestra, que en este caso ha sido 7.

En cuanto a las variables independientes se seleccionaron los rayos caídos sobre Galicia, obtenidos a partir de la información original de Meteogalicia, la pendiente y orientación, calculada a partir del MDT de 200 metros de resolución disponible en el IGN, y la vegetación, analizada a partir de los datos del SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España) del año 2011. Además, es vital tener en cuenta la meteorología, optando en esta ocasión por el empleo del balance hídrico y el déficit hídrico máximo, que se encuentran tipificados diariamente en la base de datos de Meteogalicia.

El dato fundamental en este análisis son los rayos, que proceden de las estaciones de control de Meteogalicia. En la descarga de esta información se encuentra la fecha de ocurrencia y la ubicación espacial del rayo. A partir de estos datos se generó una capa para representar los rayos caídos sobre Galicia en el período 2010-2013. Para obtener el peligro de la ignición por causas naturales se decidió trabajar con aquellos días en los que cayera al menos un rayo, eliminando de este modo la información de los días sin tormentas en Galicia.

Los datos meteorológicos presentan una distribución puntual a lo largo de todas las estaciones meteorológicas, por lo que se ha recurrido a la selección de los datos de 50 de estas estaciones distribuidas a lo largo del territorio gallego. Con la totalidad de los valores se realizó una interpolación mediante el método de Kriging, que se fundamenta en que los puntos más próximos espacialmente tienden a tener valores más semejantes entre sí, lo que se adapta perfectamente a este tipo de información. El procesado se ha realizado con una resolución espacial de 500 metros, la deseada para el producto final, y seleccionando el método ordinario con semivariograma esférico. Este proceso se empleó para la realización del ráster con los valores medios del balance hídrico y la capa del déficit hídrico máximo.

La vegetación es otro de los factores fundamentales por el diferente comportamiento que presentan ante el fuego las especies y la mayor o menor probabilidad de ignición. Para tipificar esta variable se realizó una extracción de la información del SIOSE 2011, separando los tipos de bosque, matorral y pastizal como se muestra en la tabla 2. Las superficies de cada uno de los tipos de cobertura definidos son aquellas que disponen o bien de la totalidad de la superficie con la categoría a la que hace referencia o en los casos de las zonas mixtas, cuando el porcentaje de superficie ocupada por la categoría es superior al 50%. Tras este procedimiento se calculó el porcentaje que representa cada una de estas coberturas sobre el total del área del píxel, que en este caso es de 25 hectáreas.

Para poder analizar la altitud, la pendiente y las orientaciones se empleó el Modelo Digital del Terreno (MDT) disponible con una resolución de 200 metros, el cual se ha restringido a las zonas forestales del área de estudio. En cada píxel se expresó el porcentaje de la superficie ocupada por cada una de las orientaciones del terreno (ocho categorías más las zonas planas), junto a la media de la altitud del píxel y la pendiente de la superficie forestal. La información que se ha empleado para la realización del modelo de ocurrencia natural es la que se presenta en la tabla 2, en la que se pueden observar las variables que se seleccionaron en primera instancia, de las que se han extraído aquellas que presentaban una mayor idoneidad para la realización del modelo final.

**Tabla 2.** Variables seleccionadas para la ocurrencia natural.

Variable	Descripción
Altitud media (A_M)	Altitud media de la superficie forestal
Pendiente media (P_M)	Pendiente media de la superficie forestal
Norte (N)	% de superficie forestal orientada al norte
Noreste (NO)	% de superficie forestal orientada al noreste
Este (E)	% de superficie forestal orientada al este
Sureste (SE)	% de superficie forestal orientada al sureste
Sur (S)	% de superficie forestal orientada al sur
Suroeste (SO)	% de superficie forestal orientada al suroeste
Oeste (O)	% de superficie forestal orientada al oeste
Noroeste (NO)	% de superficie forestal orientada al noroeste
Coníferas (CON)	% de superficie de coníferas en cada píxel
Frdosas caducifolias (F_C)	% de superficie de frondosas caducifolias en cada píxel
Frdosas perennifolias (F_P)	% de superficie de frondosas perennifolias en cada píxel
Matorral (MAT)	% de superficie de matorral en cada píxel
Pastizal (PAST)	% de superficie de pastizal en cada píxel
Número de rayos (N_R)	Número de N_R en cada píxel (2010-2013)
Balance hídrico medio (BH_M)	Valor medio del balance hídrico en cada píxel
Déficit hídrico máximo (DH_M)	Valor máximo de déficit hídrico en cada píxel

Con las variables descritas se procedió a la comprobación de su validez, para lo que se analizó su multicolinealidad mediante el índice de Spearman's Rho (Rodrigues *et al.*, 2014), descartando aquellas variables cuya relación no se encontraba entre los valores 0,5 y -0,5.

Tras el proceso anterior se procedió a la elaboración de un primer modelo usando para la modelización el 60% de los registros y con la elección de 310 vecinos a considerar para el análisis, teniendo en cuenta el valor más bajo alcanzado por el Akaike Information Criterion (AIC). Con los resultados obtenidos se ha procedido al análisis de los valores de *t* de Student descartando las variables que presentaran en la mayoría del territorio valores entre -2 y 2.

Posteriormente, al igual que se realizó para el apartado anterior, se procedió a la calibración y validación del modelo resultante. En primer lugar, a partir de los datos empleados para la modelización (calibración) y a posteriori mediante la información apartada inicialmente (validación).

### 2.3. Probabilidad del agente causal

Una vez que se ha dispuesto de la probabilidad de ignición por causas humanas y por causas naturales se procedió al cálculo del índice que relaciona ambas variables y que refleja la probabilidad de ignición sin tener en cuenta las características del combustible.

En este contexto se debe destacar que la probabilidad será mayor que la representada por las variables de forma separada. Para el cálculo de esta probabilidad se siguió la propuesta de Chuvieco *et al.* (2010), que realiza la integración de ambas variables a partir de un criterio probabilístico basado en los axiomas de Kolmogorov:

$$P(H \cup N) = P(H) + P(N) - P(H) * P(N)$$

Dónde:

H es la probabilidad de que tenga lugar un incendio por causas humanas.

N es la probabilidad de incendio por causas naturales.

### 2.4. FMC muerto

A diferencia de las variables anteriores, que se actualizarían a largo plazo (anual/quinquenal), está el FMC muerto que se genera diariamente, otorgando al índice un carácter muy dinámico y una validez de corto plazo. Para la generación de la información referente al FMC muerto se ha seguido la propuesta de Chuvieco *et al.* (2014), que utiliza el índice 10h del NFDRS. El FMC muerto indica el contenido de humedad de los combustibles finos muertos, es decir, los de menos de 2,5 cm. Para su elaboración se han empleado datos de las predicciones diarias a las 12:00 a.m. de la temperatura del aire y la humedad relativa, con una resolución de 500 metros.

La fórmula empleada en la obtención de esta variable ha sido la siguiente:

$$FMC_{10h} = 1,28 * EMC (\%)$$

Siendo EMC el *Equilibrium Moisture Content* (EMC) calculado a partir de la formulación elaborada por (Aguado *et al.*, 2007). Entendiéndose EMC como el equilibrio en el contenido de humedad de un cuerpo, el que varía en función de la humedad relativa y la temperatura.

Para este cálculo se consideran unas condiciones de cielo despejado. Con los datos adaptados a estas condiciones se utilizaron las ecuaciones recogidas a continuación en función del valor alcanzado por la humedad relativa en cada uno de los píxeles del área de estudio:

Cuando  $HR < 10 \rightarrow EMC (\%) = 0,03 + 0,2626 * HR - 0,001040 * HR * Ta$

Cuando  $HR \geq 10$  y  $HR < 50 \rightarrow EMC (\%) = 1,76 + 0,1601 * HR - 0,02660 * Ta$

Cuando  $HR > 50 \rightarrow EMC (\%) = 21,06 + 0,005565 * HR^2 - 0,00063 * HR * Ta - 0,4944 * HR$

### 2.5. FMC vivo

La información referente al contenido en humedad que presenta el combustible vivo se genera a partir de imágenes MODIS, siguiendo las propuestas del Grupo de Investigación de Teledetección Ambiental (GITA) de la Universidad de Alcalá (Yebra *et al.*, 2008). Los datos necesarios para realizar los cálculos se corresponden con el producto MCD43 de MODIS, las Look Up Table (LUT) realizadas por GITA y el mapa forestal español.

Inicialmente se realiza una simulación del contenido de humedad del combustible vivo, a través de la aplicación de Modelos de Transferencia Radiativa (RTM), que han sido generados a nivel de hoja con el modelo Prospect, con el modelo Sailh para el caso del pasto y el matorral y con el Geosailh para el dosel

en el caso de las cubiertas arbóreas. En las Look Up Table (LUT), se han diferenciado las tres coberturas mencionadas con anterioridad. En el caso del MCD43 se parte de una imagen cada 8 días que presenta los valores de reflectividad y el índice NDII. La estimación del valor del FMC vivo se realiza mediante la técnica Spectral Angle Mapper, que toma como referencia las LUT, los valores de reflectividad, el índice NDII y el FMC simulado.

El procedimiento mencionado con anterioridad no se ha realizado para este estudio, sino que ha sido proporcionado por Marta Yebra y procede de proyectos previos, en los que ya se contaba con esta información para el contexto español y con una resolución de 500 metros. En este caso la variable tiene una periodicidad de 8 días, una temporalidad adecuada para el seguimiento de la humedad de la vegetación.

## 2.6. Peligro de ignición FMC

A partir de las medidas de FMC, calculadas para el caso del combustible vivo y muerto, se generó el peligro de ignición FMC adoptando la propuesta de Chuvieco *et al.* (2004).

Para el cálculo de esta variable se requiere conocer el nivel de humedad de extinción, que varía para las diferentes cubiertas, siendo en los combustibles vivos del 30% para el pastizal y de 105% en el caso del matorral y el arbolado. Por su parte en el combustible muerto la humedad de extinción se sitúa en el 15% para el pastizal y en el 25% para el matorral y el arbolado. Además, se deben fijar los niveles mínimos y máximos para cada una de las cubiertas, llevando los valores que se encuentran fuera de dicho rango a la cifra máxima o mínima respectivamente. En función de la experiencia del grupo GITA, en el caso del FMC muerto el valor mínimo será de 2 y el máximo de 30 para todas las cubiertas, mientras que en el FMC vivo existen distintos valores siendo para el pasto el mínimo 30 y el máximo 420, para el matorral las cifras son 50 y 250 respectivamente y en el caso del arbolado el valor mínimo es 70 y el máximo 250.

Tras el procesado de adaptación siguiendo lo expuesto anteriormente se aplican dos ecuaciones distintas en función de si el FMC es superior al nivel de humedad de extinción:

$$PI\_FMC = (1 - ((FMC - ME) / (FMC_{max} - ME))) * 0,2$$

O, por el contrario, si este valor es inferior a la humedad de extinción:

$$PI\_FMC = 0,2 + ((ME - FMC) / (ME - FMC_{min})) * 0.8$$

Estas ecuaciones se han aplicado a todas las cubiertas que se han mencionado anteriormente y que ofrecen valores de peligro de ignición distintos en función de sus características.

Con la información de peligro de ignición para todos los ficheros según los distintos tipos de combustibles se dio a cada pixel un peso según las proporciones de FMC vivo y muerto con las que contaba y cuyos valores son de 80% vivo y 20% muerto en el pastizal cuyo FMC > 30%, en cambio para las zonas de pastizal con un FMC < 30% el porcentaje de FMC vivo es de 5% y el de muerto del 95%. En el matorral las cifras son del 70% de vivo y 30 de muerto, mientras que el arbolado presenta un 75% de vivo y un 25% de muerto.

Tras la aplicación de estas técnicas se obtuvo el producto final de peligro de ignición del FMC tras la unión de las distintas cubiertas que forman el área de estudio.

## 2.7. Peligro de ignición

Tras el análisis por separado de los distintos componentes que se han relacionado con la ignición forestal, se ha procedido al cálculo del peligro de ignición mediante la relación tanto de la causalidad (natural y humana) como el estado hídrico del combustible. En este caso se le ha otorgado un mayor peso a la variable más dinámica que es la probabilidad de ignición FMC. Para elaborar esta capa se ha recurrido a la utilización de la siguiente fórmula propuesta por Chuvieco *et al.* (2010):

$$P. Ignición = 1 - \sqrt{\frac{4 * (1 - FMC)^2 + (1 - Causalidad)^2}{5}}$$

Donde la variable FMC hace referencia al estado hídrico del combustible y la Causalidad es el peligro asociado a la ocurrencia humana y los incendios naturales. La introducción del numerador en la fórmula escala los resultados entre valores de 0 y 1 y el sumando invierte la escala, siendo así el valor 1 el de mayor peligro de ignición.

## 2.8. Validación del modelo de peligro

Tras la calibración y validación por separado de la ocurrencia humana y la natural se procedió a la validación del peligro de ignición, que se ha realizado empleando los focos de calor registrados por el sensor MODIS en su producto MOD14, utilizado para la aproximación a la ocurrencia de incendios forestales en distintos estudios (Chuvienco *et al.*, 2012). Los datos usados se corresponden con el verano del 2013 y para la selección de los días de validación se buscó una distribución de dos imágenes semanales desde mediados de junio hasta mediados de septiembre, el periodo de máxima ocurrencia de incendios forestales en Galicia. Tras una primera selección se eliminaron aquellos puntos de calor que se encontraban fuera de las zonas de pastizal, matorral o forestales, reduciéndose así el número de días válidos. Con los puntos finales, se siguió una aproximación propia, por la que se comprobó el valor de peligro de ignición teniendo en cuenta el valor máximo del día y considerando como alta probabilidad los valores que superaban la cifra marcada por el tercer cuartil de la distribución diaria.

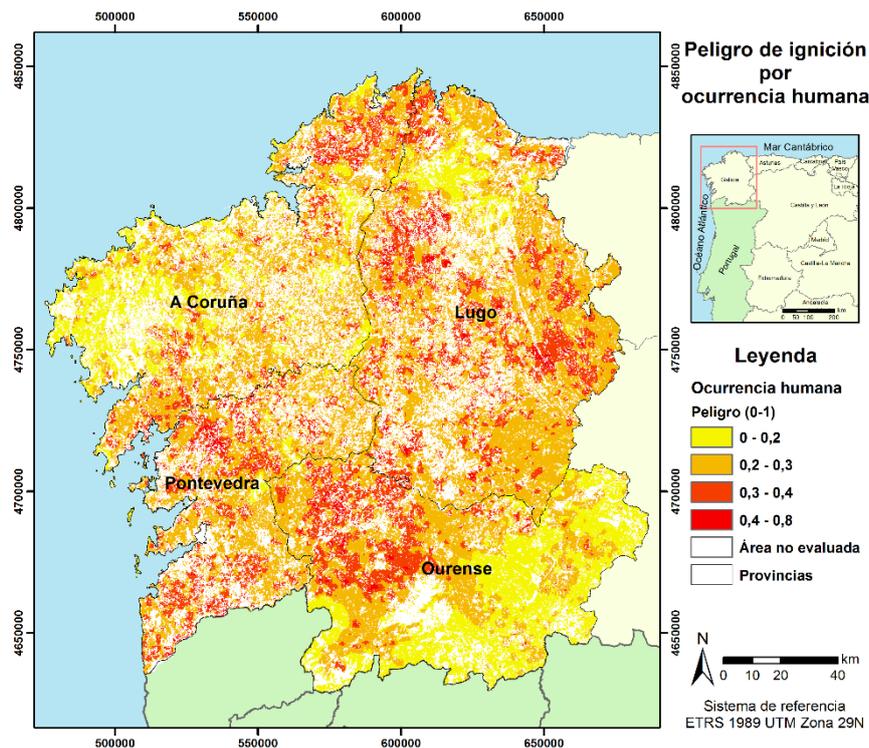
### 3. Resultados

Para la generación de la ocurrencia humana, tras la aplicación del índice de Spearman's Rho, se eliminaron las siguientes variables: número de ocupados en el sector primario, la variación de población para el período 1991-2011 y el porcentaje de ganaderos mayores de 55 años, que no cumplieran las condiciones requeridas.

Con las variables restantes se realizó un primer modelo, tras el que se descartaron aquellas que no tenían la suficiente significancia en el área de estudio. Se seleccionaron tres variables de interfase: la interfase pasto-forestal, con significancia positiva en la mayoría del territorio, exceptuando el área de Costa da Morte; la interfase cultivo-forestal, relacionada positivamente con los incendios forestales; y la interfase artificial-forestal con una significancia positiva en buena parte de Galicia, destacando Ourense y en la zona central de la comunidad.

También se consideró la tasa de paro como uno de los factores para la realización del modelo, teniendo un efecto positivo claro en el norte de la provincia de Lugo y en el área costera entre la provincia de Coruña y Pontevedra. Por su parte las zonas protegidas tienen un efecto mitigador en la ocurrencia de incendios, destacando su importancia en la zona sur de Galicia, el extremo norte de la provincia de Lugo y el extremo oriental de la de Coruña. En último lugar se consideraron los montes mancomunales cuya mayor relación se corresponde con áreas de ocurrencia de incendios, destacando el litoral de Pontevedra y Coruña y la zona oriental de la provincia de Ourense, mientras que tiene una significación negativa en el norte de la provincia de Lugo.

La distribución espacial del peligro de ignición asociado a la ocurrencia humana (Fig. 3) presenta un patrón en el que el extremo suroriental y noroeste muestran los valores más bajos, mientras que la provincia de Pontevedra y buena parte de Lugo cuentan con el peligro más elevado.



**Figura 3.** Mapa del peligro de ignición por influencia humana.

Tras la realización del modelo final con las variables seleccionadas se procedió con la calibración de los resultados obtenidos (Tabla 3) mediante los propios puntos del modelado, consiguiendo una fiabilidad global del 75,66%. Por su parte, la validación se realizó a partir de la muestra del 40% no utilizada para el modelado (Tabla 3) que ha arrojado un acierto del 74,76%, por lo que los resultados de ambos análisis ofrecen valores bastante similares.

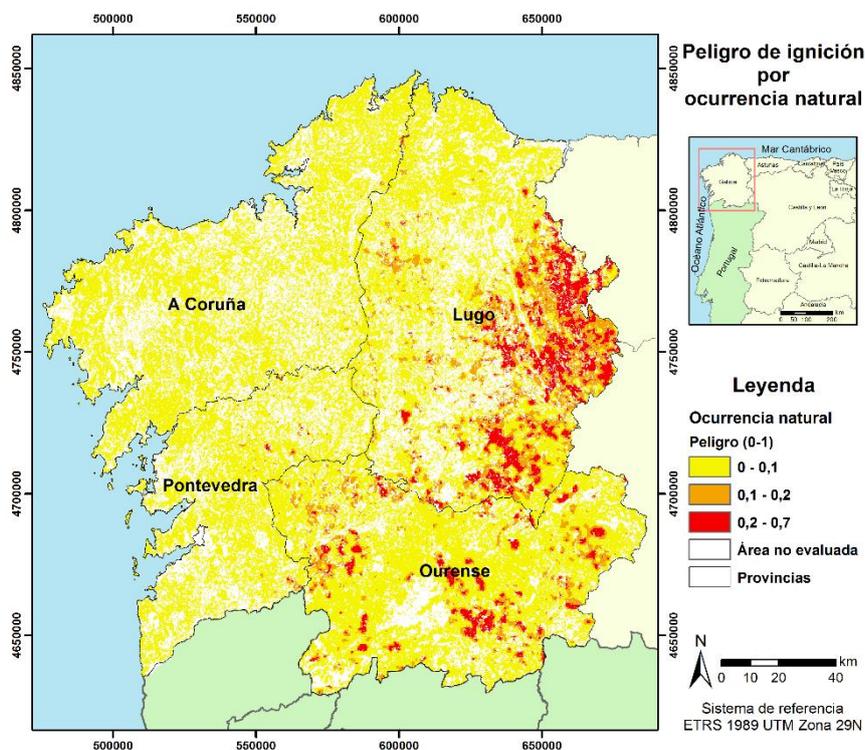
**Tabla 3.** Calibración y validación del modelo de ocurrencia humana.

Calibración del modelo (60% de la muestra)			Validación del modelo (40% de la muestra)	
Real/Estimado	Baja ocurrencia	Alta ocurrencia	Baja ocurrencia	Alta ocurrencia
Alta ocurrencia	22,59	2,56	25,23	0,02
Baja ocurrencia	73,10	1,75	74,74	0,01

En el caso de la modelización de la causalidad de origen natural (rayos), el índice de Spearman's Rho recomendó la exclusión de las variables balance hídrico medio y altura media, dada su gran similitud con las variables déficit hídrico máximo, en el primer caso, y la pendiente y las frondosas caducifolias en el segundo.

A partir de las variables resultantes se llevó a cabo un primer modelado, del cual se eliminaron aquellas que no resultaban representativas tras el análisis de los valores de  $t$  de Student seleccionando de este modo 4 variables para el modelo final. La primera son las coníferas que se distribuyen en consonancia con los incendios forestales naturales. Las frondosas caducifolias tienen una relación positiva con los incendios naturales en casi la totalidad del territorio gallego, exceptuando una pequeña franja en la zona central de la provincia de Coruña. Como puede parecer lógico, el número de rayos también está directamente relacionado con los incendios forestales producidos por causas naturales, en este sentido la mayor importancia la encontramos en la zona sur de la provincia de Pontevedra y la zona oriental de Lugo y Ourense. La última variable introducida en el modelo ha sido el déficit hídrico máximo cuya relación positiva con los incendios forestales aparece claramente reflejada en la totalidad de la provincia de Lugo y en pequeños sectores de Ourense y Coruña.

En el mapa del peligro de ignición a partir de la información de los incendios naturales (Fig. 4) se puede observar como la mayoría del territorio presenta unos valores bastante bajos. La excepción a esta tónica se encuentra en la frontera oriental de Lugo y zonas del interior de Ourense, que se corresponden con las áreas en las que el número de rayos es más importante.

**Figura 4.** Mapa del peligro de ignición por causas naturales.

Con el modelo final para la ocurrencia de incendios naturales se ha procedido a su calibración, empleando los valores de ocurrencia de los puntos seleccionados para la realización del modelo (Tabla 4) y que arrojaron un acierto del 94,96%. A continuación, al igual que en el caso de la ocurrencia humana se realizó la validación con la muestra del 40% de los puntos separada inicialmente (Tabla 4). En este caso la fiabilidad ha obtenido un valor del 94,67%, muy próxima a la anterior.

**Tabla 4.** Calibración y validación del modelo de ocurrencia natural.

Calibración del modelo (60% de la muestra)			Validación del modelo (40% de la muestra)	
Real/Estimado	Baja ocurrencia	Alta ocurrencia	Baja ocurrencia	Alta ocurrencia
Alta ocurrencia	4,67	0,55	5,32	0,02
Baja ocurrencia	94,40	0,38	94,65	0,01

Las capas de ocurrencia humana y natural se combinaron para obtener el mapa de causalidad, que presenta una distribución espacial del peligro muy similar a los anteriores, donde las zonas de mayor peligro son las del interior de Ourense y la zona oriental de la provincia de Lugo, además de áreas interiores del sur de Pontevedra y su extremo sur. Por su parte, el menor peligro se encuentra en la Costa da Morte, el límite occidental de Ourense y el norte de Lugo.

Los mapas de FMC muerto, de carácter diario, y FMC vivo, de carácter semanal solo se utilizaron para las fechas propuestas para la validación del modelo de peligro de ignición. En el caso del combustible muerto, se generó el producto a partir de los datos meteorológicos suministrados por la empresa Meteorológica, utilizando las ecuaciones ya comentadas. Por su parte el FMC vivo se utilizó a partir de las capas ya generadas.

Con la capa de peligro de ignición resultante se procedió a la comprobación del nivel de acierto que presenta el modelo calculado en las fechas recogidas en la tabla 5, de la que ya se han descartado los días en los que no existían puntos válidos.

**Tabla 5.** Peligro de ignición en los focos de calor MODIS para el verano del 2013.

Fecha	Número de focos de calor	Focos con alta probabilidad	%
05/07/2013	6	2	33,3
06/07/2013	4	4	100
12/07/2013	2	1	50
18/07/2013	1	0	0
21/07/2013	1	0	0
13/08/2013	2	0	0
14/08/2013	2	0	0
19/08/2013	6	5	83,3
22/08/2013	8	4	50
26/08/2013	17	9	52,9
27/08/2013	34	28	82,4
02/09/2013	6	3	50
03/09/2013	10	3	30
12/09/2013	21	15	71,4
13/09/2013	14	6	42,9
Total	134	80	59,7

A partir de los resultados ofrecidos por la validación mediante los datos del verano del 2013 se observa como el grado de acierto es del 60%, aunque a este respecto es necesario destacar que muchos de los puntos con valores por debajo del tercer cuartil, límite para considerar el peligro de ignición como elevado, se encuentran en áreas donde los píxeles colindantes son de alto peligro o bien en zonas donde el peligro de ignición por causas humanas es muy elevado.

Analizando las distintas fechas se puede ver como en los días seleccionados desde mediados de julio a mediados de agosto no existen focos de calor con un alto peligro de ignición. Sin embargo, centrandose la atención en la información del peligro de ocurrencia humana se ve como se encuentran en zonas de elevada peligrosidad y en el caso del 18 de julio y el 13 y 14 de agosto la zona circundante presenta valores de peligro de ignición muy elevados, situados por encima del tercer cuartil. Este hecho se repite en las distintas fechas analizadas.

La Fig. 5 presenta el peligro de ignición para el 27 de agosto del año 2013, donde se puede observar con claridad como los valores eran elevados en buena parte del territorio, destacando la provincia de Ourense y el extremo sur de Pontevedra, donde se concentran los focos de calor de MODIS.

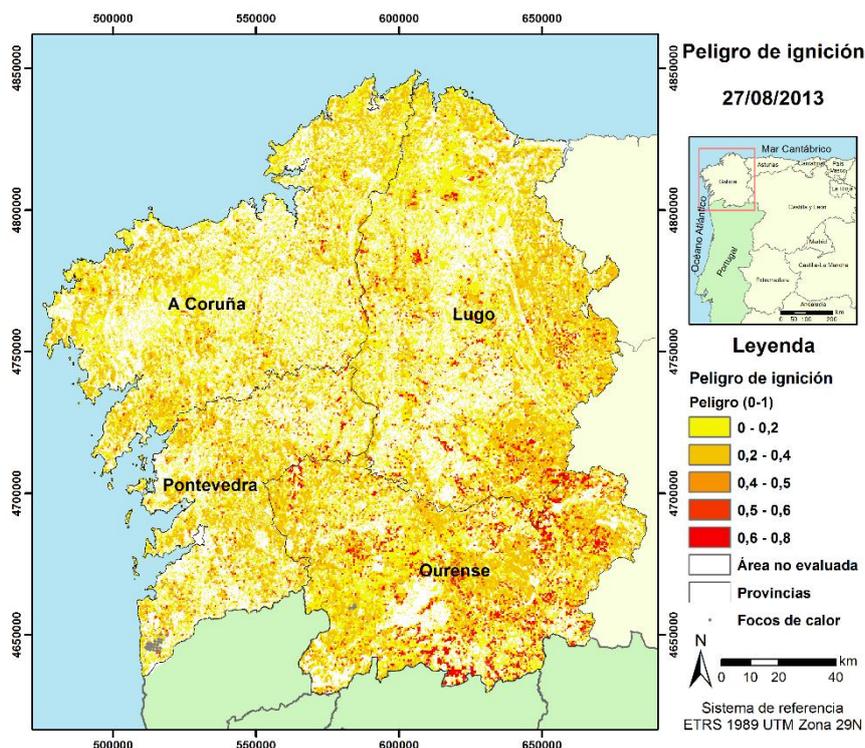


Figura 5. Mapa del peligro de ignición del 27 de agosto de 2013.

#### 4. Discusión

En este estudio se ha considerado importante analizar los factores humanos en la ocurrencia de incendios forestales, a pesar de las dificultades que estos entrañan, ya que en estudios previos se ha comprobado la importancia que estos tienen.

Las variables empleadas para la ocurrencia humana, coinciden en buena medida con las seleccionadas por Rodríguez *et al.* (2014) y Vilar del Hoyo *et al.* (2008). Las interfases están representadas en ambos estudios, con la particularidad de que en esta ocasión también se ha tenido en cuenta la de la zona forestal con el pasto por la significancia obtenida en Galicia. Otra de las variables que se recoge son los espacios naturales, que en todos los casos ofrece un comportamiento mitigador. En el caso gallego también se han tenido en cuenta los montes mancomunales, al considerarse como un buen indicador de la acción humana en los incendios forestales.

Para el análisis de la ocurrencia humana sería interesante disponer de la información más actualizada, para que el modelo se asemeje a la realidad más actual. También sería de interés conocer datos como la maquinaria agrícola, que en este caso no se encontraba con un nivel de detalle lo suficientemente bueno.

En el caso de la ocurrencia natural las variables seleccionadas se asemejan a las empleadas en el modelado final por Pacheco *et al.* (2009) donde se ha tenido en cuenta el número de rayos y una de las variables meteorológicas. Para la realización de esta variable sería interesante realizar una aproximación con un mayor número de variables meteorológicas, para así conocer si existe algún índice con una mejor adaptación que el déficit hídrico máximo, como se realiza en el caso de Pacheco *et al.* (2009). Otro elemento que podría mejorar esta variable sería la inclusión de previsiones de rayos y de las condiciones meteorológicas.

Los resultados obtenidos para la causalidad humana y natural se han comparado con las parroquias<sup>2</sup> consideradas por la Xunta de Galicia como de alto peligro de actividad incendiaria para el año 2016 (Xunta de Galicia, 2016), dando como resultado que la mayoría de estas parroquias se encuentran en las áreas de alto peligro de ignición por la acción humana. Las únicas parroquias en las que el valor de la causalidad humana no es elevado se encuentran en la zona suroriental de la provincia de Ourense, donde se encuentran los valores más elevados de riesgo de incendio natural. Con esta comprobación se puede entender que la información de peligro ofrecida por estas variables se corresponde bastante bien con las zonas en las que se produjeron un mayor número de incendios en los últimos años.

<sup>2</sup> Este término hace referencia a las parroquias civiles, que en Galicia son entidades colectivas reconocidas de tamaño inferior al del *concello* (municipio) y tiene su origen en las parroquias eclesiásticas.

La información disponible sobre la localización de los incendios forestales no presenta un buen nivel de detalle al no disponer de las coordenadas de estos (Martínez *et al.*, 2009), por lo que en este estudio se realizó una aproximación a partir de los datos ministeriales, lo que nos confiere una serie de limitaciones al no tratarse de los lugares exactos en los que se haya producido un incendio, sino una aproximación a estos. Este problema de precisión también está presente en la validación, para la que se ha recurrido al empleo de los focos de calor de MODIS, entendiendo sus limitaciones para la detección de los focos en condiciones de alta nubosidad, muy frecuentes en Galicia (Pettazzi y Casado, 2011), la aparición de puntos en áreas que no son forestales y la elevada temperatura del lugar para ser registrado como foco de calor por el satélite. En este aspecto se podría trabajar en el futuro en la mejora de la precisión de los datos de los incendios forestales ya ocurridos, facilitándose así tanto el modelado como la validación de los modelos.

Los resultados del modelo propuesto pueden ser mejorables en función de las variables seleccionadas para su elaboración. Una limitación de esta propuesta es el empleo de una causalidad estática, lo que no ocurre en otros estudios (Vilar *et al.*, 2010), donde los factores humanos varían en función de días del año, logrando un mayor nivel de detalle, que se podría acrecentar introduciendo información relativa al comportamiento humano según la hora del día o época del año.

Las zonas de baja peligrosidad que presentan focos de calor se corresponden mayoritariamente con áreas de alta influencia humana en los incendios forestales, lo que muestra con claridad la problemática con los incendios iniciados por causas humanas en Galicia.

## 5. Conclusiones

El método propuesto ofrece un índice de peligro de ignición adaptado al territorio gallego, en el que, en líneas generales, las zonas que tienen un mayor peligro se corresponden con las zonas de mayor incidencia de los incendios forestales, siendo el acierto del 60% para la validación realizada con los datos del año 2013. Además, se trata de una metodología que es exportable a otros territorios con la simple modificación de los valores de las variables de entrada.

El modelo ofrece varios productos que pueden utilizarse de manera independiente por los gestores forestales, los que pueden tener un mayor interés en un modelo de este tipo, donde la integración de todos los productos ofrece un índice integrado final de peligro de ignición forestal.

La distribución de los incendios forestales registrados desde el 1974 se corresponden claramente con las zonas en las que el modelo presenta los valores de peligro de ignición más elevados.

Se ha demostrado la importancia de los factores humanos en los incendios forestales gallegos, lo que se observa en áreas que presentan valores bajos de peligro de ignición y que sufrieron incendios forestales en el verano del 2013. Estas zonas tenían en común un valor por encima del tercer cuartil en el peligro de ignición por causas humanas.

Con este estudio se ha tratado de mejorar la resolución espacial de trabajos precedentes, siendo esta de 500 metros, un tamaño óptimo para comprender la variabilidad de peligro de ignición en Galicia.

La automatización del modelo facilita el análisis de un mayor registro temporal con un reducido consumo de tiempo, tan sólo necesitando la introducción de tres capas de información iniciales (temperatura, humedad relativa y los datos MODIS).

## Agradecimientos

Este trabajo se ha elaborado en el transcurso del Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica de la Universidad de Alcalá. Agradecer las enseñanzas aportadas por los docentes de este máster y la ayuda de Marcos Rodrigues y Marta Yebra.

## Referencias

- AGUADO, I., CHUVIECO, E., BORÉN, R. y NIETO, H., 2007. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 16, no. 4, pp. 390-397.
- ALONSO-BETANZOS, A., FONTENLA-ROMERO, O., GUIJARRO-BERDIÑAS, B., HERNÁNDEZ-PEREIRA, E., ANDRADE, M.I.P., JIMÉNEZ, E., SOTO, J.L.L. y CARBALLAS, T., 2003. An intelligent system for forest fire risk prediction and fire fighting management in Galicia. *Expert Systems With Applications* [en línea], vol. 25, no. 4, pp. 545-554. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417403000952>.
- ANGULO, C.E.P., AGUADO, I. y NIETO, H., 2009. Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular. *GeoFocus*, vol. 9, pp. 232-249.
- BARREIRO, J.B., GONZÁLEZ, R.C.L. y HERMOSILLA, T., 2014. La campaña de incendios de 2006 en Galicia: un análisis del cambio en la distribución espacial de la actividad incendiaria. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* [en línea], no. 64, pp. 81-100. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oiart?codigo=4653634>.

- CHUVIECO, E., AGUADO, I. y DIMITRAKOPOULOS, A.P., 2004. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research* [en línea], vol. 34, no. 11, pp. 2284-2293. Disponible en: <http://www.ingentaconnect.com/content/nrc/cjfr/2004/00000034/00000011/art00010>.
- CHUVIECO, E., AGUADO, I., JURDAO, S., PETTINARI, M.L., YEBRA, M., SALAS, J., HANTSON, S., DE LA RIVA, J., IBARRA, P., RODRIGUES, M., ECHEVERRIS, M., AZQUETA, D., ROMAN, M. V, BASTARRIKA, A., MARTINEZ, S., RECONDO, C., ZAPICO, E. y MARTINEZ-VEGA, F.J., 2014. Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire* [en línea], vol. 23, no. 5, pp. 606-619. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1885/18171>.
- CHUVIECO, E., AGUADO, I., YEBRA, M., NIETO, H., SALAS, J., MARTÍN, M.P., MARTÍN, S., VILAR, L., MARTÍNEZ, J., IBARRA, P., DE LA RIVA, J., BAEZA, J., RODRÍGUEZ, F., MOLINA, J.R., HERRERA, M.A. y ZAMORA, R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling* [en línea], vol. 221, no. 1, pp. 46-58. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380008005735>.
- CHUVIECO, E., CIFUENTES, Y., HANTSON, S., LÓPEZ, A.A., RAMO, R. y TORRES, J., 2012. Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos. *Revista de Teledetección*, vol. 37, pp. 9-22.
- DE LA RIVA, J., PÉREZ-CABELLO, F., LANA-RENAULT, N. y KOUTSIAS, N., 2004. Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment* [en línea], vol. 92, no. 3, pp. 363-369. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704002469>.
- DEL HOYO, L.V., NIETO, I.G., ISABEL, M.P.M. y VEGA, F.J.M., 2007. Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. *IV International Wildland Fire*, vol. 11, no. 1, pp. 41-51.
- FOTHERINGHAM, A.S., BRUNSDON, C. y CHARLTON, M., 2002. *Geographically weighted regression*. Chichester: Wiley. ISBN 0471496162.
- FUENTES-SANTOS, I., MAREY-PEREZ, M.F. y GONZALEZ-MANTEIGA, W., 2013. Forest fire spatial pattern analysis in Galicia (NW Spain). *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 128, pp. 30-42. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23714585>.
- GALICIA, X. de, 2016. PLADIGA. [en línea]. Santiago de Compostela: Disponible en: <http://goo.gl/Un2ce1>.
- KALABOKIDIS, K.D., KOUTSIAS, N., KONSTANTINIDIS, P. y VASILAKOS, C., 2007. Multivariate analysis of landscape wildfire dynamics in a Mediterranean ecosystem of Greece. *Area* [en línea], vol. 39, no. 3, pp. 392-402. Disponible en: <http://www.ingentaconnect.com/content/bpl/area/2007/00000039/00000003/art00015>.
- MARTÍ, A., CABALAR, M. y GARCÍA, E., 2011. O clima. En: M.J. PIÑEIRA y X.M. SANTOS SOLLA (eds.). Vigo: Xerais, Xeografía de Galicia, pp. 99-130.
- MARTÍNEZ, J., VEGA-GARCIA, C. y CHUVIECO, E., 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 90, no. 2, pp. 1241-1252. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479708001758>.
- MOLANO, F., RODRÍGUEZ, C. y PONTE, J.M., 2007. *Informe sobre investigación de incendios forestales en Galicia. Verano 2006* [en línea]. 2007. S.l.: s.n. Disponible en: <http://data.theeuropeanlibrary.org/BibliographicResource/2000067275443>.
- NIETO, HAGUADO, I., GARCIA, M. y CHUVIECO, E., 2012. Lightning-caused fires in Central Spain: Development of a probability model of occurrence for two Spanish regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 162-163, pp. 35-43.
- PETTAZZI, A. y CASADO, S.S., 2011. *Atlas de radiación solar de Galicia*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.
- RODRIGUES, M., LA RIVA, J. De y FOTHERINGHAM, S., 2014. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography*, vol. 48, pp. 52-63.
- ROMERO-CALCERRADA, R., BARRIO-PARRA, F., MILLINGTON, J.D.A. y NOVILLO, C.J., 2010. Spatial modelling of socioeconomic data to understand patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (central Spain). *Ecological Modelling* [en línea], vol. 221, no. 1, pp. 34-45. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380009005638>.
- SCHMUCK, G., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., CAMIA, A., DURRANT, T., BOCA, R., LIBERTÁ, G. y SCHULTE, E., 2014. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2013. , vol. 26791.
- VEGA, J.A., FERNÁNDEZ, C. y FONTURBEL, T., 2015. Comparing the effectiveness of seeding and mulching. *Ecological Engineering* [en línea], vol. 74, pp. 206-212. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857414005552>.
- VILAR, L., WOOLFORD, D.G., MARTELL, D.L. y MARTÍN, M.P., 2010. A model for predicting human-caused wildfire occurrence in the region of Madrid, Spain. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19, no. 3, pp. 325.
- VILAR DEL HOYO, L., 2008. Empleo de regresión logística para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. *Boletín de la A.G.E.*, vol. 47, pp. 5-29.
- YEBRA, M., CHUVIECO, E. y RIAÑO, D., 2008. Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology* [en línea], vol. 148, no. 4, pp. 523-536. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192307003140>.