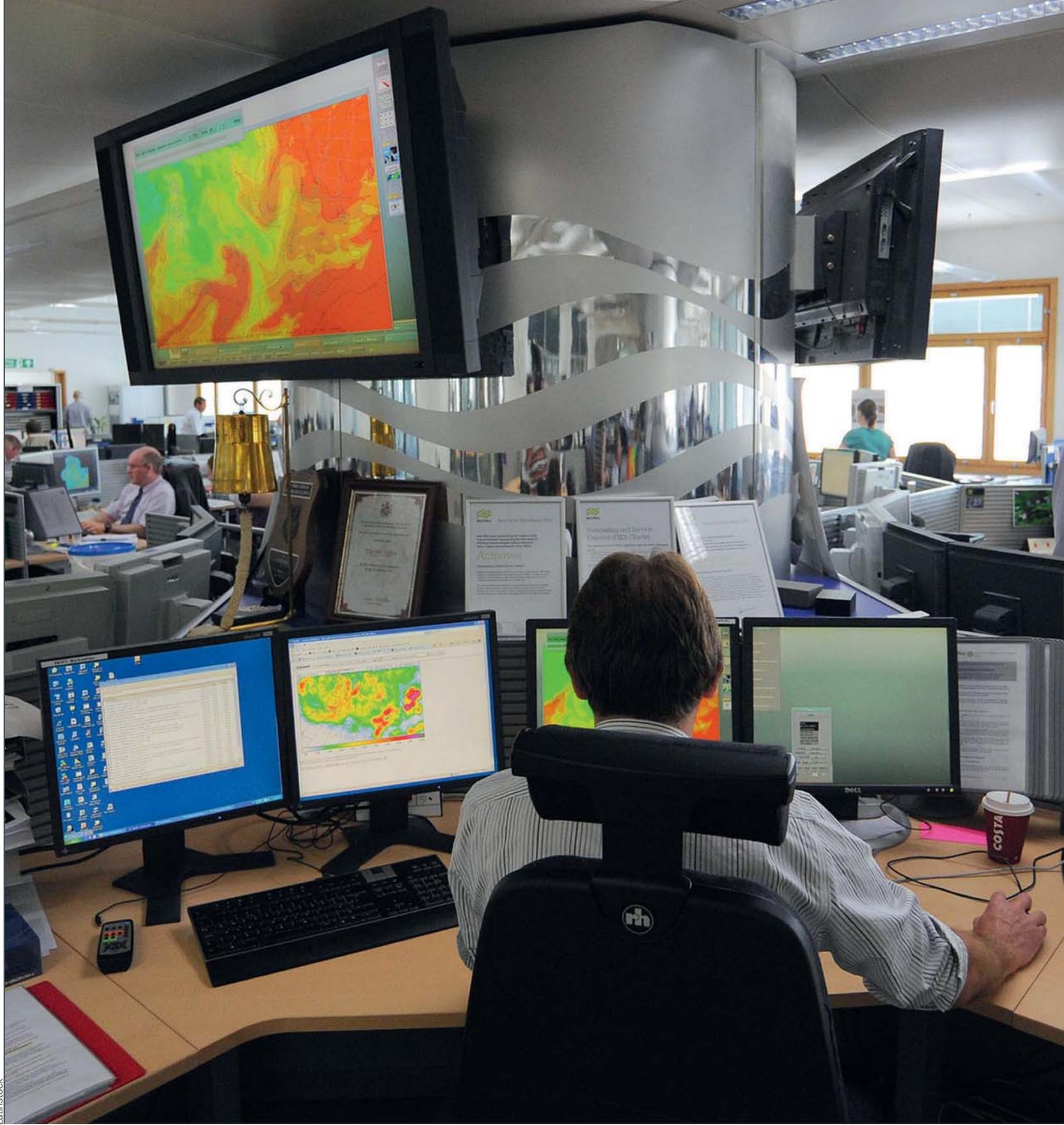


Metodología de integración de información de teledetección para la



LatinStock

prevención de incendios forestales mediante la predicción estadística

Anticipando el RIESGO DE FUEGO

En el presente trabajo se han desarrollado modelos específicos para la estimación y predicción del riesgo de incendios. Para ello se ha integrado el análisis estadístico de series de tiempo en el ámbito de la teledetección y los incendios forestales. Los índices de riesgo utilizados son el FPI_{NDWI} y el FPI_{NDVI} , cuya diferencia radica en el índice de vegetación utilizado en su cálculo, NDVI o NDWI. El FPI (*Fire Potential Index*) integra la información procedente de imágenes de teledetección con información meteorológica. El análisis estadístico de series de tiempo ha permitido descubrir patrones dinámicos en el comportamiento del riesgo durante el periodo de estudio 2000-2009. A partir de las series de tiempo del periodo 2000-2008 se han desarrollado modelos específicos de predicción para los dos índices por «tipo de combustible-región bioclimática». Los resultados han mostrado un alto grado de ajuste entre los datos originales del FPI_{NDWI} y las predicciones para el año 2009. Asimismo, se ha demostrado que el riesgo es más predecible por medio del índice FPI_{NDWI} que del FPI_{NDVI} , sobre todo para los ecosistemas del norte de la región analizada.

Por **M. HUESCA**. M.Sc. Geo-information Science y estudiante de doctorado. ETSI Montes, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid, Madrid. mhuescamartinez@alumnos.upm.es.

A. PALACIOS ORUETA. Doctora Ingeniera Agrónomo y profesora titular de universidad. ETSI Montes, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid. alicia.palacios@upm.es.

J. LITAGO LAVILLA. Doctor Ingeniero Agrónomo y profesor titular de universidad. ETSI Agrónomos Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid. javier.litago@upm.es.

S. MERINO DE MIGUEL. Doctora Ingeniera de Montes y profesora de escuela universitaria. EUIT Forestal, Ciudad Universitaria sn, 28040, Madrid. silvia.merino@upm.es.

J. SAN ROMÁN ORTIZ. Ingeniero de Montes, estudiante de máster ETSI Montes, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid. guisandero@hotmail.com.

V. CICUENDEZ LÓPEZ-OCAÑA. Estudiante de Ingeniería de Montes y becario de la UPM. ETSI Montes, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid. victor.cicuendez.lopezocana@alumnos.upm.es.

J. MAQUEDA BUENO. Estudiante de Ingeniería de Telecomunicación y becario de la UPM, ETSI Montes, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid. jmaqueda@gmail.com.

El fuego es considerado como un elemento natural en muchos ecosistemas, y en concreto en los mediterráneos, los cuales presentan adaptaciones importantes al fuego. Sin embargo, la presión humana ha originado un desequilibrio entre el número y extensión de los incendios forestales y la dinámica de los ecosistemas, provocando su destrucción o afectando muy negativamente a la composición de las

especies y a la biodiversidad, dando lugar a un alto impacto ambiental.

El comportamiento del fuego está gobernado por tres factores naturales: los combustibles existentes en el lugar, la topografía y las características del tiempo atmosférico^[1]. Para que un incendio se inicie es necesario que exista biomasa suficiente, que las condiciones ambientales sean las adecuadas y que haya alguna causa de ignición.

Aunque los factores sociológicos tienen un gran peso en la ocurrencia de incendios^[2] en términos generales en España, los incendios, y especialmente los grandes incendios, ocurren durante la época de verano, lo que indica que las condiciones meteorológicas juegan un papel fundamental. En estas épocas la biomasa acumulada se convierte en combustible potencial que arde fácilmente si se dan las condiciones adecuadas, por lo que la disponibilidad y el estado hídrico de los combustibles juegan también un papel decisivo en la ocurrencia de incendios. Además, mientras que los factores sociológicos y los meteorológicos son muy difíciles de gestionar por ser el primero poco predecible y el segundo inevitable, sobre los combustibles se puede actuar directamente y de manera preventiva mediante una adecuada gestión de las labores selvícolas^[3]. Por ello, en esta hipótesis se reconoce el tipo de combustible como factor fundamental en el riesgo, así como la gran variabilidad en la respuesta de la vegetación a las fluctuaciones atmosféricas.

Los combustibles pueden ser descritos en términos de tipo, carga y estado del combustible. Mientras que el tipo de combustible es una característica estática e intrínseca al propio combustible, la carga y el estado son variables dinámicas que cambian a lo largo del año. Estas variaciones pueden ser diarias, como respuesta a las variaciones de las condiciones meteorológicas; estacionales, gobernadas principalmente por el ciclo biofisiológico del combustible y por los efectos acumulados de las condiciones atmosféricas; o anuales, como respuesta al ciclo fenológico de las especies^[3].

Identificar las áreas de alto riesgo de incendios, así como entender su dinámica a lo largo del tiempo, es esencial para la prevención, control y gestión de los montes. Asimismo, proporciona una herramienta útil para la evaluación de

las condiciones ecológicas, ya que muchos ecosistemas de nuestra geografía son modelados por los efectos de los incendios forestales^[1]. Este tipo de análisis proporciona un mejor entendimiento de cómo variables como el clima y la vegetación ejercen una influencia dinámica sobre el comportamiento del fuego^[4], pero es una tarea compleja ya que dichas variables tienen escalas de varia-

ción diferentes. De ahí la necesidad de definir modelos de predicción específicos para cada combinación clima-vegetación que presenten distintos comportamientos frente al fuego.

El patrón temporal de los incendios forestales puede ser analizado por medio de los llamados índices de riesgo, mediante los cuales se estima la probabilidad de que se inicie un incendio. En Es-



Latinstock

IDENTIFICAR LAS ÁREAS DE ALTO RIESGO DE INCENDIOS, ASÍ COMO ENTENDER SU DINÁMICA A LO LARGO DEL TIEMPO, ES ESENCIAL PARA LA PREVENCIÓN, CONTROL Y GESTIÓN DE LOS MONTES

paña generalmente se utilizan índices que dependen únicamente de las condiciones meteorológicas; sin embargo, en nuestra geografía se ha demostrado una gran dificultad en la predicción del número de incendios o área quemada en función únicamente de las condiciones climáticas. El *Fire Potential Index* (FPI)^[5] es un indicador dinámico del riesgo de incendios que combina información sobre el tipo de combustible, con información meteorológica y con información del estado de la vegetación proveniente de imágenes de teledetección. El FPI ha sido validado satisfactoriamente en zonas geográficas muy diferentes. Varios autores^[6, 7 y 8] han demostrado la utilidad de este índice para describir el comportamiento de los incendios forestales en regiones templadas y mediterráneas. Otros autores^[9] desarrollaron un modelo estadístico de predicción del número de grandes incendios basado en el FPI, demostrándose así la capacidad de este índice para estimar y predecir la ocurrencia de incendios.

La cobertura espacio-temporal de algunos sistemas de teledetección hace que la información proporcionada sea especialmente apropiada como componente indicador del estado de la vegetación dentro de los índices de riesgo. Las imágenes multispectrales generalmente son analizadas utilizando índices de vegetación, que son ratios de la reflectancia a distintas longitudes de onda y que dependen de propiedades específicas de la vegetación. Los índices espectrales más frecuentemente utilizados son el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)^[10], relacionado con la actividad fotosintética, y el NDWI (*Normalized Vegetation Water Index*)^[11], más dependiente de la humedad.

El análisis estadístico de series temporales (AST), en sus dominios frecuencial y temporal^[12], ofrece una herramienta muy útil para la predicción en casi todas las áreas de conocimiento, desde la economía a la ingeniería o la meteorología, en las que se puede medir una magnitud con una determinada frecuencia. En el ámbito de los incendios forestales ha sido utilizada para, entre otros, estudiar el área quemada anualmente^[13], hacer seguimiento de la humedad del combustible y evaluar el riesgo de incendio^[14], verificar el ciclo dominante de incendios^[15], o para identificar las tendencias pre- y post-incendio de la vegetación^[16]. El AST pone a nuestra disposición una serie de herramientas para identificar los patrones temporales que definen la dinámica, pasada y presente, de una variable. Asimismo, nos ofrece una metodología para la construcción de modelos de predicción basada en modelos estadísticos bien definidos, como los AR (autorregresivo), MA (media-móvil), ARMA (combinan los dos anteriores) y ARIMA (incorporan un término de integración para lograr la estacionariedad de la variable). En realidad, no se trata de un único modelo sino de un conjunto de posibles modelos. El procedimiento seguido para su estimación y ajuste es un procedimiento iterativo de prueba y error hasta alcanzar el modelo que mejor describe la variable seleccionada. Estos modelos han sido utilizados en diversos trabajos dentro del campo del medio ambiente, como en hidrología^[17] y en estudios de cambio climático^[18], entre otros. Estos modelos pueden ser utilizados tanto para estudiar, analizar y modelizar el comportamiento de una variable como para predecir su valor en el futuro. Va-

rios autores^[19] utilizaron un modelo ARIMA para predecir la sequía en China.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar modelos de predicción específicos o locales del riesgo de incendios mediante el análisis estadístico de series de tiempo. El riesgo de incendios es estimado utilizando el *Fire Potential Index* propuesto por Burgany otros (FPI_{NDVI}) y la modificación propuesta por Huesca y otros^[8] (FPI_{NDWI}).

Área de estudio

El área de estudio es la Comunidad Foral de Navarra, que ocupa una superficie de 10.420 km² y está situada en el límite de las regiones bioclimáticas templada o atlántica, alpina y mediterránea. Dentro de cada ecorregión las características del clima son lo suficientemente similares como para dictar comportamientos parecidos en la evolución del suelo y la vegetación climática y, por tanto, con diferentes comportamientos del fuego.

La región atlántica se caracteriza por un clima marítimo templado cálido, fuertemente influido por el mar Cantábrico, con abundantes lluvias, nieblas y lloviznas y con temperaturas suaves. En esta región predominan los bosques caducifolios. Los incendios se caracterizan por su alta frecuencia y por tener una superficie quemada relativamente baja. El carácter de los mismos es bimodal, presentando dos máximos, uno al comienzo de la primavera y otro en verano-otoño.

En la región alpina se pueden distinguir dos zonas. La primera, más elevada, con clima continental húmedo frío, y la segunda, con menor elevación y más

EL PATRÓN TEMPORAL DE LOS INCENDIOS FORESTALES PUEDE SER ANALIZADO POR MEDIO DE LOS LLAMADOS ÍNDICES DE RIESGO, MEDIANTE LOS CUALES SE ESTIMA LA PROBABILIDAD DE QUE SE INICIE UN INCENDIO

cercana al límite con la región mediterránea. Esta es realmente una zona de transición entre el clima mediterráneo frío y el mediterráneo templado. Los bosques predominantes son los de coníferas y hayas, caracterizados por una frecuencia de incendios baja y una marcada variabilidad estacional y anual.

En la región mediterránea el clima es netamente mediterráneo, con una clara influencia atlántica en su parte occidental y mayor continentalidad hacia el este. El bosque típico de esta región es esclerófilo mediterráneo, donde la frecuencia de incendios es intermedia, pudiendo afectar a superficies de medianas a grandes. El carácter de los incendios es unimodal, con un máximo absoluto en verano.

Material y métodos

Información de teledetección

La información de teledetección utilizada consiste en un conjunto de 454 imágenes adquiridas por el sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite TERRA (<https://lpdaac.usgs.gov/>). El producto utilizado es el MOD09A, consistente en imágenes de reflectancia superficial que abarcan la zona del espectro que va desde el azul hasta los canales SWIR. Las imágenes utilizadas tienen una resolución espacial de 500 metros y son compuestas de 8 días, por lo que se dispone de 46 imágenes al año, es decir, 46 valores para cada píxel que compone la imagen. El periodo de estudio comprende desde febrero del año 2000 hasta diciembre del año 2009.

Las imágenes se descargaron del ser-

vidor de la NASA y fueron reproyectadas al sistema de proyección UTM30N datum WGS-84. Se extrajeron los canales rojo (648 nm), infrarrojo cercano (858 nm) y SWIR1 (1240 nm) con los que se construyeron las series temporales. De esta forma se cuenta con series de tiempo de reflectancia a tres longitudes de onda durante un periodo de 10 años y cada 8 días aproximadamente. Finalmente, se calcularon los índices de vegetación NDVI y NDWI (ecuaciones 1 y

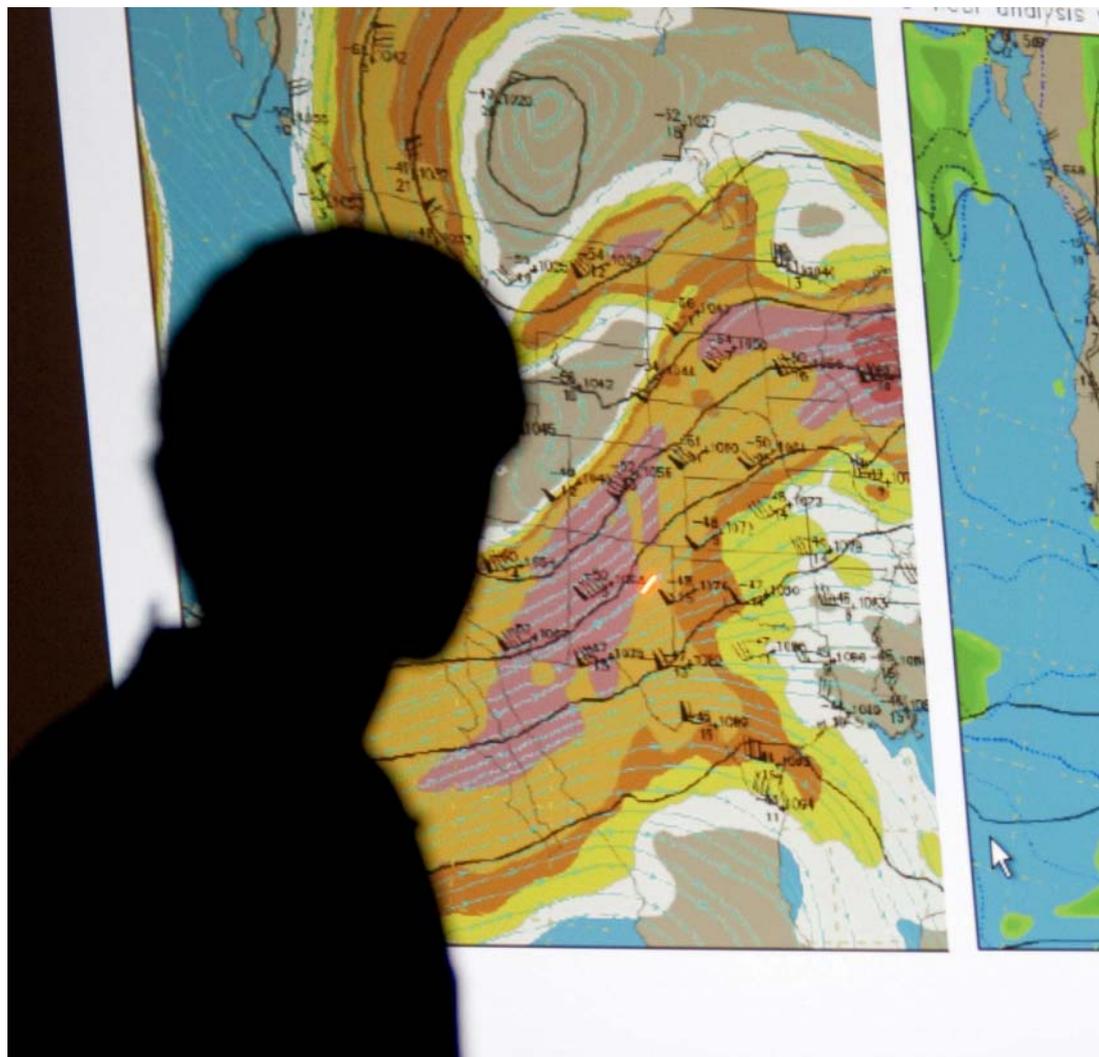
2) que serán utilizados para el cálculo del índice de riesgo FPI.

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_r) / (\rho_{nir} + \rho_r) \quad (Eq.1)$$

$$NDWI = (\rho_{nir} - \rho_{swir1}) / (\rho_{nir} + \rho_{swir1}) \quad (Eq.2)$$

donde ρ_r , ρ_{nir} y ρ_{swir} representan la reflectancia en los canales rojo, infrarrojo cercano y SWIR1 respectivamente.

Las series se suavizaron, en la medida de lo posible, mediante la identificación y eliminación de los posibles valores anómalos (*outliers*), utilizando umbrales definidos a partir de la media y la desviación típica de la serie temporal. Los valores



anómalos fueron sustituidos por la media entre el valor de la fecha anterior y el de la siguiente. En caso de que el valor de la fecha anterior o siguiente fueran anómalos se utilizó el primero no anómalo.

Información meteorológica

La información meteorológica se obtuvo de las estaciones meteorológicas existentes en la Comunidad Foral de Navarra y en las provincias limítrofes. Estas últimas fueron utilizadas para asegurar una buena calidad de la información en los bordes del área de estudio. Los registros diarios de las estaciones meteorológicas de la Comunidad Foral de Navarra para el periodo 2000-2009 fueron proporcionados por el Departamento de De-

sarrollo Rural y Medio Ambiente del Gobierno de Navarra. Los datos meteorológicos de las estaciones de las provincias limítrofes fueron obtenidos de 17 estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Con objeto de obtener los resultados más precisos posibles se ha utilizado cada año el número máximo de estaciones disponibles (puesto que desde el año 2000 el número de estaciones disponibles en Navarra ha ido aumentando).

Las variables utilizadas han sido la temperatura máxima y la humedad relativa mínima diaria para trabajar con la situación más adversa en lo referente a los incendios forestales. Los datos diarios se resumieron a 8 días para armonizarlos con los datos MODIS, que son compuestos de 8 días. De esta forma se calculó el valor medio de las temperaturas máximas (T_{max}) y de las humedades relativas mínimas (H_{rel}) de las 8 fechas que corresponden a un compuesto de MODIS. A continuación, T_{max} y H_{rel} fueron interpoladas espacialmente fecha a fecha para obtener mapas de T_{max} y H_{rel} para cada fecha del periodo de estudio. La temperatura fue interpolada utilizando el método «inverso de la distancia» y la humedad relativa mínima mediante una regresión lineal múltiple siguiendo la ecuación 3.

$$H_{rel} = 72.1761 - 1.4181xT_{max} + 0.0049xH \quad (\text{Eq.3})$$

Donde H es la altitud (procedente del modelo digital del terreno de Navarra).

Información auxiliar

Se han utilizado el modelo digital de elevaciones (www.ign.es) y el mapa de combustibles de Navarra (www.marm.es). Este último utiliza como base los 13 modelos de combustible establecidos para el NFDRS (*National Fire Danger Rating System*) y adaptados a la vegetación española. En Navarra están presentes to-

dos los modelos de combustibles menos aquellos donde el fuego se propaga a través de los restos de cortas y operaciones selvícolas. Cada modelo de combustible lleva asociada una humedad de extinción, que representa la humedad a partir de la cual el combustible deja de entrar en ignición, y es utilizada en el cálculo del FPI.

Cálculo del Fire Potential Index (FPI)

El *Fire Potential Index* (FPI) se expresa de la siguiente manera:

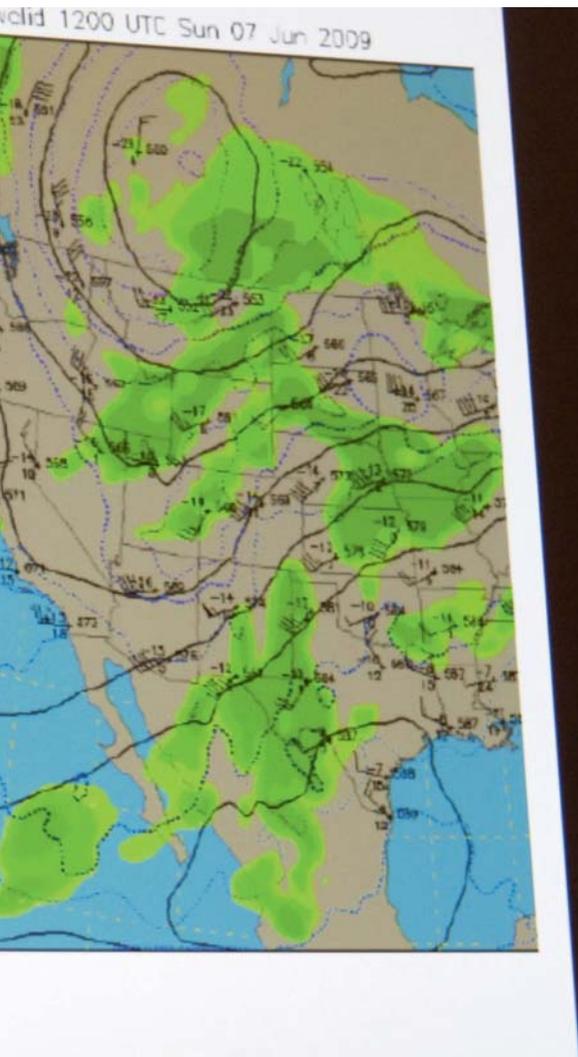
$$FPI = 100 \times (1 - H_{cm_{10hrfrac}}) \times (1 - CV_{cor}) \quad (\text{Eq.4})$$

donde FPI es el *Fire Potential Index*, el cual toma valores máximos de 100 cuando el riesgo es muy elevado y valores próximos a cero o negativos cuando no existe riesgo. $H_{cm_{10hrfrac}}$ representa la humedad del combustible fino y muerto y CV_{cor} representa la carga de combustible susceptible de arder.

Los índices usados fueron el FPI_{NDVI} y el FPI_{NDWI} . Para su cálculo se siguió la formulación descrita por Huesca y otros⁽⁸⁾.

Análisis estadístico de series temporales (AST)

En primer lugar se realizó un estudio cualitativo de la evolución temporal del FPI en el periodo 2000-2009 para cuatro zonas con un tipo de vegetación y modelo de combustible representativos de la región. A continuación se llevó a cabo un análisis cuantitativo utilizando el análisis estadístico de series temporales⁽¹²⁾. Las series de tiempo de FPI_{NDVI} y FPI_{NDWI} de cada píxel se agruparon según su comportamiento utilizando los estadísticos descriptivos (media y varianza) y la función de autocorrelación. De esta forma, se definieron zonas del área de estudio con un comportamiento temporal similar, lo que permitió recoger la variabilidad temporal de toda el área de estu-



LatinStock

dio. Los estadísticos descriptivos nos permiten obtener de forma cuantitativa una primera idea sobre la naturaleza global del riesgo en cada zona. La función de autocorrelación mide la correlación del valor del riesgo distanciando un intervalo de tiempo, lo que permite evaluar la dinámica del riesgo y estimar su estabilidad a lo largo del tiempo, es decir, cómo de repetitivo es su patrón.

Para cada zona con un comportamiento similar se desarrolló un modelo específico siguiendo la metodología propuesta por Box y otros^[12], cuya estrategia es la construcción de un modelo estadísticamente adecuado que responda al principio de parametrización escueta (máxima simplicidad estructural y mínimo número de parámetros). Esta metodología se lleva a cabo en tres etapas: (1) Identificación, (2) Estimación y Validación, y (3) Predicción. En la primera etapa se estudia la estacionariedad y la estacionalidad de la serie y se identifican los órdenes de los términos Autorregresivo y de Medias móviles que debería contener el modelo. En la segunda etapa se estiman los parámetros del modelo y en la tercera, se verifica la adecuación estadística de las estimaciones a la serie analizada. La evaluación de las predicciones permite estimar su error, y aceptar el modelo estimado o rechazarlo, retornando a una nueva identificación. En este trabajo, en primer lugar se propuso un modelo para cada una de las zonas definidas previamente, y en un segundo paso se agruparon los modelos que tenían una estructura común. Los modelos se estimaron utilizando la serie temporal 2000-2008, dejando el año 2009 para realizar una predicción.

La significación estadística de los modelos se estimó mediante el test *t* de Student y la ausencia de autocorrelación residual fue determinada a partir de tests *Q(k)* de Ljung y Box. La capacidad predictiva de los modelos se estimó mediante el estadístico *U* de Theil^[20].

Resultados

Evolución temporal del FPI

La figura 1 muestra el mapa de los modelos de combustibles agrupados en función del elemento propagador del fuego, pasto, matorral u hojarasca, así como la localización de los píxeles seleccionados para explicar la evolución temporal del riesgo entre los años 2000 y 2009. La zona 1 corresponde a cultivos de secano mediterráneos, principalmente cereal, en los que el elemento propagador es fundamentalmente el pasto. La zona 2, situada en la región alpina, está ocupada por bosques de coníferas donde el pino silvestre y el abeto son las especies dominantes y en donde el fuego se propaga principalmente por la hojarasca. En la Navarra del noroeste (región atlántica) se han seleccionado dos zonas (3 y 4). La zona 3 está ocupada por bosques de frondosas caducifolias de hayas. Este tipo de bosque es muy cerrado y no permite la presencia de sotobosque, por lo que el fuego se propaga principalmente por la hojarasca. En la zona 4 predominan los bosques de frondosas caducifolias de robles y castaños. Estos bosques son más abiertos, por lo que suelen ir acompañados por un sotobosque de matorral que se convierte en el elemento propagador del fuego.

La figura 2 muestra la evolución temporal del FPI_{NDVI} y el FPI_{NDWI} en las zonas representativas indicadas en la figura 1.

En los cultivos herbáceos de la región mediterránea (figura 2a) se observa un comportamiento de riesgo de ambos índices casi idéntico. El riesgo presenta un patrón unimodal con los valores máximos centrados en verano de forma inequívoca. En las masas boscosas de la zona norte (figuras 2b, 2c y 2d) se observa que el riesgo estimado con el FPI_{NDWI} es siempre considerablemente mayor que el estimado por el FPI_{NDVI} excepto en el

invierno, cuando el riesgo es menor. En los bosques de coníferas de la zona alpina (figura 2b) se observa un patrón anual de riesgo más evidente cuando se estima con FPI_{NDWI} . El FPI_{NDVI} presenta un patrón muy irregular. Los bosques de frondosas (figura 2c) presentan unos valores de FPI_{NDWI} y FPI_{NDVI} similares durante el invierno y principio de primavera. Sin embargo, presentan una tendencia de riesgo opuesta en la transición al verano, siendo el riesgo creciente cuando se utiliza el FPI_{NDWI} y decreciente con el FPI_{NDVI} . En el otoño los valores de los dos índices vuelven a ser similares. En los bosques abiertos de frondosas caducifolias con sotobosque de matorral (figura 2d) aparece un comportamiento similar en

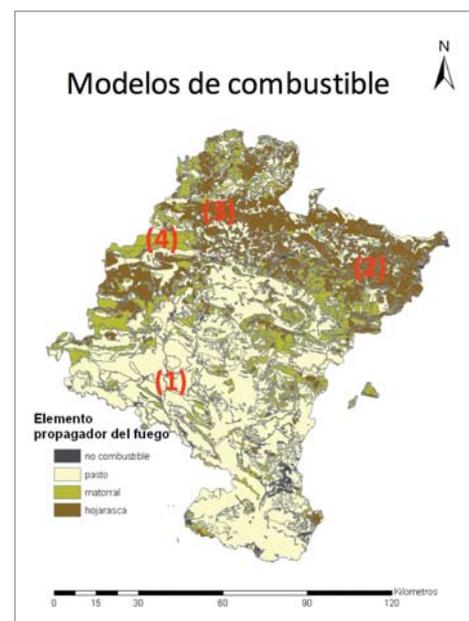


Figura 1. Modelos de combustible agrupados en función del elemento propagador del fuego. Los números entre paréntesis hacen referencia a las cuatro zonas donde se han extraído las firmas temporales de FPI_{NDVI} y FPI_{NDWI} .
 (1) Cultivo de secano de la región mediterránea.
 (2) Bosque de coníferas de la región alpina.
 (3) Bosque de frondosas caducifolias de la región atlántica.
 (4) Bosque abierto de frondosas caducifolias con sotobosque de matorral de la región atlántica.

EL 'FIRE POTENTIAL INDEX'
ES UN INDICADOR
DINÁMICO DEL RIESGO DE
INCENDIOS QUE COMBINA
INFORMACIÓN SOBRE EL
TIPO DE COMBUSTIBLE,
CON INFORMACIÓN
METEOROLÓGICA Y CON
INFORMACIÓN DEL ESTADO
DE LA VEGETACIÓN
PROVENIENTE DE
IMÁGENES DE
TELEDETECCIÓN

invierno, primavera y otoño. Durante el verano presentan un comportamiento opuesto tanto en valores como en tendencia, presentando el FPI_{NDWI} valores más altos que el FPI_{NDVI} .

Las figuras 3a y 3b muestran la función de autocorrelación hasta 150 retardos (algo más de 3 años) calculada para las series de FPI_{NDVI} y FPI_{NDWI} en las zonas seleccionadas (figura 1). Se observa que en los pastos mediterráneos la autocorrelación es alta y positiva en los dos índices en el retardo 1 (≈ 8 días) y en el retardo 46 (≈ 1 año) y muy negativa en el retardo 23 (≈ 6 meses). En las coníferas de la zona alpina la función de autocorrelación del FPI_{NDWI} presenta valores similares a los de pasto, mientras que los valores de autocorrelación del FPI_{NDVI} son muy bajos e irregulares para todos los retardos. Las frondosas de la región atlántica con elemento propagador hojarasca muestran valores ligeramente más altos de autocorrelación para los dos índices. Las frondosas de la región atlántica con sotobosque de matorral presentan un patrón similar al de las coníferas, en los dos índices.

Zonificación del área de estudio

Las figuras 4a y 4b muestran la distribución espacial de los estadísticos descriptivos (media y varianza) para FPI_{NDVI} y

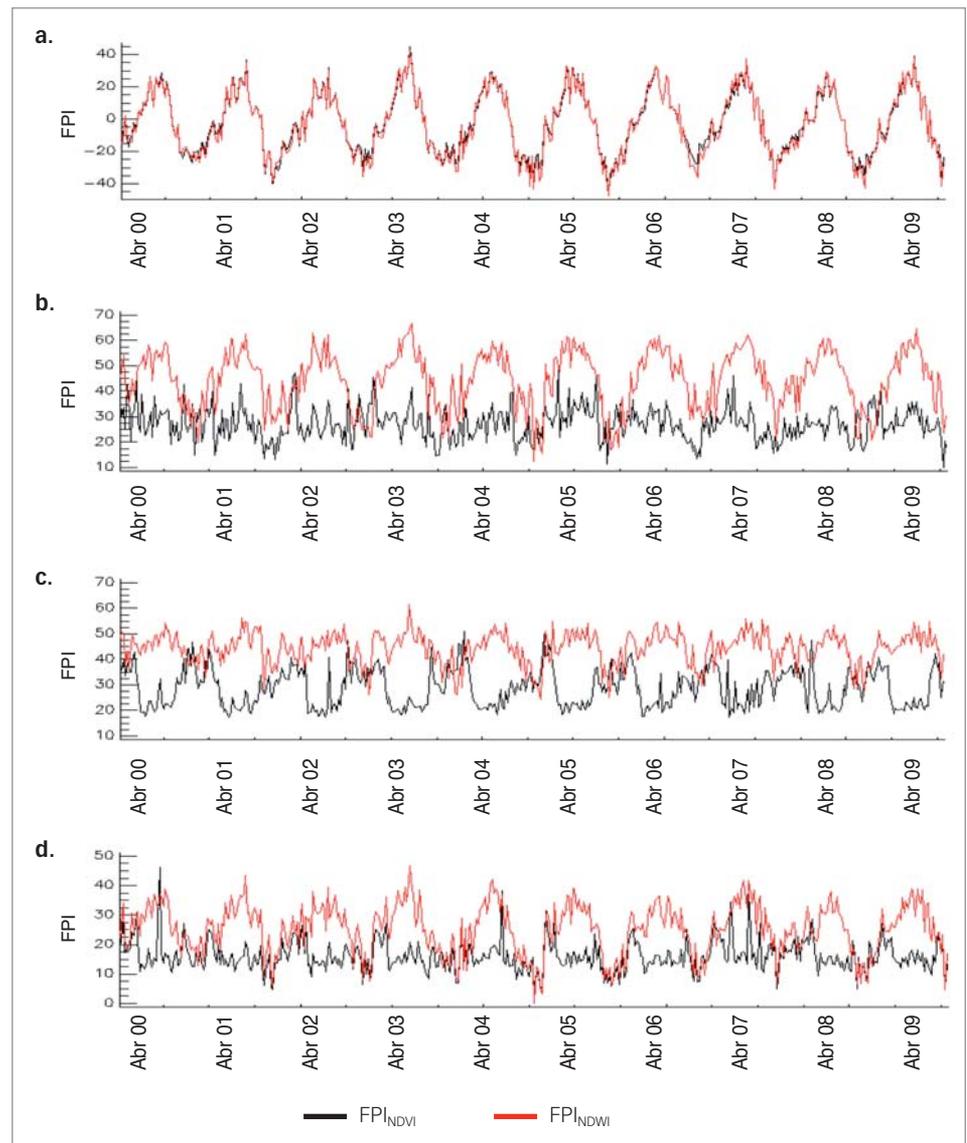


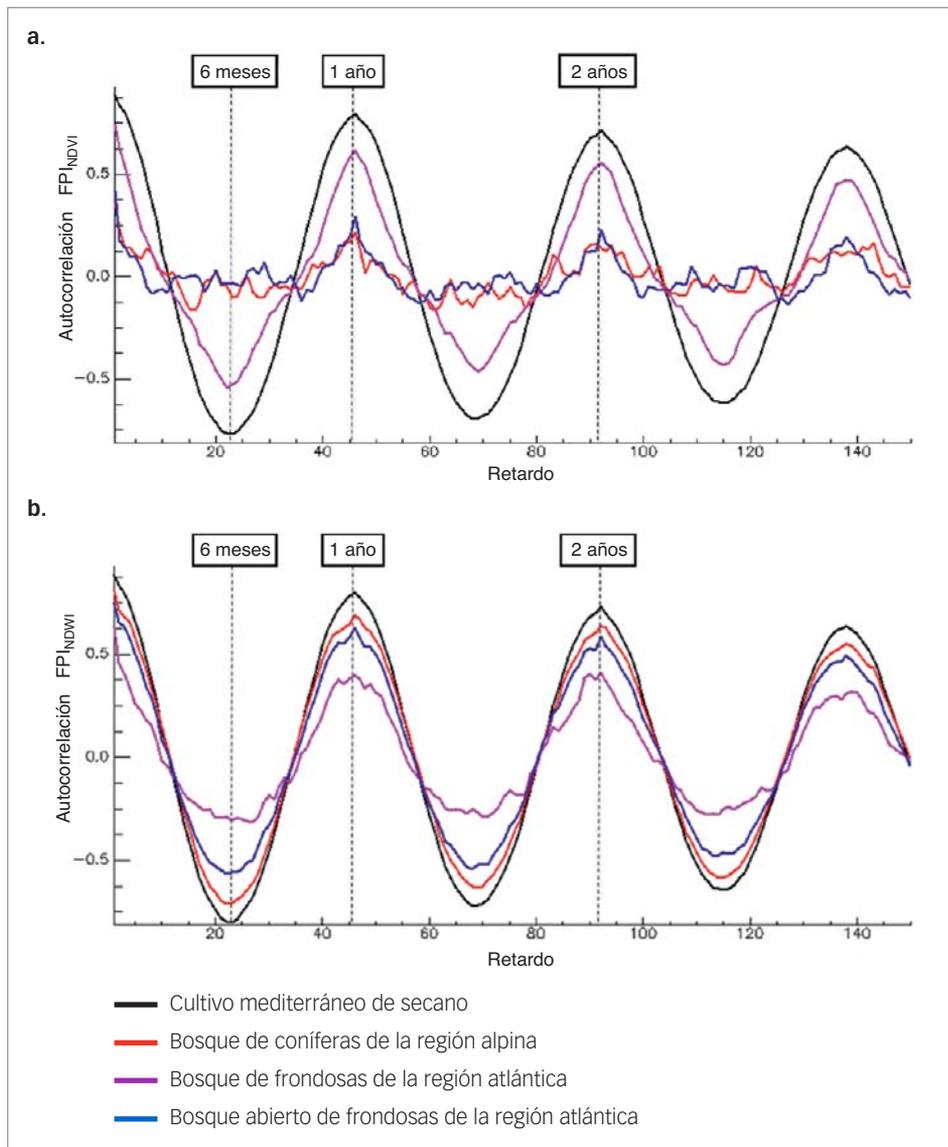
Figura 2. Evolución del riesgo calculado a partir de los dos índices en las cuatro zonas seleccionadas entre los años 2000 y 2009. (a) Cultivo de secano de la región mediterránea, (b) Bosque de coníferas de la región alpina, (c) Bosque de frondosas caducifolias de la región atlántica, (d) Bosque abierto de frondosas caducifolias con sotobosque de matorral de la región atlántica.

FPI_{NDWI} respectivamente; la tabla 1 muestra sus valores medios por modelo de combustible. Los modelos de combustible que se propagan a través de la hojarasca o matorral están caracterizados por una media más alta y una varianza más baja que los que se propagan por el pasto.

Las figuras 5a y 5b muestran la distribución espacial de la autocorrelación a 8 días, a 6 meses y a 1 año, para FPI_{NDVI}

y FPI_{NDWI} respectivamente. Se puede observar un gradiente norte-sur claro sobre todo en las autocorrelaciones a 8 días y a 1 año. La zona sur de Navarra presenta valores más altos y positivos que la zona norte. En todos los casos la autocorrelación a 6 meses es negativa; sin embargo, en el norte toma valores más próximos a cero.

Los resultados de estos análisis (tabla 1 y figuras 5a y 5b) muestran que las zo-



Figuras 3a y 3b. Autocorrelación hasta 150 periodos de retorno del riesgo calculado a partir del FPI_{NDVI} (a) y FPI_{NDWI} (b) en las cuatro zonas seleccionadas entre los años 2000 y 2009.

nas con similares estadísticos y autocorrelaciones a 8 días y 1 año corresponden principalmente a los tipos de combustible y zonas bioclimáticas. Esto nos ha llevado a definir una zonificación previa basada en la combinación de estas dos variables y en la presencia de píxeles puros dentro de cada clase. El resultado ha sido una zonificación «tipo de

combustible - región bioclimática» compuesta por 26 clases.

Construcción de modelos de predicción del riesgo de incendios

Utilizando la zonificación obtenida en el apartado anterior se ha desarrollado un modelo para cada clase. Para ello se han utilizado los valores medios de las

series temporales correspondientes a los píxeles puros incluidos completamente en cada zona.

Los modelos construidos muestran una alta significación estadística en las estimaciones de sus coeficientes, medida por tests t de Student, así como una alta probabilidad de ausencia de autocorrelación residual calculada a partir de tests $Q(k)$ de Ljung y Box. Así, para la mayoría de los coeficientes estimados se ha obtenido un estadístico t de Student superior a 2 en valor absoluto. Para todos los modelos se han obtenido valores muy bajos del test $Q(k)$ de Ljung y Box, para periodos de medio, uno y dos años (23, 46 y 92 retardos). La probabilidad de rechazar autocorrelación residual en estos modelos (pérdida de información relevante al explicar la variable en el modelo) para cualquier retardo es mayor de 0,05 (salvo en 5 casos) y en algunos casos mayor de 0,8 (80%). Este ha sido el criterio utilizado para la evaluación del ajuste global de los modelos.

En una segunda etapa se han agrupado las clases de la fase anterior en función de la coincidencia en el tipo de estructura del modelo autorregresivo. Las tablas 2 y 3 muestran los nuevos grupos, su composición, los retardos significativos de los modelos autorregresivos seleccionados, y su capacidad predictiva estimada mediante el coeficiente U de Theil, para FPI_{NDVI} y FPI_{NDWI} respectivamente.

Todos los modelos presentan una estructura con un parámetro autorregresivo a muy corto plazo (1,2 y 3 retardos \approx 8, 16 y 24 días) y otro a largo plazo (45 y 46 retardos \approx aproximadamente 1 año). En todos los casos (excepto en el de matorral-arbolado atlántico), el modelo esti-

LA COBERTURA ESPACIO-TEMPORAL DE ALGUNOS SISTEMAS DE TELEDETECCIÓN HACE QUE LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA SEA ESPECIALMENTE APROPIADA COMO COMPONENTE INDICADOR DEL ESTADO DE LA VEGETACIÓN DENTRO DE LOS ÍNDICES DE RIESGO

EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA AMBOS ÍNDICES MUESTRAN UN COMPORTAMIENTO CASI IDÉNTICO, MIENTRAS QUE EN LAS REGIONES ATLÁNTICA Y ALPINA EL FPI_{NDWI} PARECE RECOGER MEJOR EL RIESGO DEL VERANO

Tabla 1. Media y varianza del riesgo estimado con el FPI_{NDVI} y el FPI_{NDWI} para cada modelo de combustible.

Modelo de combustible	FPI _{NDVI}		FPI _{NDWI}	
	Media	Varianza	Media	Varianza
1	-1.87	345.54	-2.64	397.86
2	6.59	207.94	7.58	256.42
3	27.04	37.81	38.26	50.03
4	21.78	37.81	28.51	121.22
5	18.14	67.17	25.51	122.55
6	29.30	74.48	38.99	88.76
7	40.78	110.19	56.93	23.94
8	29.48	52.06	44.29	63.37
9	28.79	64.54	39.32	68.57

ma una relación significativa a medio plazo (21, 22 y 23 retardos \approx aproximadamente 6 meses) de carácter negativo y valores especialmente bajos en la zona sur de Navarra. En los modelos con presencia de pasto se estima una relación, significativa de bajo valor y negativa a 10 retardos (\approx aproximadamente 2.5 meses).

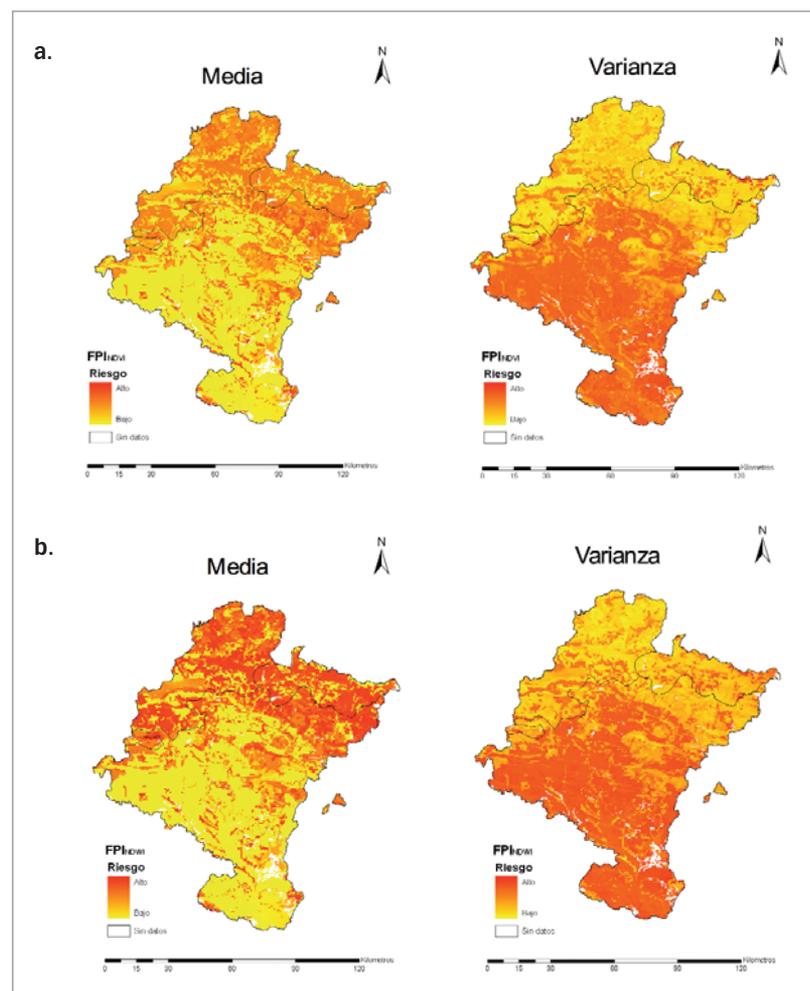
El coeficiente U de Theil muestra valores muy bajos en todos los modelos excepto en los de los pastos, aunque en estos la mayor parte de su valor se acumula en el parámetro de la covarianza, lo que indica que los errores son aleatorios y la adecuada capacidad predictiva de los modelos.

Con los modelos seleccionados se ha elaborado la predicción del riesgo para el año 2009 (46 fechas) únicamente del FPI_{NDWI}, puesto que es el índice que presenta mejor capacidad predictiva. La figura 6 muestra las predicciones de FPI_{NDWI} para al año 2009 junto con el valor calculado. Como puede observarse, las estimaciones recogen de manera precisa el patrón general del riesgo, estando prácticamente todas las predicciones situadas dentro del intervalo de confianza.

Discusión

Evolución temporal del FPI

La similitud en el comportamiento de ambos FPIs en los cultivos herbáceos de la región mediterránea (figura 2a) es debida a que en estos ecosistemas la actividad fotosintética de las especies está perfectamente sincronizada con el contenido de humedad de la vegetación. De esta forma, el patrón descrito por los índices de vegetación NDVI (relacionado



Figuras 4a y 4b. Mapas de media y varianza del riesgo estimado con el FPI_{NDVI} (a) y el FPI_{NDWI} (b) para el periodo de estudio.

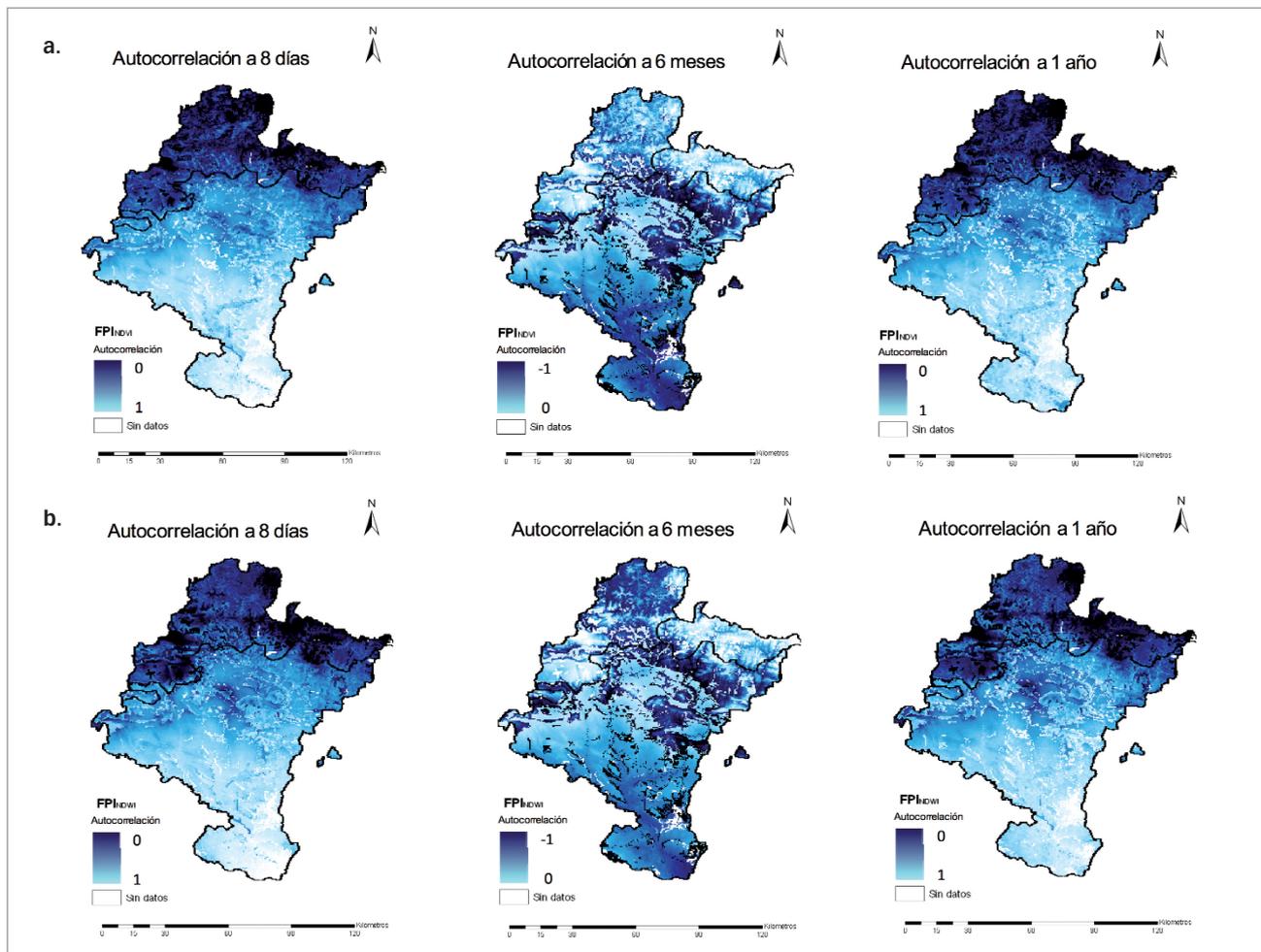
con la actividad fotosintética) y NDWI (relacionado con la humedad) es el mismo. La función de autocorrelación (alta y positiva –figuras 5a y 5b– en los dos índices a corto plazo y a un año) confirma un ciclo anual muy marcado que coincide con el patrón de la región mediterránea^[1], pues este es el modelo que domina en la zona.

La mayor irregularidad presentada por el FPI_{NDVI} en los bosques de coníferas de la zona alpina (figura 2b) queda confirmada por la función de autocorrelación, que no presenta valores significativos a ningún periodo de retardo. Por otra parte, la función de autocorrelación del FPI_{NDWI} presenta autocorrelaciones significativas a cor-

EN ESTE TRABAJO SE HA INTEGRADO EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SERIES DE TIEMPO EN LOS ÁMBITOS DE LA TELEDETECCIÓN Y LOS INCENDIOS. ESTO HA PERMITIDO DESCUBRIR PATRONES DINÁMICOS DEL RIESGO DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO

to, medio y largo plazo, confirmando la presencia de un patrón anual. La diferencia entre los dos índices se podría explicar por la presencia de nubes muy frecuentes en esta zona, incluso en el verano. Esto introduce un nivel de ruido en las series de NDVI que distorsionaría la información, mientras que su efecto en las series de NDWI es menor por estar calculado a partir de bandas situadas a mayor longitud de onda.

En los bosques de frondosas en los que el fuego se propaga a través de la hojarasca la función de autocorrelación para los dos índices muestra un patrón anual claro con valores más significativos en el FPI_{NDVI} (figura 2c). La diferencia más importante entre ellos ocurre durante el verano, cuando el FPI_{NDVI} presenta valores muy bajos y el FPI_{NDWI} muestra sus valores máximos. Esta divergencia es probablemente debida a que el



Figuras 5a y 5b. Mapas del valor de la función de autocorrelación del FPI_{NDVI} (a) y del FPI_{NDWI} (b) a 8 días, a 6 meses y a 1 año en Navarra.

Tabla 2. Modelos seleccionados, estructura y capacidad predictiva estimada mediante el coeficiente U de Theil para el índice FPI_{NDVI} .

Código grupo	Descripción	Modelos agrupados	Retardos significativos	U	Coeficiente de Theil		
					P.sesgo	P.varianza	P.covarianza
1	Pastos alpinos y atlánticos	AP1, AP2, AT1 y AT2	1, 3, 10, 22, 46	0,1938	0,0002	0,2433	0,7565
2	Pasto alpino y atlántico tipo2	AP3, AT3	1, 2, 10, 22, 46	0,0733	0,0249	0,4658	0,5093
3	Pastos mediterráneos	M1 y M2	1, 2, 3, 10, 22, 46	0,2102	0,0684	0,2709	0,6607
4	Pasto-matorral mediterráneos	M3	1, 2, 3, 6, 7, 11, 21, 46	0,0613	0,1388	0,3219	0,5393
5	Matorral alpino y atlántico	AP4, AP5, AT4, AT5,	1, 2, 10, 23, 46	0,1409	0,0629	0,5778	0,3593
6	Matorral mediterráneo	M4, M5 y M6	1, 2, 3, 10, 21, 46	0,1132	0,1095	0,5388	0,3517
7	Matorral alpino y atlántico	AP6, AT6	1, 9, 27, 46	0,0778	0,0624	0,6069	0,3307
8	Matorral-arbolado atlántico	AT7	1, 2, 3, 11, 23, 45, 46	0,0624	0,0029	0,2154	0,7817
9	Matorral-arbolado mediterráneo	M7	1, 2, 12, 21, 46	0,0464	0,0297	0,0074	0,9629
10	Arbolado alpino y atlántico	AP8, AP9, AT8 y AT9	1, 9, 23, 45, 46	0,0663	0,0001	0,2632	0,7367
11	Arbolado mediterráneo	M8 y M9	1, 3, 10, 21, 46	0,0707	0,1335	0,4865	0,3800

Tabla 3. Modelos seleccionados, estructura y capacidad predictiva estimada mediante coeficiente U de Theil para el índice FPI_{NDWI} .

Código grupo	Descripción	Modelos agrupados	Retardos significativos	U	Coeficiente de Theil		
					P.sesgo	P.varianza	P.covarianza
1	Pastos alpinos y atlánticos	AP1, AP2, AT1 y AT2	1, 3, 10, 21, 23, 34, 45, 46, 55	0,1666	0,0246	0,2734	0,7020
2	Matorral alpino y atlántico	AP3, AP4, AP5, AP6, AT3, AT4, AT5, AT6	1, 3, 10, 21, 23, 34, 46	0,1065	0,0203	0,4752	0,5045
3	Pastos mediterráneos	M1 y M2	1, 3, 10, 21, 45, 46	0,1744	0,0699	0,3037	0,6264
4	Pasto-matorral mediterráneos	M3	1, 2, 3, 10, 21, 46	0,0472	0,0257	0,3459	0,6284
5	Matorral mediterráneo	M4, M5 y M6	1, 3, 4, 10, 22, 42, 46	0,0833	0,0725	0,2865	0,6410
6	Matorral-arbolado atlántico	AT7	1, 3, 10, 34, 42, 46	0,0327	0,1316	0,2185	0,6499
7	Matorral-arbolado mediterráneo	M7	1, 3, 21, 23, 46	0,0282	0,0090	0,1675	0,8235
8	Arbolado alpino	AP8, AP9	1, 3, 22, 42, 46	0,0629	0,0032	0,3416	0,6551
9	Arbolado atlántico	AT8 y AT9	1, 3, 16, 22, 34, 42, 46	0,0500	0,0247	0,3445	0,6308
10	Arbolado mediterráneo	M8 y M9	1, 3, 10, 21, 23, 46	0,0500	0,0416	0,2990	0,6594

NDVI es más dependiente de la actividad fotosintética, por lo que responde muy directamente a los cambios fenológicos (muy marcados en las frondosas caducifolias), lo que se manifiesta en los mayores valores absolutos de autocorrelación. De esta forma, la presencia del follaje durante el verano da lugar a una componente de carga viva muy alta en el FPI_{NDVI} , y con ello una estimación muy baja de combustible susceptible de arder. Por otro lado, el NDWI, más relacionado con la humedad, responde más directamente a las condiciones atmosféricas, y por ello estima un riesgo más alto en verano, siendo capaz de detectar el estrés hídrico de la vegetación según avanza el verano.

En los bosques abiertos de frondosas caducifolias con sotobosque de matorral (figura 2d) la función de autocorrelación muestra un patrón claro en el índice FPI_{NDWI} , mientras que en el FPI_{NDVI} no muestra autocorrelaciones significativas a ningún periodo de retardo. En este ecosistema el ciclo fenológico captado por los índices de vegetación es el resultado de la mezcla del sotobosque perenne de matorral y el arbolado caducifolio. Esto se refleja en una gran irregularidad a lo largo del año, sobre todo cuando se utiliza el FPI_{NDVI} , en el que la dinámica fenológica tiene un gran peso. Esto se manifiesta claramente en la función de autocorrelación. Sin embargo, las series de FPI_{NDVI} sí muestran una

disminución del riesgo en la primavera, cuando la frondosa inicia su actividad vegetativa, aunque menos acusada que en el caso de frondosas sin sotobosque. Esto se pone de manifiesto asimismo durante el invierno, cuando el verdor del sotobosque da lugar a valores más bajos de FPI_{NDVI} (porque detecta más carga de vegetación viva, matorral) que en el ecosistema anterior. Por otro lado, el FPI_{NDWI} sigue un patrón similar al del ecosistema anterior, estimando los mayores valores de riesgo en verano.

Los resultados del análisis espacial de los estadísticos básicos y las autocorrelaciones a 8 días, 6 meses y un año indican que se puede proponer una zonifi-

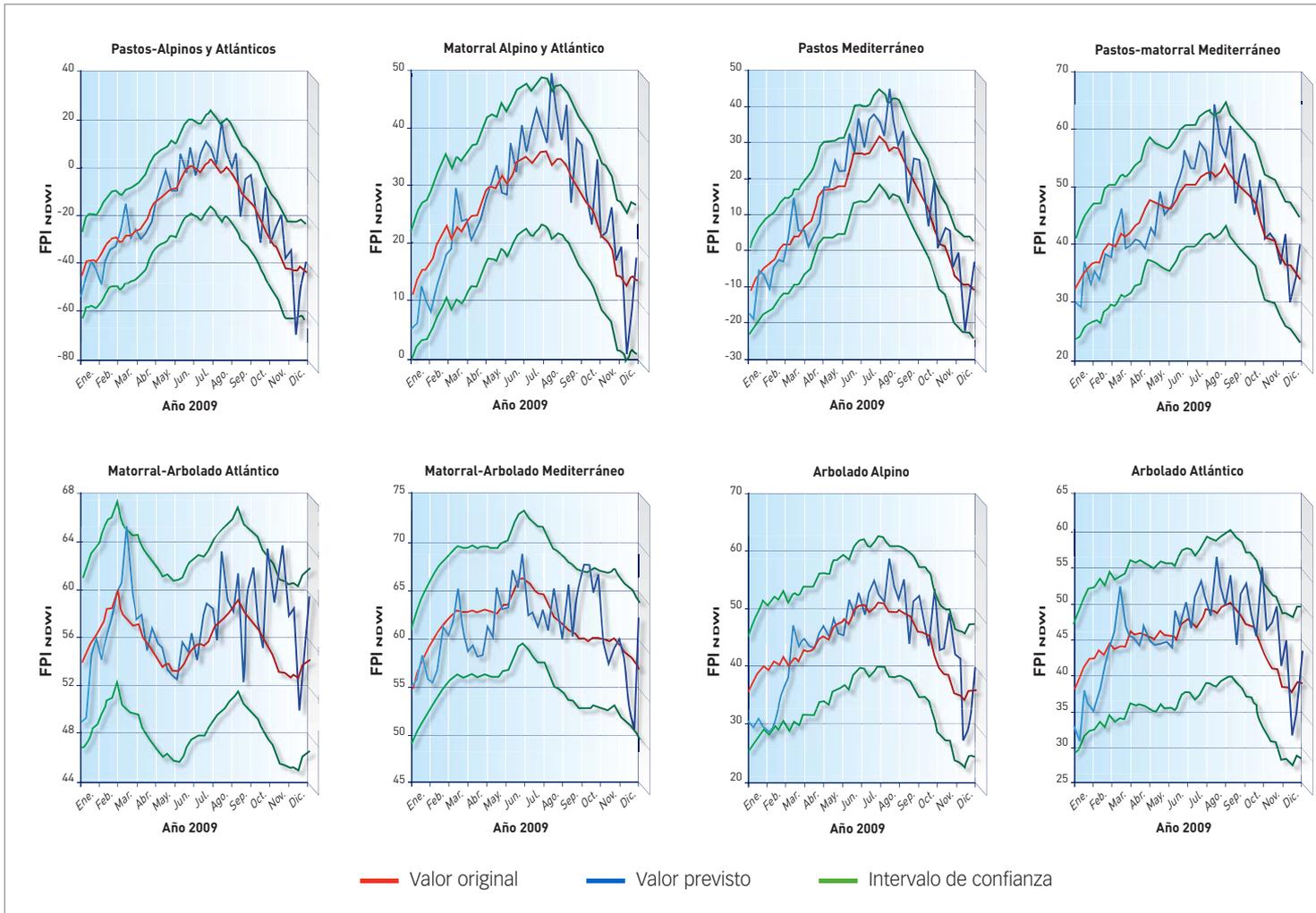


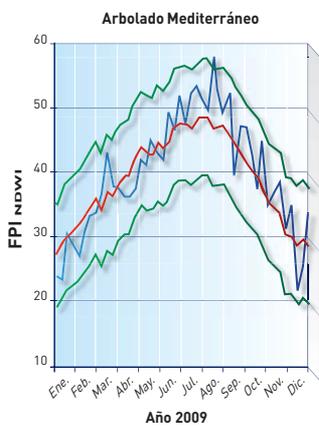
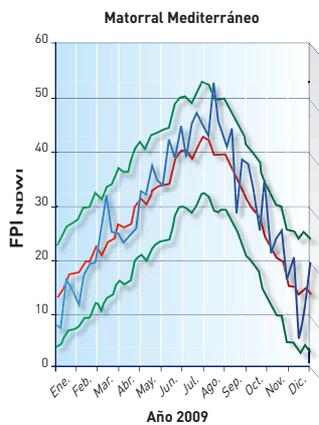
Figura 6. Predicciones del FPI_{NDWI} para cada uno de los 10 grupos durante el año 2009.

cación preliminar basada en zona bioclimática y modelo de combustible. Los modelos de combustible han mostrado medias y varianzas muy diferentes, lo que indica distintos niveles de riesgo y variabilidad a lo largo del año. Por otro lado, la función de autocorrelación ha mostrado un patrón distinto entre regiones bioclimáticas, lo que indica que la estabilidad del patrón del riesgo es muy diferente. Por ejemplo, la mayor autocorrelación a 1 año en la zona mediterránea se debe probablemente a que la sequía estival es muy regular y constante, por lo que confiere estabilidad al riesgo. Sin embargo, en el norte, más fresco y húmedo, la limitación hídrica no es una

constante anual, por lo que el patrón del riesgo presenta más variabilidad entre años. Estos resultados nos han llevado a definir preliminarmente un modelo específico para cada combinación «modelo de combustible–zona bioclimática». En todos los casos los modelos propuestos son modelos autorregresivos, los cuales modelizan la variable en función solamente de su pasado, estando las principales diferencias entre ellos en

su estructura (retardos necesarios para modelizar el riesgo). En una segunda fase se han agrupado los modelos que comparten una misma estructura y las predicciones se han llevado a cabo solo para el FPI_{NDWI} por mostrar mejor capacidad predictiva. Las 26 clases originales han sido agrupadas en 10 para este índice. Los pastos puros atlánticos y alpinos presentan un comportamiento similar, por lo que se han agrupado en una misma

SE HA PODIDO MODELIZAR Y PREDECIR EL RIESGO CON UN MISMO TIPO DE MODELO, EN CONCRETO EL AUTORREGRESIVO. ESTO SIMPLIFICA LA PREDICCIÓN PORQUE EL RIESGO SOLO DEPENDE DE SU PROPIA HISTORIA



clase. Por otro lado, los dos modelos de combustible de arbolado (8 y 9) se han unido pero se ha mantenido la distinción entre zonas bioclimáticas. El matorral con distintos niveles de asociación con pasto y arbolado atlánticos y alpinos se ha agrupado, excepto el matorral-arbolado atlántico, que se ha tenido que modelizar independientemente. En la región mediterránea se han definido tres clases de matorral según su asociación al pasto o al arbolado.

Todos los modelos comparten una estructura común con un parámetro autorregresivo a muy corto plazo y otro a largo plazo. Esto indica que el valor del riesgo depende en gran medida de su va-

lor en el pasado reciente y que tiene un comportamiento similar al del año anterior en esas mismas fechas. La relación significativa encontrada a medio plazo, de carácter negativo (excepto en el matorral-arbolado atlántico), puede explicar la influencia que tiene el riesgo de la primavera sobre el del otoño, de forma que primaveras húmedas darían lugar a mucha biomasa y, por lo tanto, a mayor

riesgo al final del verano y en otoño. La relación, significativa de bajo valor y negativa, a aproximadamente 2.5 meses, encontrada en los modelos con presencia de pasto, puede ser explicada porque el modelo esté capturando una relación dinámica en el riesgo asociada a la evolución de algunos combustibles de corto periodo vegetativo, como pueden ser algunos ecosistemas de pastos.



Latinstock

Conclusiones

En este trabajo se ha modelizado el riesgo de incendio utilizando dos índices: el FPI_{NDVI} y el FPI_{NDWI} . En la región mediterránea ambos índices muestran un comportamiento casi idéntico mientras que en las regiones atlántica y alpina el FPI_{NDWI} parece recoger mejor el riesgo del verano, probablemente por estar más vinculado a la humedad. Asimismo, este índice presenta mejor capacidad predictiva.

Se ha demostrado que la combinación tipo de combustible–región bioclimática da lugar a clases con un comportamiento característico del riesgo. Asimismo, se ha podido modelizar y predecir el riesgo con un mismo tipo de modelo, concretamente el autorregresivo. Esto

simplifica la predicción porque el riesgo solo depende de su propia historia, sin tener en cuenta variables auxiliares.

En este trabajo se ha integrado el análisis estadístico de series de tiempo en el ámbito de la teledetección y en el de los incendios. Este es un enfoque novedoso y original. Por los resultados obtenidos, creemos que esta metodología tiene un gran potencial en el ámbito de los incendios, tanto en el aspecto científico como en el de la gestión. Además, estas metodologías pueden ser fácilmente extrapolables a otros ámbitos medioambientales. ♦

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado gracias a una ayuda a la investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

A MODO DE GLOSARIO

- FPI:** Fire Potential Index.
 FPI_{NDWI} : Fire Potential Index calculado con el índice NDWI.
 FPI_{NDVI} : Fire Potential Index calculado con el índice NDVI.
NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.
NDWI: Normalized Vegetation Water Index.
AST: Análisis estadístico de series temporales
AR: Modelo autorregresivo.
MA: Modelo media-móvil.
ARMA: Modelo autorregresivo y media-móvil.
ARIMA: Modelo autorregresivo y media-móvil con término de integración.
MODIS: MODerate resolution Imaging Spectroradiometer.
 ρ_r : Reflectancia en el canal rojo.
 ρ_{nir} : Reflectancia en el canal infrarrojo cercano.
 ρ_{swir} : Reflectancia en el canal SWIR 1.
 T_{max} : Temperatura máxima.
 H_{rel} : Humedad relativa mínima.
H: Altitud.
 H_{cm} _{10hrfrac}: Humedad del combustible fino y muerto.
 CV_{cor} : Carga de combustible susceptible de arder.

PARA SABER MÁS

- [1] Vélez, R. y otros. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGraw-Hill. 2000, 1.3 – 9.43
- [2] Bartlein, P.J., Hostetler, S.W., Shafer, S.L., Holman, J.O. y Solomon, A.M. Temporal and spatial structure in a daily wildfire-start data set from the western United States (1986-96). *International Journal of Wildland Fire*, 2008, (17), 8-17.
- [3] Pyne, S., Andrew, P. y Laven, R.D. *Introduction to wildland fire*. 2a.ed. Wiley, Nueva York. 1996.
- [4] Morgan, P., Hardy, Colin C., Swetnam, Thomas W., Rollings, Matthew G. y Long, Donald G. Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, (10), 329-342
- [5] Burgan, R. E., Klaver, Robert W. y Klaver, Jacqueline M. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire*, 1998, (8), 159-170.
- [6] Sebastián-López, A., San Miguel-Ayán, J. y Burgan, Robert E. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale *International Journal of Remote Sensing*, 2001, (13), 2713-2719.
- [7] Schneider, P., Roberts, D.A. y Kyriakidis, P.C. A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index. *Remote Sensing of Environment*, 2008, (112), 1151-1167.
- [8] Huesca, M., Litago, J., Palacios-Orueta, A., Montes, F., Sebastián-López, A., y Escribano, P. Assessment of forest fire regimes using MODIS fire potential: a time series approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, (149), 1946-1955.
- [9] Preisler H.K., Burgan R.E., Eidenshink J.C., Klaver J.M., y Klaver R.W. Forecasting distributions of large federal-lands fires utilizing satellite and gridded weather information. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, (18), 508-516.
- [10] Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. y Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 1973, 309-317.
- [11] Gao, B.C. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water form space. *Remote Sensing of Environment* 1996, (58), 257 – 266.
- [12] Box G.E.P., Jenkins G.M. y Reinsel G.C. *Time series analysis, Forecasting and control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [13] Armstrong, G.W. A stochastic characterisation of the natural disturbance regime of the boreal mixed-wood forest with implications for sustainable forest management. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, (29), 424-433.
- [14] Stow, D., Niphadkar, M. y Kaiser, J. MODIS-derived visible atmospherically resistant index for monitoring chaparral moisture content. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, (26), 3867-3873.
- [15] Carmona-Moreno, C., Belward, A., Malingreau, J., Hartley, A., García-Alegre, M., Antonovskiy, M., Buchshtaber, V. y Pivovarov, V. Characterizing interannual variation in global fire calendar using data from Earth observing satellites. *Global Change Biology*, 2005, (11), 1537-1555.
- [16] Telesca, L. y Lasaponara, R. Pre- and post-fire behavioral trends revealed in satellite NDVI time series. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33.
- [17] Modarres, R. Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2006, (21) 223-233.
- [18] Piwowar, J. M. y Ledrew, E. F. AR-MA time series modelling of remote sensing imagery: a new approach for climate change studies. *International Journal of Remote Sensing*, 2002 (23), 5225-5248.
- [19] Han, Ping, Wang, Peng Xin, Zhang, Shu Yu y Zhu, De Hai. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA models. *Mathematical and Computer Modelling in Agriculture*, 2010, (51), 1398-1403
- [20] Theil, H. 1971. *Principles of Econometrics*. John Wiley & Sons, Inc., New York.