

Mapas de Riesgo de Incendios Forestales Basados en Experimentación Factorial*

Germán Bianchini¹, Ana Cortés¹, Tomàs Margalef¹, Emilio Chuvieco², Andrea Camia³ y Emilio Luque¹

¹ Dept. de Arquitectura de Computadores y Sistemas Operativos,
Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Barcelona) España
german.bianchini@aomail.uab.es, {ana.cortes,tomas.margalef,emilio.luque}@uab.es

² Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. España
emilio.chuvieco@uah.es

³ European Commission - DG Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability
andrea.camia@jrc.it

Resumen La valoración del riesgo en los incendios forestales es un tema realmente significativo para la elaboración de políticas que permitan prevenir y mitigar los efectos de los incendios de una manera eficiente. Esta valoración usualmente se basa en la probabilidad de ignición debida a factores meteorológicos o humanos, pero no suele considerar el riesgo de propagación cuando el fuego ya ha comenzado. Para evaluar el riesgo de propagación es necesario aplicar algún modelo de comportamiento para simular el frente de fuego. Sin embargo, este riesgo de propagación debe ser evaluado considerando múltiples escenarios. Por lo tanto, la cantidad de simulaciones que debe llevarse a cabo es enorme y resulta necesario aplicar técnicas de cómputo de altas prestaciones para que la metodología sea factible. En este artículo se describe un método para crear mapas de riesgo de propagación basados en experimentación factorial. La metodología fue aplicada en escala de la Europa meridional durante la temporada de verano de 2004.

Palabras claves: Procesamiento paralelo, Mapas de riesgo, Incendios forestales, Experimentación factorial, Simulación, Propagación

El presente trabajo está dirigido al Workshop del tema *Procesamiento Distribuido y Paralelo* (WPDP).

* This work has been supported by the Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) under contract TIC2001-2592 and by the European Commission under contract EVG1-CT-2001-00043 SPREAD.

1. Introducción

Los incendios forestales son un problema muy serio y cada año causan daños significativos alrededor del mundo, tanto desde el punto de vista ecológico, como social, económico y humano. Estos siniestros son particularmente peligrosos cuando las condiciones meteorológicas son extremas (sequías, temporadas de calor, vientos fuertes, etc.). Por ejemplo, el verano de 2003 presentó temperaturas muy elevadas en el área del Mediterráneo y, por citar un ejemplo, sólo en Portugal se quemaron 420000 hectáreas y murieron 20 personas. En octubre de 2003, un fuerte viento causó un gran incendio en California que incendió 300000 hectáreas, destruyendo 3361 casas y matando a 26 personas.

En este contexto, los mapas de riesgo de incendios se vuelven una herramienta muy importante para las autoridades, para prevenir estos accidentes. Sin embargo, la mayoría de las técnicas de generación de mapas de riesgo evalúan el peligro de ignición basándose sólo en las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, lluvias, etc.) y en factores humanos (negligencia, incendios premeditados, etc.), pero no toman en cuenta el peligro de propagación en sí mismo una vez que el fuego se ha iniciado. Esta característica es muy importante, debido a que provee una información más completa para determinar el posible comportamiento del incendio y determinar aquellas regiones donde el inicio de una combustión puede ser más peligrosa de acuerdo al posible índice de riesgo o intensidad de llama.

El riesgo depende de factores estáticos tales como la pendiente del terreno o el tipo de vegetación en una región particular, pero también depende de ciertos factores dinámicos como el contenido de humedad en la vegetación o las condiciones del viento. Por lo tanto, no es posible determinar con antelación las condiciones reales cuando se presenta un incendio. Como resultado, no se puede evaluar de antemano el índice de propagación efectivo o la intensidad de llama en una situación real.

Se han desarrollado diversos modelos de propagación para predecir el comportamiento de un incendio [1,2,5,6]. Estos modelos requieren un conjunto de parámetros, incluidos el tipo de vegetación, el contenido de humedad, las condiciones del viento y demás, y proporcionan la evolución del frente de fuego en pasos de simulación. Sin embargo, en el caso de estudio, no hay un conjunto de parámetros de entrada a ser aplicados al modelo de propagación debido a que, como hemos visto, no es posible conocer el valor de cada parámetro cuando el fuego comienza.

Considerando esta incertidumbre, nuestro método para determinar el posible índice de propagación e intensidad de llama se basa en análisis estadístico. El método propuesto toma los parámetros estáticos de la región bajo consideración (pendiente y tipo de combustible) y aplica análisis estadístico mediante la simulación de la propagación del incendio, considerando para esto un amplio rango de combinaciones de parámetros para determinar el índice de propagación promedio y la altura de la llama en una región particular. Este índice de propagación e intensidad de llama representan la peligrosidad de la propagación potencial para dicha región.

Esta metodología requiere que cada región sea representada por una pendiente promedio y un tipo de combustible dominante. Por lo tanto, el tamaño de las celdas no debe ser muy grande, de forma tal que permita alcanzar un alto grado de uniformidad.

La metodología es prometedora, pero no resulta útil si sólo se aplica en una escala local: debe ser aplicada a escala regional, nacional o incluso internacional (i.e. la región Mediterránea). Por lo tanto, toda la región bajo consideración debe ser dividida en un conjunto de áreas uniformes, y entonces debe aplicarse la metodología a todas las áreas dentro de la región como un todo, para proporcionar un mapa de peligrosidad de propagación.

Nuestro sistema, llamado S^2F^2M [3] (de la sigla inglesa *Statistical System for Forest Fire Management*) no sólo alimenta al simulador con los valores “conocidos”, sino que efectúa un

conjunto de simulaciones, en vez de una, utilizando combinaciones de aquellos parámetros de entrada de los cuales se tiene menos certeza acerca de su valor.

Este método requiere una gran cantidad de cómputo para poder obtener una conclusión a partir de los datos utilizados. Esto se debe a que es preciso ejecutar un gran número de simulaciones. Para hacer frente a este problema hemos usado un esquema de programación paralela (*master-worker*), implementado usando MPI [8] como librería de paso de mensajes y ejecutado sobre un cluster Linux.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: La experimentación factorial y los conceptos básicos del sistema son explicados en la sección 2. La implementación del sistema es descrita en la sección 3. La sección 4 incluye el resultado obtenido durante la experimentación. Finalmente, la sección 5 reporta las principales conclusiones.

2. Experimentación factorial

Este trabajo ha sido abordado usando el concepto de **experimento diseñado**. En esta clase de experimento se realizan cambios deliberados o intencionados en las variables controladas de un sistema o proceso. Se observan los resultados obtenidos y luego se hace una inferencia o toma de decisión acerca de las variables responsables de los cambios. Cuando son varios los factores potencialmente importantes (i.e. clima, velocidad del viento, etc.), la mejor estrategia es usar algún tipo de **experimento factorial**. Un experimento factorial es aquel en el que los factores se hacen variar al mismo tiempo [7] (por ejemplo cambiando las condiciones del viento, contenido de humedad y parámetros de la vegetación). Cada situación particular resultante de una combinación de valores es denominada **escenario**.

En nuestro caso específico, cada escenario representa una combinación particular de parámetros de entrada, pero es importante notar que la pendiente del terreno y el tipo de combustible son características estáticas en nuestra área de estudio. Por lo tanto, los parámetros que identifican un escenario particular son las condiciones del viento y el contenido de humedad de la vegetación.

Por cada escenario es posible simular el comportamiento del fuego, aplicando algún modelo de propagación, y determinar la altura de llama y el índice de propagación. Esta información representa la peligrosidad potencial de un área específica en un determinado escenario. Mientras más rápida la propagación y más intensa la llama, más peligroso el incendio.

Es importante notar que no hay relación directa entre índice de propagación e intensidad de llama, debido a que hay tipos de combustible que presentan un alto índice de propagación con baja intensidad de llama, y vice versa.

El próximo paso es generalizar este razonamiento y aplicarlo a diferentes escenarios. En este caso, para un terreno representando un modelo de combustible y una cierta pendiente, un escenario distinto representa el mismo terreno pero con otra combinación de humedad en el combustible.

Por consiguiente, enfocamos nuestro análisis en el procedimiento de generar posibles escenarios.

2.1. Generación de escenarios

Nuestro sistema utiliza un simulador de comportamiento de fuego como una caja negra, el cual debe ser alimentado con un conjunto de parámetros para operar correctamente. Un conjunto particular de estos parámetros es lo que define un escenario. Estos parámetros se corresponden con los parámetros propuestos en el modelo de Rothermel [9].

Para cada uno de estos parámetros, hemos de definir un rango y un valor de incremento con el cual recorrer el intervalo planteado. Para un parámetro dado i (al cual llamaremos *Parámetro _{i}*) el intervalo e incremento asociado se expresa como:

$$[Cota_Inferior_i, Cota_Superior_i], Incremento_i$$

Luego, de cada parámetro i , es posible obtener un número C_i (cardinalidad del dominio del parámetro), el cual es calculado de la siguiente manera:

$$C_i = ((Cota_Superior_i - Cota_Inferior_i) + Incremento_i) / Incremento_i$$

Finalmente, a partir de la cardinalidad de cada parámetro, es posible calcular el número total de escenarios obtenidos de las variaciones de todas las posibles combinaciones.

$$\#Escenarios = \prod_{i=1}^n C_i$$

siendo n el número de parámetros.

Una vez que han sido generados todos los escenarios para una área particular (pendiente y tipo de combustible) y que se han evaluado el índice de propagación y la intensidad de llama para cada escenario, es necesario determinar tales índices de forma general para dicha área, es decir, considerando los resultados parciales hallados.

2.2. Índice de propagación e intensidad de llama de un área particular

Debido a que tenemos un conjunto de valores correspondientes a cada escenario, para determinar el índice de propagación y la intensidad de llama de un área es necesario aplicar algún tipo de método estadístico. Una posibilidad sería seleccionar el valor máximo que representa el área bajo estudio, pero esta aproximación señalaría el escenario más peligroso ya que tal situación se correspondería con un caso extremo que no es completamente representativo. El promedio de estos resultados es más factible como un valor indicativo de dicha área.

3. Implementación

Los conceptos descritos anteriormente han sido implementados en un sistema operacional llamado S^2F^2M , que incorpora un kernel de simulación y aplica la metodología para evaluar el promedio del índice de propagación y de la altura de llama evaluando las posibles condiciones del terreno (pendiente y modelos de combustible). Este sistema ha sido desarrollado sobre un cluster de PC's LINUX usando MPI [8] como librería de paso de mensajes.

3.1. El kernel de simulación

S^2F^2M usa como núcleo de simulación el simulador propuesto por Collin D. Bevins, el cual está basado en la librería fireLib [4]. **fireLib** es una librería que encapsula el algoritmo de comportamiento de incendios BEHAVE [1]. En particular, este simulador usa una aproximación basada en celdas y una relación con los vecinos colindantes para evaluar si una celda se ha quemado y en qué momento fue alcanzada por el fuego.

El simulador acepta como entrada mapas de terreno, características de la vegetación, el viento y el mapa de ignición.

La salida generada por el simulador consiste de dos mapas del terreno. En el primero, cada celda es rotulada con su tiempo de ignición; en el segundo, cada celda es rotulada con su altura de llama. Esta información debe ser usada para calcular el índice de propagación y un promedio entre las alturas de llama.

Para calcular el índice de propagación, se divide la distancia entre el punto de ignición inicial y cada celda por el tiempo particular de dicha celda (en el cual fue alcanzada por el fuego). Este cálculo se repite por cada celda en el terreno para determinar el máximo valor de propagación. Este máximo hallado será usado como índice de propagación para tal particular situación (Figura 1).

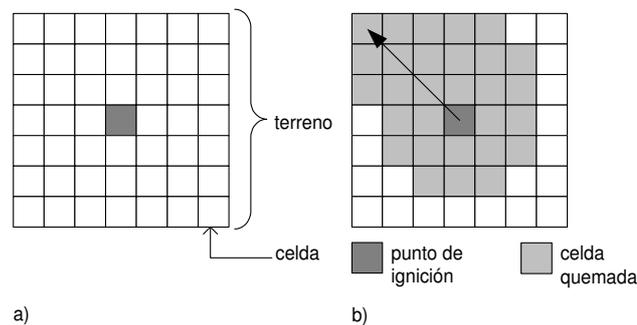


Figura 1. Metodología para calcular el índice de propagación. a) Punto de ignición en el centro; b) Búsqueda de máxima propagación

La intensidad de llama (altura) para un terreno dado se calcula evaluando el promedio de intensidad de llama en todo el terreno.

Para evaluar el índice de propagación en un escenario particular (combinación de parámetros de entrada) en un terreno dado, es necesario simular la propagación del fuego y entonces estimar el índice de propagación y la altura de llama promedio. Este cálculo es sencillo y no demanda mucho cómputo, de modo que puede ser efectuado en un PC en pocos segundos.

No obstante, debemos recordar que la cantidad de escenarios a ser evaluados por cada terreno (pendiente y tipo de combustible) es muy grande. Por lo tanto, el tiempo de cómputo total requerido para estimar todos los índices de propagación es extremadamente grande. El uso de sistemas paralelos/distribuidos surge como la única solución para hacer factible esta aproximación.

3.2. Implementación paralela

S^2F^2M debe efectuar una cantidad importante de cálculos debido a que debe realizar una simulación por cada combinación resultante de parámetros ($\#Escenarios$) sobre cada terreno. Esto conlleva un substancial coste en tiempo.

Para reducir el tiempo de ejecución hacemos uso de múltiples recursos computacionales trabajando en paralelo para lograr la eficiencia requerida. Teniendo en mente la naturaleza del problema que S^2F^2M pretende resolver, creemos que una arquitectura de tipo *master-worker* es idónea para tal propósito, pues de esta manera un procesador principal puede calcular cada combinación de parámetros y enviar dicha información a un conjunto de workers (figura 2). Éstos se encargarán de efectuar la simulación de cada escenario y calcularán el índice de propagación y la altura de llama, retornando estos datos al *master*.

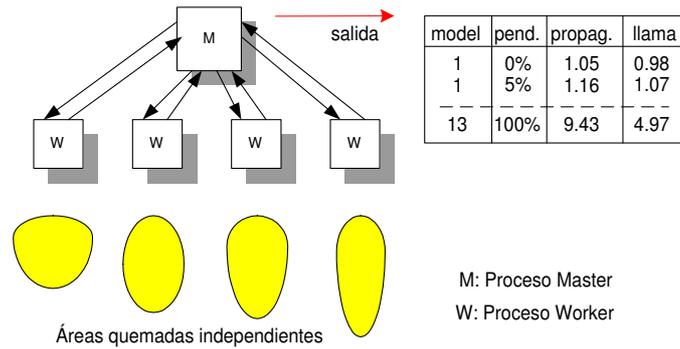


Figura 2. Ejemplo conceptual con cuatro escenarios

Nuestro sistema posee una estructura bien definida. El proceso *Master* tiene una etapa de recepción de datos (ficheros de parámetros, ficheros de terreno, tiempos de simulación, etc.). Seguido hay una etapa de inicialización para las estructuras de datos. En el bucle principal, el *Master* distribuye escenarios a los *workers*, espera por los resultados y envía más datos a los *workers* que van terminando los escenarios asignados (si quedan escenarios por simular). Cada escenario representa una combinación de parámetros de entrada. Cuando todos los escenarios para un terreno dado han sido calculados, el proceso *master* calcula el promedio del índice de propagación y altura de llama para el terreno, y comienza a procesar el nuevo terreno. Finalmente, provee una tabla listando el índice de propagación y la altura de llama por cada terreno (*modelo*, *pendiente*) como salida.

Por su parte, la estructura de los *workers* es complementaria. Cada uno tiene una etapa de recepción de datos (para inicializar dimensiones del terreno e inclinación). Seguido a esto, ingresan en un bucle en el cual reciben escenarios por parte del *Master*. Cuando el siguiente escenario ha sido recibido, el *worker* activa la función de simulación para calcular el comportamiento del fuego. Una vez que se ha completado la simulación, evalúa el índice de propagación máximo para dicho escenario, y de igual forma con la altura de llama. Estos resultados los envía al proceso *master*, y el *worker* vuelve a ingresar en la etapa de recepción.

4. Resultados de la experimentación

Para proporcionar el mapa de riesgo de propagación creamos un conjunto de *plots* prototipo, considerando todos los modelos de combustible de la clasificación de Rothermel y un cierto porcentaje de inclinación del terreno (desde 0 a 100 %, con paso de 5 %) (figura 3). De esta forma, el número total de *plots* generados fue 273. Cada *plot* consiste de una matriz de celdas consistente de 11 columnas x 11 filas (cada celda midiendo 328,083 x 328,082 pies). El punto de ignición se ubicó en el centro del *plot*. Por cada *plot* se usaron muchas combinaciones de parámetros de entrada para simular el comportamiento del incendio. Del total de casos se calculó el índice de propagación y la altura de llama. Los parámetros usados en las variaciones fueron: humedad del combustible muerto en 1 hora, humedad del combustible muerto en 10 horas, humedad del combustible muerto en 100 horas, y humedad del combustible herbáceo vivo. Los rangos aplicados a estos parámetros y la precisión considerada fueron aquellos establecidos por el simulador Farsite [5]. Estos valores se muestran en la tabla 1.

Considerando estos rangos y pasos, el número de simulaciones por *plots* fue 4300, y el número total de simulaciones fue 1173900. Por cada resultado independiente (escenario), se obtuvo un valor de altura de llama como el promedio entre la altura de llama de cada celda. Entonces, en

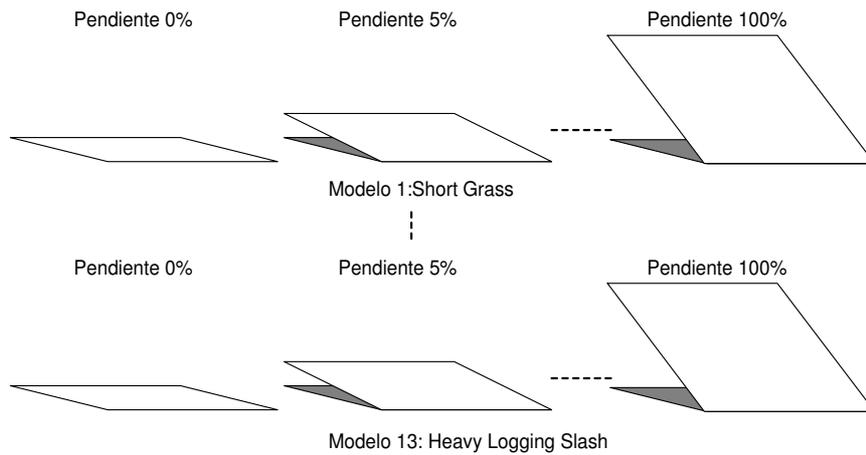


Figura 3. Generación artificial de *plots*

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Incremento
Humedad combustible muerto en 1 h	0,03	0,12	0,01
Humedad combustible muerto en 10 h	0,04	0,13	0,01
Humedad combustible muerto en 100 h	0,05	0,14	0,01
Humedad combustible vivo herbáceo	0,07	1,7	0,3

Tabla 1. Valores de parámetros

la tabla final, el valor mostrado es el promedio para todos los diferentes casos resultantes de las combinaciones de contenido de humedad. Estos valores se muestran en la figura 4. Puede observarse que cada modelo tiene un rango de altura bien definido, con un mínimo y un máximo. Sin embargo, es interesante notar que, en ciertos casos (por ejemplo, los modelos 3 o 4), éste no es completamente lineal o incremental de acuerdo a la pendiente del terreno.

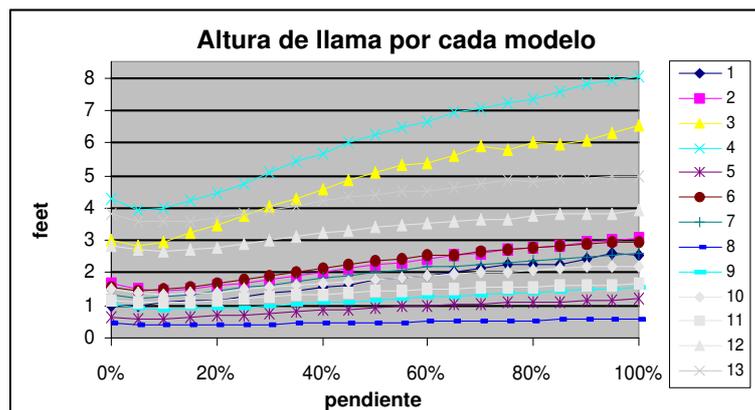


Figura 4. Altura de llama por cada modelo de combustible

Por otra parte, cada índice de propagación hallado es promediado para calcular un valor representativo. Estos valores son presentados en la figura 5. En este diagrama, podemos ver que mientras más inclinado es el terreno, más rápida es la propagación. Por lo tanto, más peligroso el incendio.

Observando las dos figuras a la vez es posible concluir que la altura de la llama no tiene relación directa con el índice de propagación. Por ejemplo, el modelo 1 exhibe un alto índice de

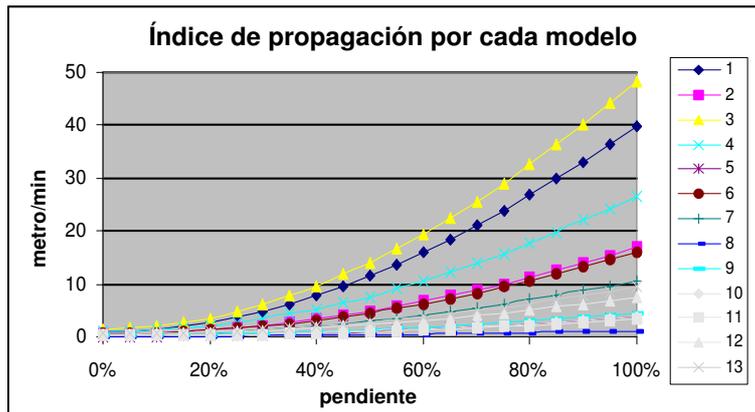


Figura 5. Índice de propagación por cada modelo de combustible

propagación en pendientes elevadas, pero su altura promedio de llama no es particularmente grande. Este comportamiento debe considerarse para evitar conclusiones erróneas: en un incendio forestal, esto podría ser muy peligroso. Estos resultados pueden aplicarse en una escala Europea. Para hacerlo precisamos un mapa de Europa dividido en celdas que incluyan la pendiente promedio y el modelo de combustible dominante en cada celda. Una vez que el mapa está disponible, es posible elaborar dos diferentes mapas: uno para el índice de peligrosidad de propagación y otro para la peligrosidad de propagación de acuerdo a la altura de llama. Estos mapas se muestran en la figura 6 y en la figura 7.

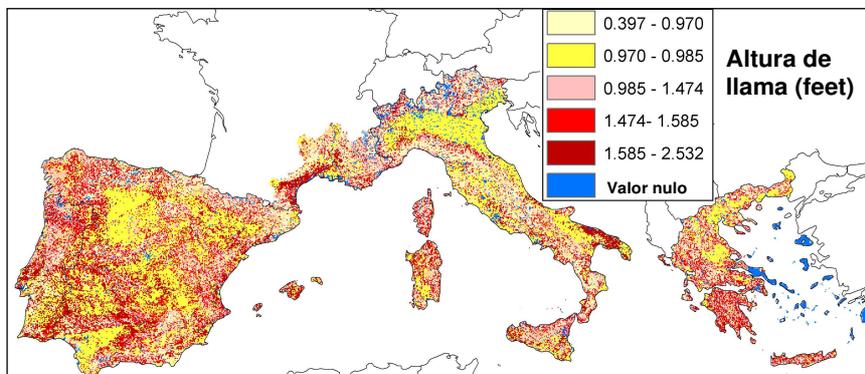


Figura 6. Mapa de riesgo de altura de llama de la EUMed

5. Conclusiones

En este artículo, hemos descrito el uso de una herramienta llamada S^2F^2M con el objetivo de construir un mapa de riesgo de propagación de incendios forestales para la Europa meridional. La peligrosidad de la propagación se estima en base a dos características de propagación diferentes: índice de propagación y altura de llama. El cálculo del riesgo de propagación se basa en experimentación factorial, en la cual todas las posibles combinaciones de parámetros son simuladas y los resultados son promediados. Este cálculo requiere una cantidad considerable de simulaciones y por lo tanto es necesario aplicar técnicas de paralelización para elaborar los

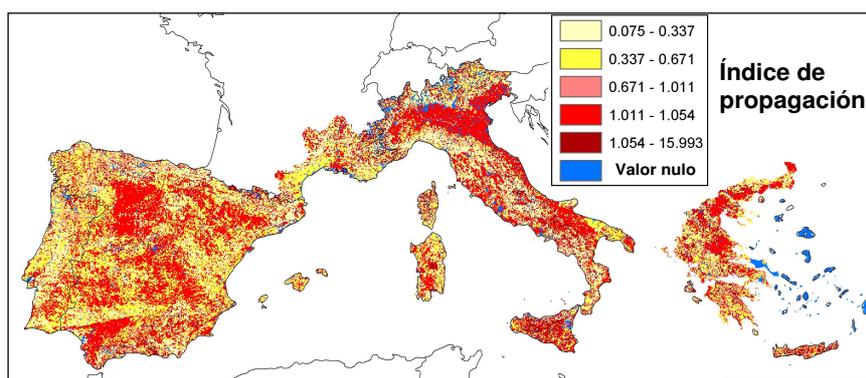


Figura 7. Mapa de riesgo de índice de propagación de la EUMed

mapas de riesgo en un tiempo razonable. Tal paralelización fue llevada a cabo aplicando un esquema *master-worker*.

La utilización de procesamiento paralelo abre nuevas posibilidades para la aplicabilidad de la metodología en ambientes con estimación de incendios forestales en tiempo real.

Referencias

1. Andrews P. L. "BEHAVE: Fire Behavior prediction and modeling systems - Burn subsystem, part 1". General Technical Report INT-194. Ogden, UT, US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station; 1986.
2. Andrews, Patricia L.; Bevins, Collin D.; Seli, Robert C. "BehavePlus fire modeling system, version 2.0: User's Guide". Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2003.
3. G. Bianchini, A. Cortés, T. Margalef and E. Luque. " S^2F^2M - Statistical System for Forest Fire Management". LNCS 3514, pp. 427-434. 2005.
4. Collins D. Bevins, "FireLib User Manual & Technical Reference", 1996.
<http://www.fire.org>.
5. Finney, Mark A.. "FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation". Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p. 1998.
6. ADAI Products: FIRESTATION
<http://www.adai.pt/products/firestation/>
7. Douglas C. Montgomery, George C. Runger, "Applied statistics and probability for engineer", John Wiley & Sons, New York. D.L. 1994 ISBN 0471010219
8. MPI: The Message Passing Interface Standard
<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/>
9. Rothermel, R. C., "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels", USDA FS, Ogden TU, Res. Pap. INT-115, 1972.