

# Estimación del riesgo de incendio en Galicia a partir de imágenes EVI del Sensor Terra-MODIS

## Estimation of fire risk in Galicia from Terra-MODIS EVI Images

J. M. Sánchez<sup>1</sup>, V. Caselles<sup>1</sup>, M. M. Bisquert<sup>1</sup>, M. I. Paz Andrade<sup>2</sup> y J. L. Legido<sup>3</sup>  
Juan.M.Sanchez@uv.es

<sup>1</sup>Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València, Burjassot, 46100

<sup>2</sup>Dpto. Física Aplicada, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 15782

<sup>3</sup>Dpto. Física Aplicada, Universidad de Vigo, Vigo, 36200

Recibido el 12 de Junio de 2008, aceptado el 6 de Noviembre de 2008

### RESUMEN

Los incendios son una de las principales causas de destrucción de la naturaleza. La región de Galicia, situada al noroeste de España, es una zona particularmente castigada por la acción devastadora del fuego. Por este motivo, es de vital importancia la elaboración de un modelo de predicción de riesgo de incendio. En este artículo recurrimos a un índice de vegetación concreto, el Enhanced Vegetation Index (EVI), para caracterizar los cambios en el estado de la vegetación en Galicia. Se ha empleado una serie de 6 años de imágenes EVI del producto MOD13 Q1 (imagen cada 16 días) del sensor MODIS a bordo del satélite EOS-Terra, así como información de los incendios registrados durante el mismo periodo en base a una cuadrícula de  $10 \times 10$  km<sup>2</sup>. El porcentaje de casos afectados con incendio se ajusta bastante bien a la variación del EVI experimentada, siguiendo una distribución lineal. La ecuación obtenida permite calcular la probabilidad de que se produzca incendio, con un error de estimación en torno al 15%. Se establece una clasificación de tres niveles diferentes de peligrosidad y se comprueba, comparando con los mapas de incendios registrados, su potencialidad a la hora de catalogar la mayor o menor probabilidad de que se produzcan incendios en una zona. Así pues, el método que presentamos podría contribuir a aumentar la eficiencia de los sistemas de prevención de incendios que se utilizan actualmente.

Palabras clave: EVI, MODIS/Terra, riesgo de incendio, Galicia.

### ABSTRACT

Forest fires contribute highly to the nature destruction. The Galicia region, placed at the northeast of Spain, is an area specially affected by the devastating action of the fire. For this reason, it is imperative the development of a model to predict fire risk. In this paper, the Enhanced Vegetation Index (EVI) is used to monitor changes in the vegetation status in Galicia. Six years of EVI images, from the MODIS product MOD13 Q1 (one image each 16 days), together with fire data in a  $10 \times 10$  km<sup>2</sup> grid basis were used. The percentage of fire events fits the EVI variation suffered following a linear distribution. The inferred equation permits us to estimate the fire occurrence probability, with an estimation error around 15%. Three different levels of fire risk are established. The potential of this classification is tested by comparing fire events data with predicted probability of fire occurrence. The method presented in this paper may then contribute to increase the efficiency of the fire prevention systems currently used.

Key words: EVI, MODIS/Terra, fire risk, Galicia.

## INTRODUCCIÓN

Los incendios son una de las principales causas de destrucción de la naturaleza, afectando al paisaje, al ciclo natural de la vegetación, y a la estructura y función de los ecosistemas (Koutsias & Karteris, 2000; Lozano *et al.*, 2008). Los grandes incendios pueden afectar, incluso, al cambio climático debido a la gran cantidad de gases, hidrocarburos y partículas que son liberadas a la atmósfera durante el proceso de combustión de la biomasa (González *et al.*, 1997).

En España, de acuerdo con las estadísticas del Ministerio de Medio Ambiente, aproximadamente un 60% de los incendios forestales tienen como causa la acción antropogénica. Éstos son responsables del 48,6% de la superficie forestal quemada anualmente en España ([http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/defensa\\_incendios/estadisticas\\_incendios/](http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/defensa_incendios/estadisticas_incendios/)). Para hacernos una idea de la magnitud catastrófica de los incendios, tan solo tenemos que recordar algunos ejemplos, como el año 1994, en el que la superficie total quemada en todo el país fue de 432.997 ha. Centrándonos en la Comunidad de Galicia, el porcentaje de incendios por causas no naturales se eleva hasta el 73,3%; y como ejemplo ilustrativo podemos citar el año 2006, en el que se quemaron, en esta región, cerca de 95.000 ha.

La determinación del riesgo de incendios y del daño ocasionado por los mismos son herramientas muy valiosas; sin embargo, la recogida de información sobre el propio terreno es muy costosa en términos económicos, de tiempo y de recursos humanos. La Teledetección se ofrece como la solución a este problema. Desde 1990 varios equipos de investigación han dedicado su esfuerzo a la lucha contra los incendios haciendo uso de imágenes de satélite, con distintos objetivos: identificar y cartografiar áreas quemadas (Martín y Chuvieco, 1995), detectar focos activos (Casanova *et al.*, 1993), y la estimación de riesgo de incendios (Maselli *et al.*, 2003; González-Alonso *et al.*, 1997; Lozano *et al.*, 2007 y 2008).

Alonso-Betanzos *et al.* (2003) presentaron un sistema desarrollado centrado en la región de Galicia que cumple con tres funciones principales: sirve de herramienta de prevención a través de la predicción del riesgo de incendio, de apoyo en la fase de control y extinción, y finalmente de ayuda en la planificación de recuperación de áreas quemadas. El trabajo que aquí presentamos se inserta dentro del marco de este ambicioso proyecto, y en concreto en la tarea de diseñar un índice de peligro de incendios cuyos principales parámetros de entrada sean: la orografía

del terreno, las variables meteorológicas, y el estado de la vegetación. En este artículo nos centraremos en este último aspecto y trataremos de encontrar una relación entre el estado de la vegetación y la probabilidad de que se produzcan incendios. Hay que tener presente que las relaciones entre la ocurrencia de incendios y los factores medioambientales, pueden llegar a ser muy complejas, sobre todo cuando el factor humano juega un papel importante. A pesar de ello, el riesgo de incendio presenta una dependencia con varios factores entre los que destaca el contenido en agua de la vegetación. Esta variable se puede expresar a través de distintos términos: *Fuel Moisture Content* (FMC), se define como el cociente entre el contenido de agua y el peso en seco de la vegetación; *Equivalent Water Thickness* (EWT) es el contenido de agua por unidad de área foliar; o *Relative Water Content* (RWC), es la relación entre la cantidad de agua en un momento dado y la cantidad de agua en plena turgencia (Maki *et al.*, 2004). Todas estas magnitudes requieren de muestreos en superficie, y por tanto su aplicación directa a la predicción de incendios se ve muy limitada cuando se trata de monitorizar áreas extensas. Sin embargo, la posibilidad de determinar el estado de sequedad de la vegetación a través de datos obtenidos mediante sensores remotos hace que la Teledetección se convierta en una herramienta fundamental para medir variaciones temporales y espaciales del contenido de humedad sobre regiones amplias.

El agua presenta unos rasgos característicos de absorción en determinadas regiones espectrales. Los cambios en la absorción espectral de la vegetación se producen a consecuencia de cambios en la cantidad de agua, y también en la estructura de la misma así como en los pigmentos fotosintéticos (Yu *et al.*, 2000; Ceccato *et al.*, 2001). En los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios basados en la relación entre el contenido de agua de la vegetación y las reflectividades espectrales, y los resultados se han comparado con medidas gravimétricas directas (Maki *et al.*, 2004; Gillon *et al.*, 2004; Dennison *et al.*, 2005; Stow *et al.*, 2005; Cheng *et al.*, 2006). Los estudios se centran en los dominios del infrarrojo próximo (SWIR), del infrarrojo cercano (NIR), del visible (VIS) y del infrarrojo térmico (TIR). Se han propuesto distintos índices, calculados a partir de dichas reflectividades, cuya diferencia reside en las bandas espectrales utilizadas en cada caso: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974), *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Gao, 1996), *Normalized Difference Infra-*

*red Index* (NDII) (Hunt y Rock, 1989), *Leaf Water Content Index* (LWCI) (Hunt *et al.*, 1987), *Vegetation Dryness Index* (VDI) (Maki *et al.*, 2004), *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI) (Stow *et al.*, 2005), *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Huete *et al.*, 2002), entre otros.

Algunos de estos índices, como el NDVI, EVI o VARI no incluyen bandas de absorción del agua, sin embargo, son muy sensibles a las variaciones del LAI y del contenido de clorofila que van asociados al proceso de secado en muchas especies (Yebra *et al.*, 2008). Hay que tener en cuenta que según el tipo de vegetación considerado el comportamiento del FMC vendrá mejor caracterizado por un índice específico. Maki *et al.* (2004) comprobaron la relación entre el NDWI y el EWT en una zona de coníferas. Dennison *et al.* (2005) observaron que la medida de absorción del agua, proporcionada por el NDWI, podría ser más adecuada para monitorizar el FMC que la medida de la absorción de la clorofila, plasmada a través del NDVI, utilizando datos de bosques en Los Angeles (EEUU). Stow *et al.* (2005) mostraron mayor robustez y correlación del VARI, frente al NDWI, con el FMC en una zona de arbustos de San Diego (EEUU), a pesar de que el VARI está basado únicamente en valores de reflectividad de bandas del visible. Los resultados obtenidos por Verbesselt *et al.* (2006) en una zona de sabana en Africa del Sur mostraron que el NDWI poseía la mayor capacidad para predecir el riesgo de incendio en dicho ecosistema. Cheng *et al.* (2006) compararon cuatro índices diferentes, observando los mejores resultados con el EVI en una zona de cultivo y de arbustos semiárida y con el NDWI en un bosque de coníferas, ambas zonas de EEUU. Existen también estudios que relacionan la temperatura de la superficie (LST) con el contenido de agua de la vegetación (Moran *et al.*, 1994, en zona de cultivos), incluso se ha comprobado que una combinación de LST y NDVI muestra mayor relación con la humedad de la vegetación que cualquiera de las dos variables por separado (Alonso *et al.*, 1996, en especies mediterráneas; Chuvieco *et al.*, 2004, en pastizales mediterráneos y arbustos). De toda esta serie de trabajos se deduce que, a pesar de que se ha estudiado ampliamente la relación entre los índices y la humedad de la vegetación, todavía no se puede destacar a uno en concreto como más eficaz que el resto a la hora de predecir riesgo de incendio, sino que depende de la zona, del tipo de vegetación, y de las condiciones ambientales. Además, no son tan frecuentes los trabajos que tratan de relacionar los índices directamente con datos reales de

incendios en una zona. Dentro de estos últimos se insertan, por ejemplo, los análisis de los datos de NDVI obtenidos a través del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA, para controlar el riesgo de incendios (González-Alonso *et al.*, 1997; Maselli *et al.*, 2003). Más recientemente, algunos trabajos utilizan datos del sensor MODIS, a bordo de la plataforma EOS-Terra, operativo desde principios del año 2000, y que permite captar información en más de 30 canales de resolución espacial variable. Schneider *et al.* (2008) eligieron el VARI para calcular el *Relative Greenness* (RG) a partir de una serie de imágenes MODIS, y validar los resultados utilizando datos reales de incendios en una zona del sur de California (EEUU).

El objetivo de este estudio es el de encontrar una relación empírica directa entre los cambios del estado de la vegetación, y la probabilidad de que se produzcan incendios en la región de Galicia. De esta forma dispondremos de una herramienta para catalogar el riesgo de una zona, en base a una serie de categorías simbólicas, a partir de la información proporcionada de forma operativa mediante teledetección. A pesar de que en este artículo se hace un tratamiento de esta metodología con total identidad propia, se espera que en un futuro próximo se pueda implementar como un módulo adicional dentro del sistema elaborado por Alonso-Betanzos *et al.* (2003). En la Sección 2 se hace una descripción de la zona de estudio, así como de la información e imágenes de satélite empleadas. La metodología aplicada para el estudio se muestra en la Sección 3. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos, y, finalmente, las principales conclusiones se resumen en la Sección 5.

## ÁREA DE ESTUDIO Y MATERIAL UTILIZADO

La zona de estudio de este trabajo es la región de Galicia, situada en el Noroeste de la Península Ibérica, ocupando una superficie de 29.575 km<sup>2</sup> (Fig. 1) Se encuentra en una zona templada, con un clima de transición entre el oceánico y el mediterráneo, con inviernos suaves y veranos frescos. En la costa las temperaturas oscilan entre los 8°-10° en invierno y los 20°-25° en verano, mientras que en el interior el clima es más seco, con temperaturas más bajas en invierno y más altas en verano. Toda Galicia posee un clima lluvioso debido a los vientos dominantes del oeste que traen masas de aire húmedas. De acuerdo con el Tercer Inventario Forestal Nacional

(1997-2006), cerca del 70% de la superficie de Galicia es “forestal”, un 64% de la cual está cubierta por árboles (coníferas y eucaliptos, principalmente). A pesar de los altos niveles de humedad de la vegetación que predominan en Galicia, se trata de la región española donde habitualmente mayor número de incendios forestales se concentra. Con este marco supone pues un auténtico desafío el tratar de encontrar una relación entre los cambios en el estado de la vegetación y el riesgo de incendio.

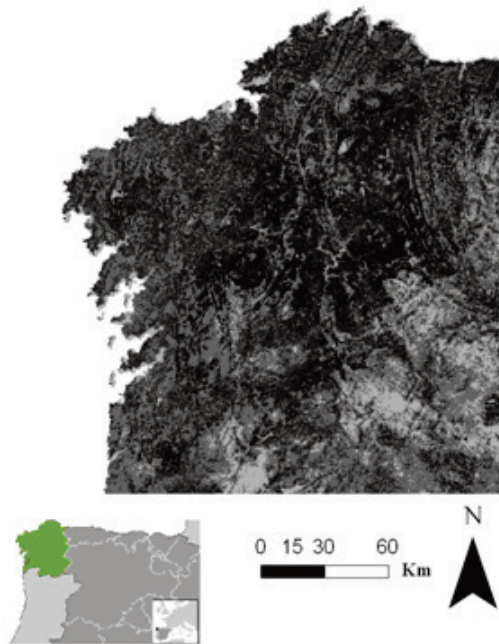


Figura 1. Localización de la región de Galicia.

El sistema de Alonso-Betanzos *et al.* (2003) trabaja sobre una cuadrícula que divide Galicia en 360 casillas de 10×10 km<sup>2</sup> cada una en base a la proyección UTM (*Universal Transverse Mercator*), zona 29. Las series históricas disponibles sobre incendios acaecidos en Galicia permiten localizarlos en base a esta cuadrícula, pero se desconoce la localización exacta de los incendios dentro de cada casilla. Por este motivo nos planteamos caracterizar el estado de la vegetación con esa misma resolución espacial de 10×10 km<sup>2</sup>. En cuanto a la resolución temporal, el estado de la vegetación no es algo que cambie de forma apreciable de un día para otro (como sí ocurre con las variables meteorológicas) y asumimos que disponer de esta información aproximadamente cada 15 días sería suficiente.

El producto MOD13 Q1 obtenido a partir de imágenes del sensor MODIS, contiene información de la composición de 16 días de los índices NDVI y EVI,

con una resolución espacial de 250 m (Fig. 2), cumpliendo con nuestros requisitos descritos con anterioridad. Por tanto, para el presente estudio hemos hecho uso de las imágenes MOD13 Q1, facilitadas de forma gratuita por el NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC), cubriendo un periodo de 6 años entre 2001 y 2006. El uso de una composición de 16 días nos permite disponer de información más completa, ya que en las imágenes diarias, en una zona como Galicia, es más que habitual la presencia de nubes.

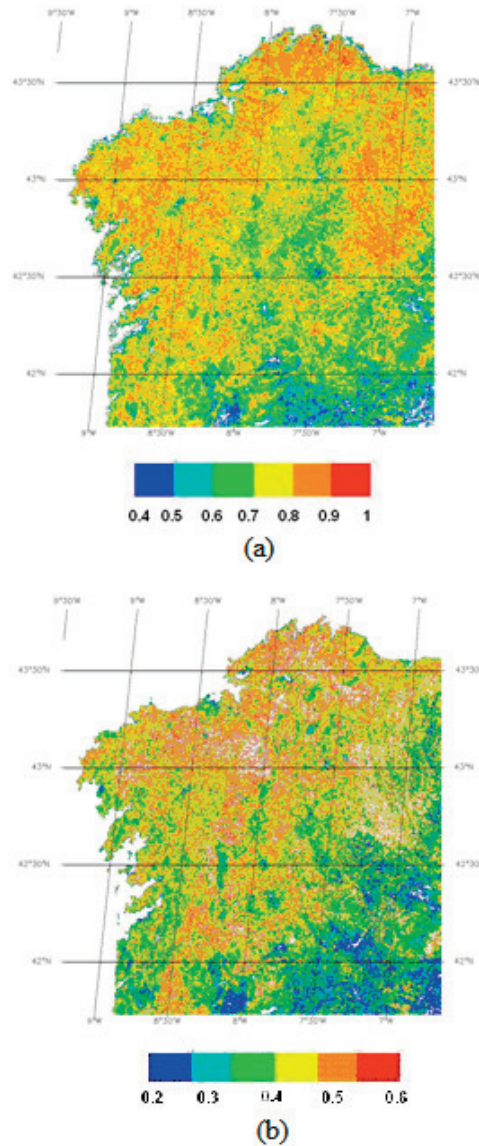


Figura 2. Imágenes del producto MOD13 Q1 elaborado a partir de la información diaria registrada por el sensor MODIS para la región de Galicia, correspondientes al periodo asociado entre el 10 y el 25 de junio de 2003: (a) NDVI, (b) EVI.

También se hizo uso del producto de cubierta terrestre, MOD12Q1 para clasificar los usos de suelo en Galicia. Se trata de imágenes anuales de una resolución espacial de 1 km. De las muchas clasificaciones que se pueden establecer, para el presente estudio consideramos suficiente dividir los usos de suelo en cuatro grupos principales: zona agrícola, zona arbolada, zona de matorral y zona sin vegetación.

Por otro lado, la Universidad de Santiago de Compostela nos facilitó la información relativa al registro de incendios para esos mismos años. En la Figura 3, se muestra el histograma del valor medio de número de incendios para el periodo de los 6 años. Se aprecia un primer pico de incendios, menos importante, por el mes de marzo, y el pico principal coincidiendo con los meses de verano. Además, se observa como la práctica totalidad de los incendios se produce en el periodo comprendido entre los meses de febrero y primera quincena de octubre, por lo que restringimos nuestro análisis a este periodo.

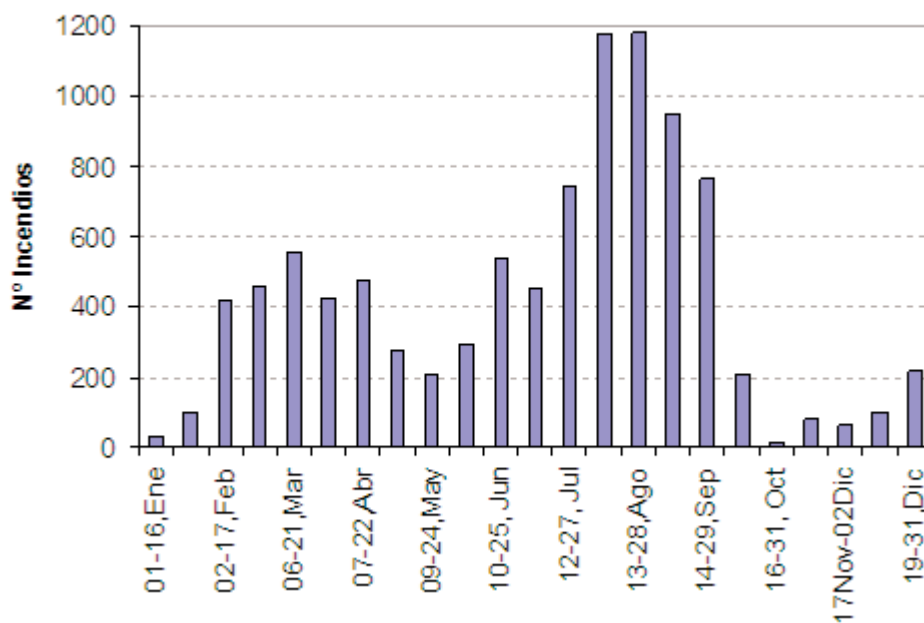
## METODOLOGÍA

La metodología comprendió varias fases: (i) pre-procesado de las imágenes MODIS, (ii) elección entre NDVI o EVI, como índice de vegetación más

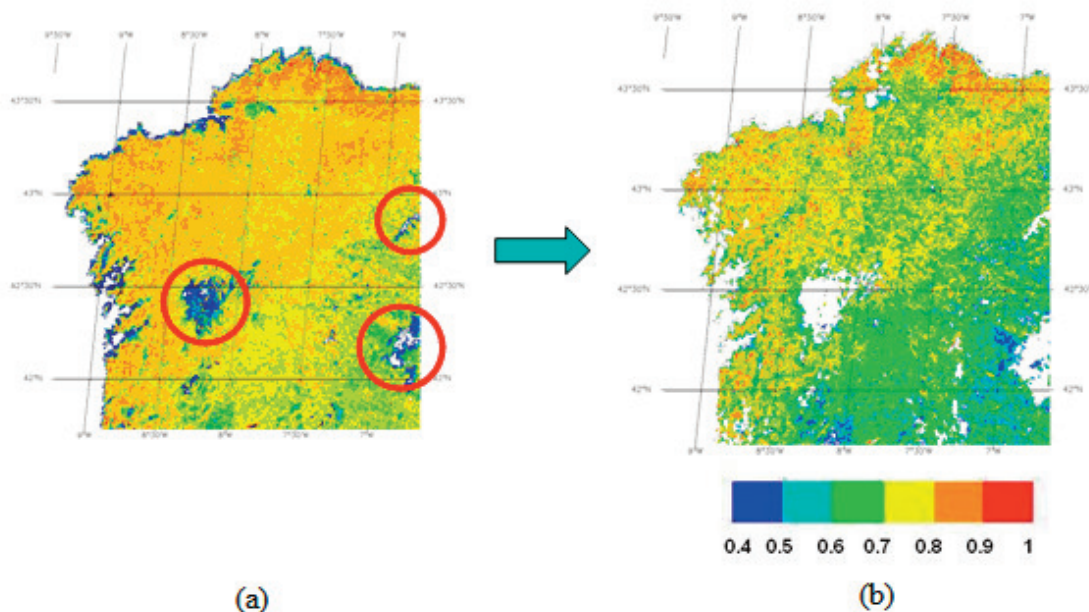
apropiado para el estudio, (iii) búsqueda de relaciones empíricas entre las variaciones del índice de vegetación y la frecuencia de incendios en una zona determinada.

### Pre-procesado de las imágenes MODIS

En este trabajo hemos utilizado las imágenes revisadas de la Colección 5 del producto MOD13 Q1. Como se ha indicado anteriormente, la composición de 16 días permite elaborar imágenes con la mayor cobertura espacial posible de información de NDVI y EVI, es decir, eliminar al máximo el efecto de las nubes. Sin embargo, pueden existir píxeles de los que no ha sido posible captar información en ninguno de esos 16 días, y por tanto, el valor asignado estará contaminado por esa presencia de nubes. Por otro lado, también pueden existir píxeles con valores erróneos por diversas causas, como por ejemplo un mal funcionamiento de los detectores. Finalmente, la presencia de agua dentro del píxel también altera el valor del índice de vegetación. Por todo ello, realizamos un proceso de filtrado de las imágenes basándonos en la información contenida en la banda de calidad, incluida dentro del mismo producto MOD13 Q1, quedándonos, tan solo, con aquellos píxeles que contienen información fiable para nuestro estudio (Fig. 4).



**Figura 3.** Número medio de incendios, acumulados en periodos de 16 días, de los años 2001 a 2006 en la comunidad de Galicia.



**Figura 4.** Mapas de NDVI del producto MOD13 Q1, correspondientes al período del 2 al 17 de febrero del año 2003: (a) sin filtrar, (b) filtrado.

Los organismos y autoridades encargados de la lucha contra los incendios en Galicia, trabajan habitualmente sobre la cuadrícula espacial de  $10 \times 10 \text{ km}^2$  que hemos comentado anteriormente. Así pues, tuvimos que superponer dicha cuadrícula a las imágenes MODIS, y calcular el valor medio de todos los píxeles contenidos en cada una de las celdas ( $40 \times 40$  píxeles) (Fig. 5). Es evidente que de esta forma perdemos resolución espacial, pero es necesario para poder buscar relaciones coherentes con el número de incendios, ya que este valor viene, también, dado en base a la citada cuadrícula. De la misma forma, a partir de las imágenes del producto MOD12Q1, se realizó el promedio de los píxeles dentro de cada celda ( $10 \times 10$  píxeles en este caso), y se agruparon las distintas clases en los cuatro usos mencionados anteriormente. En la Figura 6 se muestra un mapa con información del uso de suelo dominante en cada cuadrícula, correspondiente al año 2003. Se aprecia claramente que Galicia está dividida básicamente en dos tipos de vegetación: zona arbolada y zona de matorral.

#### Selección del EVI como índice de vegetación más adecuado

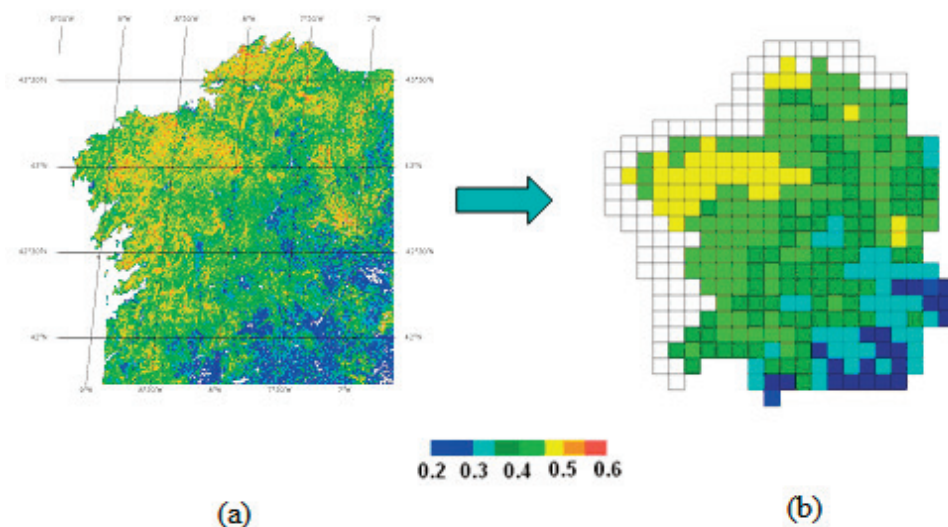
Los valores de NDVI y EVI se obtienen con MODIS a partir de la información de reflectividad contenida en las bandas 1 (645 nm), 2 (858,8 nm), y

3 (469 nm) de acuerdo con las ecuaciones (1) (Rouse *et al.*, 1974) y (2) (Huete *et al.*, 2002), respectivamente:

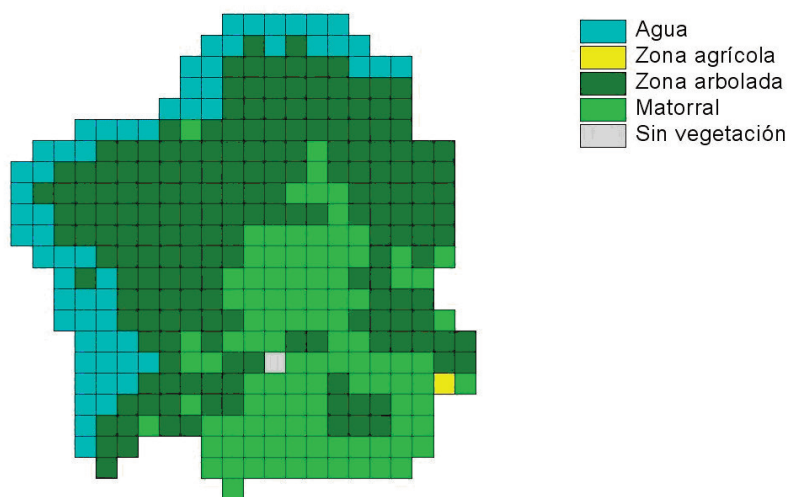
$$NDVI = \frac{Banda2 - Banda1}{Banda2 + Banda1} \quad (1)$$

$$EVI = 2,5 \frac{Banda2 - Banda1}{Banda2 + 6Banda1 - 0,75Banda3 + 1} \quad (2)$$

En la Figura 2 se puede observar como es muy difícil poder identificar el índice de vegetación más apropiado a través de la simple comparación de imágenes para la misma fecha. Sin embargo, la elección se hace obvia cuando analizamos la evolución a lo largo del año del NDVI y del EVI para cada una de las casillas. En la Figura 7 mostramos un ejemplo de la evolución a lo largo del año 2003 de los valores medios de NDVI y EVI para todas las casillas. Se puede observar como las oscilaciones entre distintas épocas del año son mayores en el caso del EVI. El promedio de las diferencias entre el valor máximo y mínimo alcanzados dentro de cada casilla es de  $0,14 \pm 0,05$  en el caso del NDVI y de  $0,19 \pm 0,05$  para el EVI. Además, en la Figura 7 se aprecia como,



**Figura 5.** Mapas de EVI correspondientes al periodo entre el 29 de agosto y el 13 de septiembre del año 2003, con resolución espacial de: (a) 250 m, (b) 10 km.



**Figura 6.** Mapa de usos de suelo dominantes en Galicia.

salvo en los meses Febrero-Abril, el valor del NDVI prácticamente se satura a un valor en torno a 0,75 mostrando muy ligeras variaciones entre distintas fechas, lo que dificulta la tarea de búsqueda de relaciones empíricas entre éste parámetro y la probabilidad de que se produzcan incendios. Estos resultados están de acuerdo con otros estudios que muestran como el NDVI se satura en zonas de alta densidad de vegetación (Holben *et al.*, 1980; Sellers, 1985). Por tanto, a partir de este momento, nos centramos en el

análisis de las variaciones del EVI como indicadores de cambios en el estado de la vegetación que estén relacionados con un mayor riesgo de incendios en una zona determinada.

En la Figura 8 hemos representado el promedio para los 6 años de los datos del valor medio de EVI (para toda la región de Galicia) para cada una de las 23 escenas disponibles por año. Se observa claramente la presencia de un pico hacia finales de mayo, principios de junio.

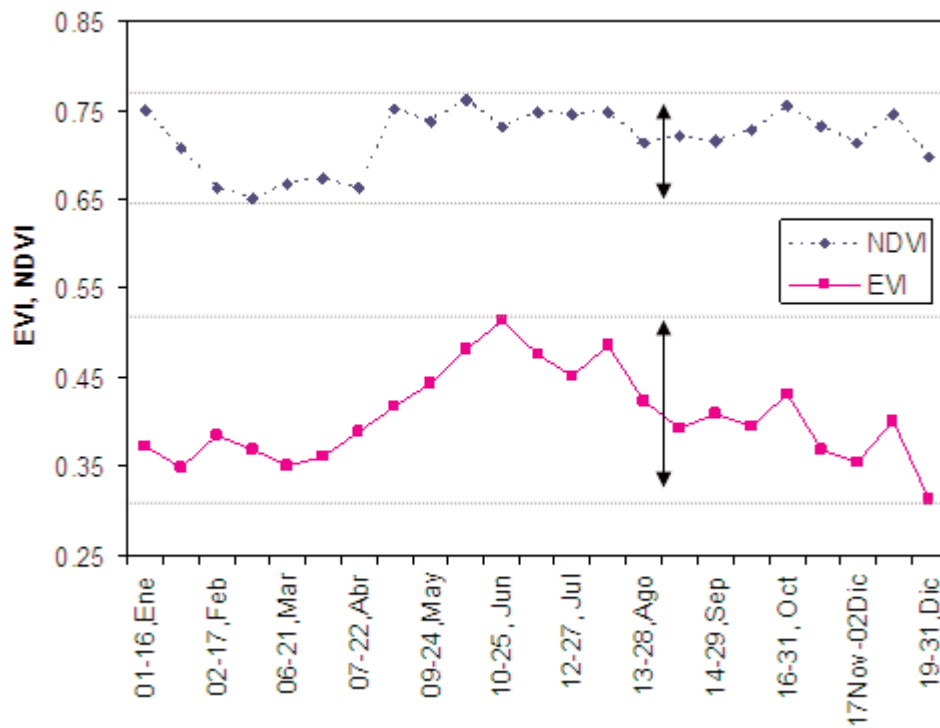


Figura 7. Evolución del NDVI y del EVI a lo largo del año 2003.

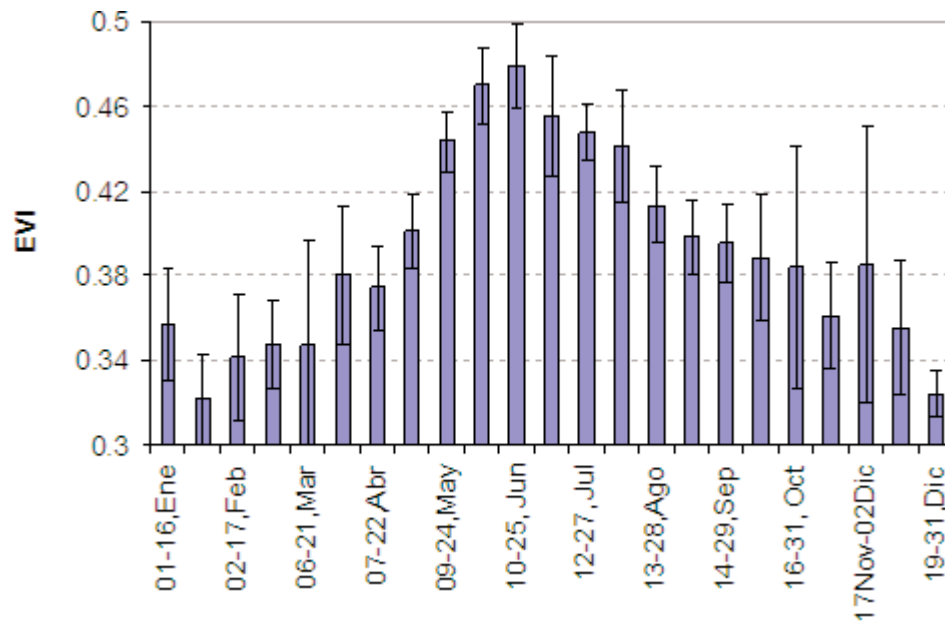


Figura 8. Evolución media del EVI a lo largo del año para los años 2001 a 2006 para toda la región de Galicia.



### Relación entre la frecuencia de incendios y las variaciones del EVI

La mayoría de los trabajos que investigan las relaciones entre la probabilidad de que ocurra un incendio y un cierto índice de vegetación, lo hacen a través de la búsqueda de relaciones empíricas directas entre dicha probabilidad y el propio valor del índice. Sin embargo, en nuestro caso no se apreciaba correlación alguna entre los valores del EVI y la frecuencia de los incendios. Por este motivo, pensamos que la relación sería más clara si enfrentáramos la frecuencia de los incendios y la variación que el EVI experimenta en comparación con la fecha anterior (en nuestro caso, 16 días), en lugar de estudiar la relación con el valor del EVI directamente. Esto es lógico, si tenemos en cuenta que son las variaciones del EVI las que nos pueden informar de cambios en el estado de la vegetación, que puedan estar relacionadas con una mayor o menor probabilidad de que se produzca un incendio.

En primer lugar restamos los valores del índice de vegetación para dos imágenes consecutivas. Seguidamente se agrupan las casillas en intervalos de 0,01 en términos de variación del EVI. Contabilizamos todas aquellas casillas, dentro de cada intervalo de variación de EVI, en las que se ha producido al menos un incendio durante las dos semanas que siguen a la fecha de la imagen considerada. Para que estas variaciones del EVI sean realistas, es decir, para asegurar que no se hayan producido por el efecto de algún incendio en la zona, hemos de filtrar, previamente, la base de datos, y eliminar del estudio, para cada caso, todas aquellas casillas en las que se haya registrado al menos un incendio durante las dos semanas anteriores, y en las que, por tanto, se ha producido un descenso del valor del EVI no asociado directamente a un cambio en el contenido en agua de la vegetación por causas naturales.

Dividiendo el número de casillas con incendio entre el total de casillas, dentro de cada intervalo de variación de EVI, obtenemos un valor de porcentaje de casillas con incendio para cada caso. Finalmente, representamos gráficamente estos valores de porcentaje en función de la variación del EVI, y tratamos de buscar una relación entre ambos que nos permita parametrizar la probabilidad de que se produzca incendio conocida la variación que experimenta el EVI en una determinada casilla. De toda la serie temporal de que disponemos, el 50% de los datos (años impares) se empleó en calcular esta relación, mientras que las tareas de validación se llevaron a cabo a partir del otro 50% (años pares).

En la revisión bibliográfica que se muestra en la introducción se puede ver como las relaciones empíricas entre un determinado índice y el contenido en agua de la vegetación, por ejemplo, varían según el tipo de vegetación considerado. También se observa como la eficacia de los índices a la hora de predecir el riesgo de incendios no es la misma en todas las zonas. Por estos motivos, parece evidente el tratar de sectorizar nuestro análisis por áreas de vegetación uniforme, o al menos, distinguir entre los dos usos de suelo predominantes en Galicia (Fig. 6). De esta forma, además de la relación para todo el conjunto de casillas sin discriminación de zonas, se obtuvieron las ecuaciones empíricas para los conjuntos de casillas con predominio de zona arbolada y de matorral por separado.

## RESULTADOS

Una vez realizado el proceso de filtrado, descrito anteriormente, de los datos contaminados por la presencia de algún incendio en las fechas anteriores, un total de 5184 casos, correspondientes a los años impares (2001+2003+2005) estuvieron disponibles para este análisis. En la Figura 9 representamos el porcentaje de casillas afectadas por incendio en función de la variación del EVI. La distribución de los puntos se ajusta bastante bien a una línea recta. El resultado de la regresión lineal es el siguiente:

$$y = (-1,76 \pm 0,12)x + (0,333 \pm 0,008) \quad (3)$$

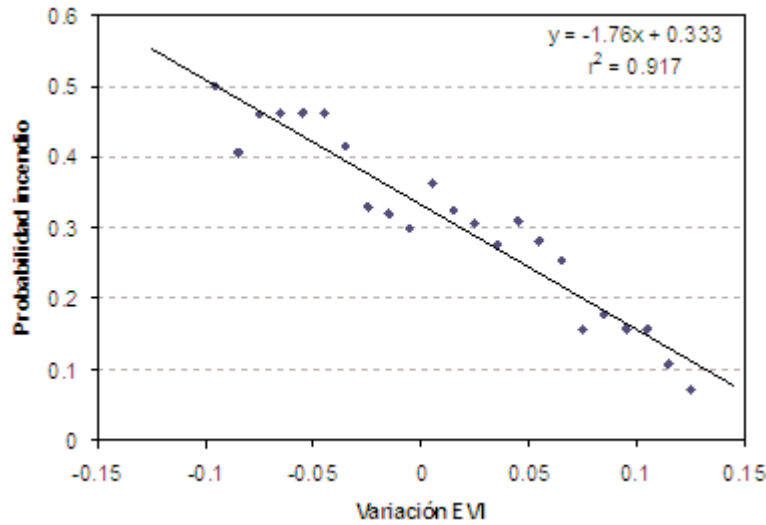
con un coeficiente de regresión de 0,917 y una desviación estándar de 0,04. De la misma forma, se realizó el ajuste por separado para las casillas predominantemente arboladas (ecuación (4)) y aquellas en las que predomina el matorral (ecuación (5)):

$$y = (-1,4 \pm 0,2)x + (0,326 \pm 0,014) \quad (4)$$

$$y = (-2,2 \pm 0,3)x + (0,340 \pm 0,015) \quad (5)$$

En las ecuaciones (3) a (5), la variable de entrada es la variación del EVI respecto al periodo anterior, una vez filtrados los casos en los que se registró algún incendio en dicho periodo. La ecuación nos da la probabilidad de que en una casilla con una variación de EVI dada se produzca algún incendio durante las dos semanas siguientes a la fecha de la imagen.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las variables del ajuste en los tres casos anteriores.



**Figura 9.** Ajuste lineal entre el porcentaje de casillas que presentan algún incendio y la variación que sufre el EVI en las dos semanas anteriores para los años impares.

	a	b	r <sup>2</sup>	σ	n
Todo	-1,76±0,12	0,333±0,008	0,917	0,04	5184
Zona arbolada	-1,4±0,2	0,326±0,014	0,698	0,03	3133
Zona de matorral	-2,2±0,3	0,340±0,015	0,804	0,07	1822

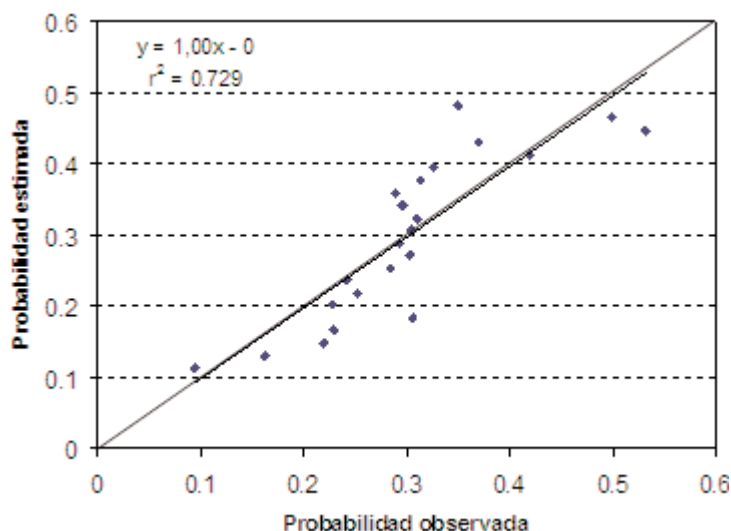
**Tabla 1.** Resultados de la regresión lineal entre el porcentaje de casillas con incendio y la variación del EVI en los años impares para el total de las casillas, y para los dos usos de suelo predominantes por separado (a: pendiente, b: ordenada en el origen, r<sup>2</sup>: coeficiente de regresión, σ: desviación estandar, n: número de sucesos considerados).

Para la validación se contó con un total de 5546 sucesos correspondientes a los años pares (2002+2004+2006). Los resultados obtenidos tras aplicar la ecuación (3) se compararon con los datos de los incendios registrados durante esos años (Fig. 10). Los resultados de este ajuste, así como un análisis estadístico del mismo (Willmott, 1982) se recogen en la Tabla 2. Se obtiene una pendiente igual a la unidad y un valor nulo de la ordenada en el origen, además de un error cuadrático medio de 0,06 y un error relativo medio del 15%.

Con el fin de comprobar el efecto de utilizar la expresión (3) como única relación para toda la región de Galicia, o bien hacer distinción entre los dos tipos de vegetación considerados a través de las ecuaciones (4) y (5), en la Tabla 2 también se han incluido los resultados de la validación de la expresión (3) sobre las dos zonas por separado. Finalmente, también aparecen en la Tabla 2 los resultados de la validación de las relaciones (4) y (5) por separado, en sus respectivas zonas de aplicación (en cursiva). Analizando los estadísticos de la Tabla 2, se aprecia

como incluso sectorizando por usos de suelo se obtiene un mejor acuerdo cuando se emplea la ecuación (3), en lugar de las expresiones (4) y (5) particularizadas para cada una de las zonas. Por tanto, podemos concluir que dadas las suposiciones de este trabajo se consigue una mayor precisión utilizando una relación única (ecuación 3) para toda la región de Galicia.

Hasta el momento tenemos que haciendo uso de la ecuación (3), sobre todo el territorio de Galicia, se puede estimar la probabilidad de que se produzca al menos un incendio dentro de una cierta casilla en las dos semanas siguientes, con un error en torno al 15%. Sin embargo, en los sistemas operativos de predicción de riesgo de incendios se suelen emplear escalas graduadas en base a una clasificación previa. Alonso-Betanzos *et al.* (2003), por ejemplo, distinguen entre cuatro categorías simbólicas de riesgo: bajo, medio, alto y extremo. Tratando de adaptarnos a esta misma clasificación consideramos el siguiente criterio en base a los valores de variación de EVI:



**Figura 10.** Porcentaje de casillas con incendio por intervalo de variación del EVI para los años pares y porcentaje predicho por el modelo basado en los años impares.

	a	b	r <sup>2</sup>	Bias <sup>1</sup>	RMSE <sup>2</sup>	RMSES <sup>3</sup>	RMSEU <sup>4</sup>	MAD <sup>5</sup>	MAPD <sup>6</sup>
Todo	1,00±0,14	0±0,04	0,729	-0,003	0,06	0	0,06	0,05	15%
Bosque arbolado	0,79±0,12	0,05±0,04	0,667	-0,010	0,06	0,02	0,05	0,05	15%
Matorral	0,97±0,15	0±0,05	0,667	-0,009	0,06	0,010	0,06	0,05	17%
	1,16±0,18	-0,03±0,05	0,698	0,009	0,07	0,02	0,07	0,05	20%
	0,91±0,14	0,04±0,04	0,698	0,014	0,06	0,017	0,05	0,04	16%

<sup>1</sup> Sesgo:  $Bias = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$

<sup>2</sup> Error cuadrático medio:  $RMSE = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5}$

<sup>3</sup> Error cuadrático medio sistemático:  $RMSES = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5}$

<sup>4</sup> Error cuadrático medio no sistemático:  $RMSEU = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - P_i')^2 \right]^{0,5}$

<sup>5</sup> Diferencia absoluta media:  $MAD = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$

<sup>6</sup> Diferencia absoluta media en porcentaje:  $MAPD = 100MAD / \langle O_i \rangle$   
 donde  $P_i$  y  $O_i$  son los valores estimados y observados, respectivamente, y  $P_i = aO_i + b$ .

**Tabla 2.** Análisis estadístico del ajuste entre los valores de porcentaje de casillas con incendio estimados y los datos registrados en los años pares para el total de las casillas, y para los dos usos de suelo predominantes por separado. Los resultados de utilizar las ecuaciones (4) y (5) se muestran en cursiva, el resto corresponden al uso de la expresión (3).

- Riesgo extremo:  $\Delta\text{EVI} < -0,05$
- Riesgo alto:  $-0,05 < \Delta\text{EVI} < 0$
- Riesgo medio:  $0 < \Delta\text{EVI} < 0,05$
- Riesgo bajo:  $\Delta\text{EVI} > 0,05$

Agrupando toda la serie de datos disponible en estas cuatro categorías y calculando el valor medio del porcentaje de casillas con incendio para cada una de ellas, obtenemos los siguientes resultados:  $0,43 \pm 0,02$ ,  $0,33 \pm 0,06$ ,  $0,30 \pm 0,06$  y  $0,24 \pm 0,04$  para el riesgo extremo, alto, medio y bajo, respectivamente. En la Figura 11a se puede observar como las categorías de riesgo extremo y bajo se desmarcan claramente, mientras que la diferencia entre el riesgo alto y medio es muy pequeña, incluso podría decirse que no es significativa si tenemos en cuenta las barras de error. Desde el punto de vista de la prevención de incendios, es preferible estar lo más preparados posible; sin embargo, las falsas alarmas no son deseables, y además restarían fiabilidad al modelo de predicción. Un buen modelo debe ser lo más robusto posible en los dos sentidos, es decir, tanto en la predicción de las zonas en las que se producirá incendio, como de las zonas en las que no se registrará ningún incendio. Por este motivo, decidimos trabajar con una clasificación de tan solo tres clases de riesgo:

- Riesgo alto:  $\Delta\text{EVI} < -0,04$
- Riesgo medio:  $-0,04 < \Delta\text{EVI} < 0$
- Riesgo bajo:  $\Delta\text{EVI} > 0,04$

Los resultados según esta nueva clasificación son:  $0,44 \pm 0,06$ ,  $0,31 \pm 0,06$ , y  $0,25 \pm 0,05$  para el riesgo alto, medio, y bajo, respectivamente. Ahora, los límites entre las tres categorías están mucho mejor definidos como se aprecia en la Figura 11b.

Además de la capacidad de predecir el riesgo puro de incendio en una casilla, es interesante ver que sucede con el número de incendios que se registran en esa misma casilla. En la Figura 11c se muestran los valores medios del número de incendios por casilla para cada una de las clases de riesgo consideradas. La conclusión es que los niveles alto, medio y bajo también reflejan la densidad de incendios que se espera.

Hay que señalar que en el momento de elaboración de este trabajo no disponíamos de información referente al tamaño de los incendios incluidos en la base de datos, y por ello en ningún momento se ha hecho discriminación en base a su extensión. Sin embargo, es cierto que en Galicia abundan los incendios denominados conatos (<1ha en extensión), y que sería interesante eliminar del análisis quedándonos tan solo con los grandes incendios. En estos momentos

estamos completando nuestra base de datos y esperamos abordar este asunto en un próximo trabajo. También sería interesante mejorar algún aspecto de la metodología, como por ejemplo, cambiar el criterio de integración de píxeles EVI dentro de cada celda y recurrir al porcentaje de dichos píxeles que superan un cierto valor umbral preestablecido. De esta forma, se podría paliar la pérdida de información que conlleva el suavizado de los valores EVI. Incluso, sería deseable probar el método en Galicia, y comparar los resultados, con otros índices utilizados habitualmente, como el NDWI. Todas las tareas mencionadas, así como la aplicación y validación del método propuesto a otras regiones, se llevarán a cabo en trabajos futuros.

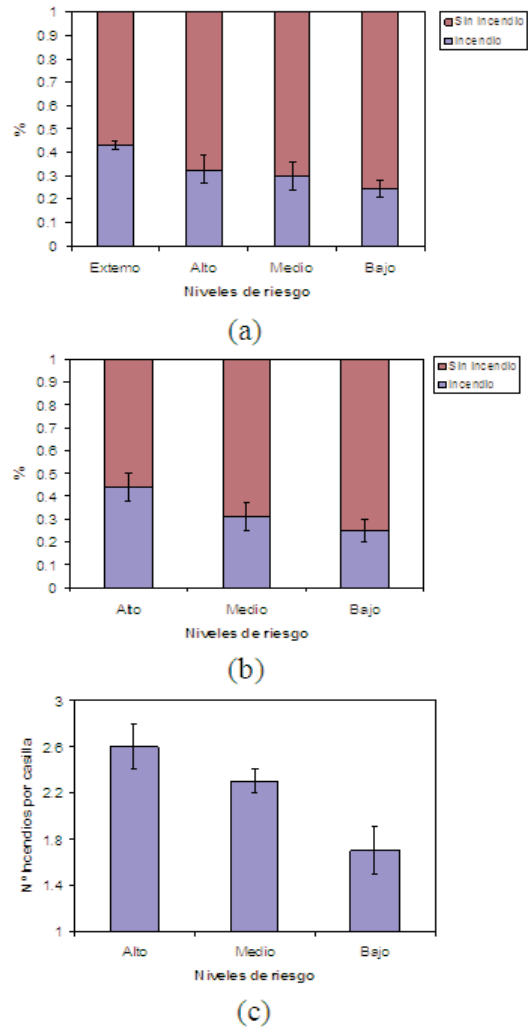


Figura 11. Probabilidad de incendio para cada nivel de riesgo considerando: a) Cuatro niveles de riesgo de incendio, y b) 3 niveles de riesgo de incendio. c) Número de incendios por casillas para los 3 niveles de riesgo de incendio

## CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos un modelo empírico sencillo de estimación de riesgo de incendio en la región de Galicia. El único parámetro de entrada del modelo es la variación que experimenta el EVI en un periodo de dos semanas, anterior a la fecha para la que se quiera hacer la predicción del peligro de incendio. Hemos empleado imágenes, del periodo 2001-2006, del producto de índices de vegetación, MOD13 Q1, del sensor MODIS, reescaladas a una resolución espacial de  $10 \times 10$  km<sup>2</sup>. Las variaciones del EVI entre dos imágenes consecutivas se relacionan con la probabilidad de que se produzcan incendios. Tras agrupar los datos en intervalos de 0,01 en variación de EVI, se ha realizado el ajuste lineal entre el porcentaje de casillas, dentro de cada intervalo, que presentan algún incendio, y el valor de la propia variación del EVI. Los resultados de la ecuación obtenida se ajustan bien a los datos de incendios registrados. La comparación muestra un error cuadrático medio de 0,06 con un sesgo prácticamente nulo. Además, utilizando una expresión única para toda la región de Galicia se obtienen mejores resultados que sectorizando por tipos de vegetación. Definimos una escala de tres niveles de riesgo de incendio (alto, medio y bajo), en función de los valores de variación de EVI, que permite catalogar la mayor o menor probabilidad de que se produzcan incendios, así como la mayor o menor densidad de estos, en cada una de las cuadrículas en las que se divide la región de Galicia para las gestiones de prevención y extinción de incendios. Por último, indicar que este artículo se corresponde con un primer estudio dentro de un trabajo que hay que completar a través del análisis con detalle de la extensión de los incendios, de nuevas técnicas de promediado del EVI, del análisis de otros índices de vegetación, y por supuesto, de la aplicación del método propuesto a otras zonas fuera de la región de Galicia.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyectos CGL2007-64666/CLI, REN2005-08207-C02), y la Universidad de Valencia (beca de investigación *V Segles* de J. M. Sánchez).

## REFERENCIAS

- ALONSO, M., CAMARASA, A., CHUVIECO, E., COCERO, D., KYUN, I., MARTÍN, M.P., & SALAS, F.J. (1996). Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data. *EARSEL Advances in Remote Sensing*, 4, 9-24.
- ALONSO-BETANZOS, A., FONTENLA-ROMERO, O., GUIJARRO-BERDIÑAS, B., HERNÁNDEZ-PEREIRA, E., PAZ ANDRADE, M.I., JIMÉNEZ, E., LEGIDO SOTO, J.L., CARBALLAS, T. (2003). An intelligent system for forest fire risk prediction and fire fighting management in Galicia. *Expert Systems with Applications*, 25, 545-554.
- CASANOVA, J.L., ILLERA, P., DELGADO, J.A., y RODRÍGUEZ, P. (1993). Análisis de incendios mediante imágenes NOAA. *Proceedings de la Cuarta Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Agencia del Medio Ambiente, Sevilla* (Junta de Andalucía), pp. 40-45.
- CECCATO, P., FLASSE, S., TARANTOLA, S., JACQUEMOUD, S., GREGOIRE, J.M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77, 22-33.
- CHENG, Y., ZARCO-TEJADA, P.J., RIAÑO, D., RUEDA, C.A., USTIN, S. L. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different Canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105, 354-366.
- CHUVIECO, E., COCERO, D., RIAÑO, D., MARTIN, P., MARTÍNEZ-VEGA, J., DE LA RIVA, J., PÉREZ, F. (2004). Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92, 322-331.
- DENNISON, P.E., ROBERTS, D.A., PETERSON, S.H., RECHEL, J. (2005). Use of Normalized Difference Water Index for monitoring live fuel moisture. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1035-1042.
- GAO, B.C. (1996). NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.

- GILLON, D., DAURIAC, F., DESHAYES, M., VALLETTE, J.C., MORO, C. (2004). Estimation of foliage moisture content using near infrared reflectance spectroscopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 51-62.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., CUEVAS, J.M., CASANOVA, J.L., CALLE, A., y ILLERA, P. (1997). A forest fire risk assessment using NOAA AVHRR images in the Valencia area, eastern Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (10), 2201-2207.
- HOLBEN, B.N., TUCKER, C.J., & FAN, C. -J. (1980). Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 651-656.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., & FERREIRA, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- HUNT, E.R., & ROCK, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water-content using near-infrared and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-54.
- HUNT, E.R., ROCK, B.N., & NOBEL, P.S. (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22, 429-435.
- KOUTSIAS, N., y KARTERIS, M. (2000). Burned areas mapping using logistic regression modelling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 673-687.
- LOZANO, F.J., SUÁREZ-SEOANE, S., KELLY, M., y LUIS, E. (2008). A multi-scale approach for modelling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: A case study in a mountainous Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, 112, 708-719.
- LOZANO, F.J., SUÁREZ-SEOANE, S. y LUIS, E. (2007). Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment*, 107, 533-544.
- MAKI, M., ISHIAHRA, M., TAMURA, M. (2004). Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 90, 441-450.
- MARTIN, M.P., y CHUVIECO, E. (1995). Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios forestales a partir de imágenes de satélite. *Ecología*, 9, 9-21.
- MASELLI, F., ROMANELLI, S., BOTTAI, L., Y ZIPOLI, G. (2003). Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. *Remote Sensing of Environment*, 86, 187-197.
- MORAN, M. S., CLARKE, T.R., INOUE, Y., & VIDAL, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246-263.
- ROUSE, J.W., HASS, R.H., SCHELL, J.A., & DEERING, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, NASA SP-351* (pp. 309-317).
- SELLERS, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335-1372.
- SHNEIDER, P., ROBERTS, D.A., KYRIAKIDIS, P.C. (2008). A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1151-1167.
- STOW, D., NIPHADKAR, M., KAISER, J. (2005). MODIS-derived visible atmospherically resistant index for monitoring chaparral moisture content. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 3867-3873.
- VERBESSELT, J., JÖNSSON, P., LHERMITTE, S., VAN AARDT, J., COPPIN, P. (2006). Evaluating satellite and climate data-derived indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1622-1632.
- YEBRA, M., CHUVIECO, E., RIAÑO, D. (2008). Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 523-536.
- WILLMOTT, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 63, 1309-1313.
- YU, G.R., MIWA, T., NAKAYAMA, K., MATSUOKA, N., KON, H. (200). A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties. *Plant Soil*, 227, 47-58.