

INTEGRACIÓN DE UNA CARTOGRAFÍA DE VIENTOS EN SITUACIONES METEOROLÓGICAS DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES EN LA COMUNIDAD VALENCIANA MEDIANTE UN SIG

MARÍA JOSÉ ESTRELA NAVARRO¹, FRANCISCO PASTOR GUZMÁN, JOSÉ ANTONIO VALIENTE PARDO, JOSÉ ANTONIO ALLOZA

Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo

C/ Charles R. Darwin, 14. Parque Tecnológico, Paterna, Valencia. C.P. 46980, España

¹estrela@ceam.es

RESUMEN

Las condiciones meteorológicas constituyen un factor decisivo en la dinámica y evolución de los incendios forestales. Se ha analizado las condiciones meteorológicas propicias para la propagación de incendios forestales en la Comunidad Valenciana. Tres situaciones cubren la mayor cantidad de interacciones entre condiciones sinópticas y vientos regionales: 1) ciclo de brisas con baja térmica; 2) vientos de poniente con efecto Föhn; 3) ciclo combinado, ciclo diurno de brisa con acoplamiento de la brisa terral con el Oeste por la noche. Se ha utilizado el modelo mesoescalar Regional Atmospheric Modelling System para simular los flujos de viento en estos tipos sinópticos, obteniéndose una cartografía con la evolución del viento a gran resolución y desagregada por cuencas. Los resultados se han integrado en un SIG para efectuar análisis cartográficos con aplicación directa en la gestión forestal, tanto en la prevención como en la extinción de incendios.

Palabras clave: modelos meteorológicos, incendio forestal, viento, SIG.

ABSTRACT

Meteorological conditions are a key factor on wildfire dynamics; there is, therefore, a need to determine their influence on wildfires. In the Valencian Region, three synoptic situations have been found to be closely related to forest fires. These are: 1) sea breeze cycle combined with Iberian thermal low; 2) synoptic westerlies; and 3) combined cycle, namely diurnal breeze cycle combining the nocturnal return flow with synoptic westerlies at middle and upper levels. Selected meteorological events representing those three types have been simulated with a mesoscale numerical model (RAMS) to study wind regimes in each situation at high spatial resolution. A representative wind cartography has been developed showing the "typical" daily wind regimes at the three synoptic situations related to forest fires. These data have been incorporated into a GIS,

together with orography and vegetation data, in order to perform geographical analysis that can be applied in forestry policies, both in fire prevention and extinction.

Keywords: meteorological model, forest fires, wind, GIS.

1. Introducción

Los incendios forestales son un fenómeno habitual a lo largo de la historia de la cuenca mediterránea. Estos incendios se han visto favorecidos tanto por las condiciones climáticas mediterráneas como por las prácticas tradicionales de explotación del suelo. Como es sabido, la Comunidad Valenciana es una de las regiones españolas que en la última parte del siglo pasado experimentó un notable incremento tanto en el número de incendios forestales como en la superficie quemada, (Vallejo y Alloza, 1998; Pausas y Vallejo, 1999). Un análisis de los datos correspondientes a los incendios de los últimos 30 años indica que los accidentes con pérdidas humanas son, en su mayoría, resultado de cambios repentinos en la dinámica del fuego. Por tanto, un buen conocimiento de las condiciones meteorológicas y su evolución podría contribuir a evitar catástrofes y la pérdida de vidas humanas.

Una revisión de la literatura científica en incendios forestales indica que muchos estudios se centran en los efectos del fuego en la vegetación, en los cambios en las propiedades del suelo y en los procesos de regeneración de los ecosistemas (Trabaud, 1982; Moreno y Oechel, 1994; Vallejo, 1996). Otros trabajos tratan de modelizar la propagación de los incendios forestales atendiendo tanto a los procesos puramente físicos que los caracterizan como a los que han de determinarse desde un punto de vista empírico dada la complejidad del fenómeno (Simeoni et al., 2001; Santoni et al., 2000; Andre y Viegas, 1998; Viegas et al., 1998). El principal objetivo de la modelización del comportamiento del fuego es la descripción del mismo basándose en la forma del frente de llama y en la velocidad de propagación en cualquier momento del fenómeno, es decir la predicción de sus propiedades macroscópicas a tiempo real según unas condiciones de contorno que deben conocerse durante la aplicación del modelo. Entre las principales condiciones de contorno que afectan a la propagación del fuego se encuentran la pendiente del terreno como el elemento topográfico más importante, el tipo y cantidad de combustible presente en tres posibles capas o niveles así como su contenido en humedad, y finalmente las condiciones meteorológicas con especial atención tanto a los efectos a largo y corto plazo producidos por la precipitación como al papel fundamental del viento en las condiciones de propagación. Sin duda es el viento por sí sólo el factor más importante en todo el problema de la propagación del incendio forestal (Viegas 1998; Chandler et al. 1991). Se observa que en situaciones de propagación regidas por el viento, la velocidad de avance del fuego llega a ser 100 veces mayor que en situaciones de ausencia de viento. Esto contrasta con los efectos producidos por la pendiente del terreno que pueden suponer un incremento en un factor de 20 en el mejor de los casos. Por lo tanto, es de vital importancia en la modelización del comportamiento del fuego el poder estimar la distribución del viento cerca de la vegetación y su evolución temporal dada la gran variabilidad espacial y temporal que esta variable meteorológica presenta.

Si bien los modelos que tratan de describir el comportamiento del fuego pueden ser de gran utilidad a tiempo real cuando se dispone de datos de viento in situ, el interés del presente estudio se centra más en catalogar distintas zonas geográficas según un índice de riesgo que sea función del régimen de vientos característico en dicha zona. Existen sin embargo distintos índices meteorológicos de riesgo de incendios forestales, unos más generales a escala global (Carrega, 1991; Van Wagner, 1987) y otros de ámbito local, concretamente el aplicado en el plan PREVIFOC de la Comunidad Valenciana (Mediavilla et al., 1994). Estos índices meteorológicos se elaboran a tiempo real haciendo uso de datos correspondientes a diferentes variables meteorológicas que se registran en distintas estaciones repartidas a lo largo de un territorio. En su mayoría tratan de evaluar el contenido de humedad de las distintas capas en las que se encuentra el combustible, no obstante también incorporan la velocidad del viento para la estimación de la propagación del frente de llama en un posible incendio. Concretamente el índice desarrollado en el PREVIFOC distingue incluso entre dos tipos de viento según su dirección de procedencia: terrales y no terrales, dadas sus distintas características en la Comunidad Valenciana. Los índices meteorológicos se elaboran diariamente poniendo en marcha una serie de servicios de alerta dependientes de los gobiernos locales, sin embargo dividen el territorio de forma muy extensa en muchos casos y atienden primero a criterios de proximidad espacial antes que a criterios meteorológicos que pueden caracterizar cada una de las zonas. De esta forma no se tiene en cuenta el régimen de vientos característico en la diferenciación de las zonas geográficas y por ello no atienden a la distinción de distintos niveles de riesgo a la hora de la extinción de un posible incendio forestal. Los resultados de diversos proyectos europeos realizados en la cuenca occidental del Mediterráneo muestran que muchos de los procesos atmosféricos estivales en esta región están regidos por circulaciones mesoescalares con marcado ciclo diurno (Millán et al., 1991, 1992, 1996, 1997). Por tanto, un buen conocimiento de las condiciones atmosféricas de la cuenca occidental del Mediterráneo, profundizando en los procesos a escala local y regional, es fundamental para la labor de prevención y/o extinción de los incendios forestales.

El objetivo general de este trabajo es la obtención, a partir del modelo meteorológico RAMS, de una cartografía de vientos "tipo" de alta resolución para cada una de las situaciones sinópticas relacionadas con la propagación de incendios forestales en la Comunidad Valenciana, cuyos resultados se puedan integrar en un Sistema de Información Geográfica (SIG) a fin de realizar análisis cartográficos con aplicación directa en la gestión forestal.

En este estudio se ha trabajado con cuatro metodologías: análisis sinóptico, modelización, análisis estadístico de las bases de datos meteorológicas (dirección y velocidad de viento) e incendios forestales y sistemas de información geográfica. El período de estudio comprende los veranos de 1980 a 2000. Se han utilizado datos de viento provenientes del INM de las estaciones primarias Manises, Almassora y Alicante (El Altet). La base de datos que se ha utilizado para los incendios forestales es la del ICONA (1988).

2. Análisis sinóptico de situaciones meteorológicas de riesgo para la propagación de los incendios forestales (período 1980-2000)

Este tipo de análisis sinóptico no se ha incluido hasta la fecha en los índices utilizados habitualmente y constituye una clara mejora en el aspecto meteorológico. Las situaciones definidas son: 1) ciclos de brisa mar-tierra con baja térmica sobre la Península; 2) vientos de poniente (efecto Föhn); 3) ciclos combinados (ciclo diurno de brisa de mar con acoplamiento de flujos de tierra-mar con el viento de altura durante la noche). Estas situaciones cubren las más probables interacciones entre las condiciones sinópticas y los vientos locales, así como sus implicaciones para la dinámica de los incendios en la Comunidad Valenciana (Millán et al., 1998).

2.1. Ciclos diurnos de brisas mar-tierra con formación de baja térmica

Tiene lugar con gradientes de presión muy débiles a todos los niveles y favorecen el total desarrollo de las circulaciones locales y regionales durante el día. En la costa mediterránea las brisas de mar se presentan durante todo el año aunque con menor frecuencia en invierno, por el contrario alcanzan su máxima penetración en el interior, frecuencia y duración en verano con la formación de la Baja Térmica Ibérica. En años muy secos pueden iniciarse a principios de Marzo, obteniéndose las máximas velocidades hacia final de Mayo o principio de Junio. En el Mediterráneo español la orientación de las laderas favorece la combinación de la brisa de mar con los vientos anabáticos; estos son vientos fuertemente canalizados a lo largo de valles que conectan la costa con la Meseta con velocidades de 8 a 10 m s⁻¹ durante varias horas y con los vientos más intensos confinados en un núcleo a lo largo del eje del valle desde 100 a 200 m sobre el suelo. Los vientos anabáticos también se desarrollan en laderas orientadas al Sur formando un flujo en forma de espiral a lo largo de los valles orientados Este-Oeste con subsidencia compensatoria en las laderas orientadas al Norte. Como resultado, algunas de las cumbres que bordean el valle se localizan en los flujos de retorno de la combinación brisas de mar-vientos anabáticos durante la totalidad o parte del día, variando esta situación en cada valle en función de su topografía, la orientación de las laderas y momento del día.

En cuanto a interacciones con los incendios, el periodo más peligroso son las horas diurnas con la canalización de las brisas hacia el interior a lo largo de los valles que conectan la costa con la Meseta. En esos valles los núcleos de vientos fuertes del Este se refuerzan con, o refuerzan a, los vientos anabáticos a lo largo de las laderas orientadas al Sur donde los vientos cambian de Este a Sudeste al avanzar hacia el interior del valle. Durante la tarde-noche, cambio de brisas marinas a terrales, hay un tiempo de calma antes del establecimiento de las brisas de tierra y los vientos de drenaje. Estos están confinados en los valles y alcanzan su máxima intensidad antes de la salida del sol, llegando raramente a profundidades mayores de 150 a 200 m e incluso a resultar bloqueados al llegar al mar. Durante este periodo las cumbres montañosas pueden permanecer inmersas en un flujo sinóptico débil semejante a una brisa de mar. Un proceso similar, aunque más suave, rige el tránsito de terrales a brisas marinas a primeras horas cuando se inicia el calentamiento solar.

2.2. Poniente: Vientos del Oeste con sistemas de bajas presiones migratorios

Las condiciones sinópticas anulan la formación de circulaciones regionales y representan el caso más fuerte de acoplamiento del flujo sinóptico con la superficie. Se producen al migrar las depresiones atlánticas hacia latitudes más bajas entre las Islas Británicas y el Golfo de Vizcaya-Sur de Francia. Pueden extenderse desde mediados de Agosto hasta últimos de Junio y su ciclo de vida dura de uno a varios días. En general, la componente Oeste de los vientos se extiende desde la superficie hasta niveles altos.

En la Comunidad Valenciana, el último obstáculo encontrado por las masas de aire antes de llegar al Mar Mediterráneo es el Sistema Ibérico. Esta barrera potencia la precipitación en el lado de barlovento y produce a sotavento un efecto Föhn que provoca vientos fuertes del Oeste, racheados, cálidos y muy secos sobre la mayor parte de la costa mediterránea. Estos vientos producen convergencia a sotavento de las montañas y una fuerte subsidencia sobre los llanos costeros.

En la franja costera se ha detectado que la llegada de los ponientes sucede preferentemente durante la noche. Si el ciclo de ponientes comienza durante el día y la celda de la brisa ya está bien establecida, los vientos del Este tienden a bloquear o desviar los ponientes para que no alcancen la superficie, desarrollándose una línea de fuerte convergencia tierra adentro. Por la tarde la brisa de mar termina y los vientos de superficie cambian a flujos de drenaje del Oeste acoplándose los ponientes con el flujo en superficie y estableciéndose a todos los niveles. Los ponientes afectan simultáneamente tanto a las zonas elevadas como a los valles orientados al Este-Oeste, donde pueden estar fuertemente canalizados. En relación con los grandes incendios forestales, cabe destacar su capacidad para secar muy rápidamente la superficie y la vegetación, su potencial para activar fuegos latentes y su capacidad para propagar los fuegos gracias a su persistencia e intensidad.

2.3. Ciclo combinado: brisas de mar con acoplamiento de ponientes en altura por la noche

En esta situación sinóptica los gradientes de presión desde la superficie hasta los 850 hPa son débiles y favorecen el desarrollo de la baja térmica y/o las circulaciones costeras. En o sobre la superficie de 700 hPa hay un flujo del Oeste bien definido. Esta situación se da durante la transición de verano a otoño-invierno alternando con periodos de brisas de mar o con ponientes. En esta situación las brisas de mar aún pueden alcanzar la cima de las cadenas montañosas costeras hasta final de septiembre cuando su frecuencia y alcance disminuyen.

Su desarrollo inicial es similar al de las brisas de mar-tierra con formación de baja térmica. Pero el final de la combinación de las brisas de mar-vientos anabáticos y la transición al flujo de drenaje y brisas de tierra se ven modificados por los vientos del Oeste en altura. El acoplamiento con los flujos en superficie está causado por: (1) ambos vientos, de superficie y altura, tienen la misma dirección, (2) el inicio de los flujos de drenaje conduce los vientos de altura hacia la superficie, y (3) el inicio de la subsidencia provoca un chorro nocturno, justo por debajo de la nueva

Estrella Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", GeoFocus (Artículos), nº 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

inversión en la misma dirección general. La combinación de estos procesos produce un tipo de "ponientes por medio de acoplamiento ayudado por subsidencia". A la mañana siguiente se desarrollan de nuevo las brisas de mar, aunque más tarde, así como la baja térmica sobre la meseta central, y el ciclo se inicia de nuevo. Esta situación dura de uno a varios días, tras los cuales pasa a un ciclo completo de baja térmica.

Estos "ponientes ayudados por acoplamiento" se desarrollan a últimas horas de la tarde alrededor de la puesta de sol, o incluso una o dos horas antes. El cambio en la dirección del viento y el colapso de la brisa de mar tiene lugar casi a la vez en toda el área costera, desde las cadenas montañosas hasta el mar. Los vientos en superficie pueden estar fuertemente canalizados a lo largo de los valles alineados de Este a Oeste mientras que las zonas más elevadas de los valles pueden no tener vientos tan fuertes como en los "ponientes clásicos". Su duración se limita al periodo nocturno y de madrugada.

El cambio súbito en la dirección del viento, que puede producirse en cualquier punto del valle, puede ser extremadamente peligroso para las brigadas de extinción que trabajan cerca del frente de llamas. También existe la posibilidad de que el fuego se desdoble y una parte ascienda la ladera, mientras que el frente de llamas se mueva por el valle siguiendo el nuevo flujo. Esto significa que el inicio de estos vientos puede provocar el avance y la propagación del fuego durante la noche. Este análisis lo hemos complementado con un análisis estadístico de la frecuencia de vientos y la frecuencia y tamaño de los incendios forestales en el periodo 1968-2000.

3. Cálculo del riesgo de incendios en la Comunidad Valenciana

El modelo de simulación meteorológica utilizado es el RAMS (Regional Atmospheric Modelling System). Se trata de un modelo de mesoescala especialmente diseñado para la resolución de fenómenos de mesoescala y circulaciones locales. Este modelo presenta la característica de trabajar con mallas anidadas, lo cual permite simular a muy alta resolución el área de interés mientras áreas circundantes se simulan con menor resolución. Al modelo se le han introducido datos relativos a la topografía y la vegetación de la Comunidad Valenciana a fin de adaptarlo a las características específicas de nuestra región. También se ha mejorado la calidad de los datos de entrada de temperatura superficial del mar. En esta fase, parte de los esfuerzos se han dirigido a la adaptación del modelo a las condiciones de la cuenca occidental del mediterráneo, sobre todo mejorando la topografía, usos del suelo y temperatura superficial del mar.

Un aspecto importante en la modelización de vientos a escala muy fina es la representación de la topografía en el modelo meteorológico. En este trabajo se han utilizado datos de topografía obtenidos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con resolución de 30 segundos de grado. El modelo RAMS trata estos datos para crear archivos de topografía adaptados a las mallas de cada simulación, haciendo estos valores compatibles entre las mallas de diferentes resoluciones utilizadas en la simulación. Para este tratamiento RAMS (en la versión utilizada para este trabajo) realiza una serie de pasos, siendo el primero una interpolación horizontal de los datos originales a una malla temporal cartesiana o polar estereográfica (según se indique en la simulación). En un

segundo proceso se pasa a una resolución mayor por medio de promedios convencionales y de "silueteado". El primero consiste en la suma de todos los valores de altitud de cada una de las celdas incluidas en una celda de la malla superior dividido por el número de éstas para obtener el valor de altitud que se asignara a la celda superior; mientras, en el segundo se calcula la silueta promedio de todas las celdas incluidas en una celda de la malla superior tanto en dirección Oeste-Este como Norte-Sur, obteniéndose así la silueta promedio de la celda superior.

El promediado convencional descrito en el párrafo anterior preserva el volumen total del terreno sobre el nivel del mar mientras que el silueteado "rellena" los valles añadiendo masa en su fondo. En cambio, el silueteado tiene la ventaja de preservar la altura efectiva de la barrera topográfica que debe superar el aire, resultando ésta más baja en el caso del promedio convencional. Posteriormente el modelo realiza un ajuste entre éstos dos métodos según los coeficientes asignados por el usuario, dando en nuestro caso un peso preponderante al silueteado al querer preservar las barreras orográficas de los valles y accidentes geográficos propios de una orografía compleja como es la de la Comunidad Valenciana. Para finalizar el modelo interpola los datos obtenidos a las mallas del modelo en el formato propio del RAMS.

3.1. Modelización: cartografía de campos de viento

Para los tres tipos sinópticos definidos se ha seleccionado un episodio considerado tipo o estándar para simular con el modelo meteorológico RAMS con el objetivo de elaborar una cartografía de vientos de alta resolución. Para la modelización se ha dividido la Comunidad Valenciana en 17 áreas en las que han prevalecido criterios geográficos, sobre todo teniendo presente la disposición orográfica que pueda condicionar la canalización de flujos. Para cada episodio se ha realizado una simulación comprendiendo los días centrales del evento así como dos días previos y uno posterior al mismo, con el objeto de evitar inestabilidades de cálculo en la resolución de las ecuaciones diferenciales que caracterizan a la atmósfera. Como característica principal en la configuración del modelo cabe destacar la alta resolución a la que trabaja éste, calculando valores para las distintas variables meteorológicas en una malla de resolución 1,3 km (resolución muy superior a la utilizada habitualmente en los modelos de previsión meteorológica). Los campos que se han trabajado son la intensidad y la dirección del viento en cada punto de la malla. En la [tabla 1](#) se resumen algunas de las características de la configuración del modelo para este trabajo.

En la situación de poniente se ha trabajado con los valores máximos diarios de viento. Para ello se han comparado los 24 valores diarios en cada punto de la malla para encontrar la mayor intensidad del viento en cualquier punto de la malla. Posteriormente se normalizan todos los valores máximos (de cada punto de la malla) respecto al máximo absoluto en todos los puntos de la malla. Para el caso de las situaciones de brisa y ciclo combinado no se realizan los cálculos de los valores máximos debido a que se trata de ciclos marcados por la variabilidad tanto de velocidad como de dirección. En estos casos se obtienen los datos horarios de velocidad y dirección y se agrupan según los distintos tipos de brisa (brisa marina y terrenal y dos periodos de transición de una a otra) o se presentan en un solo mapa en el caso del ciclo combinado. La [figura 1](#) muestra uno de los campos

de viento resultantes para una situación tipo de las definidas como de riesgo, en una de las áreas descritas con la configuración del modelo RAMS que aparece en la [tabla 1](#).

3.2. Integración en un SIG: riesgo de propagación de incendios forestales

Los resultados del modelo se guardan en archivos horarios, lo que permite disponer de la evolución horaria de los campos de viento en las 17 zonas en que se ha dividido la Comunidad Valenciana. Estos ficheros se han georreferenciado y exportado en formato ASCII para su lectura desde un Sistema de Información Geográfica, lo cual nos permite disponer de los mapas de viento normalizados para un día representativo de cada una de las situaciones sinópticas de riesgo en la propagación de incendios.

En la [figura 2](#) se muestra el mapa de viento normalizado para las situaciones de viento de poniente y ciclo combinado. Para el caso de las brisas se presentan dos figuras separadas ya que se distinguen cuatro periodos de vientos muy bien definidos; la brisa marina y terral se muestran en la [figura 3](#) mientras que los dos periodos de transición de la brisa se muestran en la [figura 4](#).

Esta cartografía puede resultar útil en la prevención de los incendios, ya que al cruzar los datos de vientos máximos previsibles con datos de biomasa y de topografía se pueden determinar índices de peligrosidad que muestren las áreas susceptibles de mayor riesgo en la propagación de incendios. Las metodologías y aproximaciones para elaborar cartografía asociada al riesgo de incendios son múltiples, Velasco (2001). La inflamabilidad de la vegetación o facilidad de producir llamas bajo la acción de un foco de calor, depende de dos tipos de factores, intrínsecos y extrínsecos (Vélez, 2000); dentro de los primeros se encuentran la composición, especie vegetal, estado selvícola, etc., dentro de los factores extrínsecos se encuentran el relieve y los factores meteorológicos, ambos con una gran influencia en la propagación. En nuestro estudio, hemos aplicado un procedimiento similar al descrito por Chuvieco et al. (1999) siguiendo el método de selección de variables e integración. Por un lado hemos considerado la pendiente del territorio (obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno) y, por otro, las características de la vegetación que inciden en la propagación de un incendio (altura, continuidad vertical y horizontal, carga de combustible); dicha información queda sintetizada en los modelos de combustible, para lo cual se ha utilizado la correspondiente cobertura del Plan de Selvicultura Preventiva de la Comunidad Valenciana de la Conselleria de Territorio y Vivienda (1995). La integración de ambas variables, topografía y modelos de combustible, se ha realizado por medio de una tabla de riesgo ([tabla 2](#)); cartográficamente el mapa correspondiente se muestra en la [figura 5](#).

Para identificar las situaciones sinópticas con mayor riesgo de propagación, el índice de riesgo se ha combinado con el respectivo índice de la velocidad del viento por medio de una tabla de doble entrada ([tabla 3](#)). En la [figura 6](#) se muestran los resultados de dicho análisis para el caso de los vientos de poniente y del ciclo combinado. En las situaciones de brisa, como en el caso de los mapas de viento normalizados, presentamos dos gráficos separados con los periodos de brisa marina y terral en la [figura 7](#) y los periodos de transición entre ambas en la [figura 8](#).

4. Resultados

Analizando la frecuencia y el tamaño de los incendios forestales en el período 1968-2000 se observa que el mayor número de fuegos tiene lugar en verano, especialmente Julio y Agosto (Millán et al. 1998, Pausas y Vallejo 1999). En esta época del año se combinan una serie de factores que favorecen una mayor ocurrencia de los incendios al ser la estación más seca del año y la más turística, con mayor peligro de ignición de la masa forestal por el uso mayoritario del bosque. Sin embargo, la situación meteorológica que favorece la ignición o propagación de los incendios no es la misma en todos los casos.

Los resultados del análisis de frecuencia de vientos apoyan los resultados del estudio sinóptico que se resumen en la [tabla 4](#). Para todas las estaciones analizadas hay un predominio de los vientos de componente Este en el verano, con las brisas de mar incluidas en este grupo mientras que los terrales se cuentan entre los vientos de componente Oeste. En la [tabla 4](#) se resume el porcentaje de las tres situaciones sinópticas. Para la Comunidad Valenciana y en el período analizado la situación predominante es el régimen de brisas, con un 70% de los días analizados.

No obstante lo señalado, cabe destacar que se aprecia una cierta tendencia descendente en la última década a favor de las situaciones de ciclo combinado y de ponientes, aunque se mantiene la distancia respecto al valor de brisas. En la misma tabla se incluye el número de incendios así como su porcentaje sobre el total. Lo más destacable es la correlación tan elevada (69%) entre número de incendios forestales y el ciclo de brisas. Por detrás y bastante lejos de este valor se encuentran el ciclo combinado (16%) y los ponientes (14%). Para el caso de la superficie afectada por incendios, la brisa es la situación que presenta más hectáreas quemadas seguida, aunque a gran distancia, por los ponientes y el ciclo combinado, superando ligeramente los ponientes al ciclo combinado.

Según lo anterior, podemos afirmar que la extendida idea entre los medios de comunicación de que los fuegos en la Comunidad Valenciana están producidos por los vientos de poniente no parece estar justificada. Es evidente, por tanto, la utilidad de estudios de las situaciones sinópticas relacionadas con la propagación y/o ignición de los incendios forestales que sirvan de apoyo para la prevención y extinción de los incendios forestales.

El análisis cartográfico, nos ha permitido comprobar que el ciclo combinado destaca como la situación meteorológica más peligrosa para la propagación de incendios en la Comunidad Valenciana debido a que la mayor parte del territorio presenta valores de viento en el rango del 60-100% del promedio del máximo de la situación. Por provincias los resultados del análisis muestran diferencias destacables; así mientras para la provincia de Castellón la situación meteorológica más peligrosa para la propagación de los incendios forestales es la brisa (concretamente la diurna de componente marítima), para las provincias de Valencia y Alicante es el ciclo combinado. La creencia, bastante extendida, de relación estrecha entre ponientes e incendios forestales parece no cumplirse para la provincia de Castellón dado que es el área donde menores valores de riesgo se registran.

Igualmente, la cartografía indica que más del 53% de la superficie forestal presenta alto riesgo de propagación ([figura 5](#)). Los resultados indican una estrecha relación entre el índice

promedio de velocidad del viento para las distintas direcciones y las áreas de riesgo de propagación. De hecho, se confirma que la situación sinóptica de ciclo combinado se revela como la más peligrosa para la propagación de incendios forestales en la Comunidad Valenciana (con un 57% de la superficie forestal con riesgo extremo) seguida, aunque a distancia, por la de poniente (24%) o brisas. Por zonas, el índice de riesgo es extremo en el interior de Valencia en las situaciones de ciclo combinado y poniente, el círculo montañoso que circunda el óvalo de Valencia, lo cual está en consonancia con la gran incidencia de incendios en estas zonas; el Norte de la Comunidad Valenciana tiene un índice extremo de propagación bajo la situación de brisa y de ciclo combinado y, en la provincia de Alicante, los índices de propagación extremos se presentan con las situaciones de ciclo combinado quedando el poniente en un índice mayoritariamente medio-alto. Durante el cambio de dirección entre la brisa terral y la brisa marina (de 8 a 10h UTC) el mapa de riesgo muestra un esquema similar al de la brisa terral aunque con disminución de la zona de riesgo extremo. En la transición de brisa marina a terral se observa una disminución de las zonas de riesgo extremo que se reducen a dos pequeñas áreas en el Norte de Castellón y prelitoral Norte de Alicante.

5. Conclusiones

A tenor de los resultados obtenidos de los diversos análisis realizados podemos afirmar:

- 1.- Se han podido determinar las situaciones sinópticas de mayor riesgo en cuanto a los incendios forestales en la región de estudio, en nuestro caso la Comunidad Valenciana.
- 2.- Se han definido e identificado las áreas de mayor riesgo de propagación de incendios forestales para cada una de las situaciones meteorológicas definidas.
- 3.- Queda patente la necesidad/utilidad de un buen conocimiento de las situaciones meteorológicas favorables a la ignición y/o propagación de incendios forestales
- 4.- La cartografía de vientos de alta resolución para situaciones sinópticas de riesgo es un instrumento novedoso y con un gran potencial para apoyo en la planificación por parte de los poderes públicos en la lucha contra el fuego.
- 5.- Esta herramienta permite mejorar los índices de riesgo de incendio basados solamente en modelos de combustible, condicionantes orográficos u otros parámetros meteorológicos como la humedad (o incluso el viento) que no contemplan la evolución de la situación sinóptica. Los índices de riesgo de ignición se pueden combinar con los que muestran el riesgo de propagación y la evolución posterior de las zonas donde se haya producido la ignición.
- 6.- Por último, los autores consideran que el uso de esta técnica de combinación de cartografía de viento de alta resolución con modelos de combustible presenta un gran potencial para su aplicación en tiempo real a la extinción de incendios forestales.

Finalmente cabe destacar que este trabajo muestra la aplicación de una metodología novedosa en el estudio del riesgo de incendios forestales como resultado de un proyecto de investigación aplicado a la Comunidad Valenciana y no el propio desarrollo del método. Sin duda, esta metodología sería aplicable a otras áreas donde sea de interés el estudio del riesgo de incendios forestales previa identificación de las condiciones sinópticas propicias para el desarrollo y propagación de aquellos.

Referencias bibliográficas

- Andre, J.C.S. and Viegas, D.X. (1998): "An unifying theory on the propagation of the fire front of surface forest fires". *III International Conference on Forest Fire Research; 14th Conference on Fire and Forest Meteorology; Luso; 16/20 November 1998*, vol. 1, pp. 259-279
- Brotak, E.A., and Reifsnyder, W.E. (1976): "Synoptic study of the meteorological conditions associated with extreme wildland fire behaviour". *Proceedings of the Fourth National Conference on Fire and Forest Meteorology*, November 16-18, St Louis, Missouri, US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report RM-32.
- Carrega, P., (1991): "A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France". *Int. Jour. Wildland Fire*, 1, 79-86.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. and Williams, D. (1991): *Fire in forestry. Volume I. Forest Fire behaviour and effects*. Krieger Publishing Company, 450 pp.
- Chuvieco E., Salas F., Carvacho L. y Rodríguez F., (1999): "Integrated fire risk mapping". *Remote Sensing of Large Wildfires*, en Chuvieco, E. (Ed.). Berlin, Springer, 61-84 pp.
- Gómez, J. (2000): "La experiencia de la Comunidad Valenciana: el proyecto de implantación de un sistema integrado de gestión de las actuaciones de prevención de incendios forestales". *I Jornada Técnica sobre Prevención de Incendios Forestales*. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia (policopiado).
- Instituto para la Conservación de la Naturaleza (1988): *Experimentación de un nuevo sistema para la determinación del peligro de incendios forestales derivados de los combustibles: Instrucciones de cálculo*. Madrid, Ministerio de Agricultura.
- Johnson, E. A. (1992): *Fire and vegetation dynamics: Studies from the North American boreal forest*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Mediavilla, J., Alcover, V., Tamayo, J., Correa, B. (1994): "Índice Meteorológico de Peligrosidad de los Incendios Forestales". *Nota Técnica n.º 2 del GPV de Valencia*. Valencia, Instituto Nacional de Meteorología, Centro Meteorológico Territorial de Valencia, ACL-94, pp. 1-83.
- Millán, M. M., Artíñano, B., Alonso, L., Navazo, M., and Castro, M. (1991): "The effect of mesoscale flows the regional and long-range atmospheric transport in the western Mediterranean area", *Atmos. Environ.*, 25A, pp. 949-963.
- Millán, M. M., Artíñano, B., Alonso, L., Castro, M., Fernandez-Patier, R., and Goberna, J. (1992): *Meso-meteorological Cycles of Air Pollution in the Iberian Peninsula, (MECAPIP)*, Contract EV4V-0097-E, Air Pollution Research Report 44, (EUR N° 14834) CEC-DG XII/E-1, Rue de la Loi, 200, B-1040, Brussels, 219 pp.
- Millán, M. M., Salvador, R., Mantilla, E., and Artíñano, B. (1996): "Meteorology and photochemical air pollution in southern Europe: experimental results from EC research projects", *Atmos. Environ.*, 30, pp. 1909-1924.
- Millán, M. M., Salvador, R., Mantilla, E., and Kallos, G. (1997): "Photo-oxidant dynamics in the Western Mediterranean in Summer: Results from European Research Projects", *J. Geophys. Res.*, 102, pp 8811-8823
- Millán, M. M., Estrela, M.J., and Badenas, C. (1998): "Meteorological processes relevant to forest fire dynamics on the Spanish Mediterranean coast", *Journal of Applied Meteorology*, 37, 83-100.

Estrella Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

- Moreno, J. M., and W. C. Oechel, Eds., (1994): *The role of fire in Mediterranean type ecosystems*. Springer Verlag, 201 pp.
- Pausas J. and Vallejo R., (1999): "The role of fire in European Mediterranean", *Remote Sensing of Large Wildfires*, en Chuvieco, E. (Ed.). Springer, Berlin, pp. 4-16.
- Rothermel, R.C. (1983): *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-143.
- Santoni, P.A., Balbi, J.H. and Dupuy, J.L. (2000): "Dynamic modelling of upslope fire growth", *Int. J. Wildland Fire*, 4, 9, pp. 285-292.
- Simeoni, A., Santoni, P.A., Larini, M. and Balbi, J.H. (2001): "On the wind advection influence on the fire spread across a fuel bed: modelling by a semi-physical approach and testing with experiments", *Fire Safety Journal* 36 (5), pp. 491-513.
- Trabaud, L. (1982): "Effects of past and present fire on the vegetation of the French Mediterranean region". *Symp. Dynamics, Manage. Medit. Type Ecosyst. USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. PSW-58*, pp. 450-457. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn.
- Vallejo V.R. (1996, Ed.): *La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana*. Valencia, Fundación CEAM, 601 pp.
- Vallejo V.R. and Alloza J.A. (1998). "The restoration of burned lands: the case of Eastern Spain". In: Moreno J. M. (Ed.): *Large forest fires*. Leiden, The Netherlands, Backhuys Publishers, pp. 91-108.
- Van Wagner, C.E. (1987): "Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System". *Technical Report 35*. Ottawa, Canadian Forestry Service, pp.1-37.
- Velasco, L. (2001): "Planificación de redes de áreas cortafuegos para la defensa del monte frente al riesgo de incendios forestales", *Foresta* n° 13, pp. 128-132.
- Vélez, R. (2000): *La defensa contra incendios forestales*. Madrid, Ed. Mundi Prensa.
- Viegas, D.X. (1998): "Forest fire propagation", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 356, pp. 2907-2928.
- Viegas, D.X., Ribeiro, P.R. and Maricato, L. (1998): "An empirical model for the spread of a fireline inclined in relation to the slope gradient or to wind direction". *III International Conference on Forest Fire Research; 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*; Luso; 16/20 November 1998; Vol. 1, pp. 325-342.

TABLAS

Tabla 1. Configuración del modelo RAMS para las simulaciones de viento

	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Coordenadas centro	38° N, 0° E	40.7° N, 0.2°W	40.64° N, 0.03° E
Dimensiones X,Y (km)	1760x1440	295x295	81x55
Número de puntos (X,Y)	44x36	44x44	62x42
Incremento de X (km)	40	6.7	1.3
Incremento de Y (km)	40	6.7	1.3
Incremento de T (seg)	60	15	3.75

Tabla 2. Riesgo de propagación de incendios según combustible y pendiente

Pendiente	Modelo de combustible		
	1, 2	8	4,5,6 y7
< 12%	Bajo	Bajo	Medio
12-35%	Bajo	Bajo	Alto
>=35%	Medio	Medio	Alto

Tabla 3. Integración de riesgo por medio físico (combustible y pendiente) y velocidad del viento.

Riesgo Físico	Índice Velocidad Viento				
	0-20%	20-40 %	40-60%	60-80 %	80-100%
Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto
Medio	Bajo	Medio	Medio	Extremo	Extremo
Alto	Medio	Alto	Alto	Extremo	Extremo

Tabla 4. Número de incendios y porcentaje asociados a las situaciones sinópticas y número de días y porcentaje de ocurrencia de las situaciones sinópticas

1980-2001	Incendios		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Total	
	Nº	%	Días	%	Días	%	Días	%	Días	%	Días	%
Brisas	4193	69.4	408	61.8	513	75.2	527	77.2	426	64.5	1874	69.8
C. Combi	992	16.4	177	26.8	132	19.3	103	15.1	119	18.0	531	19.7
Ponientes	859	14.2	75	11.3	37	5.4	52	7.6	115	17.4	279	10.3

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

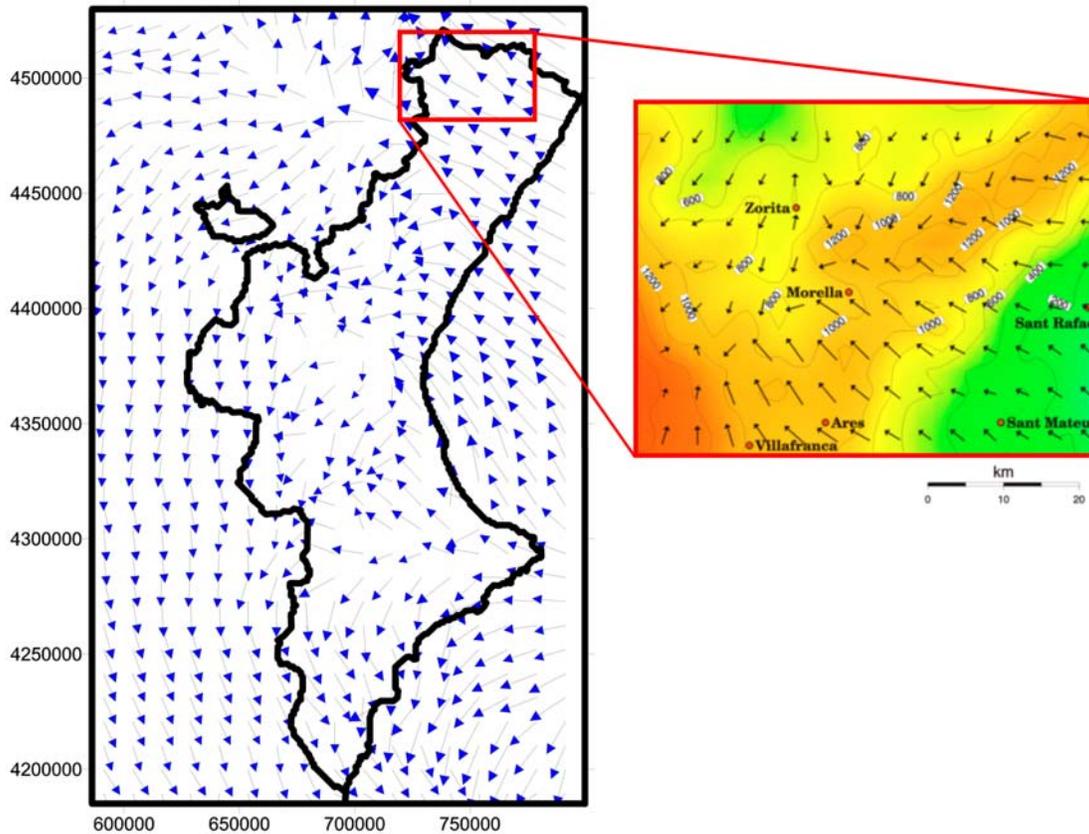


Figura 1. Campos de viento resultantes de la modelización con el RAMS para toda la Comunidad Valenciana y detalle de área del Norte de la Comunidad.

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

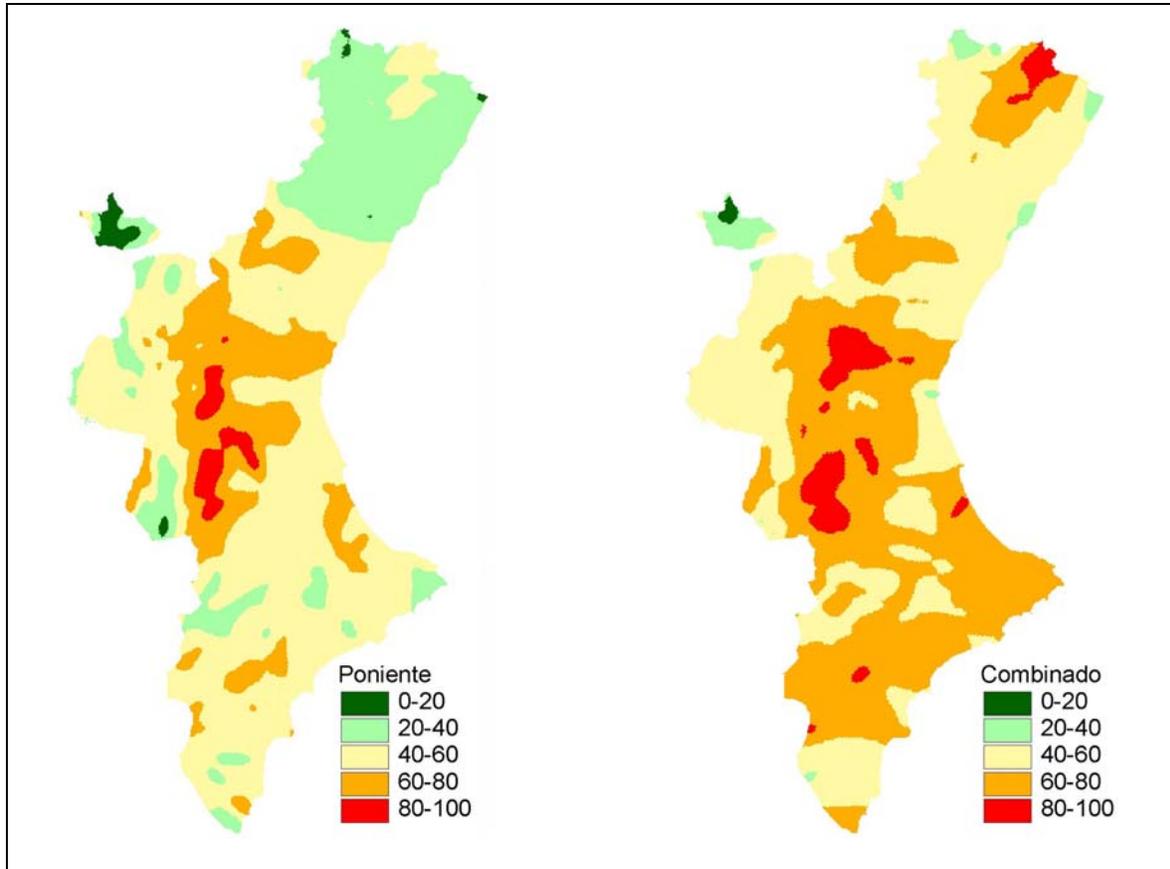


Figura 2. Mapas de índice de vientos normalizados para poniente y ciclo combinado.

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

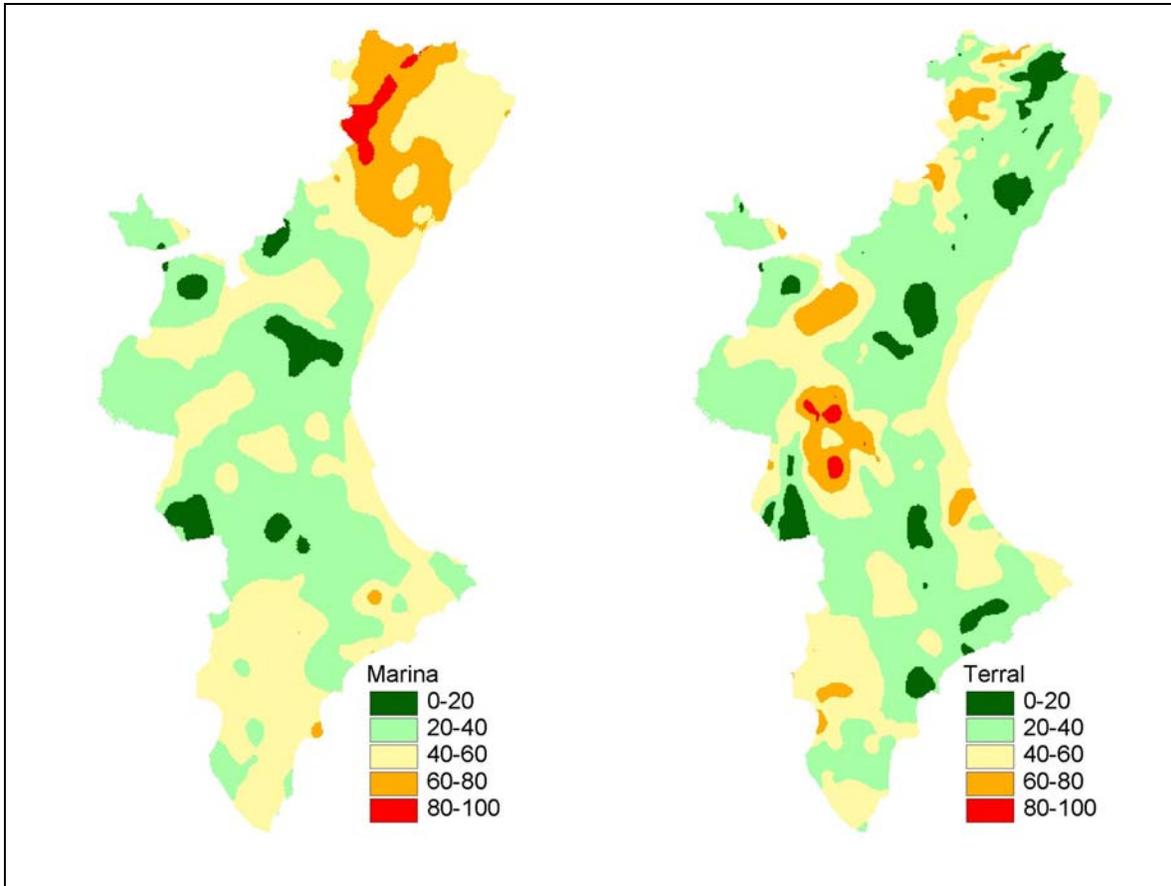


Figura 3. Mapas de índice de vientos normalizados para los casos de brisa marina y terral.

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

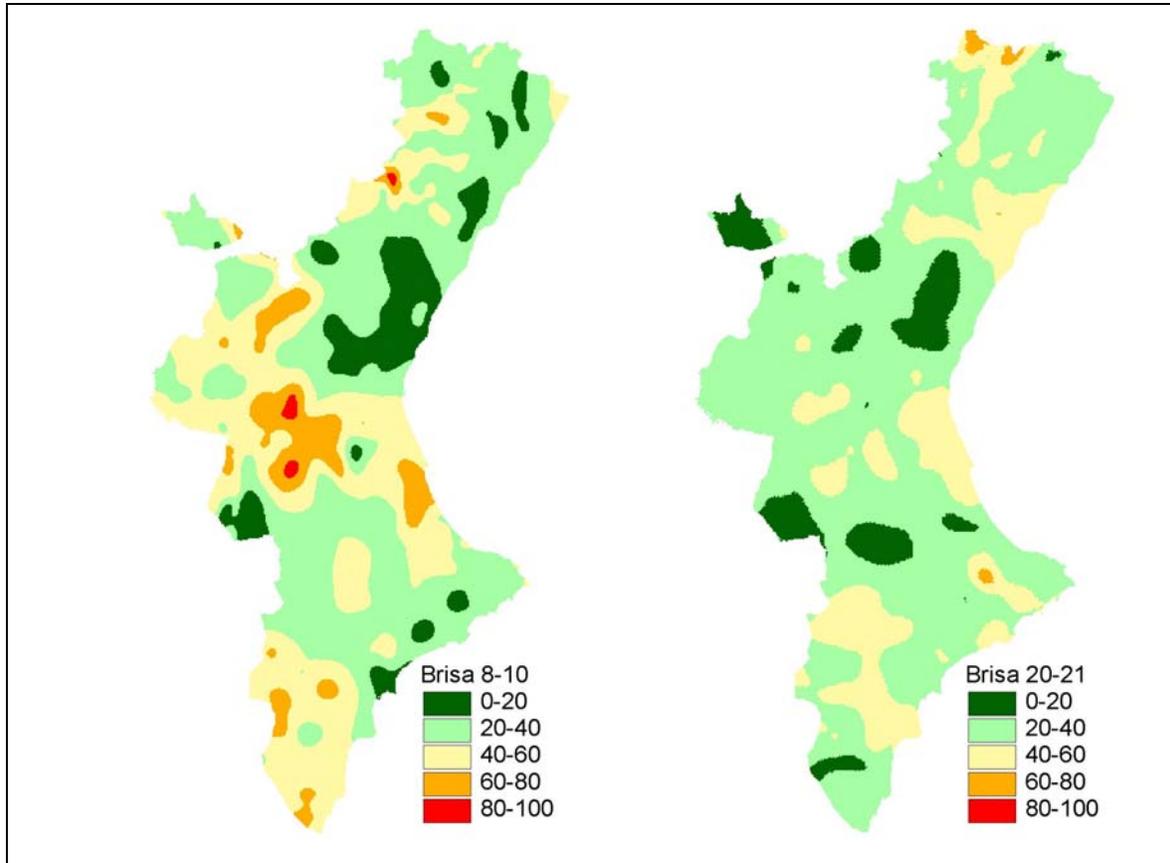


Figura 4. Mapas de índice de vientos normalizados para los periodos de transición de la brisa, de 08 a 10 horas y de 20 a 21 horas.

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

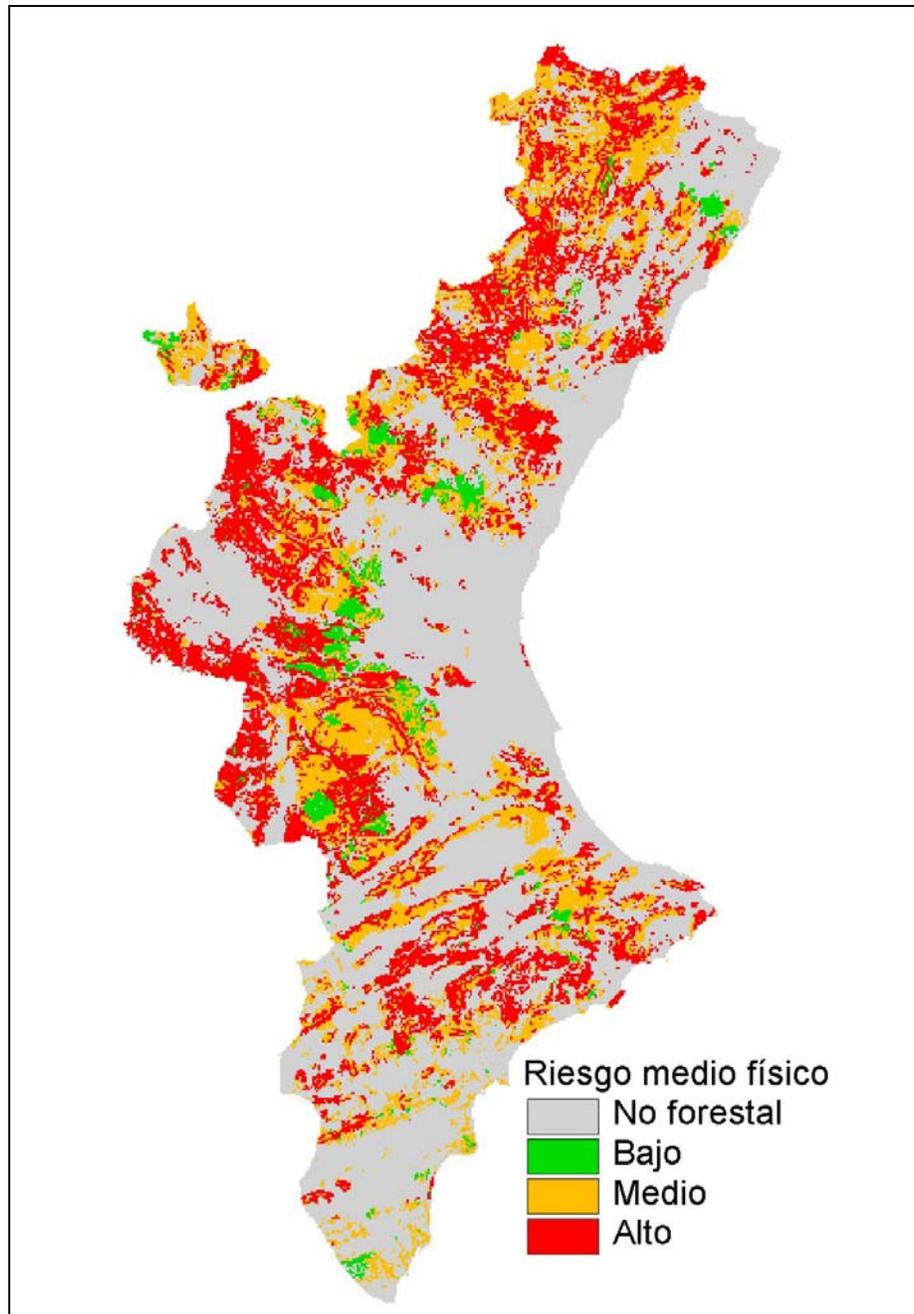


Figura 5. Mapa de riesgo físico (masa forestal + pendiente) de propagación de incendios forestales.

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

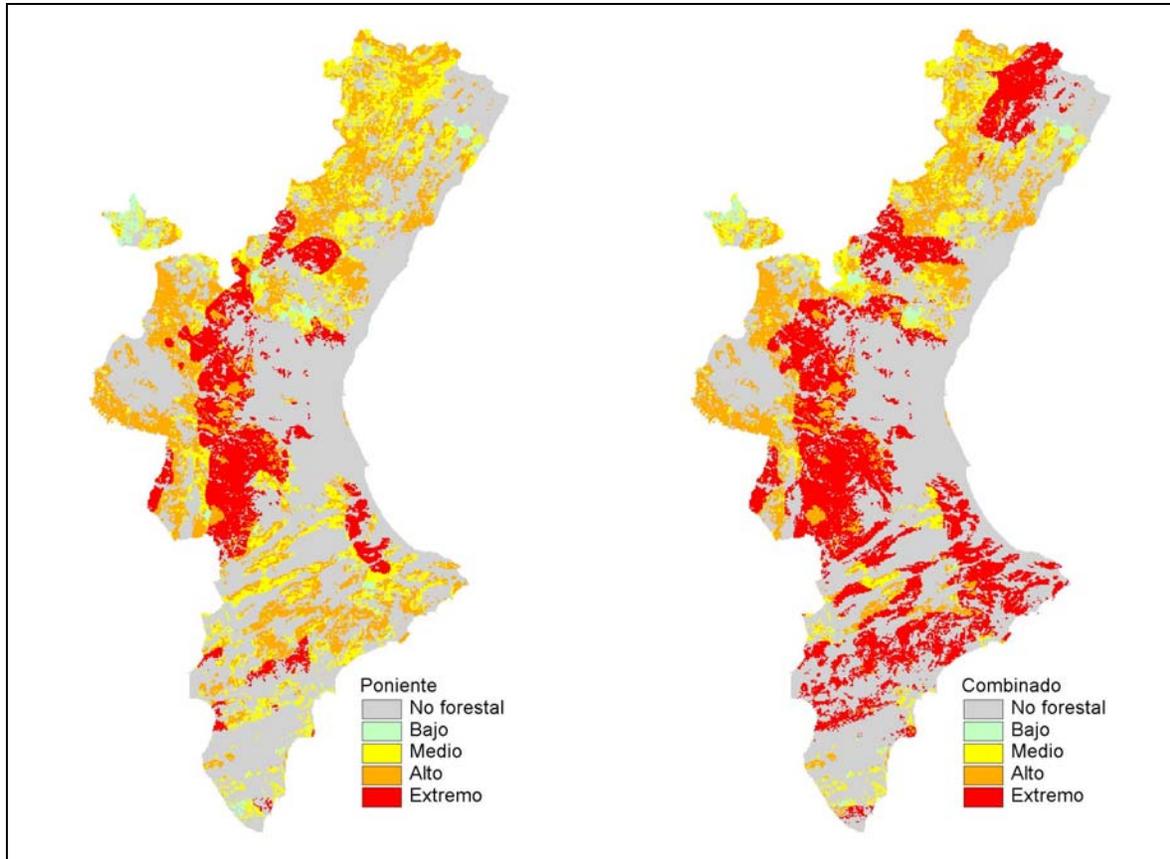


Figura 6. Mapa de riesgo de propagación de incendios forestales para poniente y ciclo combinado.

Estrela Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

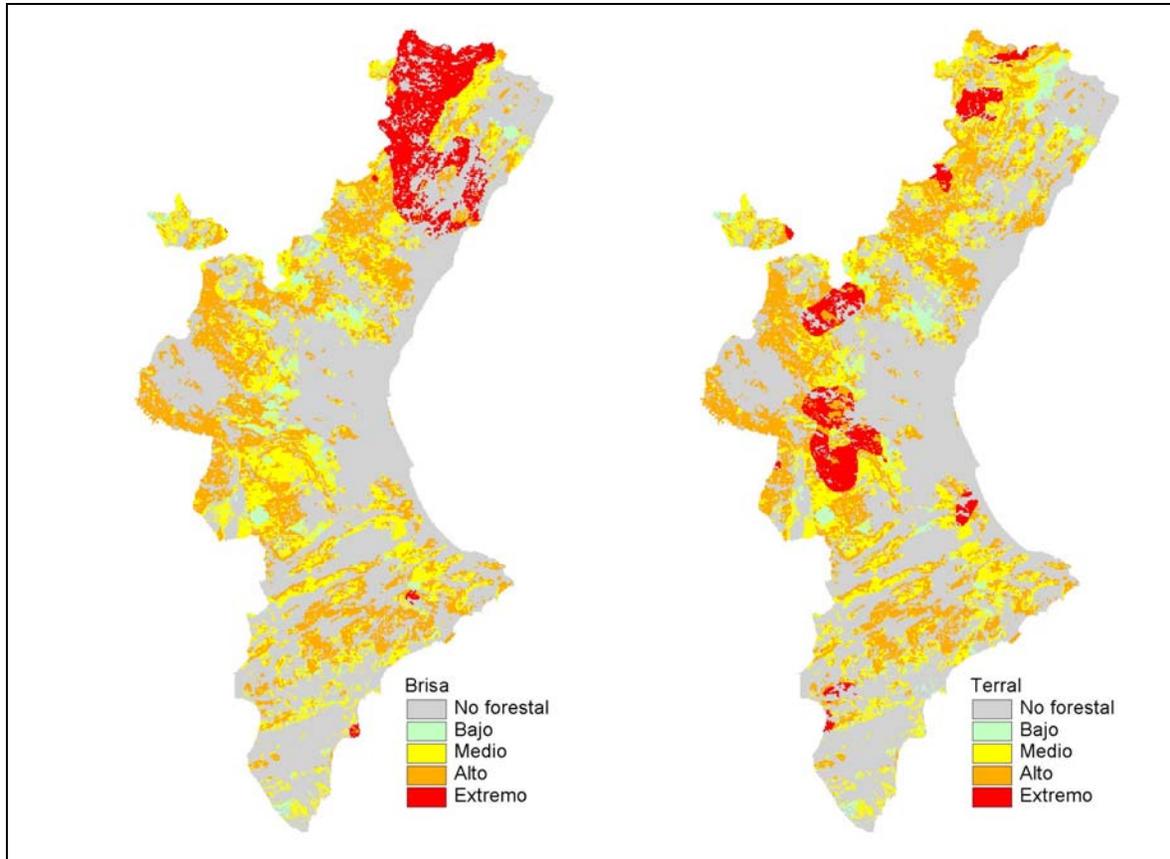


Figura 7. Mapa de riesgo de propagación de incendios forestales para los casos de brisa marina y terral.

Estrella Navarro, M. J. et al. (2005): "Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157

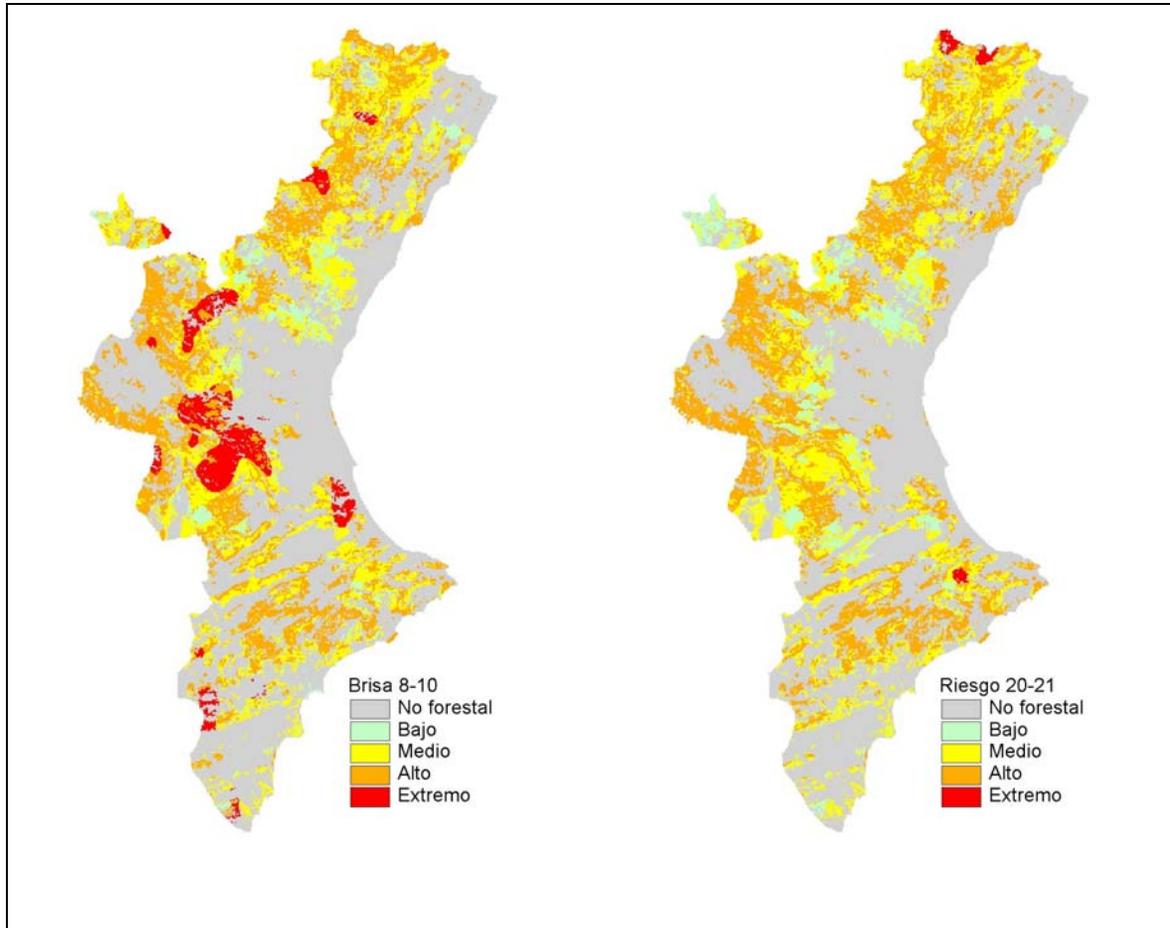


Figura 8. Mapa de riesgo de propagación de incendios forestales para los periodos de transición de la brisa, de 08 a 10 horas y de 20 a 21 horas.