



DESARROLLO DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS AVANZADAS PARA LA MEJORA DE LA PREVENCIÓN, LA EFICACIA Y LA SEGURIDAD EN MATERIA DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES (SATFOR)

PROYECTO: SATFOR
CÓDIGO: SOE2/P2/E457

DOCUMENTO DE TRABAJO

DOCUMENTO:
FECHA REV:

PROYECTO SATFOR

DOCUMENTO DE TRABAJO

“Revisión del estado del arte en modelización de la propagación de incendios forestales”

18/05/2011



UE/EU - FEDER/ERDF

ÍNDICE

CONTENIDO	1
TIPOS DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO	2
TÉCNICAS DE SIMULACIÓN	4
MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO DE SUPERFICIE	7
MODELOS EMPÍRICOS	7
MODELOS SEMI - EMPÍRICOS	10
MODELOS FÍSICOS	15
MODELOS PROBABILÍSTICOS	16
SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO DE COPA	17
MODELOS PREDICTIVOS DE FUEGO DE PAVESAS	24
COMPORTAMIENTO DEL CONTRAFUEGO	26
SISTEMA DE PREDICCIÓN CAMPBELL	27
MODELIZACIÓN METEOROLÓGICA	30
BIBLIOGRAFÍA	37

CONTENIDO

En este documento se pretende exponer una revisión resumida del estado del arte de los diferentes tipos de modelos de comportamiento del fuego, tanto de superficie como de copa. Se incluyen igualmente, unas notas sobre diferentes modelos predictivos de fuego de pavesas, así como los resultados iniciales de algunos estudios desarrollados sobre contrafuego. Se procede a desarrollar un resumen de diferentes modelos meteorológicos de utilidad en el análisis del comportamiento del fuego.

TIPOS DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO

En numerosas áreas científicas, el uso de modelos para representar el sistema físico se ha convertido en una estrategia común. Estos modelos reciben algunos parámetros como inputs representando las condiciones particulares, y aportan outputs que representan la evolución del sistema. Usualmente, estos modelos se integran en herramientas de simulación que se pueden ejecutar desde ordenadores.

Un caso particular en el que los modelos pueden ser de gran utilidad, es el de la predicción del comportamiento del fuego forestal. Los modelos, en general, presentan una serie de limitaciones, fundamentalmente como consecuencia de la necesidad de un gran número de parámetros de entrada (inputs). En muchos casos, estos parámetros están asociados a cierto grado de incertidumbre, debido a la imposibilidad de medir todos ellos en tiempo real, y a la necesidad de estimarlos mediante mediciones indirectas. Además, en la mayoría de los casos, estos modelos no se pueden resolver de una manera analítica, y deben ser abordados mediante la aplicación de métodos numéricos, que son solamente aproximaciones de la realidad.

El fuego es el resultado de una reacción química de oxidación, llamada combustión, donde a un material combustible se le aplica calor con presencia de oxígeno y se obtiene energía, dióxido de carbono, vapor de agua y residuos sólidos. Por tanto para que se produzca fuego se necesitan tres elementos: calor, combustible y oxígeno. Un incendio forestal es el fuego que se expande sin control sobre especies arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, siempre que no sean características del cultivo agrícola o fueren objeto del mismo y que no tengan calificación de terrenos urbanos, afectando esta vegetación que no estaba destinada para la quema.

Dentro de la compleja actividad de la gestión de incendios forestales se pueden introducir sistemas informáticos que ayuden a la hora de la toma de decisiones. Estos sistemas deben incluir 3 modelos básicos: modelos de riesgo que ayudaran en tareas de prevención, modelos de identificación, para que cuando se produzca un fuego sea rápidamente detectado y se puede intervenir rápidamente y finalmente en caso de que el fuego llegue a propagarse se empleará un modelo de comportamiento del fuego con el objetivo de que ayude a la extinción de este al saber previamente como se va a comportar.

En este documento se van a analizar principalmente los modelos de comportamiento del fuego existentes. El comportamiento de un fuego viene determinado por su velocidad de propagación, intensidad o cantidad de calor que libera, temperatura y geometría de la llama. El comportamiento de un fuego va a depender de 3 factores fundamentales: meteorología, topografía y combustible y que por tanto todo sistema de modelización del comportamiento del fuego deben considerar.

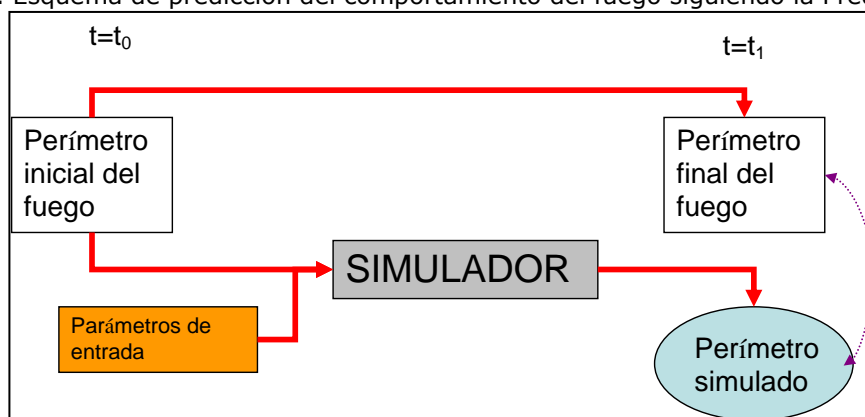
En el caso de los modelos de predicción del comportamiento del fuego, existen numerosos parámetros de entrada (características de los combustibles, condiciones

ambientales, variaciones del terreno) muchos de los cuales presentan un comportamiento dinámico, por lo que no pueden ser estimados de manera precisa en tiempo real. Por lo tanto, las simulaciones pueden dar lugar a errores en muchos casos, debido a la imprecisión de la estimación de estos parámetros de entrada. El acercamiento más prometedor para la reducción de esta incertidumbre es el uso de datos en tiempo real y la aplicación de métodos computacionales para el análisis de la desviación de la predicción con respecto al comportamiento real, la determinación de los valores de los parámetros de entrada para reproducir el comportamiento del fuego, y el uso de estos valores para el siguiente paso en la simulación.

Para la predicción del comportamiento del fuego se han desarrollado numerosos modelos de propagación. Estos modelos pueden ser utilizados para el desarrollo de herramientas y simuladores con utilidad para la predicción y combate de los incendios forestales (Finney, 1998; Andrews, 2009). Estos modelos requieren un conjunto de parámetros de entrada, incluyendo tipo de vegetación, contenido de humedad, condiciones del viento, entre otras, aportando información sobre la evolución de la línea de fuego en diferentes pasos de la simulación, entre otros posibles outputs.

En la predicción del comportamiento del fuego, generalmente se han venido utilizando Predicción Clásica (Malen, 2009). Este tipo de predicción consiste en la utilización de algún simulador del comportamiento existente para la evaluación de la posición del fuego después de haber transcurrido un tiempo determinado. Ejemplos de estos tipos de predicción son los programas BEHAVE y FARSITE, que describiremos con mayor detalle posteriormente. Este acercamiento clásico está esquematizado en la siguiente figura (Figura 1).

Figura 1. Esquema de predicción del comportamiento del fuego siguiendo la Predicción Clásica

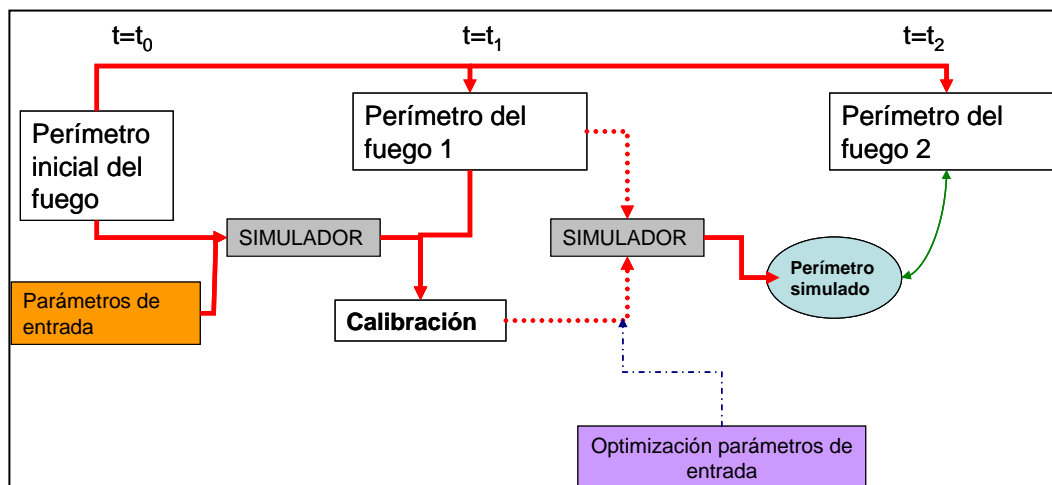


La predicción clásica presenta ciertas limitaciones, y el error que puede presentarse cuando se aplica, no sólo proviene de limitaciones de los modelos de

predicción, sino también de la implementación del simulador, principalmente por la falta de precisión de los parámetros de entrada.

Como una segunda opción de clasificación, tenemos la predicción Guiada por Datos (Malen, 2009). En este tipo de clasificación se integran diferentes métodos en los que se hace uso de técnicas de optimización con el objetivo de calibrar el conjunto de parámetros de entrada. El objetivo del proceso de optimización es el de encontrar un conjunto de parámetros de entrada que, si alimentan al simulador, describirían de la mejor forma posible en comportamiento real previo del fuego. Este acercamiento clásico está esquematizado en la siguiente figura (Figura 2). En la actualidad se está empezando a implementar este tipo de modelos de predicción en simulaciones de comportamiento del fuego.

Figura 2. Esquema de predicción del comportamiento del fuego siguiendo la Predicción Guiada por Datos



En la predicción del comportamiento del fuego, los simuladores existentes en la actualidad utilizan fundamentalmente aproximaciones empíricas y semi-empíricas para usos operacionales, entrenamiento y simulaciones del comportamiento del fuego en tiempo real (Johnston et al., 2005). La aproximación física es utilizada principalmente para la descripción de los procesos físicos y químicos que tienen lugar durante la combustión y propagación del fuego.

TÉCNICAS DE SIMULACIÓN

Todos los simuladores, aparte del modelo de comportamiento del fuego, utilizan una técnica para la representación del fuego en el terreno (Albright y Meisner, 1998). Este puede ser visto como una malla de celdas, y la propagación del fuego de una celda a otra dependerá de un conjunto de reglas o de probabilidades de ocurrencia. Otra

forma es modelar la línea de fuego por funciones matemáticas sobre un terreno continuo. Podemos describir tres técnicas principales de simulación (Malen, 2009: bond percolation, propagación elíptica y autómatas celulares.

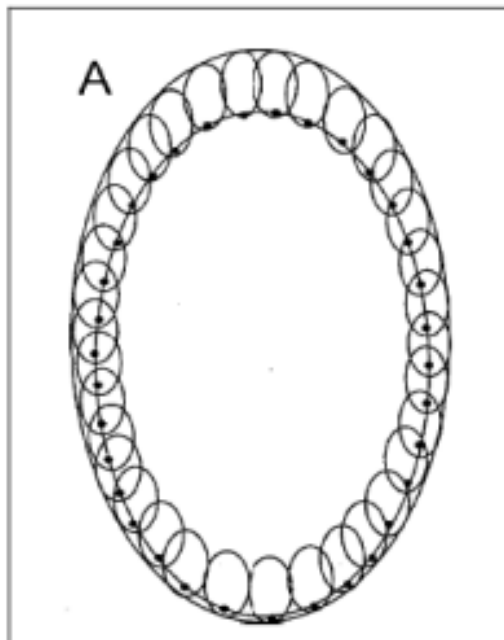
Bond Percolation

En este caso el terreno se representa mediante una malla de celdas cuadradas, triangulares o rectangulares. El fuego se propaga de una celda a otra que contenga combustible mediante el ajuste de probabilidad de propagación realizado por el usuario en función de factores como viento, topografía y diferencia entre los tipos de combustibles. Al no basarse en las características físicas de la propagación, la efectividad de la simulación es limitada a condiciones similares para las que la técnica fue sintonizada.

Prolongación elíptica

En este caso, el terreno es un medio continuo, y en el se implementa el crecimiento del fuego utilizando las propiedades del comportamiento del fuego junto a las propiedades matemáticas de las elipses. Se definen puntos espaciados regularmente en el perímetro de la línea de fuego donde cada uno representa un fuego pequeño independiente propagándose de forma elíptica, siendo el perímetro del incendio a cada paso, el definido por las pequeñas elipses (Figura 3). Se han desarrollado ecuaciones diferenciales que describen la propagación del fuego para combustibles heterogéneos, topografía no uniforme y clima variable.

Figura 3. Esquema de la propagación elíptica en el que puntos espaciados regularmente en el perímetro de la línea de fuego representan un fuego pequeño independiente propagándose de forma elíptica, siendo el perímetro del incendio a cada paso, el definido por las pequeñas elipses



En su implementación se usa el principio de Huygens, donde el frente de fuego se propaga como un polígono en continua expansión, definido por una serie de vértices, que pueden servir como fuente de una expansión elíptica independiente. Para conocer como será la propagación de cada vértice es necesario saber:

- La orientación del vértice en el frente del fuego en términos de componentes diferenciales x , y .
- La dirección de máxima velocidad de propagación del fuego.
- La forma de un fuego elíptico determinado por las condiciones locales de dicho vértice en términos de las dimensiones a , b y c .

Autómatas celulares

En este caso el terreno es representado como una malla de celdas, donde cada una contiene un conjunto de valores (pendiente, orientación, tipo de combustible, etc.). La probabilidad de propagar el fuego a cada celda se determina por el mismo conjunto de reglas para todas ellas. Como las reglas que gobiernan la propagación del fuego

pueden estar basadas en aspectos físicos de la ignición, esta técnica puede ser aplicada a un amplio rango de condiciones.

Se asumen condiciones uniformes en secciones pequeñas del terreno y, discretizando el tiempo, el fuego se propaga sobre la malla haciendo viajar el fuego desde una celda a sus vecinas. Se iteran sucesivos pasos, siempre comenzando desde la celda con menor tiempo de ignición, propagando así el fuego a las celdas vecinas. Mediante esta forma de propagación, en malla rectangular, de una celda a sus ocho vecinas, la forma final del fuego queda distorsionada. Existen aproximaciones para reducir estas distorsiones, como es incrementando el número de vecinos de cada celda (celdas hexagonales), modificando la forma de las celdas, modificando el tamaño de las celdas conforme el fuego avanza (malla de multi-resolución dinámica), etc.

MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO DE SUPERFICIE

Los modelos de predicción de comportamiento del fuego forestal de superficie se pueden dividir en tres clases:

- Modelos físicos
- Modelos semi – empíricos
- Modelos empíricos
- Modelos probabilísticos

MODELOS EMPÍRICOS

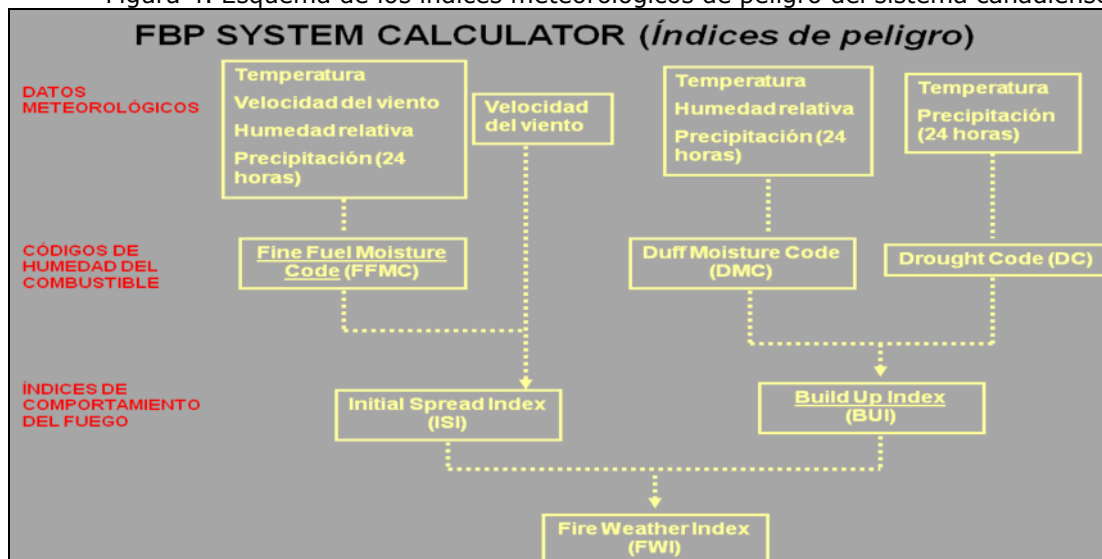
Estos modelos se basan en información recogida en incendios, ya sea en fuegos reales o en quemas experimentales. Las predicciones obtenidas mediante este tipo de modelos suelen ser más ajustadas a la realidad que en el resto de modelos.

Sin embargo, los fundamentos físicos de las relaciones obtenidas entre variables no son siempre claros, y las predicciones deben aplicarse sólo en el rango de las variables que fueron medidas, por lo que su extrapolación a otros casos es difícil. Además, en la experimentación en campo no es posible ejercer un control sobre las variables influyentes en el fenómeno, y muchas relaciones pueden quedar oscurecidas por colinealidades entre variables explicativas.

Existe software para modelos empíricos obtenidos para incendios de superficie y copa en Canadá (FBP System Calculator), así como para incendios de superficie en Australia (CSIRO Fire Danger and Fire Spread Calculator).

- FBP System Calculator se basa en el modelo empírico del Forestry Canada Fire Danger Group (1992). Mediante este modelo se calcula la velocidad de propagación del fuego, así como el flujo de calor por metro lineal a partir de los índices meteorológicos de peligro canadienses – Figura 4 - (BUI: índice de combustible disponible y FFM: índice de la humedad del combustible fino muerto), tipo de combustible (son modelos de combustible canadienses con escaso parecido a los presentes en la Península Ibérica), velocidad del viento y pendiente, así como elevación del terreno, latitud-longitud y fecha para la determinación del contenido de humedad foliar.

Figura 4. Esquema de los índices meteorológicos de peligro del sistema canadiense



- CSIRO Fire Danger and Fire Spread Calculator, basado en los modelos empíricos iniciados por McArthur (1966) en los que se obtiene la velocidad de avance del frente de llamas en pastizales, en función de la temperatura y humedad relativa ambiental, fracción de materia muerta y velocidad del viento a 10 m de altura, así como la velocidad del frente de llamas en incendios superficiales bajo arbolado en función de la temperatura y humedad relativa ambiental, velocidad del viento a 10 m de altura, pendiente, días después de la lluvia, precipitación hasta las 9 de la mañana, índice de sequía Keetch-Byram (este índice se describirá posteriormente en el apartado de meteorología) y combustible disponible inferior a 6 mm.

Aparte de estos programas informáticos, en la bibliografía podemos observar diferentes ecuaciones obtenidas a partir de quemas experimentales para la determinación de la velocidad de propagación en incendios forestales en ecosistemas

mediterráneos europeos. Para incendios de matorrales podemos destacar los siguientes modelos:

- Modelo de Trabaud (1979). Ecuaciones desarrolladas a partir de fuegos experimentales para vegetación de garriga de *Quercus coccifera* de 0.5 – 1 m de altura. Desarrolló dos ecuaciones para determinar la velocidad de propagación (R; m/min) en estas masas, la primera, función de la velocidad del viento a 2 m de altura (U_2 ; cm/s) , y la altura de la vegetación (H; cm):

$$R = 0,066 U_2^{0,439} H^{0,345} \quad r^2 = 0,71$$

- La segunda ecuación es función de la velocidad del viento a 2 m de altura (U_2 ; cm/s), y la altura de la vegetación (H; cm) y humedad del combustible en porcentaje del peso verde (m; %):

$$R = (5,72 U_2^{0,400} H^{0,352})/m^{1,12} \quad r^2 = 0,77$$

- Modelo de Baeza (2002). Desarrolla a partir de quemas experimentales en *Ulex parviflorus* en el Levante. La velocidad de propagación (R; m/min) en este caso se calcula mediante una ecuación lineal de la humedad del combustible aéreo (FM; %):

$$R = 0,03677 - 0,000407 FM \quad r^2 = 0,69$$

- Modelo Vega et al., (2000). En el Centro de Investigación Forestal (CIF) - Lourizán se han desarrollado un gran número de quemas experimentales en el NO de la Península Ibérica en formaciones de *Ulex sp.*, *Chamaespartium tridentatum* y *Erica sp.* Se ha desarrollado una ecuación para determinar la velocidad de propagación del fuego (R; m/min) que depende de la velocidad del viento a 1,7 m de altura ($U_{1,7}$; m/s), altura del matorral (H; m) y pendiente del terreno en tanto por uno (s):

$$R = 4,84 U_{1,7}^{1,13} H^{0,49} \exp(0,77 s)$$

- Otra variante desarrollada por Vega (2001) para matorrales del NO de la Península Ibérica calcula la velocidad de propagación (R; m/min) a partir de la velocidad del viento a 1,7 m de altura ($U_{1,7}$; m/s), cobertura del matorral en tanto por uno (cob) y altura del matorral (H; m):

$$R = 1,94 (U_{1,7} + e^s)^{1,12} cob^{-0,83} H^{0,49}$$

- Modelo Vega et al., (2006). Combinando datos del CIF – Lourizán y la Universidad de Tras os Montes, se obtuvo una ecuación de velocidad de propagación (R; m/min) para matorrales del norte de Portugal y Galicia, como función de la velocidad del viento a 6 m de altura (U_6 ; m/s) y la pendiente del terreno en tanto por uno (s):

$$R = 1,43 U_6^{1,15} \exp(0,039 s) \quad r^2 = 0,70$$

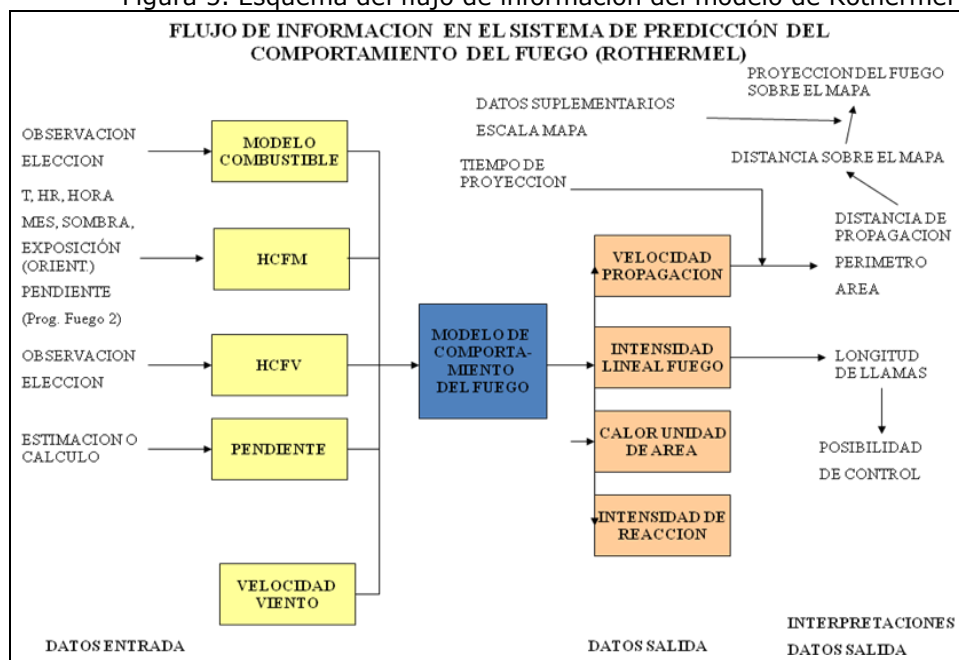
Para incendios bajo arbolado podemos destacar el modelo desarrollado por Fernandes et al., (2008) para sotobosque bajo *Pinus pinaster*, en el que la velocidad de propagación (R; m/min) se calcula a partir de la velocidad del viento a 1,7 m de altura ($U_{1,7}$; m/s), humedad de los combustibles muertos (ms ; %), pendiente del terreno en tanto por uno (s), y altura del combustible (H ; m):

$$R = 0,773 U_{1,7}^{0,707} \exp(-0,062s - 0,039 ms)H^{0,188} \quad r^2 = 0,75$$

MODELOS SEMI - EMPÍRICOS

Los modelos semi - empíricos se apoyan en los principios físicos básicos, pero integran también información experimental, casi siempre para resolver problemas parciales dentro del modelo, que presentan dificultades extremas en su resolución analítica. De esta variedad de modelos, el más empleado es el sistema de predicción de comportamiento del fuego de Rothermel (1972; 1983), cuyo flujo de información se presenta en la Figura 5. En este modelo se evalúa la energía generada por el fuego, la transmisión de calor desde el fuego al combustible y la energía absorbida por el combustible. En él se tienen en cuenta los combustibles muertos y vivos, así como su humedad. También se consideran los efectos del viento y pendiente en la transferencia de calor, la carga y compactación del combustible, el tamaño de partícula, etc. Todos estos factores determinan la forma y velocidad en que el fuego se propaga.

Figura 5. Esquema del flujo de información del modelo de Rothermel



La base teórica que sirve para explicar la propagación del fuego y su comportamiento se basa en la ecuación:

$$R = \frac{I_r \left(1 + \frac{w}{s} \right)}{\rho_b Q_{ig}}$$

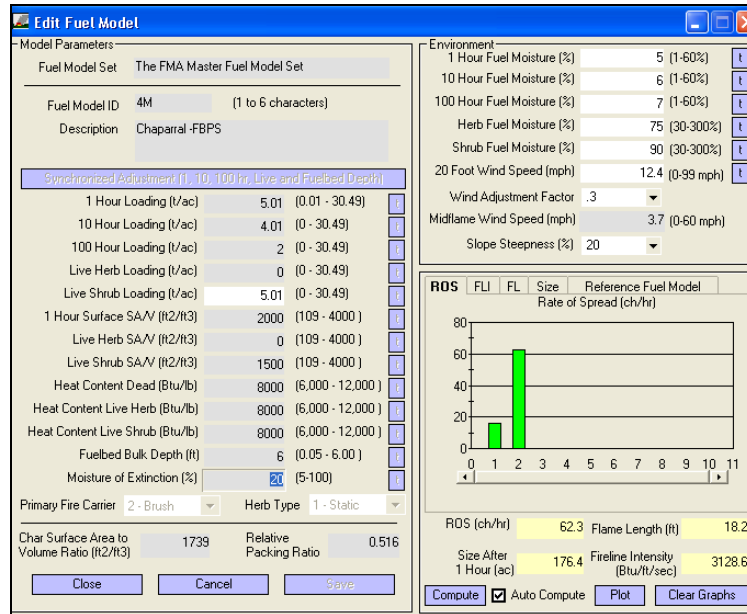
En la que R es la velocidad de propagación del frente de llamas (m/s), I_r es la intensidad de reacción ($\text{kcal m}^{-2} \text{s}^{-1}$) – energía liberada por unidad de superficie del frente de llamas por unidad de tiempo, ξ es la proporción de la intensidad de reacción que realmente calienta las partículas de combustible adyacente hasta la ignición, ϕ_w y ϕ_s son factores adimensionales que tienen en cuenta el efecto del viento y la pendiente, respectivamente, ρ_b la densidad aparente del combustible (kg m^{-3}), ϵ es la proporción de las partículas de combustible que se calientan hasta la temperatura de ignición en el momento en que éstas se inflaman, y Q_{ig} es la cantidad de calor necesario para inflamar 1 kg de combustible (Kcal kg^{-1}). Esta ecuación es una relación entre el calor recibido por el combustible con respecto al calor necesario para llevar este combustible a la temperatura de ignición.

Todas estas variables son, en resumen, función de 10 variables básicas de entrada: altura del combustible, relación superficie/volumen del combustible, calor de combustión, densidad aparente del combustible, humedad del combustible vivo, humedad del combustible muerto, carga disponible, contenido de sílice del combustible, pendiente del terreno y velocidad del viento a media llama.

Este modelo, con algunas modificaciones realizadas por Albini (1976) es el utilizado para la predicción de la velocidad de propagación del fuego de superficie en el programa **BehavePlus** (Andrews, 2009), uno de los programas informáticos de comportamiento (velocidad de propagación del fuego, emisión de pavesas) y efectos (mortalidad del arbolado) del fuego más utilizados. Para todos los cálculos se asume que las condiciones son uniformes y constantes para el período de tiempo que dura la simulación).

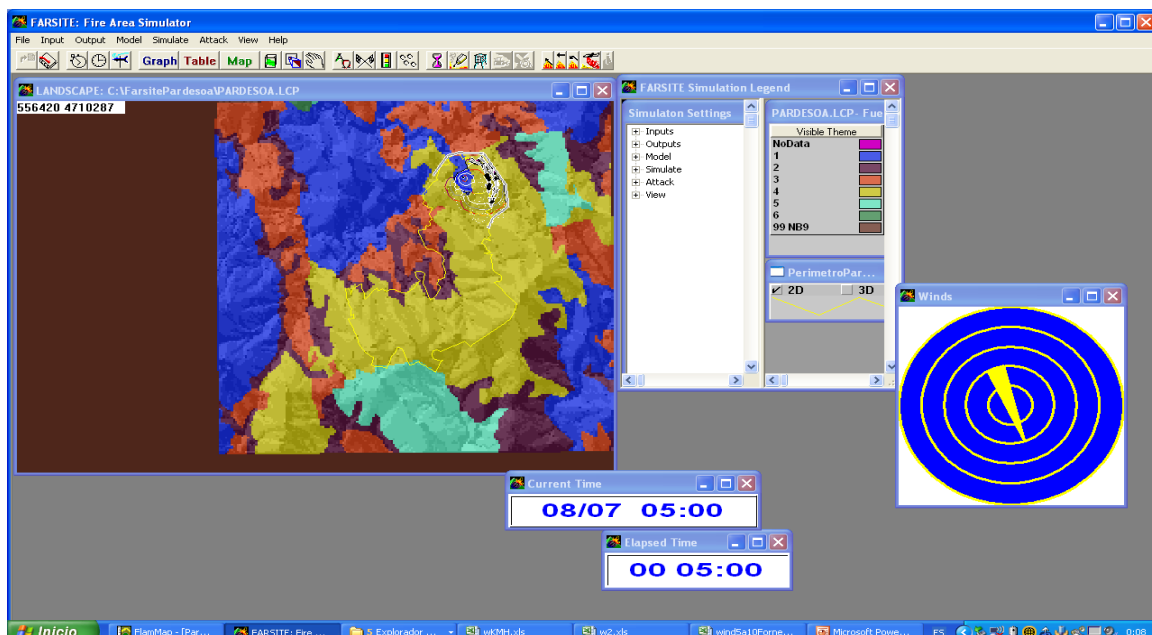
También es empleado en otros programas, como el **FIRESTATION** (Lopes et al., 2002) y **FMAPlus** (Fuel Management Analyst). Este último programa, aparte de presentar diferentes módulos de foto – guías, biomasa de copa, y comportamiento del fuego (superficial y de copa), presenta un módulo de generación de modelos de combustibles específicos (Fuel Model Manager Module) de gran utilidad (Figura 6).

Figura 6. Editor de generación de modelos de combustible específicos del programa FMAPlus



El modelo de comportamiento del fuego de superficie de Rothermel es el empleado también en el programa espacial de comportamiento del fuego **FARSITE** - Figura 7 - (Finney, 1998).

Figura 7. Imagen de la ejecución de una simulación mediante FARSITE

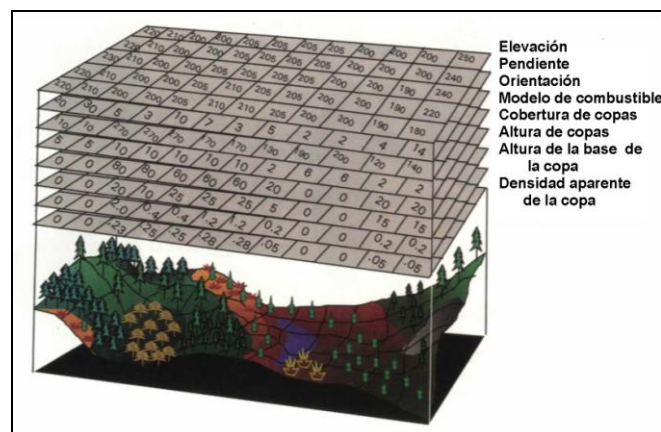


FARSITE es un simulador de crecimiento del fuego en dos dimensiones siguiendo un modelo de propagación elíptica, en el que se considera el terreno como un medio continuo, y no como una malla de celdas. Para simular el crecimiento del frente del fuego se basa en el principio de propagación de ondas de Huygens. Tiene fuertes requerimientos de información organizada de topografía, combustibles y condiciones meteorológicas.

Con la finalidad de analizar el comportamiento del fuego y sus características, este simulador necesita cinco capas esenciales de entrada (elevación, pendiente, orientación, modelos de combustibles y cobertura de copa), introducidas como mapas digitales como ficheros ASCII, creados mediante SIG (Figura 8).

Este programa aplica los cálculos de comportamiento del fuego a condiciones ambientales complejas, en el que los combustibles, condiciones atmosféricas y topografía varían espacial y temporalmente. Se controla la resolución espacial y temporal de los cálculos, y como resultado se obtienen mapas de propagación del fuego y de su comportamiento. La utilidad de este programa es amplia, ya que permite realizar una evaluación a corto, medio y largo plazo de incendios activos, planificar la lucha contra incendios, realizar evaluaciones de alternativas de actuaciones de supresión y planificar actuaciones selvícolas preventivas, y además, con incendios pasados, nos permite validar y ajustar el programa, así como reconstruir y estudiar incendios.

Figura 8. Capas digitales de entrada necesarias para la ejecución de FARSITE



Los mismos requerimientos de información son necesarios para el programa **FlamMap** (Finney et al., 2006), programa de análisis y mapificación de las características de comportamiento de incendio en un paisaje de FARSITE para unas condiciones meteorológicas y de humedad de combustibles constantes, con gran utilidad a la hora de definir zonas preferentes de acciones preventivas.

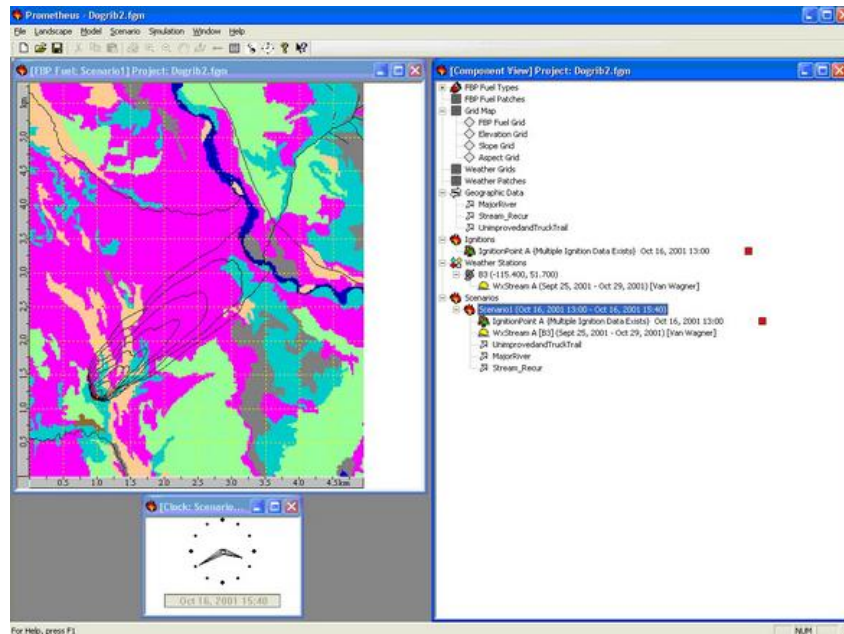
El modelo de comportamiento del fuego de superficie de Rothermel es también el utilizado en **fireLib**. Esta es una librería desarrollada en C para la simulación de incendios forestales en dos dimensiones basados en los algoritmos de BEHAVE. Contiene 13 funciones, pero con solo cuatro de ellas es suficiente para crear un simulador simple y funcional. Este simulador utiliza la técnica de simulación de autómatas celulares para la propagación del fuego. Permite la inclusión de combustibles específicos. En el momento de una simulación, el programa itera sobre cada una de las celdas del mapa, propagando el fuego de una celda a otra hasta que la intensidad del fuego no es suficiente como para propagarse a una celda vecina, o se llega a un borde del terreno. Los pasos que se computan se resumen en la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 1. Pasos que se computan durante la simulación mediante fireLib

Etapa	Input	Output
1 Combustible	Características del combustible	Características generales del combustible, carga, densidad, altura
2 Humedad	Humedad del combustible	Índice de propagación sin viento ni pendiente. Intensidad de reacción, humedad de extinción, etc
3 Viento y Pendiente	Dirección y velocidad del viento, orientación y pendiente del terreno	Índice de máxima propagación y su dirección
4 Dirección	Dirección de máxima propagación	Intensidad de propagación, longitud de llama, altura de pavesas para cada una de las 8 direcciones principales

En Canadá, se ha desarrollado un programa denominado **PROMETHEUS** (Figura 9) con características similares a FARSITE, pero en el que el comportamiento del fuego se basa en el modelo empírico del Forestry Canada Fire Danger Group (1992).

Figura 9. Imagen de la ejecución de una simulación mediante PROMETHEUS



Cabe destacar la existencia en la actualidad de programas como **ArcFuel**, en el cual se integran en ArcGIS FARSITE y FlamMap, entre otros programas.

MODELOS FÍSICOS

Son modelos que predicen la propagación del fuego basándose en las características físicas de la combustión, teniendo en cuenta los tres modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Estos modelos están basados en ecuaciones en 3D de dinámica de fluidos, combustión, transferencia de calor y degradación térmica de los combustibles vegetales, dando lugar a una solución numérica en escala espacial y temporal de las ecuaciones de transporte para masa, momento y energía. En estos modelos, correlaciones o análisis con experimentos de campo o laboratorio no son necesarios, por lo tanto, tests de calibración y validación son necesarios. A pesar de que se han desarrollado diversos modelos físicos, su utilización es muy compleja debido a la gran cantidad de información y el alto grado de detalle que requieren, lo que hace que los cálculos requieran una alta capacidad computacional, así como mucho tiempo, lo que los hace en la actualidad poco prácticos, sobre todo en tareas de extinción de incendios forestales.

En la actualidad podemos destacar los modelos físico HIGRAD/FIRETEC (EEUU; Linn et al., 2002), WFDS (Wildland – urban interface Fire Dynamics Simulator, EEUU; Mell et al., 2007) y FIRESTAR (Francia; Morvan y Dupuy, 2004) – Figura 10.

Figura 10. Imágenes de simulaciones realizadas con modelos físicos. Arriba, uso de FIRETEC para simular fuego de copas. Abajo a la izquierda, uso de WFDS para simulación de fuego de copas. Abajo derecha, uso de FIRESTAR para simulación de contrafuegos.

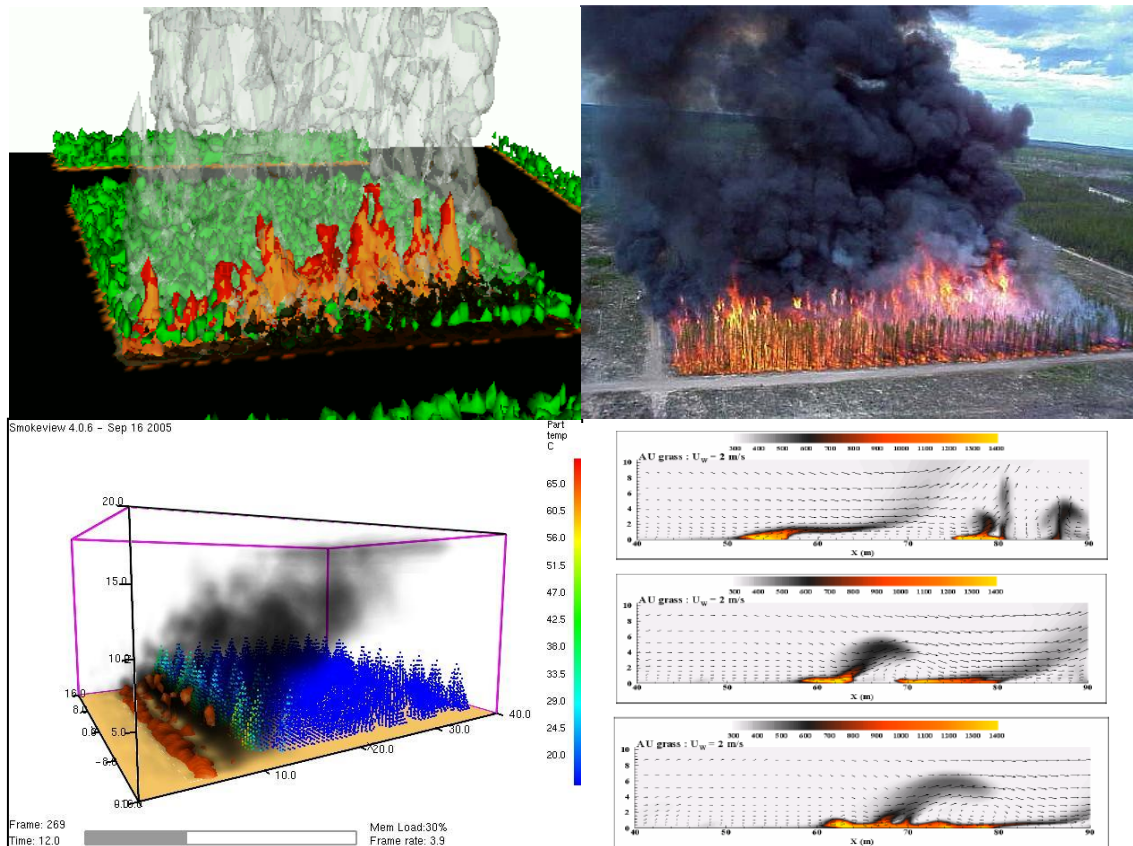


Figure 2: Temperature and velocity vectors calculated during the propagation of a head fire (on the left) and a back fire (on the right) in a grassland 68 s, 78 s and 82 s after the simultaneous ignition of the two fires and for a wind speed U_2 equal to 2 m/s ($U_1=2.6$ m/s).

El CIF-Lourizán ha colaborado con el INRA (Francia) y el laboratorio de Los Alamos en el marco del proyecto europeo Fire Paradox, para la realización de simulaciones de contrafuegos realizados en quemas experimentales en el NO de la Península Ibérica, con la finalidad de evaluar la presencia o no de interacción entre el frente principal y el contrafuego con el modelo físico HIGRAD/FIRETEC (Dupuy et al., 2011).

MODELOS PROBABILÍSTICOS

Estos modelos se basan en tablas de contingencia más que en ecuaciones físicas y estadísticas. En estos sistemas, cada variable ambiental se asocia con cada posible condición ambiental, y se crean tablas de contingencia con probabilidades relativas. Estos modelos son solo aplicables bajo condiciones similares a aquellas en las que ha sido desarrollado. Estos modelos son utilizados principalmente para simular la

probabilidad de ignición y propagación de una secuencia de fuegos hipotéticos en un paisaje (Albraitght y Meisner, 1999).

SIMULACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO DE COPA

Para la simulación del comportamiento de incendios de copa, se han desarrollado tres tipos diferentes de modelos: Modelos de iniciación, modelos de propagación y modelos de iniciación y propagación:

- Modelos de iniciación
 - o Van Wagner (1977) → Behave, Farsite, FMAPlus y Nexus
 - o Xanthopoulos y Wakimoto (1993)
 - o Alexander (1998)
- Modelos de propagación
 - o McArthur (1967)
 - o Van Wagner (1989) → FMAPlus y Nexus
 - o Rothermel (1991) → Farsite y Nexus
 - o Butler, Finney, Andrews y Albini (2004)
- Modelos de inicio y propagación
 - o Forestry Canada Fire Danger Group (1992) → FMAPlus y Nexus
 - o Finney (1994) → Farsite y Nexus
 - o Cruz, Alexander y Wakimoto (2002, 2004, 2005)

*El modelo de iniciación de **Van Wagner** (1977)*

Van Wagner presentó en 1977 un modelo semi – empírico, basado en principios teóricos, combinado con observaciones experimentales, en el que expuso las condiciones para el inicio de las diferentes tipologías de incendios de copa.

Estableció criterios para la predicción de los fuegos pasivos de copas en un incendio de superficie y de la transición a un incendio con combustión continua de material aéreo (fuego activo de copas).

Mediante expresiones referidas a la intensidad lineal del frente y a la velocidad de propagación, determinó los valores críticos de estos parámetros que indican la aparición de incendios de copas activos y pasivos:

$$I_0 = (C h ABC)^{1,5} = [0,01 (460 + 25,9 HFC) ABC]$$

donde I_0 es la intensidad lineal crítica del incendio de superficie (kW/m), C es una constante empírica (adimensional), h el calor de ignición de las copas (kJ/kg), HFC es la humedad foliar de las copas (%) y ABC es la altura de la base de la copa.

Otro criterio, pero en este caso de propagación del fuego de copa es el siguiente:

$$R_0 = 3/d$$

donde R_0 es la velocidad de propagación crítica de un incendio de superficie (m/min), o mínima velocidad de propagación para un fuego de copas activo, y d es la densidad aparente de las copas (kg/m³).

El modelo predice que, siendo I y R los valores de la intensidad lineal y de la velocidad de propagación respectivamente, en un incendio de superficie, cuando $I > I_0$ y $R < R_0$, se produce un fuego pasivo de copas, y cuando $I > I_0$ y $R > R_0$ se produce un fuego activo.

*El modelo empírico de propagación de incendios de copas de **Rothermel** (1991)*

Tras observar y analizar los datos de ocho incendios de gran intensidad ocurridos en las Montañas Rocosas septentrionales (Oeste de los Estados Unidos) entre 1960 y 1980, Rothermel (1991) obtuvo una correlación estadística para la predicción de la velocidad de propagación de los frentes de incendio con combustión aérea continuada.

Utilizando su propia metodología para incendios menores modificada por Albin (1976) – estimó que la velocidad de propagación de un incendio activo de copas era 3,34 veces mayor que la velocidad predicha por su modelo de superficie, con las características ambientales presentes en los incendios reales (pero aminorando la velocidad del viento un 40%) y utilizando el modelo de combustible 10.

$$R_{Ca} = 3,34 R_{10}$$

donde R_{Ca} es la velocidad de propagación de un fuego activo de copas (m/s), y R_{10} es la velocidad de propagación de un incendio de superficie con el modelo de combustible 10 (m/s).

Asimismo, propuso una expresión empírica para la velocidad máxima de propagación (m/s) de los incendios estudiados ($R_{Ca \max}$).

$$R_{Ca \max} = 1,7 R_{Ca}$$

El modelo de predicción de inicio y propagación de incendios de copas de Finney (1994)

Finney, en 1994, desarrolló una metodología para el cálculo completo de todos los parámetros de comportamiento de los incendios en los que se produce combustión de material aéreo. Dicho método fue pensado para ser integrado directamente en un complejo sistema de simulación, utilizando para ello algunos estudios de fuegos de copa ya descritos.

El modelo emplea el trabajo de Van Wagner (1977) para determinar las condiciones idóneas de transición a los distintos tipos de incendios de copas: pasivos, activos e independientes, sucesivamente. En cuanto a la predicción del avance del fuego, establece cualitativamente la velocidad de propagación de un incendio con entorchamiento (R_{Cp}), considerándola equivalente a la calculada mediante el modelo de superficie RS de Rothermel (1972). En esta determinación no se contempla el efecto de la combustión intermitente de grupos de copas en el avance del frente de incendio.

$$R_{Cp} = R_S$$

La velocidad de propagación de un incendio de copas activo (R_{Ca}) se obtiene a partir de una expresión parecida a la de Van Wagner (1989) para los fuegos de copa pasivos, en la que se pondera la diferencia entre la velocidad de propagación de un incendio de superficie (R_S) y la velocidad máxima de un fuego de copas activo ($R_{Ca \max}$), con respecto a la fracción de combustible aéreo consumido (CFB).

$$R_{Ca} = R_S + CFB (R_{Ca \max} - R_S)$$

Fórmula en la que $R_{Ca \max}$ se obtiene a partir de los estudios de Rothermel (1991), adoptando para la velocidad media de propagación activa en copas:

$$R_{Ca} = 3,34 R_{10}$$

y CFB se calcula generalizando la expresión desarrollada por Van Wagner en 1989:

$$CFB = 1 - e^{-(ax)}$$

donde a es un coeficiente adimensional, y x se basa en la diferencia entre la velocidad de propagación del fuego de superficie (m/s) predicha (R_S) y crítica (R_{10}):

$$x = R_S - R_{10}$$

Para el cálculo del parámetro a se utiliza la siguiente expresión:

$$a = -\ln(0,1)/0,9 [(0,05/d) - R_{I0}]$$

donde R_{I0} es la velocidad de propagación crítica de un incendio de superficie (m/s) y d , es la densidad aparente de las copas (kg/m^3).

Para el cálculo de R_{I0} se utiliza la expresión:

$$R_{I0} = I_0 (R_S / I_b)$$

donde I_0 es la intensidad lineal crítica de un incendio de superficie (kW/m), R_S es la velocidad de propagación predicha del incendio de superficie, e I_b es la intensidad lineal del frente del incendio de superficie (kW/m).

Para el cálculo de éste último parámetro (I_b) se utiliza la expresión propuesta por Wilson (1980):

$$I_b = (0,21 I_R R_S) / \sigma$$

donde I_R es la intensidad de reacción ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), R_S es la velocidad de propagación del incendio de superficie (m/s) y σ es la relación superficie/volumen (m^2/m^3).

Por medio de las ecuaciones para el coeficiente a y para la velocidad de propagación crítica, correspondiente a la intensidad lineal del frente a partir de la cual aparecen fuegos de copas pasivos, se completan los cálculos.

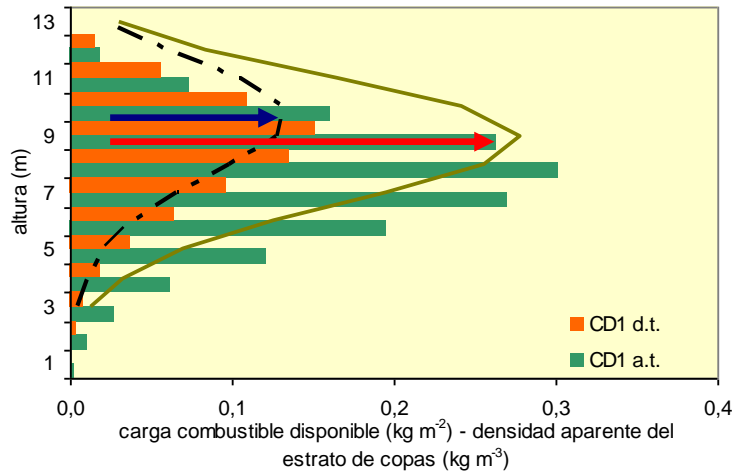
Este es el modelo de fuego de copas incluido en el programa FARSITE.

*Modelización del fuego de copas mediante el programa **Nexus** (Scott, 1999; Scott y Reinhardt, 2001)*

Este modelo usa las ecuaciones de van Wagner (1977) de iniciación de fuego de copa y la condición de fuego de copa activo junto a las ecuaciones de Rothermel de fuego de superficie (1972) y la ecuación empírica de velocidad de propagación de fuego de copa en coníferas del Oeste de Rothermel (1991). También emplea para determinar la velocidad final del fuego la aproximación del Forestry Canadian Fire Danger Group (1992), y los trabajos de van Wagner (1989, 1993).

Como en el resto de modelos, hay tres variables críticas: la densidad aparente del espacio de copas, la altura de la base de la copa, y el contenido de humedad. En este caso, se utiliza como densidad aparente de copas, la efectiva, es decir, la máxima observada al dividir el estrato de copas en intervalos (de 1 m o menos), y calcular la media móvil (intervalos de 3 o 5) – Figura 11. La altura de inicio de copa se definió en base a una mínima cantidad de densidad de copa ($0,04 \text{ kg/m}^3$).

Figura 11. Determinación de la densidad de copa eficiente en una masa de *Pinus pinaster*. La flecha roja indica la densidad de copa eficiente antes de un clareo, y la flecha azul, después del tratamiento.



NEXUS incluye un nuevo tipo de fuego, que es el fuego de copa condicional, que es aquella situación en la que un fuego de copas activo es posible, aunque no lo sea su iniciación. Además, en este modelo se incorporan dos nuevos parámetros, que son el Índice de entorchamiento (velocidad del viento a campo abierto a la cual la intensidad del fuego de superficie iguala a la intensidad de iniciación del fuego de copas) y el Índice de propagación de fuego de copas (velocidad del viento a campo abierto a la que el fuego de copa es posible).

El índice de entorchamiento se obtiene igualando las ecuaciones de velocidad del fuego obtenida mediante la fórmula de Byram, y la velocidad del fuego de superficie necesaria para alcanzar la intensidad crítica de inicio de fuego de copa según el modelo de Rothermel:

$$(60 I'_{\text{Iniciación}})/\text{HPA} = I_R \zeta (1 + \phi'_{w(\text{iniciación})} + \phi_s) / \rho_b \varepsilon Q_{ig}$$

donde $\phi'_{w(\text{iniciación})}$ es el coeficiente crítico de viento para la iniciación del fuego de copas.

$$\phi'_{w(\text{iniciación})} = (60 I'_{\text{Iniciación}} \rho_b \varepsilon Q_{ig} / \text{HPA} I_R \zeta) - \phi_s - 1$$

Por otro lado, Rothermel (1972) encontró una relación entre ϕ_w y la velocidad del viento (U):

$$\phi_w = C (54.683 U)^B (\beta/\beta_{op})^{-E}$$

donde C, B y E son constantes para un determinado complejo de combustible que depende sólo de σ y (β/β_{op}) es el ratio de densidad real/densidad óptima del complejo de combustible.

Combinando las dos ecuaciones anteriores y convirtiendo el viento a viento a campo abierto (6 m de altura) mediante el factor de reducción del viento (WRF), se obtiene el Índice de entorchamiento (TI).

$$TI = O'_{initiation} = \left(\frac{1}{54.683WRF} \right) \left(\frac{\frac{60I'_{initiation}\rho_b\epsilon Q_{ig}}{HPA\xi I_R} - \phi_s - 1}{C \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}} \right)^{\frac{1}{B}}$$

El Índice de propagación de fuego de copas está basado en el criterio de fuego de copas activo de Van Wagner (1977) y el modelo de propagación de fuego de copas de Rothermel (1991).

$$R'_{activa} = 3/d$$

$$R_{activa} = 3.34 [I_R\xi(1 + \phi'_{w(iniciación)} + \phi_s) / \rho_b\epsilon Q_{ig}]$$

Se impone la condición de que la velocidad de propagación del fuego de copas activo (R_{activa}) sea igual a la R'_{activa} obtenida por el criterio de Van Wagner. De ahí se deduce una velocidad de viento crítica (U'_{activa}):

$$U'_{activa} = \left(\frac{1}{54.683} \right) \left(\frac{\left(\frac{3.0}{CBD} \right) \rho_b\epsilon Q_{ig} - \phi_s - 1}{3.34 I_R\xi C \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}} \right)^{\frac{1}{B}}$$

Simplificando la ecuación anterior, con las características del modelo 10 y convirtiendo el viento a campo abierto a 6 m de altura, se obtiene la velocidad de viento que corresponde al índice de entorchamiento (CI):

$$CI = O'_{active} = 0.0457 \left(\frac{164.8 \epsilon Q_{ig} - \phi_s - 1}{I_R CBD} \right)^{0.7}$$

Modelo de predicción de inicio y propagación de incendios de copas en coníferas (Cruz, Alexander y Wakimoto 2002, 2004, 2005, 2006a, 2006b y 2006c)

En 2002 Cruz et al., desarrollaron un modelo probabilístico de inicio de copa (p) según la siguiente ecuación:

$$p = e^{f(x)} / 1 + e^{f(x)}$$

siendo

$$f(x) = 3,397 + 0,370 U_{10} - 0,664 ABC - 4,354 CCS(C1) - 1,787 CCS(C2) - 0,286 HCFM$$

donde U_{10} es la velocidad del viento medido en el exterior de la masa a 10 m de altura (km/h), ABC es la altura de la base de la copa sobre la parte superior del estrato del combustible del sotobosque (m), CCS es la consunción de combustible del estrato superficial, y HCFM la humedad del combustible fino muerto, estimada mediante las tablas de Rothermel (1983).

Con respecto al factor CCS, puesto que refleja una condición post-fuego, y existen dificultades a priori, de estimar el combustible disponible para la combustión, el modelo de probabilidad de inicio ha categorizado esta variable usando dos variables de diseño C1 y C2, de manera que:

$$\text{Para } CCS < 1 \text{ kg/m}^2 \rightarrow C1=1 \text{ y } C2=0$$

$$\text{Para } 1 < CCS < 2 \text{ kg/m}^2 \rightarrow C1=0 \text{ y } C2=1$$

$$\text{Para } CCS > 2 \text{ kg/m}^2 \rightarrow C1=0 \text{ y } C2=0$$

Una nueva versión (Cruz et al., 2004) define la probabilidad de ocurrencia de fuego de copas de la siguiente manera:

$$p = e^{f(x)} / 1 + e^{f(x)}$$

siendo

$$f(x) = 4,236 + 0,357 U_{10} - 0,710 ABC - 4,613 CCS(C1) - 1,856 CCS(C2) - 0,331 HCFM$$

donde U_{10} es la velocidad del viento medido en el exterior de la masa a 10 m de altura (km/h), ABC es la altura de la base de la copa sobre la parte superior del estrato del combustible del sotobosque (m), CCS es la consunción de combustible del estrato superficial, y HCFM la humedad del combustible fino muerto, estimada mediante las tablas de Rothermel (1983).

Este modelo usa el criterio de Van Wagner (1977) para clasificar los fuegos de copas en activos y pasivos:

$$R_0 = 3/d$$

donde R_0 es la velocidad de propagación crítica de un incendio de superficie (m/min), o mínima velocidad de propagación para un fuego de copas activo, y d es la densidad aparente de las copas (kg/m^3).

La velocidad de propagación del fuego de copas activo (R_{Ca}), según este modelo, se obtiene mediante la ecuación (Cruz et al., 2005):

$$R_{Ca} = 11,02 U_{10}^{0,90} d^{0,19} e^{(-0,17 \text{ HCFM})}$$

siendo U_{10} la velocidad del viento medido en el exterior de la masa a 10 m de altura (km/h), d es la densidad aparente de las copas (kg/m^3) y HCFM la humedad del combustible fino muerto, estimada mediante las tablas de Rothermel (1983).

La velocidad de propagación para fuegos pasivos (R_{Cp}), sería

$$R_{Cp} = R_{Ca} e^{-CAC}$$

siendo $CAC = R_{Ca}/R_0$

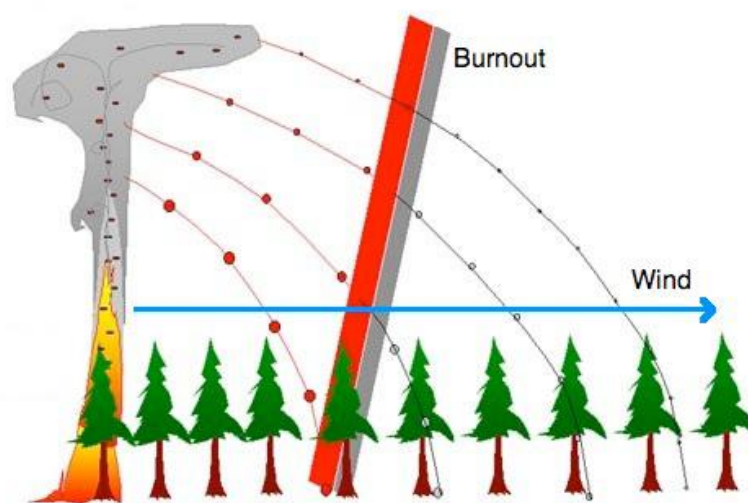
MODELOS PREDICTIVOS DE FUEGO DE PAVESAS

Los modelos predictivos de fuego de pavesas pronostican el movimiento en el aire de pavesas por la acción del viento y la columna de convección, a partir la cual se puede expandir el fuego, y la ignición de nuevos incendios es posible. Los incendios de pavesas que se generan cerca del frente principal tienen poco efecto en la propagación del fuego, ya que el frente los sobrepasará antes de que contribuyan a la propagación. Sin embargo, si estos fuegos se crean a largas distancias del frente principal pueden conllevar a una mayor dificultad en las labores de extinción.

No son demasiados los modelos de fuego de pavesas, y solo unos pocos de ellos aportan información útil para entender y predecir el fenómeno. La distancia que una pavesa puede cubrir en su vuelo, y la probabilidad de ignición de nuevos incendios son las principales características de fuego de pavesas investigadas. El trabajo más representativo del fuego de pavesas es el de Albin (1979, 1981, 1983a, 1983b), quien presentó un modelo teórico, parcialmente confirmado empíricamente. Albin definió la

distancia máxima que una partícula de combustible (de forma cilíndrica) puede recorrer, originando un fuego nuevo.

Figura 12. Esquema de emisión de pavesas de incendio forestal, aportado por Andrews et al., (2008)



El programa BEHAVE presenta un módulo (SPOT) a partir del cual se puede calcular la distancia máxima que puede alcanzar una pavesa a partir de árboles entorchados (Albini, 1979, Chase, 1981), a partir de pilas de troncos (Albini 1981), y de incendios de superficie conducidos por el viento (Albini, 1983a, Albini, 1983b, Chase, 1984). También incluye un módulo (IGNITE) mediante el que se puede calcular la probabilidad de ignición a partir de una brasa (Schroeder, 1969). El programa FARSITE utiliza el modelo de Albini (1979) de distancia de una pavesa a partir de árboles entorchados para calcular la distancia de emisión de pavesas para incendios pasivos y activos de copa.

La máxima distancia de emisión de pavesas a partir de árboles entorchados se calcula a partir de una descripción de los árboles entorchados (número, altura, especie, diámetro normal), el viento a 6 m de altura, las características del terreno (elevación del valle a la cima, distancia horizontal del valle a la cima, localización de la fuente de la pavesa) y la altura del dosel viento abajo.

La máxima distancia de emisión de pavesas a partir de un incendio de superficie conducido por el viento se basa en la longitud de llama del fuego. Este modelo solo es

aplicable para fuegos a favor de viento en combustibles de superficie que no están cubiertos por ningún tipo de dosel.

La probabilidad de la ignición de una pavesa (de 0% a 100%) en BEHAVE se basa en la humedad de los combustibles finos muertos, la temperatura del aire, y el grado de cobertura de los combustibles. En FARSITE, sin embargo, la probabilidad de ignición de las pavesas es definida por el usuario.

Se han venido desarrollando diferentes modelos de fuego de pavesas, tanto en lo referente a distancia máxima, como a la probabilidad de ignición (Woycheese et al., 1999, Ellis 2000, Sardoy et al., 2007, Ganteaume et al., 2009), aunque de momento no han sido incorporados a los simuladores más empleados. Actualmente, se han realizado simulaciones de emisión de pavesas mediante el programa de modelización física HIGRAD/FIRETEC (Koo et al., 2011). Los más recientes modelos de autómatas celulares que incluyen la ignición de pavesas y su probabilidad de ignición han sido desarrollados por Porterie et al., (2007) y Alexandridis et al., (2008).

COMPORTAMIENTO DEL CONTRAFUEGO

Aunque el contrafuego es una técnica ampliamente utilizada en la extinción de los incendios forestales (Arévalo, 1968; Chandler et al., 1983; Pyne, 1984; Luke y McArthur, 1986; Martínez y Aguirre, 1997; Castellnou et al., 2010), el conocimiento sobre el comportamiento del contrafuego, y como es la interacción entre el contrafuego y el frente principal es escaso, y la base fundamental para su empleo, es la experiencia en las labores de extinción. Se asume generalmente que el frente principal produce una atracción del contrafuego como consecuencia de la atmósfera creada por este frente. De esta manera, el contrafuego puede desplazarse en contra de la dirección de viento, y acercarse al frente principal, hasta que finalmente se unen y se produce la extinción del incendio.

Sin embargo, al ser una técnica de extinción que puede ser llevada a cabo mediante diferentes tácticas (una línea de fuego, quema en fajas, quema por puntos), puede aplicarse en diferentes zonas del incendio (en el frente principal, en los flancos, en la cola) y, principalmente, teniendo en cuenta la alta complejidad del fenómeno de interacción de frentes (Finney y McAllister, 2011), hasta la actualidad no se han empezado a realizar estudios referente al efecto del uso del contrafuego en el comportamiento de los incendios forestales.

Roxburgh y Rein (2008) utilizaron el modelo físico WFDS para simular la atracción que un frente principal puede generar, concluyendo que la máxima distancia en la que se puede implementar un contrafuego aumenta con la intensidad del frente principal, y disminuye con la velocidad del viento.

Morvan et al., (2009) realizaron simulaciones de contrafuegos para combustibles herbáceos y de matorral, utilizando los modelos físicos FIRESTAR y WFDS, observando

la existencia de interacción de ambos frentes, modificando mutuamente el comportamiento de cada uno de los incendios, e incrementándose la intensidad del fuego, una vez se produce la unión de los dos frentes.

Dupuy et al., (2011) realizaron simulaciones mediante el modelo físico HIGRAD/FIRETEC, para analizar el efecto de contrafuegos en matorrales. En este estudio, la atracción generada por el frente principal solo fue observada para valores bajos de viento, y solamente cuando la distancia entre los dos frentes era escasa.

Sin embargo, todos estos estudios se han basado en simulaciones físicas, no existiendo experimentación en campo sobre esta temática. En el CIF-Lourizán se ha venido desarrollando un estudio experimental mediante el cual se han realizado un conjunto quemas experimentales con la finalidad de incrementar el conocimiento sobre el efecto del contrafuego en la velocidad de propagación de los dos frentes. Los modelos empíricos desarrollados (Vega et al., 2010) revelaron una aceleración en la velocidad de propagación en ambos frentes. Para el frente principal, este incremento era mayor para bajas velocidades de viento. Sin embargo, la aceleración era aparente cuando las distancias entre frentes se reducían (< 20 m).

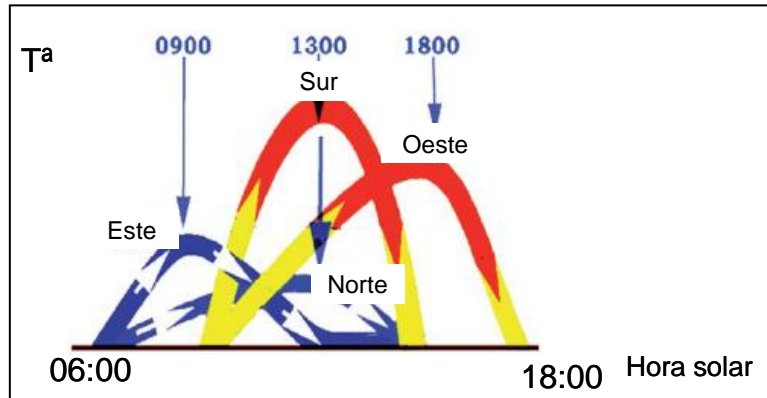
SISTEMA DE PREDICCIÓN CAMPBELL

Sistema sencillo de operar con los tres factores básicos de propagación del fuego: orientación, viento y pendiente, con el fin de realizar un breve análisis útil para el personal a la hora de plantear tácticas basadas en el comportamiento previsto del fuego y delimitar su validez en el espacio y el tiempo (Campbell, 2005).

Esta lógica se basa en el sistema de la alineación de fuerzas, entendiendo como tal el grado de coincidencia favorable o desfavorable respecto del frente de fuego de los tres factores mencionados. Si los factores están a favor sumaremos uno y si no están a favor no sumaremos ninguna alineación (exposición soleada +1, pendiente positiva +1, viento a favor +1).

La influencia de la orientación de la pendiente con respecto a la radiación solar (Figura 13) se basa en el efecto en la temperatura y humedad relativa, y por tanto, en la humedad de los combustibles finos muertos, así como en aspectos microclimáticos que condicionan la vegetación/combustibles con los que nos encontramos. Además, esta orientación condiciona la aparición de vientos locales por movimiento de masas de aire debido al calentamiento diferencial de las laderas.

Figura 13. Influencia de la orientación de la pendiente con respecto a la radiación solar



Por su parte, la pendiente y el viento, cuando están a favor contribuye a la aceleración del proceso de combustión, siendo, como hemos visto en los modelos previamente descritos, las variables más influyentes en la velocidad de propagación de los incendios, ya sean de superficie o de copa.

Hablaremos de alineación de fuerzas, en función de los tres factores, así en función del número que intervienen o no tenemos las siguientes alineaciones (Tabla 2):

- 0/3 Fuera de alineación.
- 1/3 Poca alineación.
- 2/3 Media alineación.
- 3/3 Plena alineación.

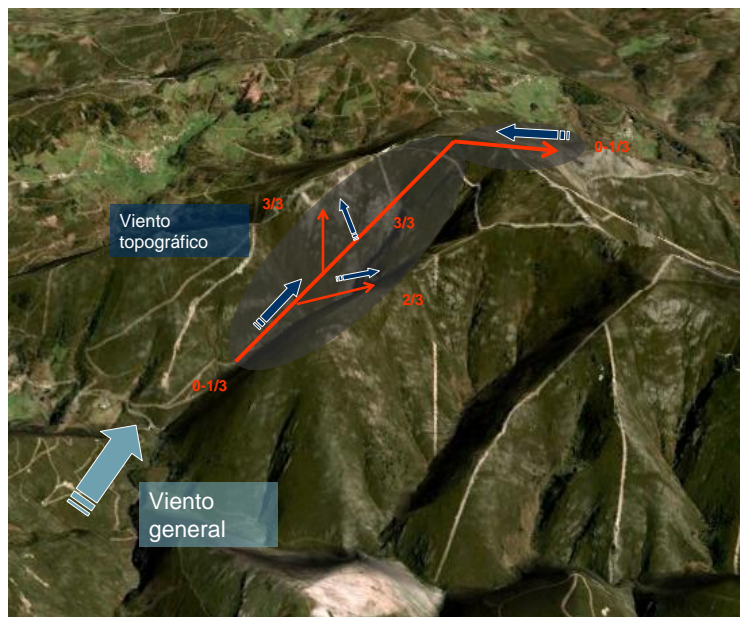
Tabla 2. Tipos de alineación en función del viento, pendiente y orientación

FACTOR	A FAVOR (+)				EN CONTRA (-)			
	VIENTO	+	+	+	-	+	-	-
PENDIENTE	+	+	-	+	-	+	-	-
ORIENTACIÓN	+	-	+	+	-	-	+	-
	plena	media	media	media	poca	poca	poca	nula

ALINEACIÓN	3/3	2/3	2/3	2/3	1/3	1/3	1/3	0/3
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

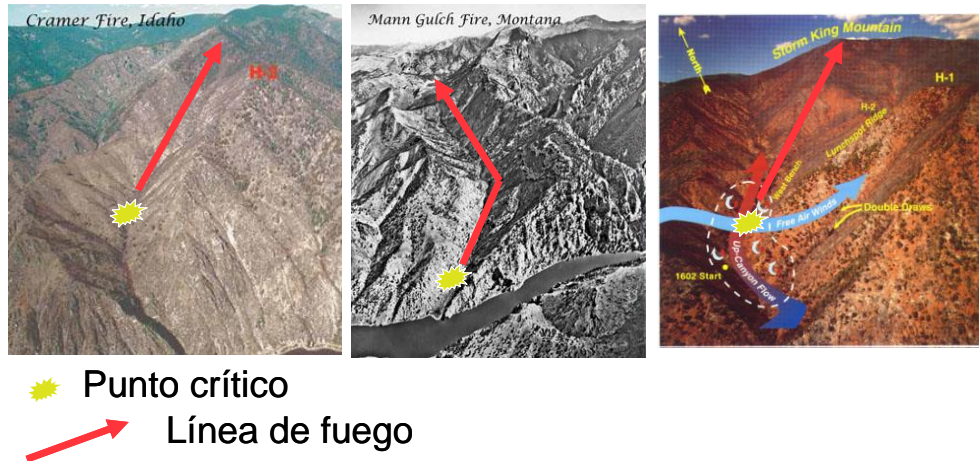
Primeramente se debe aislar un frente determinado (flanco o cabeza) para el análisis. Posteriormente se debe evaluar que factores están alineados para ese comportamiento (Figura 14). Las predicciones de cambio de comportamiento pueden hacerse observando la fuerza y la alineación que esos factores tomarán al paso del frente. En el proceso de análisis se debe evaluar las zonas y sus respectivas alineaciones (mapificar). Para cada alineación se deben identificar valores que cuantifiquen el comportamiento del fuego: longitud de llama o velocidad de avance, para determinar si está dentro o fuera del umbral de control.

Figura 14. Evaluación de las alineaciones en el terreno



Otro elemento importante es el establecimiento de “puntos de inflexión”. Son aquellas zonas en las que un cambio de alineamiento de los tres factores influyentes puede acarrear un cambio en el comportamiento del fuego, creando una oportunidad para su extinción o un posible incremento de riesgo (punto crítico) – Figura 15.

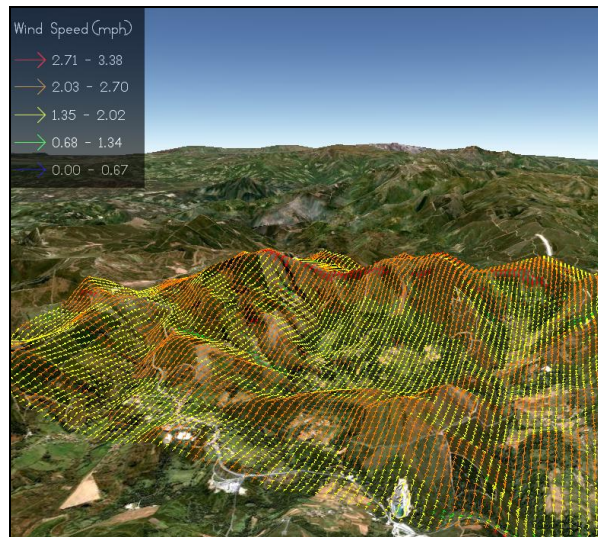
Figura 15. Localización de puntos críticos



MODELIZACIÓN METEOROLÓGICA

Una de las limitaciones existentes en la utilización de estos programas es el grado de incertidumbre en algunos de los parámetros de entrada. Un programa de gran utilidad para FARSITE y FlamMap es **WindNinja**, programa informático que da como resultado campos de viento variables espacialmente para su aplicación en estos dos programas. De esta manera se dispondría de valores más realistas de las condiciones del viento en el área de estudio. Este programa simula de manera rápida el efecto del terreno y hora del día en el flujo de viento. Para ello requiere un modelo de elevación del terreno, y una velocidad y dirección del viento dominante, así como especificaciones sobre la vegetación dominante en el área de estudio. Este programa está bajo desarrollo, pero podría permitir disponer en tiempo real de la variación espacial del viento, a partir de valores registrados en puntos de medición establecidos en el área de estudio (Figura 16).

Figura 16. Modificación del viento como consecuencia del terreno, obtenida mediante WindNinja



Otra variable con alto grado de incertidumbre es el del contenido de humedad de los combustibles en el momento de realizar la simulación, siendo esta una variable muy influyente en el comportamiento del fuego, así como en la predicción del riesgo de incendios. Existen diferentes modelos predictivos de determinación de la humedad de combustibles en función de determinadas variables del medio, como la humedad relativa, la temperatura del aire, cantidad y duración de la precipitación, velocidad y dirección del viento y porcentaje de sombra sobre el combustible. Ruiz y Vega (2007) realizaron una extensa revisión de los modelos de predicción de los combustibles muertos existentes. De manera resumida, se puede considerar que los índices de humedad de combustible (o índices de peligro de incendios) se pueden clasificar en dos grupos.

El primero comprende los estimadores directos de la humedad de los combustibles finos muertos. El segundo, los que integran esta información con otras variables meteorológicas y no tienen una significación física tan directa. Dentro del primer grupo existen dos categorías. Los que asumen que el proceso de ganancia y pérdida de humedad está sólo controlado por la humedad relativa y temperatura del aire, y los que además consideran que influyen otras variables meteorológicas. Dentro de la primera categoría, destacan un conjunto de índices australianos, estimadores de la humedad de la hojarasca de arbolado, restos leñosos finos superficiales o herbáceas secas. Destacan el índice **Control Burning in Eucalypt Forest (CBEF)** que estima la humedad de los combustibles citados en masas abiertas de eucalipto (McArthur, 1962). Este modelo empírico fue luego desdoblado en dos por Viney y Hatton (1989) para tener en cuenta, por separado, las condiciones de adsorción y desorción que se producen en el intercambio de vapor de agua entre la atmósfera y la hojarasca superficial. El índice **Grass Fire Danger Meter** de McArthur (1966) que predice la humedad de la hierba seca totalmente expuesta al sol y el **Forest Fire Danger Meter**, también de McArthur

(1967), un estimador de la humedad de la hojarasca de eucalipto, especialmente en las primeras horas de tarde durante el verano.

También dentro de esta misma categoría de índices se encuentra el modelo conocido como **FBO** de Rothermel et al., (1983) que estima la humedad de la hojarasca y restos finos leñosos. Este modelo considera además de la humedad relativa y temperatura del aire, unas correcciones aditivas que tienen en cuenta el efecto de la radiación debido a la época del año, hora del día, grado de cobertura por copa de árboles o nubosidad, junto a la pendiente y exposición del terreno.

Los índices anteriores están ideados para ser usados en pleno verano, en periodos libres de lluvia de suficiente duración como para que la influencia de este parámetro pueda considerarse despreciable.

Dentro de la segunda categoría de índices de peligro, que estiman la humedad de la hojarasca, considerando además de la humedad relativa y temperatura del aire, la intervención de otras variables meteorológicas, se encuentran el modelo **BEHAVE** (Andrews y Chase, 1989), desarrollado por Rothermel (1986), y el modelo australiano de **Sneeuwjagt y Peet** (1985).

El método de cálculo de BEHAVE es iterativo y también determina la probabilidad de ignición de la hojarasca (Schroeder, 1969), en función de su grado de cobertura por la vegetación suprayacente y la humedad y temperatura del aire. El modelo de Sneeuwjagt y Peet (1985) es también iterativo utilizando como variable la cantidad de lluvia caída en las 24 horas precedentes, la temperatura máxima y la humedad relativa mínima del día de observación, junto a un parámetro que tiene en cuenta el grado de humedad ambiental durante la noche.

Conviene señalar que en todos los índices mencionados hasta ahora, una disminución del índice implica un aumento del peligro.

Dentro de esta segunda categoría se encuentran los valores de los seis componentes de índice de peligro del sistema canadiense (Van Wagner, 1987). Básicamente, estos son indicadores numéricos del contenido de humedad de la hojarasca y otros combustibles finos superficiales (**FFMC**), de las capas orgánicas subyacentes de baja compactación y moderada profundidad (**DMC**) y de las capas más compactas y profundas (mantillo inferior, **DC**). Los restantes índices representan la velocidad de propagación (**ISI**), la cantidad de combustible disponible para la consunción en el frente de llamas, (**BUI**) y la intensidad lineal del frente de fuego (**FWI**). Todos aumentan cuando el peligro de incendios crece. Se trata de indicadores de tipo iterativo, en donde los valores diarios de los distintos índices están fuertemente mediatizados por los valores de los días precedentes.

Otras variables meteorológicas de interés para la determinación del riesgo de incendio, y para prever el posible comportamiento eruptivo de los incendios forestales son los índices de sequía y la estabilidad atmosférica.

Como índice de sequía podemos destacar el **Keetch- Byram** (KBDI), Keetch-Byram (1968). Este conocido índice valora el efecto de la precipitación y de la evapotranspiración en el balance de agua del mantillo profundo y de las capas más superficiales del suelo. Es un indicador de la facilidad para arder de la materia orgánica del suelo que crece con la intensidad de la sequía. Es un componente del índice conjunto de peligro de Estados Unidos, el **National Fire Danger Rating System** del US Forest Service (Deeming et al., 1977; Burgan, 1988; Roads et al., 2005). Las variables meteorológicas precisas para la determinación del KBDI son la precipitación media anual, la temperatura máxima diaria y la precipitación acumulada en las últimas 24 horas. Según el valor obtenido se tiene una descripción del estado de la sequía, como se puede ver en la tabla siguiente (Tabla 3).

Tabla 3. Estado de sequía según el valor del índice de Keetch-Byram

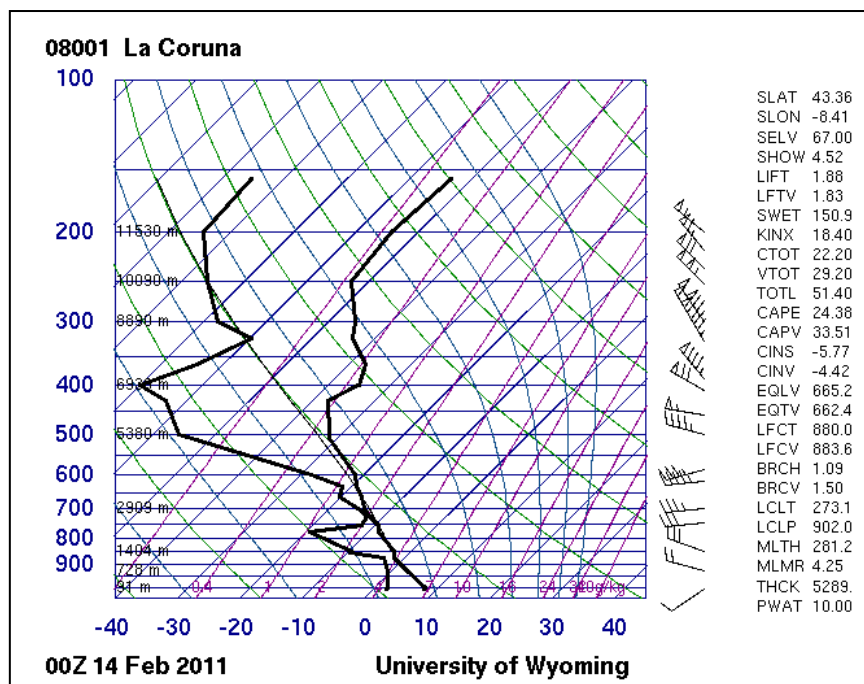
Índice de sequía	Descripción del estado de la sequía
0 – 99	Estado incipiente de sequía
100 – 199	Primer estado de sequía
200 – 299	Segundo estado de sequía
300 – 399	Tercer estado de sequía
400 – 499	Cuarto estado de sequía
500 – 599	Quinto estado de sequía
600 – 699	Sexto estado de sequía
700 – 800	Séptimo estado de sequía

Quando el aire se eleva, se enfría, se condensa y eventualmente se pueden producir nubes. La **estabilidad atmosférica** es una propiedad del aire que describe su tendencia a permanecer en su posición original, estable, o a elevarse, inestable. La estabilidad de la atmósfera está regulada por la temperatura en diferentes niveles, lo que determina el gradiente ambiental de temperatura. La estabilidad absoluta se produce cuando el gradiente de temperatura ambiental real es menor que el gradiente adiabático húmedo y por lo tanto menor que el gradiente adiabático seco. Una parcela de aire tiene inestabilidad absoluta cuando el gradiente ambiental real de temperatura es mayor que el gradiente adiabático seco. La inestabilidad condicional se produce cuando el aire húmedo tiene un gradiente ambiental de temperatura entre los gradientes adiabático seco y húmedo. En días con inestabilidad atmosférica, el comportamiento del fuego puede ser errático, incrementando su grado de peligrosidad. El grado de

inestabilidad se puede determinar a partir de una serie de índices (**Índice de Haines**, o índice **CAPE**). El índice de estabilidad más utilizado es el de Haines.

Ambos índices pueden calcularse a partir de diagramas termodinámicos, como el que se presenta a continuación (Figura 17).

Figura 17. Diagrama termodinámico

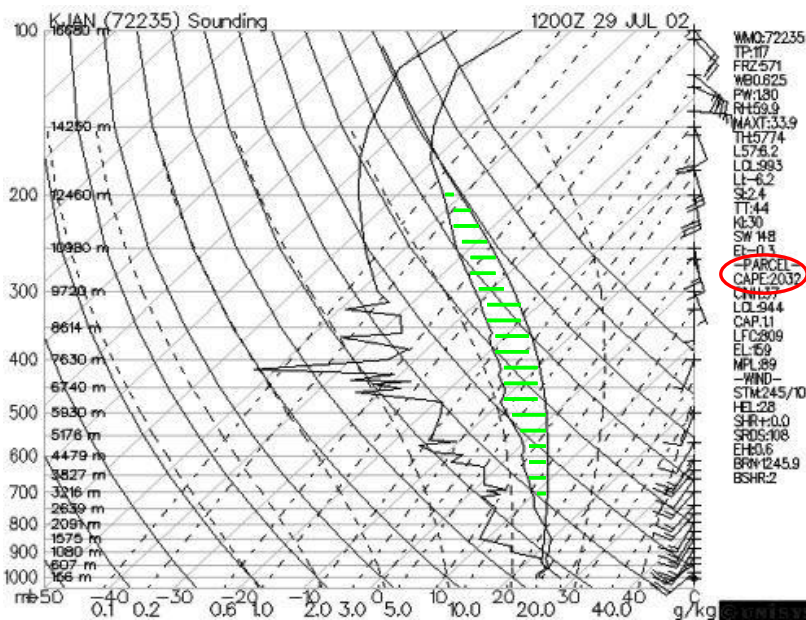


El CAPE (Convective Available Potential Energy) se calcula como la diferencia entre la curva teórica (como ascendería teóricamente una partícula de aire desde la superficie, a través de la atmósfera) y la curva de estado, que es la que nos va mostrando la temperatura del aire en las distintas alturas del diagrama (Figura 18). Según el valor obtenido, este índice nos muestra situaciones de inestabilidad positiva, alta y extrema.

Tabla 4. Situación de inestabilidad según el valor del índice CAPE

CAPE	Descripción de la estabilidad atmosférica
1 - 1500	Inestabilidad positiva
1500 - 2500	Inestabilidad alta
> 2500	Inestabilidad extrema

Figura 18. Cálculo del valor de CAPE mediante el diagrama termodinámico



El Índice de Haines fue desarrollado por Donald A. Haines (Haines, 1988) y muestra el impacto potencial de la humedad e inestabilidad atmosférica en el comportamiento de un incendio forestal. Este índice expresa la probabilidad de que en caso de declararse un incendio forestal dominado por columna, es decir, en el que el viento no es el motor del incendio, éste pueda tomar grandes proporciones y que su comportamiento pueda ser más o menos errático. El cálculo del HI depende de la inestabilidad (término A) y humedad atmosférica (término B), resultando:

$$HI = A + B$$

donde $A = (Tp1 - Tp2)$ y $B = (Tp3 - Tdp3)$, siendo Tpi y $Tdpi$ la temperatura y la temperatura de rocío al nivel de presión pi . En la siguiente tabla se muestran los valores de A y B para el cálculo del Índice de Haines para diferentes elevaciones.

Tabla 5. Valores para el cálculo del índice de Haines a diferentes elevaciones

ELEVACIÓN	TÉRMINO DE ESTABILIDAD		TÉRMINO DE HUMEDAD	
	DIFERENCIA DE TEMPERATURA		DIFERENCIA DE TEMPERATURA Y PUNTO DE ROCÍO	
BAJA	950 - 850 hPa		950 hPa	
	3 o menos °C	A = 1	5 °C o menos	B = 1
	de 4 - 7 °C	A = 2	de 6 - 9 °C	B = 2
	8 °C o más	A = 3	10 °C o más	B = 3
MEDIA	850 - 700 hPa		850 hPa	
	5 o menos °C	A = 1	5 °C o menos	B = 1
	de 6 - 10 °C	A = 2	de 6 - 12 °C	B = 2
	11 °C o más	A = 3	13 °C o más	B = 3
ALTA	700 - 500 hPa		700 hPa	
	17 o menos °C	A = 1	14 °C o menos	B = 1
	de 18 - 21 °C	A = 2	de 15 - 20 °C	B = 2
	22 °C o más	A = 3	21 °C o más	B = 3
SUMA DETÉRMINOS (A + B)		RIESGO DE GRAN INCENDIO		
2 ó 3		Muy bajo		
4		Bajo		
5		Moderado		
6		Alto		

BIBLIOGRAFÍA

Albini F.A., 1976. Estimating Wildfire Behaviour and Effects. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-30. Odgen,UT, 74 pp.

Albini, F.A., 1979. Spot fire distance from burning trees - a predictive model. General Technical Report INT-56, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Odgen, UT.

Albini, F.A., 1981. A model for the wind-blown flame from a line fire. Combustion and Flame, 43:155-174.

Albini, F.A., 1983a. Potential spotting distance from wind-driven surface fires. Research Paper INT-309, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Odgen, UT.

Albini, F.A., 1983b. Transport of firebrands by line thermals. Combustion Science Technology, 32:277-288.

Albright D., Meisner B.N., 1998. Classification of Numerical Fire Simulation Systems. Fire Management Notes 59 (2): 5-12.

Alexander M.E., 1998. Crown fire thresholds in exotic pine plantations in Australasia, Ph. D. thesis, Australian National University, Canberra, Australia, 228 p.

Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C.I., Bafas, G.V., 2008. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. Applied Mathematics and Computation, 204:191-201.

Andrews, P.L., 2009. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Variables. General Technical Report RMRS-GTR-213WWW. Fort Collins, CO: Department of Agriculture, Forest Service. Rocky Mountain Research Station 111.

Andrews P.L., Chase C.H., 1989. BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system-BURN Subsystem. Part 2. Gen. Tech. Rep. INT-260. USDA Forest Service.

Andrews, P.L., Bevins, C.D., Seli, R.C., 2008. BehavePlus fire modeling system version 4.0 user's guide. General Technical Report 106WWW Revised, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Arévalo, C., 1968. El contrafuego. Su utilización para cortar y extinguir los incendios forestales. Montes 142, 307-323.

Baeza, M., De Luis, M., Raventós, J., Escarré, A., 2002. Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk. Journal of Environmental Management 65, 199-208.

Burgan R.E., 1988. Revisions of the 1978 National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service. Res Pap. SE-273.

Butler, B.W., Finney, M.A., Andrews, P.L., Albin, F.A., 2004. A radiation driven model for crown fire spread. Canadian Journal of Forest Research, 34:1588-1599.

Campbell, D., 2005. The Campbell Prediction System Book. A Wildland Fire Predictions System and Language. 3ª edición. 142 pp.

Castellnou, M., Kraus, D., Miralles, M., Delogu, G., 2010. Suppression fire use in learning organizations. In: Towards Integrated Fire Management – Outcomes of the European Project Fire Paradox. Silva JS, Rego F, Fernandes P, Rigolot E (eds.). European Forest Institute, 189- 201.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., 1983. Fire in forestry. Vol I and II. John Wiley & Sons, New York.

Chase, C.H. 1981. Spot fire distance equations for pocket calculators. Research Paper INT-310, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Odgen, UT.

Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H., 2002. Predicting crown fire behaviour to support forest fire management decision-making. Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Viegas (ed.). 2002 Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.

Cruz, M.G., Alexander, M.E., Wakimoto, R.H., 2004. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. Forest Science 50: 640-658.

Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H., 2005. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. Canadian Journal of Forest Research 35: 1626-1639.

Cruz M.G., Butler B.W., Alexander M.E., Forthofer J.M., Wakimoto R.H., 2006a. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model idealization. International Journal of Wildland Fire, 15: 47-60.

Cruz, M.G., Butler, B.W., Alexander, M.E., 2006b. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: model evaluation. International Journal of Wildland Fire, 15: 61-72.

Cruz M.G., Butler B.W., Alexander M.E., Viegas D.X., 2006c. Development and evaluation of a semi-physical crown fire initiation model. Proceeding of the V International Conference on Forest Fire Research. Coimbra, Portugal.

Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D., 1977. The National Fire-Danger Rating System-1978. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT-39.

Dupuy, J.L., Linn, R.R., Konovalov, V., Pimont, F., Vega, J.A., Jimenez, E., 2011. Exploring three-dimensional coupled fire/atmosphere interactions downwind of wind-

driven surface fires and their influence on backfiring using the HIGRAD-FIRETEC model. *International Journal of Wildland Fire. In press*

Ellis, P., 2000. The Aerodynamics and Combustion Characteristics of Eucalypt Bark-A Firebrand Study. Ph.D. thesis, Australian National University.

Fernandes, P.M., Botelho, H.S., Rego, F.C., Loureiro, C., 2009. Empirical modelling of surface fire behaviour in maritime pine stands. *International Journal of Wildland Fire* 18, 698-710.

Finney, M.A., 1994. Modeling the spread and behaviour of prescribed natural fires. In: *Proceedings of the 12th Conference of Fire and Forest Meteorology, Jekill Island.*

Finney, M., 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. *Research Paper, RMRS-RP-4*, 47.

Finney, M.A., Britain, S., Seli, R. C., 2006. FlamMap Version 3.0 Beta. Computer program available at www.fire.org. Last updated February 16, 2006.

Finney, M.A., McAllister, S.S. 2011. A review of fire interactions and mass fires. *Journal of Combustion* 2011, 14 pp.

Forestry Canada Fire Danger Group, 1992. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System. *Inf. Report ST-X-3*. Forestry Canada.

Ganteaume, A., Lampin-Maillet, C., Guijarro, M., Hernando, C., Jappiot, M., Fonturbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., Vega, J.A., 2009. Spot fires: fuel bed flammability and capability of firebrands to ignite fuel beds. *International Journal of Wildland Fire*, 18 (8): 951-969.

Haines, D.A., 1988. A lower atmosphere severity index for wildlife fires. *Fire Weather*, Vol 13 nº 2.

Johnston, P., Milne, G., Klemitz, D., 2005. Overview of bushfire simulation systems. *Bushfire CRC. School of Computer Science and Software Engineering, University of Western Australia*, 24 pp.

Keetch J.J., Byram G.M., 1968. A drought index for forest fire control. *USDA Forest Service Research Paper. SE-38*.

Koo, E., Linn, R.R., Pagni, P., Edminster, C., 2011. Modeling firebrand transport in wildfires using HIGRAD/FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire. In press*.

Linn, R.R., Reisner, J., Colman, J.J., Winterkamp, J., 2002. Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire*, 11: 233-246.

Luke, R.H., McArthur, A.G., 1986. *Bushfires in Australia*. Wilke and Company Limited., Clayton, Victoria, Australia.

Lopes A.M.G., Cruz M.G., Viegas D.X., 2002. FireStation-an Integrated Software System for the Numerical Simulation of Fire Spread on Complex Topography. Environmental Modelling & Software 17, 269-285.

Malen, M., 2009. Predicción de la Evolución de los Incendios Forestales Guiada Dinámicamente por los Datos. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. 163 pp.

Martínez, E., Aguirre, F., 1997. Manual del contrafuego: el manejo del fuego en la extinción de incendios forestales. TRAGSA, 52 p.

McArthur A.G., 1962. Control Burning in Eucalypt Forests. Department of National Development, Commonwealth of Australia, Forestry and Timber Research Bureau, Leaflet 80. Canberra.

McArthur, A.G., 1966. Weather and grassland fire behaviour. Comm. of Australia Forestry and Timber Bureau Leaflet 100, 23p.

McArthur A.G., 1967. Fire behaviour in eucalypt forests. Department of National Development, Commonwealth of Australia, Forestry and Timber Research Bureau, Leaflet 107. Canberra.

Mell W., Jenkins M.A., Gould J., Cheney Ph., 2007. A physics-based approach to modelling grassland fires. International Journal of Wildland Fire, 16.

Morvan, D., Dupuy, J.L., 2004. Modelling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. Combustion & Flame, 138: 199-200.

Morvan, D., Hofman, C., Rego, F., Mell, W., 2009. Numerical simulation of the interaction between two fire fronts in the context of suppression fire operations. 8th Symposium on Fire and Forest Meteorology, 13-15 October 2009, Kalispell, MT-USA.

Porterie, B., Zekri, N., Clerc J.P., Loraud J.-C., 2007. Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. Combustion and Flame, 149:63-78.

Pyne, S.J., 1984. Introduction to Wildland Fires: Management in the United States. Wiley and Interscience Publications.

Roads J.O., Fujioka F., Chen S.C., Burgan, R.E., 2005. Seasonal fire danger forecasts for the USA. International Journal of Wildland Fire. 14, 1-18.

Rothermel R.C., 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. USDA Forest Service Research Paper, INT-115. Ogden, UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Rothermel R.C., 1983. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires. USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report INT-143. Ogden, UT.

Rothermel R.C., Wilson R.A., Morris G.A., Sackett S.S., 1986. Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE Fire Prediction System. USDA Forest Service, Intermountain Research Station Research Paper INT-359. Ogden, UT.

Rothermel, R.C., 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. Res. Pap. INT-438. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 46 p.

Roxburgh, R., Rein, G., 2008. Study of wildfire in-draft flows for counter fire operations. In: Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires. J de las Heras, CA Brebbia, D Viegas, V Leone (eds.). WIT Press. pp: 13-22.

Ruíz, A.D., Vega, J.A., 2007. Modelos de predicción de la humedad de los combustibles muertos: fundamentos y aplicación. Monografía INIA, Serie Forestal, 15: 207 p. INIA, MEC. Madrid. ISBN: 978-84-7498-520-7.

Sardoy, N., Consalvi, J.L., Porterie, B., Fernandez-Pello, A.C., 2007. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees. Combustion and Flame, 150:151-169.

Schroeder, M.J., 1969. Ignition probability. Office Report 2106-1, Rocky Mountain Research Station.

Scott, J. H., 1999. NEXUS: a system for assessing crown fire hazard. Fire Management Notes. 59(2): 20-24.

Scott, J.H., Reinhardt, E. D., 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. USDA For. Res. Pap. RMRS-RP-29. 59 p.

Sneeuwjagt R.J., Peet G.B., 1985. Forest Fire Behaviour Tables for Western Australia. Western Australia Department of Conservation and Land Management.

Trabaud, L., 1979. Etude du comportement du feu dans la garrigue de Chêne kermes à partir des températures et des vitesses de propagation. Annales des Sciences Forestieres 36, 13-38.

Van Wagner, C.E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal of Forestry Research, 7: 23-34.

Van Wagner C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35. Ottawa, Canada.

Van Wagner, C.E., 1989. Prediction of crown fire behavior in conifer stands. Pages 207-212 in Proceedings of Tenth Conference of Fire and Forest Meteorology (April 17-21, Ottawa, Ontario). Forestry Canada, Ottawa, Ontario.

Van Wagner, C.E., 1993. Prediction of crown fire behaviour in two stands of jack pine. Canadian Journal of Forestry Research 23: 442-449.

Vega, J.A., 2001. Manual de queimas prescritas para matogueiras de Galicia, Ed. Xunta de Galicia, 230 pp.

Vega, J.A., Cuiñas, P., Fonturbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., Fernández, C., 2000. Primer modelo de predicción de comportamiento del fuego en matorrales de Galicia. In: La defensa contra incendios forestales: Fundamentos y Experiencias. R Vélez (ed.) Mc. Graw-Hill, Madrid, España, 9.11-9.20.

Vega, J.A., Fernandes, P., Cuiñas, P., Fonturbel, T., Pérez, J.R., Loureiro, C., 2006. Fire spread analysis of early summer field experiments in shrubland fuel types of northwestern Iberia. In: DX Viegas (Ed.), Proceedings of the Fourth International Conference on Forest Fire Research, Figueira da Foz.

Vega, J.A., Jiménez, E., Fernández, C., Dupuy, J.L., Linn, R.R., 2010. Backfire feasibility in shrubland wildfire fighting in NW Spain. In: DX Viegas (Ed.), Proceedings of the Fifth International Conference on Forest Fire Research, Coimbra.

Viney N.R., Hatton T.J., 1989. Assessment of existing fine fuel moisture models applied to Eucalyptus litter. Australian Forestry 52(2), 82-93.

Woycheese, J.P., Pagni, P.J., Liepmann, D., 1999. Brand propagation from large-scale fires. Journal of Fire Protection Engineering, 10:32-44.

Xanthopoulos, G., Wakimoto, R.H., 1993. A time to ignition-temperature-moisture relationship for branches of three western conifers. Canadian Journal of Forestry Research 23(2):253-258.