



Universitat Autònoma  
de Barcelona

Departament d'Arquitectura de Computadors i  
Sistemes Operatius

Màster en Computació d'Altes Prestacions

Modelos de viento aplicados a la mejora  
en la predicción de incendios forestales

Memoria del trabajo de  
Investigación realizada por Carlos  
Brun Sorribas y dirigida por el  
Dr. Tomàs Margalef dentro del  
Máster en Computación de Altas  
Prestaciones del Departamento de  
Arquitectura de Computadores y  
Sistemas Operativos de la Escuela  
de Ingenierías de la Universidad  
Autónoma de Barcelona



Trabajo de investigación  
Máster en Computación de Altas Prestaciones  
Curso 2010-11

**Modelos de vientos aplicados a la mejora en la predicción de  
incendios forestales**

*Autor*

Carlos Brun Sorribas

*Director*

Tomàs Margalef Burrull

Departamento Arquitectura de Computadores y Sistemas Operativos  
Escola d'Enginyeries  
Universitat Autònoma de Barcelona

Firma director

Firma Autor



# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi director en este trabajo, el Dr. Tomàs Margalef, su dedicación y apoyo desde el primer día, y su capacidad para orientarme cuando sentía que no iba por buen camino. De la misma forma, han sido vitales los consejos, impresiones y ayuda continua de la Dra. Ana Cortés. Sin el apoyo de ambos este trabajo no hubiera sido posible.

Tampoco quiero olvidarme del Dr. Darío Rodríguez, por el gran esfuerzo que ha hecho para que pudiera llevar a cabo este trabajo y todas las horas que ha dedicado orientándome y trabajando a mi lado. Del mismo modo ha sido un apoyo fundamental mi amigo y compañero Andrés Cencerrado, que siempre me ha echado una mano cuando le he necesitado y, este trabajo, también es gracias a él.

Al resto de componentes del grupo de trabajo, Kerstin y Hisham, gracias por vuestras opiniones y consejos, que me han ayudado a reflexionar y poder seguir adelante en el trabajo.

A todos los profesores y compañeros con los que he compartido este maravilloso y, al mismo tiempo, intenso año. Ha sido extremadamente fácil integrarme este primer año, por la calidad humana de todos. Permitidme hacer una mención especial a Abel, mi compañero de batallas en este máster, con una mente brillante y mejor persona. A César, que es una de las mejores personas que he conocido este año y a Sandra que siempre tiene una palabra de ánimo y una sonrisa. A los dos, me alegra mucho de haberlos conocido.

A Hugo y su humor paraguayo, a Aprigio por su calidad humana, Arindham que siempre ríe aunque no sé si siempre me entiende, Javier, Julio y Claudio.

A los cracks del PT, Javi y Dani, no sé cómo nos soportan...

En el ámbito personal, quiero dar las gracias a muchas personas y espero no olvidarme de nadie.

A mis padres, porque me han hecho ser quién soy y estoy orgulloso y eternamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Os quiero.

A Marina, por ayudarme con el inglés y por ser una persona tan maravillosa y alegre. Adrià y Uku, grandes amigos que siempre los tienes cuando los necesitas. Rober, eres un 10 como persona y Nat, siempre tienes un momento para escucharme y darme aliento. No cambiéis nunca. Laurita recuerda: “*Al pot petit hi ha la bona confitura*”.

Cris, sabes cuánto te quiero y lo importante que eres para mí. Espero poder compartir muchas más risas y confidencias por muchos años. Raquel, no hace falta que te diga la gran persona que eres y lo mucho que te quiero. Labori, gracias por todos los buenos momentos que hemos compartido y los que vendrán.

Johan, 3 años bastan para saber que amigos como tú hay pocos. Sheila, contagias tu alegría y ganas de vivir, y sin hablar ya sabes cómo estoy. Gracias por todo a los dos.

Vania y Carlos, lo mejor que me he llevado de mis años en la ETSE.

A mi hermano, porque sé que lo tengo para lo que necesite y cuando lo necesite y a mi cuñada favorita, Sandra, que siempre me ha entendido mejor que nadie.

Carmen, Josep Maria e Isabel, gracias por tratarme como si fuera vuestro hijo, sois parte de mi familia y os agradezco todo lo que hacéis por mí.

Y Núria, mi amor, mi apoyo, mi guía, la persona más importante en mi vida. Soy muy afortunado de tenerte a mi lado y que mi vida vaya unida a la tuya. TE QUIERO.

Este trabajo lo quiero dedicar a mi abuela. Has sido un ejemplo de bondad y generosidad. Nunca te olvidaré yaya.

# Abstract

Forest fire prediction is one of the big challenges of the scientific community, for their environmental, human and economic impact on society.

The course of this phenomenon is hard to be modeled because of the great amount of variables involved in it and the difficulty when it comes to measure them properly. Fire simulators are very useful tools, but the results that they can currently offer us are very imprecise. Our team has been working on the forest fire prediction in two stages in which, before any prediction, we included a stage of adjustment of parameters in order to get more detailed predictions.

Although the improvement that this new paradigm of predicting means, real fire simulations offer a high rate of error due to weather conditions, which usually vary in a significant way during the simulation process.

One of the main determinants in the course of a fire, along with terrain features, is the wind. Prediction models are extremely sensitive to wind direction and velocity changes. That is the reason why any improvement of the quality of the analysis of these two variables has a direct influence on the quality of the prediction.

Current predicting systems use wind direction and velocity in a global way through all the terrain. What we aim to do with this project is to introduce a model of wind with which we could generate local winds in each cell in which the terrain is divided. These local winds will depend on general wind and on terrain features of such cells.

We consider that using general wind is not enough to obtain an accurate prediction of the course of a fire. We have confirmed that including a wind field simulator in our system can improve our predictions in a significant way. We are very optimistic with the results that we have obtained from the synthetic experiments we have carried out, for we consider that including local wind variables will enable us to improve our predictions in real cases of fires.



# Resum

La predicció d'incendis forestals és un dels grans reptes de la comunitat científica a causa de l'impacte mediambiental, humà i econòmic que tenen a la societat.

El comportament d'aquest fenomen és difícil de modelar a causa de la gran quantitat de variables que hi intervenen i la dificultat que implica el correcte mesurament d'aquestes. Els simuladors de foc són eines molt útils però, actualment, els resultats que hi obtenim tenen un alt grau d'imprecisió. Des del nostre grup s'ha treballat en la predicció en dues etapes on, abans de realitzar qualsevol predicció, s'incorpora una etapa d'ajustament dels paràmetres d'entrada per obtenir millors prediccions.

Malgrat la millora que suposa aquest nou paradigma de predicció, les simulacions sobre incendis reals tenen un alt grau d'error per l'efecte de les condicions meteorològiques que, usualment, varien de manera notable durant el transcurs de la simulació.

Un dels factors més determinants en el comportament d'un incendi, juntament amb les característiques del terreny, és el vent. Els models de predicció són extremadament sensibles al canvi en les components de direcció i velocitat del vent i per això qualsevol millora que puguem introduir per millorar la qualitat d'aquests components influeix directament en la qualitat de la predicció.

El nostre sistema de predicció utilitza la direcció i velocitat del vent de forma global a tot el terreny, i el que proposem amb aquest treball és introduir un model de vents que ens permeti generar vents locals a cada cel·la en què es divideixi el terreny. Aquest vent local dependrà del vent general i de les característiques del terreny en aquesta cel·la.

Considerem que la utilització d'un vent general no és suficient per a realitzar una bona predicció del comportament d'un incendi i hem comprovat que la inclusió d'un simulador de camp de vents en el nostre sistema pot arribar a millorar les nostres prediccions considerablement. Els resultats obtinguts en els experiments sintètics que hem realitzat ens fan ser optimistes, ja que considerem que la inclusió de components de vent locals permetrà millorar les nostres prediccions en incendis reals.



# Resumen

La predicción de incendios forestales es uno de los grandes retos de la comunidad científica debido al impacto medioambiental, humano y económico que tienen en la sociedad.

El comportamiento de este fenómeno es difícil de modelar debido a la gran cantidad de variables que intervienen y la dificultad que implica su correcta medición. Los simuladores de fuego son herramientas muy útiles pero, actualmente, los resultados que obtenemos tienen un alto grado de imprecisión. Desde nuestro grupo se ha trabajado en la predicción en dos etapas, donde antes de realizar cualquier predicción, se incorpora una etapa de ajuste de los parámetros de entrada para obtener mejores predicciones.

Pese a la mejora que supone este nuevo paradigma de predicción, las simulaciones sobre incendios reales tienen un alto grado de error por el efecto de las condiciones meteorológicas que, usualmente, varían de manera notable durante el transcurso de la simulación.

Uno de los factores más determinantes en el comportamiento de un incendio, junto con las características del terreno, es el viento. Los modelos de predicción son extremadamente sensibles al cambio en los componentes de dirección y velocidad del viento por lo que cualquier mejora que podamos introducir para mejorar la calidad de estas componentes influye directamente en la calidad de la predicción.

Nuestro sistema de predicción utiliza la dirección y velocidad del viento de forma global en todo el terreno, y lo que proponemos con este trabajo es introducir un modelo de vientos que nos permita generar vientos locales en todas las celdas en las que se divide el terreno. Este viento local dependerá del viento general y de las características del terreno de dichas celdas.

Consideramos que la utilización de un viento general no es suficiente para realizar una buena predicción del comportamiento de un incendio y hemos comprobado que la inclusión de un simulador de campo de vientos en nuestro sistema puede llegar a mejorar nuestras predicciones considerablemente. Los resultados obtenidos en los experimentos sintéticos que hemos realizado nos hacen ser optimistas, puesto que consideramos que la inclusión de componentes de viento locales permitirá mejorar nuestras predicciones en incendios reales.



# Índice general

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1    Descripción general .....	1
1.2    Motivación del trabajo.....	2
1.3    Objetivos .....	7
1.4    Organización de este trabajo.....	8
Capítulo 2: Predicción de la propagación de incendios forestales y calibración de los parámetros .....	9
2.1    Introducción.....	9
2.2    Predicción clásica.....	13
2.3    Predicción en dos etapas .....	13
2.3.1    Método evolutivo (GA).....	15
2.3.2    Método estadístico (S2F2M) .....	17
2.3.3    Método evolutivo guiado por datos .....	19
2.3.4    Método híbrido estadístico-evolutivo (SAPIFE <sup>3</sup> ).....	20
2.3.5    Método SAPIFE <sup>3</sup> rt .....	22
Capítulo 3: Incorporación del modelo de vientos en la predicción en 2 etapas .....	25
3.1    Introducción al modelo.....	25
3.1.1    Campo de vientos .....	26
3.2    Descripción de los objetivos .....	28
3.2.1    Estudio del modelo de vientos.....	29
3.2.2    Acoplamiento de los modelos .....	29
3.2.3    Diseño de los módulos de interconexión .....	29
3.2.4    Experimentación básica con el sistema.....	29
3.2.5    Experimentación con la predicción en 2 etapas .....	30
3.2.6    Experimentación con un fuego real .....	30
3.3    Partes del modelo .....	30
3.3.1    Preprocesado de los parámetros .....	31
3.3.2    Simulador de vientos.....	33

3.3.3	Postprocesado de los parámetros.....	33
3.4	Integración del modelo de vientos en el método de dos etapas .....	34
Capítulo 4:	Experimentación realizada y resultados obtenidos .....	37
4.1	Métricas.....	37
4.2	Entorno.....	38
4.2.1	WindNinja .....	39
4.2.2	FireLib.....	41
4.2.3	Miramón, GDAL.....	41
4.2.4	Gnuplot .....	42
4.3	Experimentos .....	43
4.3.1	Efecto del campo de vientos sobre la propagación de un incendio .....	44
4.3.2	Aplicación del modelo en la predicción en dos etapas.....	49
Capítulo 5:	Conclusiones y trabajo futuro .....	59
5.1	Trabajo futuro .....	60
Referencias.....		61

# **Lista de Figuras**

Figura 1.1. Ciencia computacional .....	1
Figura 1.2. Área quemada y número de incendios en los países más afectados .....	2
Figura 1.3 Proceso de creación de un modelo de propagación.....	4
Figura 1.4 Modelo de Rothermel.....	5
Figura 1.5 Sistemas de medición de variables meteorológicas .....	7
Figura 2.1 Modelos de vegetación (Pastos) .....	11
Figura 2.2 Modelos de vegetación (Arbustos) .....	11
Figura 2.3 Modelos de vegetación (Leñosos) .....	12
Figura 2.4 Modelos de vegetación (Ramosos) .....	12
Figura 2.5 Predicción de incendios clásica .....	13
Figura 2.6 Predicción en 2 etapas .....	14
Figura 2.7 Esquema del método evolutivo.....	16
Figura 2.8 Método de calibración S2F2M .....	17
Figura 2.9 Mapa de probabilidades para 4 escenarios.....	18
Figura 2.10 Búsqueda del factor $k_{ign}$ .....	18
Figura 2.11 Método de calibración SAPIFE <sup>3</sup> .....	21
Figura 2.12 Comparativa GA, S2F2M y SAPIFE <sup>3</sup> .....	22
Figura 2.13 Estructura de SAPIFE <sup>3</sup> rt .....	23
Figura 3.1 Terreno y medición hipotética del viento atmosférico .....	27
Figura 3.2 Campo de vientos aplicado al terreno en función del viento general.....	27
Figura 3.3 Estructura del sistema con el modelo de vientos acoplado .....	31
Figura 3.4 Etapa de preprocesado de los parámetros.....	31
Figura 3.5 Tipos de proyecciones .....	32
Figura 3.6 Sistemas de referencia de la dirección del viento.....	34
Figura 3.7 Dos parámetros de viento por celda del terreno .....	34
Figura 4.1 Ejemplo de cálculo de error entre dos frentes .....	38
Figura 4.2 Interfaz de WindNinja .....	39
Figura 4.3 Definición de diferentes puntos de medición en el terreno .....	40
Figura 4.4 Esquema del terreno y mapa de elevación .....	43
Figura 4.5 Esquema del terreno y mapa de elevación .....	44
Figura 4.6 Mapa de velocidades del viento.....	45
Figura 4.7 Mapa de direcciones del viento.....	45
Figura 4.8 Área de ignición inicial .....	45
Figura 4.9 Propagación con viento uniforme.....	46
Figura 4.10 Propagación con campo de vientos .....	47
Figura 4.11 Comparación de los frentes en diferentes instantes de tiempo .....	48

Figura 4.12 Esquema del método GAwf.....	49
Figura 4.13 Incendio sintético de referencia (fuego real) .....	51
Figura 4.14 Errores en la etapa de calibración.....	53
Figura 4.15 Errores en la etapa de predicción.....	54
Figura 4.16 Comparativa de frentes de 6 a 12 horas.....	55
Figura 4.17 Comparativa de frentes de 12 a 18 horas.....	55
Figura 4.18 Comparativa de frentes de 18 a 24 horas.....	56
Figura 4.19 Comparativa de frentes de 24 a 30 horas.....	56
Figura 4.20 Comparativa de frentes de 30 a 36 horas.....	57
Figura 5.1 Sistema con modelo meteorológico acoplado .....	60

# **Lista de Tablas**

Tabla 1.1 Estadísticas de incendios .....	3
Tabla 4.1 Población inicial para el método GA y GAwf.....	52



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Descripción general

La ciencia hasta el momento en que se descubrió la capacidad de un computador para realizar cálculos numéricos, estaba basada en una parte teórica y otra de experimentación, dónde los cálculos eran hechos a mano. Esto, era una barrera para abordar ciertos problemas para los cuales no era posible dar respuesta con los medios de que disponían y que los computadores eran capaces de solucionar en un tiempo realmente corto.

Con ello se plantearon las bases de una nueva disciplina denominada Ciencia Computacional [1]. Esta se define como una ciencia interdisciplinaria que se encuentra en la intersección entre las Ciencias Naturales, las Matemáticas y la Informática (ver Figura 1.1). La ciencia computacional nos provee un marco para simular y evaluar fenómenos físicos representados por modelos matemáticos utilizando para ello herramientas informáticas, tanto *hardware* como *software*.

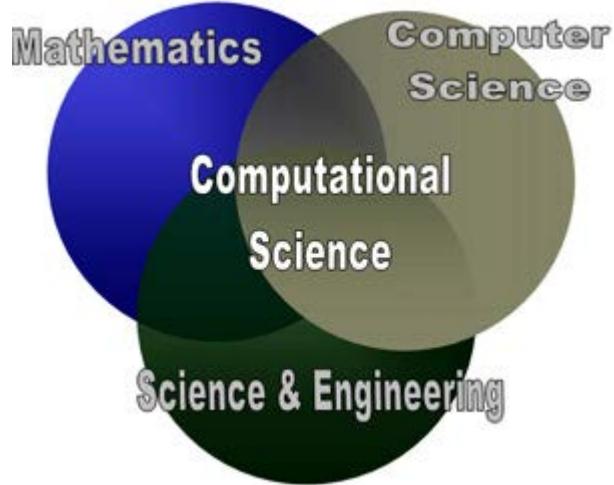


Figura 1.1. Ciencia computacional

La computación de altas prestaciones ha proporcionado la potencia de cálculo necesaria para abordar problemas extremadamente complejos, grandes retos, que hasta entonces no eran tratables con el paradigma de computación clásica, debido a la complejidad de

los mismos que hacía que los recursos de los que disponía un investigador, no permitieran encontrar una solución adecuada en un tiempo objetivamente aceptable.

Este gran incremento en la capacidad de cómputo nos ha permitido tratar este tipo de problemas y lograr soluciones aproximadas a los mismos en un tiempo aceptable, como también ha abierto las puertas al planteamiento de nuevos problemas que debido a la necesidad de un cálculo intensivo, no habían podido ser estudiados hasta el momento.

Los grandes desastres naturales como huracanes, tsunamis, terremotos o los propios incendios forestales, que es el caso que nos atañe, son fenómenos estocásticos, donde intervienen una gran cantidad de variables y por ello, requerimos de modelos que nos representen estos fenómenos para poder predecir y simular su comportamiento.

Obviamente, estos modelos son una simplificación de la realidad, y por tanto no están exentos de errores en la simulación.

## 1.2 Motivación del trabajo

Los incendios forestales son fenómenos con unas consecuencias muy graves para la sociedad. Siempre, y como es lógico, nos fijamos en las víctimas humanas que producen los fuegos más devastadores, pero no debemos olvidar la cantidad de hectáreas de terreno que arrasan, con el daño a nivel medioambiental que ello genera, así como el consecuente gasto económico que requiere, tanto en tareas de prevención, extinción, reforestación o indemnizaciones.

En el informe anual sobre los incendios forestales en Europa del *Joint Research Centre* de 2009 [2], se puede apreciar el impacto de esta catástrofe natural. Los países más afectados por los incendios son el quinteto formado por Portugal, España, Francia, Italia y Grecia. En este informe tienen el dudoso honor de merecer un capítulo aparte, por la gran cantidad de incendios y la cantidad de superficie afectada año tras año (ver Figura 1.2).

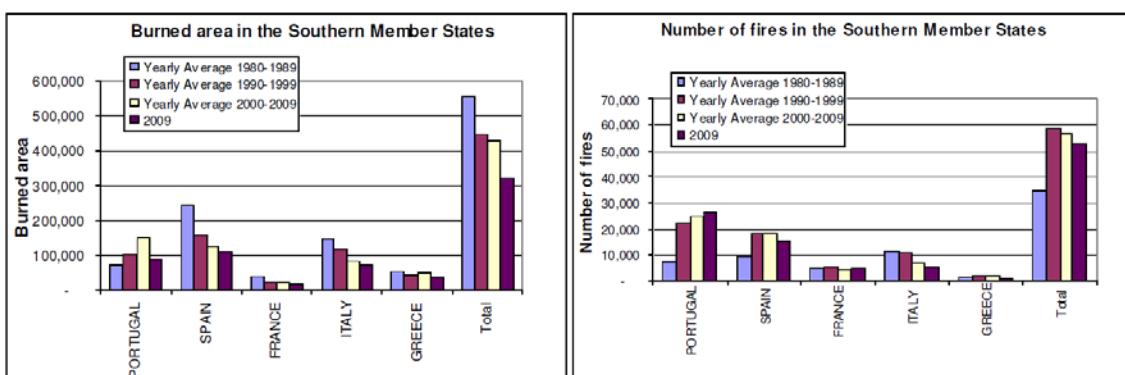


Figura 1.2. Área quemada y número de incendios en los países más afectados

En la tabla 1.1, incluida en el mismo informe, vemos como en la Península Ibérica (España y Portugal), en el año 2009, el número de incendios supone el 78% del total de incendios de los 5 países más afectados de Europa y en cuanto al área quemada suponen el 61% del total de este grupo.

Centrándonos en el caso de España, en 2009, el número de víctimas debido a incendios forestales fue de 12 personas, de las cuales 10 eran bomberos. En este apartado, el ejemplo más dramático fue el sucedido en Grecia [3], dónde de las 177 víctimas que se contaban del periodo comprendido entre 1980 y el 2007, 78 se produjeron en los graves incendios ocurridos en 2007.

En cuanto al aspecto económico, en el ejercicio de 2009 se destinaron en España 67 millones de euros para la extinción de incendios, 44 millones en prevención que fueron incrementados en 11 millones más para la eliminación de biomasa residual y unos 9 millones en reforestación. Esto hace un presupuesto total de 131 millones de euros dedicados a este concepto.

Table 1. Number of fires and burnt area in the five Southern Member States in the last 30 years.

Number of fires	PORUGAL	SPAIN	FRANCE	ITALY	GREECE <sup>(*)</sup>	TOTAL
2009	26 119	15 391	4 800	5 422	1 063	52 795
% of total in 2009	49%	29%	9%	10%	2%	100%
Average 1980-1989	7 381	9 515	4 910	11 575	1 264	34 645
Average 1990-1999	22 250	18 152	5 538	11 164	1 748	58 851
Average 2000-2009	24 949	18 337	4 406	7 259	1 569	56 645
Average 1980-2009	18 194	15 335	4 951	9 999	1 569	50 047
<b>TOTAL (1980-2009)</b>	<b>545 805</b>	<b>452 848</b>	<b>148 531</b>	<b>299 977</b>	<b>47 058</b>	<b>1 501 409</b>
Burnt areas (ha)	PORUGAL	SPAIN	FRANCE	ITALY	GREECE <sup>(*)</sup>	TOTAL
2009	87 416	110 783	17 000	73 355	35 342	323 896
% of total in 2009	27%	34%	5%	23%	11%	100%
Average 1980-1989	73 484	244 788	39 157	147 150	52 417	556 995
Average 1990-1999	102 203	161 319	22 735	118 573	44 108	448 938
Average 2000-2009	150 101	125 239	22 342	83 878	49 238	430 798
Average 1980-2009	108 956	177 115	28 078	116 534	48 587	478 910
<b>TOTAL (1980-2009)</b>	<b>3 257 886</b>	<b>5 313 457</b>	<b>842 332</b>	<b>3 496 005</b>	<b>1 457 624</b>	<b>14 367 304</b>

<sup>(\*)</sup> Provisional data for 2009.

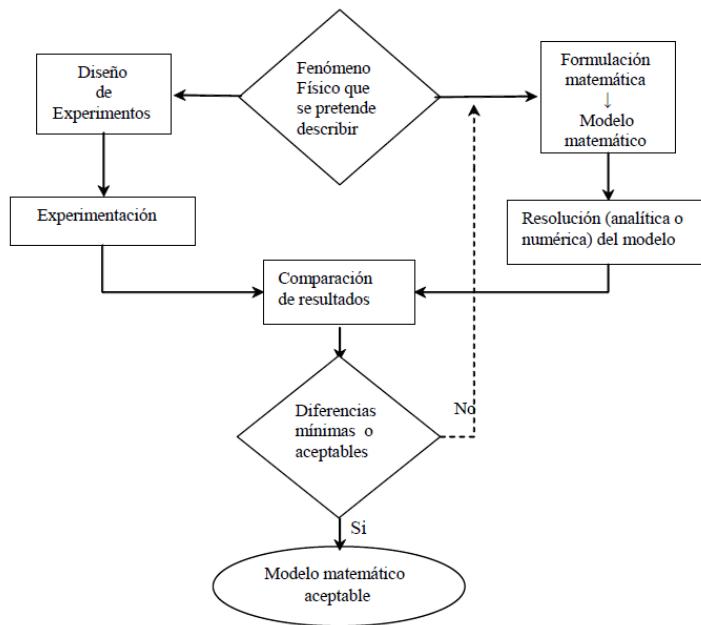
Tabla 1.1 Estadísticas de incendios

Vistos los efectos en todos los ámbitos que producen los incendios forestales, es lógico pensar que cualquier herramienta que ayude a predecir el comportamiento de los incendios y minimizar este impacto, supone un gran beneficio en todos los aspectos.

Los incendios forestales así como otros tantos grandes desastres naturales que se producen en el mundo actual, son objeto de estudio continuo por parte de la comunidad científica debido al enorme impacto medioambiental, económico y humano que generan.

Debido a la imposibilidad de predecir con antelación el inicio de un incendio forestal, los esfuerzos se centran en mitigar sus consecuencias cuando éste es detectado.

Para el estudio de este fenómeno se han desarrollado modelos de propagación del fuego, basados en leyes físicas y observaciones empíricas, que pretenden predecir con la mayor fidelidad posible el comportamiento de los incendios forestales [4].



**Figura 1.3 Proceso de creación de un modelo de propagación**

Los modelos se pueden dividir en tres categorías diferenciadas:

- Modelos *físicos*: Son modelos teóricos basados en leyes físicas de transferencia de calor y mecánica de fluidos, representadas por ecuaciones matemáticas [5] [6] [7].
- Modelos *empíricos*: Son modelos basados en la experimentación, basados en factores probabilísticos y muy ligados a la zona donde se ha experimentado y recolectado los datos, por lo que son poco portables [8].
- Modelos *semi-físicos*: Es un modelo híbrido de los dos anteriores, en el cual se entremezclan leyes físicas y observaciones empíricas [9] [10].

El modelo de Rothermel [11], es el modelo más reconocido para el estudio de este fenómeno y pertenece a los modelos semi-físicos. El modelo está basado en el cálculo de las velocidades de propagación en diferentes puntos del perímetro del frente inicial,

para obtener un nuevo perímetro que representa la predicción del nuevo frente según las ecuaciones del modelo de Rothermel. Estas velocidades se calculan en función de unas entradas como las que se pueden observar en la Figura 1.4.

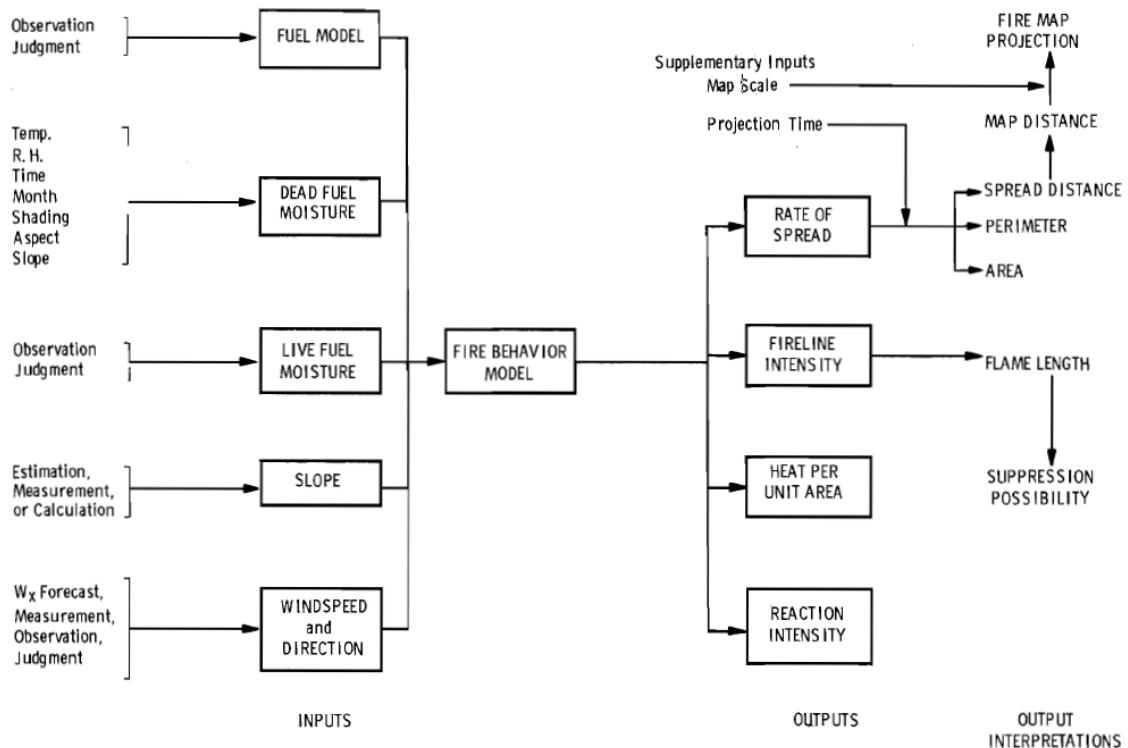


Figura 1.4 Modelo de Rothermel

Como se puede observar, el modelo requiere de una serie de parámetros de entrada que podemos categorizar en tres tipos [12]:

- Parámetros iniciales: define el estado del fuego en el preciso momento en el cual queremos realizar la simulación, es decir la situación y magnitud del incendio en ese instante, lo que denominamos frente inicial.
- Parámetros estáticos: son aquellos que no varían durante la propagación del incendio y son considerados constantes durante todos los pasos de simulación. Entre ellos podemos nombrar la topografía (elevación, pendiente, orientación) o la vegetación (también llamada combustible en este ámbito).
- Parámetros dinámicos: Son aquellos que evolucionan a lo largo del tiempo y, por tanto, son más difíciles de controlar y medir. Las variables meteorológicas forman parte de este grupo.

A partir de estos parámetros de entrada, el modelo nos generará una predicción del estado del fuego en un tiempo posterior determinado.

Para que los modelos sean útiles deben implementarse herramientas que incluyan el modelo de propagación y nos permitan predecir el comportamiento de un incendio.

Para ello se utilizan herramientas de simulación que nos permiten predecir el avance del fuego a partir de unos parámetros previamente observados. Existen multitud de simuladores de incendios [13] [14] [15] con el fin de predecir el frente de fuego en un tiempo de simulación posterior al introducido en el simulador, en forma de un conjunto de parámetros que caracterizan el terreno, el frente actual y la meteorología de la zona en un tiempo inicial  $t_i$ . Este conjunto, más o menos amplio según el simulador, es el que le permite predecir un frente estimado en el tiempo de simulación posterior  $t_{i+1}$ .

Obviamente, si dispusiéramos de un simulador ideal que tuviera en cuenta todos los factores que influyen en el comportamiento de un incendio y de una ecuación o serie de ecuaciones que nos describieran a la perfección el modelo real y sumáramos a ello, unos parámetros de entrada con total precisión en su medición, el frente predicho sería equivalente al real.

Por desgracia, los modelos son simplificaciones de la realidad y, por tanto, no contemplan todos los factores ni pueden dar una predicción exacta de la evolución del fuego. Además, la medición de los diferentes parámetros que intervienen en un fenómeno como el que estamos estudiando, no es una tarea trivial y no están exentos de imprecisión e incertidumbre, lo que añade más complejidad a la predicción de los incendios forestales.

Para atacar estos inconvenientes existen diversas estrategias que nos permiten refinar nuestras predicciones. Por un lado, los modelos son revisados, mejorados y a medida que aumenta la capacidad de cómputo y se aumenta el conocimiento del sistema físico, los modelos se hacen más complejos y tienen en cuenta más factores, para conseguir predicciones más cercanas a la realidad.

Por otro lado, la adquisición de los datos de entrada al simulador se va perfeccionando para mejorar su calidad. Las fotografías satelitales y aéreas, sensores, globos meteorológicos, estaciones meteorológicas y demás infraestructuras de medición (Ver Figura 1.5) van mejorando su precisión, a medida que la tecnología y, en buena parte, el factor económico lo permiten.



**Figura 1.5 Sistemas de medición de variables meteorológicas**

Desde nuestro grupo de trabajo hemos atacado el problema desde otro punto de vista. Somos sabedores de los errores de los modelos de cualquier simulador de fuegos que podemos encontrar en este campo de investigación. También somos conscientes que los parámetros medidos que nos llegan para entrar a estos simuladores son imprecisos y no describen de forma totalmente fiable el entorno donde se desarrolla el fuego. Por estas razones, nuestro objetivo fue el de desarrollar técnicas para calibrar los parámetros de entrada durante los pasos que forman la simulación completa de un incendio.

Con ello atacamos directamente esa imprecisión de los parámetros para ir minimizándola con cada predicción. De esta forma, no entramos al simulador aquellos parámetros que han sido medidos directamente, sino aquellos que introducidos en nuestro simulador nos dan una predicción más cercana a la realidad. La forma en que se hace este tipo de predicción y los diferentes métodos desarrollados durante estos últimos años en el grupo de investigación serán explicados más en profundidad en el capítulo 2 de este trabajo.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es mejorar los métodos de ajuste de parámetros, que serán explicados más en profundidad en el capítulo 2, acoplando un modelo de vientos que nos permita optimizar uno de los parámetros dinámicos que más influyen en el comportamiento de un incendio, como es el viento.

Para ello, el modelo de vientos nos permitirá trasladar el viento atmosférico global a toda la superficie del incendio, en un viento local en cada celda en que dividimos el mapa, de acuerdo a la resolución con la que estemos trabajando.

Esto permitirá tener predicciones más realistas ya que el viento, tanto en su componente de velocidad como en su dirección, se ve modificado por las irregularidades

del terreno estudiado, y ello afecta directamente en la forma y fuerza con la que el fuego se propaga.

Para alcanzar este objetivo global, se ha de encontrar un modelo que nos ayude a realizar la generación de los vientos locales y conseguir que nuestro sistema sea capaz de colaborar con este nuevo módulo de forma que nuestras predicciones sigan siendo válidas. Además debemos probar experimentalmente el modelo y demostrar que la inclusión de esta funcionalidad es beneficiosa para nuestro cometido.

Es de vital importancia conocer y saber aplicar los conocimientos de otras áreas de nuestra investigación, ya que nos movemos en un entorno multidisciplinar donde no son suficientes nuestras habilidades solo a nivel computacional, sino que requerimos de la ayuda y colaboración de áreas relativamente alejadas de la informática pura y dura.

## 1.4 Organización de este trabajo

Durante este primer capítulo se ha querido dar una breve introducción al tema de investigación que estamos tratando, la línea que sigue nuestro grupo y el objetivo principal del trabajo.

En el capítulo 2 se profundizará en los métodos de ajuste de parámetros que se han propuesto desde nuestro departamento y se describirán las restricciones con las que nos encontramos actualmente.

El capítulo 3 servirá para describir el modelo de vientos que queremos incorporar, la motivación de su inclusión, su estructura, la metodología que necesitamos para poder acoplarlo a nuestro sistema de predicción en 2 etapas y los beneficios que nos puede aportar.

En el capítulo 4 se expondrá la experimentación que se ha realizado para probar el potencial del modelo, mostrando con detalle la forma en que se han construido los experimentos, las herramientas utilizadas y un análisis de los resultados obtenidos de dicha experimentación.

Para acabar, en el capítulo 5, expondremos las conclusiones que podemos extraer de este trabajo, se explicarán las líneas abiertas que ha dejado este trabajo y se presentarán las líneas de trabajo que se proponen para el futuro, con la intención de ir refinando poco a poco las predicciones para que éstas sean más fiables y, por tanto, útiles a la hora de actuar en tiempo real, en el momento en que un incendio se inicia.

# **Capítulo 2: Predicción de la propagación de incendios forestales y calibración de los parámetros**

## **2.1 Introducción**

Los simuladores de incendios forestales utilizados en nuestro campo, simulan el avance del fuego en intervalos de tiempo definidos por el usuario. Para ello, necesitan de las características que definen el entorno en el momento en que tienen lugar, para poder darnos una predicción futura.

Ya se ha comentado la cantidad de variables que intervienen en este tipo de proceso, entre las cuales destacamos el terreno, el viento, la humedad, la vegetación y otras muchas más variables climatológicas.

Además se ha de tener en cuenta que estas variables no son independientes sino que suelen mantener una relación estrecha entre sí, de forma que el cambio en una de estas variables suele modificar el valor de las demás. Debido a la gran complejidad que esto supone, los simuladores y modelos asociados suelen obviar esta interrelación y omitir o mantener constantes ciertas características del entorno, para que el problema pueda ser computacionalmente abordable y poder dar una solución en un tiempo aceptable.

Este hecho no está exento de consecuencias, ya que tal simplificación ocasiona una pérdida en la calidad de los resultados que obtenemos, con la ventaja de lograr resultados en un tiempo menor. Por lo tanto, es importante establecer un buen compromiso entre calidad de predicción y tiempo de predicción.

El terreno, el viento, la humedad, la vegetación y demás variables que intervienen en una simulación son las responsables de que un fuego propague y avance a lo largo del terreno con una intensidad y velocidad determinadas, o bien, se extinga debido a que no se cumplan las condiciones necesarias para propagar.

Cuando hablamos de la vegetación debemos tener en cuenta diversos factores. Por un lado, tenemos la cantidad de material que encontramos en el terreno o carga de combustible. Cuanto mayor sea esta carga mayor será la intensidad y velocidad de propagación del incendio.

El tamaño del combustible también influye en la propagación de un incendio. Por poner un caso extremo, no quema igual un bosque de pinos que un terreno con pequeños arbustos. Si el tamaño del combustible es grande, el tiempo que tarda en calentar el material hasta que éste quema es mayor que en un combustible de pequeño tamaño que tarda muy poco en quemar.

El tiempo que tarda un combustible en calentarse hasta que se produce la ignición, también viene dado por la humedad del combustible en sí. Obviamente, a mayor humedad, más tiempo tardará éste en quemar, ya que el fuego deberá absorber esta humedad, hasta llegar a la temperatura que permite la ignición del combustible. Es por ello, que en la temporada estival, dónde la temperatura ambiental sube y las precipitaciones son poco frecuentes, la humedad del combustible es muy baja y el riesgo de incendio aumenta exponencialmente.

La forma en que está distribuido el combustible en el terreno también afecta en la propagación. En zonas muy espesas, se mantiene mejor la humedad y cuesta más quemar el combustible, mientras que con una densidad menor, se favorece el secado del combustible y permite quemar antes el combustible.

Sabemos que normalmente, en un terreno, no solo hay un tipo de vegetación. De todas formas, suele haber un tipo de vegetación que predomina por encima de todas. Por esa razón, Rothermel primero y más tarde Albini, propusieron un conjunto de 13 modelos de vegetación para simplificar los modelos de propagación de incendios, divididos en cuatro categorías (pastos, arbustos, leñosos y ramas).

Estos modelos de vegetación no solo definen el tipo de vegetación predominante sino que además, establecen una serie de factores que influyen en la intensidad y la velocidad de propagación del fuego para cada modelo.

Las Figuras 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4, nos dan una idea de los diferentes modelos de vegetación que se definieron.



Modelo 1  
Pasto corto

Modelo 2  
Pasto y arbustos pequeños

Modelo 3  
Pasto largo

**Figura 2.1 Modelos de vegetación (Pastos)**



Modelo 4  
Matorral

Modelo 5  
Arbustos pequeños



Modelo 6  
Arbustos con ramas  
pequeñas

Modelo 7  
Arbustos con muchas  
ramas

**Figura 2.2 Modelos de vegetación (Arbustos)**



Modelo 8  
Árboles con pasto o  
hojas debajo



Modelo 9  
Árboles con arbustos  
pequeños debajo



Modelo 10  
Árboles con arbustos  
secos debajo

**Figura 2.3 Modelos de vegetación (Leñosos)**



Modelo 11  
Algunas ramas caídas



Modelo 12  
Bastantes ramas caídas



Modelo 13  
Muchas ramas caídas

**Figura 2.4 Modelos de vegetación (Ramosos)**

La temperatura también influye, ya que hace secar los combustibles y, por tanto, acelera la propagación del fuego. Por supuesto, la pendiente del terreno es de suma importancia en la velocidad y dirección de propagación del fuego. Las pendientes de subida son las que más rápido hacen propagar un incendio.

Y por supuesto, y como eje central de este trabajo, está el viento. Es uno de los factores más importantes, influye mucho en la velocidad y dirección de propagación, en el transporte del calor, el secado del combustible y por lo tanto, debe ser muy tenido en cuenta a la hora de trabajar con el simulador.

## 2.2 Predicción clásica

La forma de predicción clásica tiene como elemento central el simulador de incendios. El simulador requiere en un tiempo inicial  $t_0$ , unos parámetros de entrada tales como el terreno y los datos meteorológicos, así como un frente inicial para poder dar su predicción en un instante posterior  $t_1$ .

Una vez realizado esta predicción, y llegado al instante  $t_1$ , dispondremos del frente real en este instante y podremos evaluar el error que presenta nuestra predicción (ver Figura 2.5).

Este error, como se ha comentado en el anterior capítulo, no solo viene dado por el modelo de fuegos que incorpora el simulador, sino que además hay que añadir la imprecisión e incertidumbre de los parámetros de entrada.

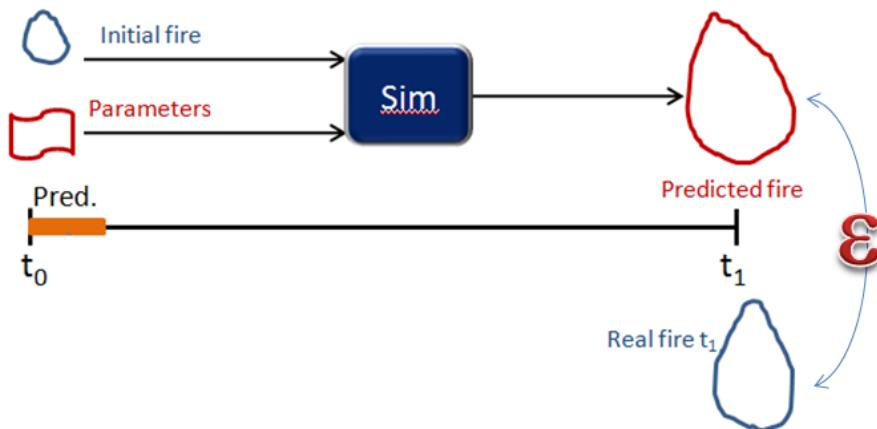


Figura 2.5 Predicción de incendios clásica

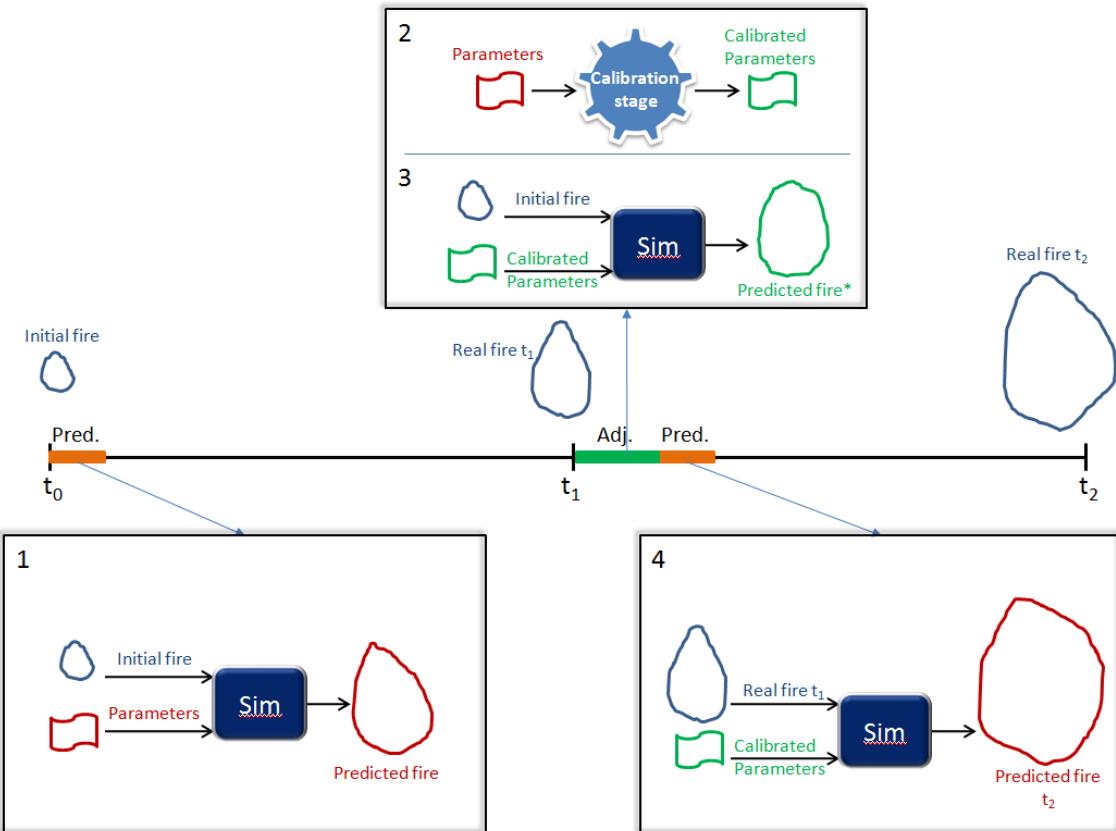
Con el fin de reducir esta imprecisión, desde el departamento se ha apostado por la denominada predicción en 2 etapas que pasamos a comentar seguidamente.

## 2.3 Predicción en dos etapas

El método de predicción en 2 etapas recibe este nombre por la inclusión de una etapa intermedia llamada de calibración o ajuste, además de la propia etapa de predicción.

Siguiendo el esquema mostrado en Figura 2.6, vamos a explicar paso a paso como se optimizan las predicciones con este método.

Para que el método funcione de forma correcta, necesitamos de un primer intervalo de tiempo ( $t_0$  a  $t_1$ ) en el cual se realiza una predicción clásica para obtener un primer frente predicho para poder comparar con el frente real en  $t_1$  (recuadro 1 de la figura).



**Figura 2.6 Predicción en 2 etapas**

Una vez disponemos de ambos frentes, medimos el error entre ellos, y pasamos los parámetros a la etapa de calibración. Ésta, optimizará los parámetros hasta generar un nuevo conjunto que produzca un error menor que el conjunto inicial de que disponíamos. Esta etapa se puede iterar hasta obtener un conjunto de parámetros que nos produzca un error que nosotros consideremos aceptable (recuadro 2).

Con este nuevo conjunto y el frente real en el instante  $t_1$ , realizaremos la predicción para el instante  $t_2$  que debería generar un error menor al de los parámetros iniciales sin optimizar (recuadro 3).

¿Por qué decimos “debería generar un error menor”? La razón es que partimos de la hipótesis de trabajo que las condiciones en que se desarrolla el fuego, no varían drásticamente entre los dos intervalos, hecho que no nos permitiría asegurar que los parámetros optimizados mejoran nuestra predicción.

### 2.3.1 Método evolutivo (GA)

La primera aproximación al problema fue utilizando el método evolutivo basado en un algoritmo genético. Los algoritmos genéticos [16], permiten la resolución de multitud de problemas basándose en la idea de cómo las especies evolucionan en el mundo natural.

Las dos ideas básicas son la selección natural y la reproducción sexual, siendo la primera, la base de la supervivencia y descendencia de los individuos y la segunda permite la combinación de los individuos que sobreviven en la población.

Por tanto, por un lado la selección asegura que sobrevivirán en la población aquellos individuos que mejor se adapten al entorno, es decir, los más fuertes, y por otro lado estos individuos se combinarán para generar nuevos individuos que harán evolucionar la población, generación tras generación. Además, algunos individuos podrán sufrir mutaciones en sus genes lo que hará que los individuos de la nueva generación no solo sean un producto exacto del cruzamiento de sus antecesores.

Para trasladar este concepto al mundo de la computación, tan solo hay que pensar en la población como una serie de posibles soluciones a un problema, para las cuales tenemos una función de error o de fitness (ajuste) que nos calcula cuan buena es la solución (o individuo).

Una vez tenemos todas las soluciones con su error asociado, podemos realizar una serie de operaciones para generar la siguiente población o conjunto de soluciones optimizada. Por una parte se seleccionan aquellos individuos mejores (un cierto porcentaje) y se mantienen intactos para la siguiente población (elitismo).

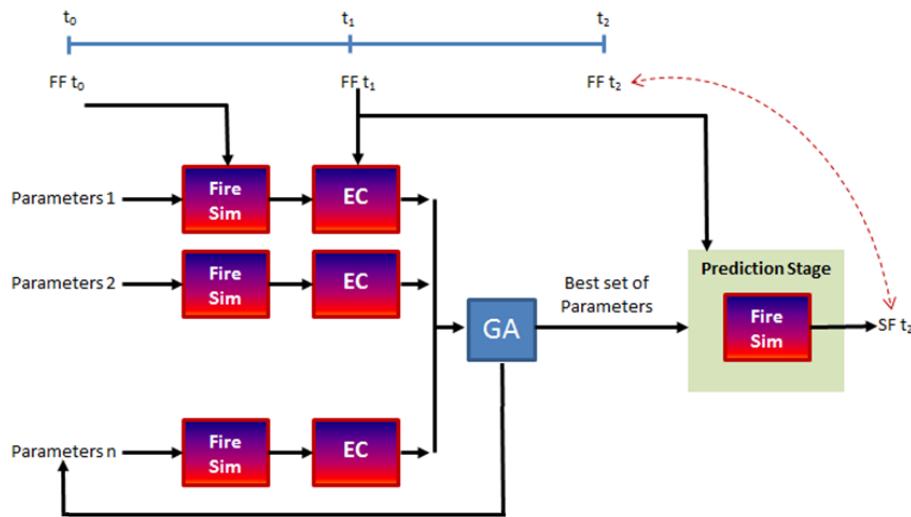
Un subconjunto de la población se combina por pares, para generar nuevos individuos (cruzamiento). Y además, otro porcentaje (usualmente bajo) de la población modifica alguna parte de sus características o genes, para introducir más heterogeneidad en la población (mutación).

Pero, ¿cómo se aplica esta mejora en la calibración de parámetros de un incendio forestal?

El método de calibración que se implementó fue llamado el método evolutivo o basado en un Algoritmo Genético (GA) [17], donde se parte de una población aleatoria formada por individuos, entendiendo que cada individuo es un conjunto de parámetros que describen el entorno del incendio.

Estos individuos son introducidos en el simulador de incendios junto con el frente inicial del fuego ( $FF t_0$ ) con lo cual cada individuo genera un frente predicho diferente para el siguiente instante de tiempo  $t_1$  (Ver Figura 2.7).

Estos frentes son comparados con el frente real en  $t_1$  ( $FF t_1$ ) y se calcula la diferencia o error de cada individuo o conjunto de parámetros (módulo EC, *Error Calculation*). Esta población se ordena y se le aplican las operaciones anteriormente descritas de elitismo, cruzamiento y mutación, para generar una nueva población.



**Figura 2.7 Esquema del método evolutivo**

Este proceso se repite un número acotado de veces (generaciones), momento en el que se selecciona el mejor conjunto de parámetros de la última generación para realizar la predicción para el instante  $t_2$ .

Los parámetros más importantes del algoritmo son el número de individuos, el número de generaciones, el porcentaje de elitismo, el cruzamiento y la probabilidad de mutación.

Este método es fácil de implementar y de paralelizar, es una técnica muy potente para la optimización de parámetros y usualmente no requiere de un número elevado de generaciones para converger a una buena solución. Por el contrario, puede suceder que no llegue a converger a una buena solución, nunca nos garantiza una solución óptima y se ha de poner especial énfasis en la decisión de los valores relativos al número de individuos, generaciones, elitismo, mutación y cruzamiento, para el buen funcionamiento del algoritmo.

### 2.3.2 Método estadístico (S2F2M)

El método estadístico o probabilístico [18] [19] persigue el mismo objetivo que el anterior método, pero difiere mucho en la forma en que alcanza el objetivo final que es la calibración de los parámetros.

Para poder entender cómo funciona el método, vamos a explicar las diferentes etapas que se muestran en la Figura 2.8.

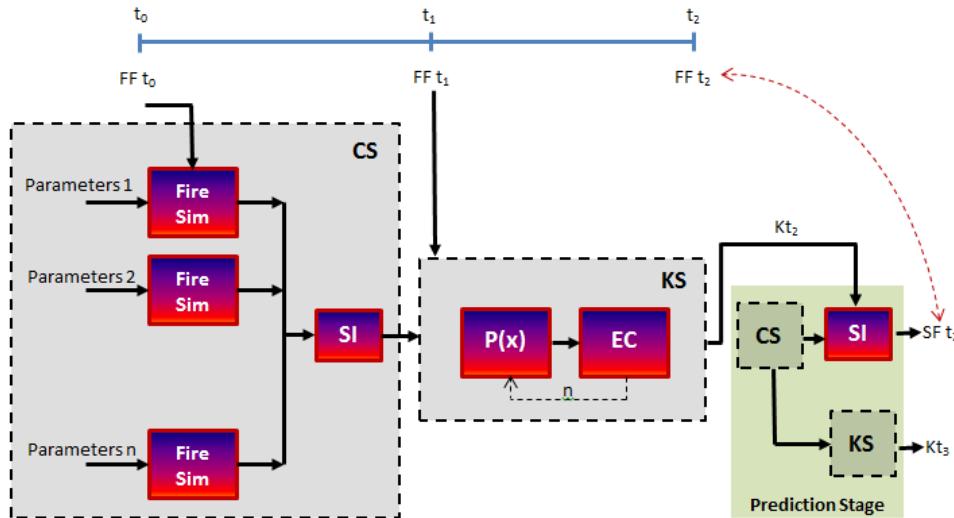


Figura 2.8 Método de calibración S2F2M

Para empezar no partimos de una serie de conjuntos de parámetros relativamente corto, sino que se realiza una explosión combinatoria de la que obtenemos todas las posibles combinaciones de parámetros. Para ello debemos definir una cota máxima y mínima para cada parámetro basadas en la observación y estudio de cada parámetro individualmente.

De este modo, la población es mucho mayor que en el método evolutivo, ya que se cubren todas las posibles combinaciones de parámetros con lo que eliminamos la posibilidad que la población inicial sea pobre, a costa de cubrir todo el espacio de búsqueda.

Todos estos sets de parámetros son introducidos en una primera etapa de simulación combinatoria (CS – *Combinatorial Simulation*), dónde se introduce cada conjunto de parámetros en el simulador de fuegos junto con el frente inicial en  $t_0$  (FF  $t_0$ ) y éste retorna el frente de cada uno de ellos. Todos estos mapas de frentes son introducidos en un módulo (SI – *Statistics Integration*) que genera un mapa dónde se acumula el número de veces que se ha quemado una celda, recorriendo cada uno de los frentes generados en la etapa anterior. Cada valor de este mapa se divide por el número total

de conjuntos de parámetros lo que nos dará una probabilidad en el rango [0-1] de que una celda este quemada (Ver ejemplo en Figura 2.9).

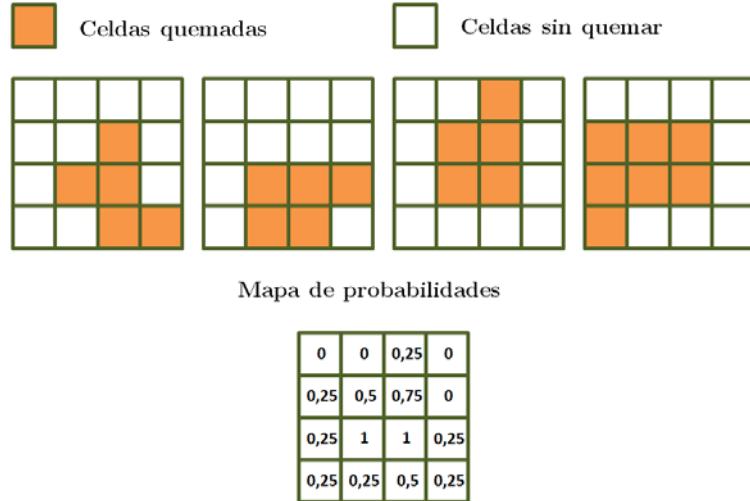


Figura 2.9 Mapa de probabilidades para 4 escenarios

Una vez tenemos nuestro mapa de probabilidades para todos los escenarios posibles comienza la búsqueda del factor  $k_{ign}$ , que será la probabilidad que mejor describe el comportamiento real del fuego en el instante  $t_1$  (ver Figura 2.10). Es por ello que en esta etapa se recibe como parámetro el frente real en este instante ( $FF\ t_1$ ) para que el programa encuentre este factor.

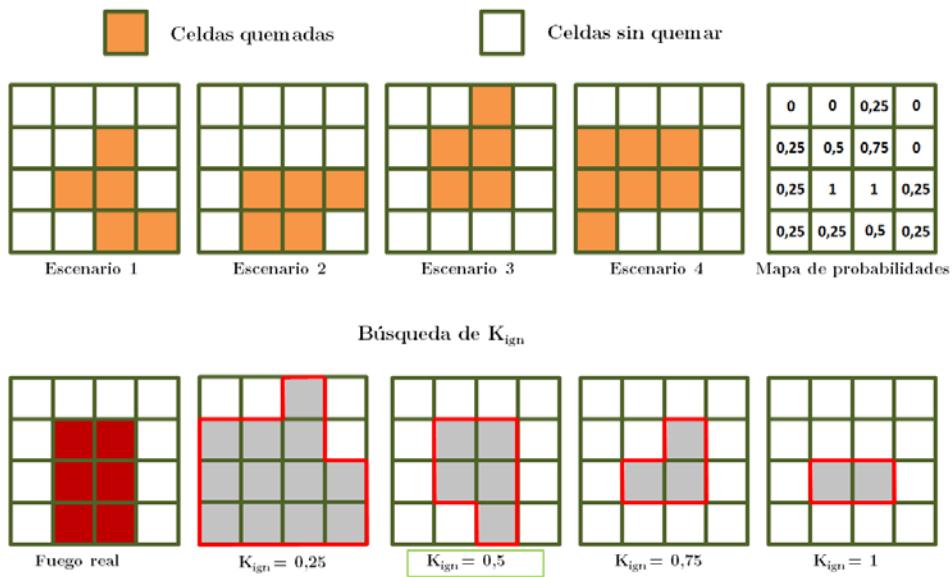


Figura 2.10 Búsqueda del factor  $k_{ign}$

Una vez encontrado este factor ( $kt_2$  en la Figura 2.8), el sistema nos dará una predicción para el tiempo  $t_2$ , que podrá ser comparado llegado este instante, con el frente real FF  $t_2$ , momento en el que se iniciará la búsqueda del factor  $kt_3$ . De este modo se irán solapando las predicciones para todos los instantes de tiempo posteriores.

La principal ventaja de este método de calibración es, al mismo tiempo, su principal inconveniente. El hecho de combinar todos los parámetros entre sí hace que cubramos todos los posibles escenarios con que nos podemos encontrar. Por el contrario, este hecho hace que necesitemos de una enorme cantidad de cómputo para llevar a cabo todas las simulaciones que requiere este método.

Pese a ello, y en contraposición al método evolutivo, el estadístico se adapta más rápido a los cambios bruscos en las condiciones meteorológicas del incendio. Como es obvio este método es paralelizable (debe serlo), y por tanto, se puede distribuir el trabajo en los diferentes nodos de que dispongamos.

### 2.3.3 Método evolutivo guiado por datos

Con el objetivo de mejorar la respuesta de los métodos de calibración a los cambios de las condiciones meteorológicas, se empieza a trabajar en técnicas para introducir conocimiento al sistema para detectar cambios con una cierta antelación, y no ir siempre un paso por detrás del incendio.

La idea de este método es sencilla de entender pero no por ello, deja de ser muy útil. El modelo de Rothermel calcula la dirección de propagación de un incendio en función del viento y la pendiente del terreno. Esta técnica [20], propone recorrer el camino inverso, y como nosotros disponemos de la pendiente y la dirección de propagación observada en un instante, se pretende obtener el viento que mejor refleja el comportamiento del incendio en ese momento.

La forma en que se obtiene este valor del viento, está fundamentado en una base de conocimiento que a partir de unas entradas (pendiente, dirección y velocidad de propagación y el modelo de vegetación), nos dará el comportamiento del viento que corresponda a estas entradas. Estas componentes serán introducidas en la etapa de calibración del sistema cuando el algoritmo genético realice las operaciones de selección, mutación y cruzamiento.

En concreto, este conocimiento adicional sobre el viento se aplicará en aquellos individuos que sean escogidos para mutar, acotando el rango de variación de los genes del viento (velocidad y dirección). Para acotar los valores a los que puede mutar el

viento (velocidad 0-30mph, dirección 0°-360°), se sitúa el valor encontrado en la base de conocimiento en el centro del rango de variación y se define un margen de confianza para cada componente. Por consiguiente, los individuos que muten, tendrán unos valores de viento aleatorios pero dentro de un rango mucho más reducido.

Con estos cambios se consigue no solo que el método evolutivo converja, por norma general, más rápido, sino que además la calidad de las predicciones mejora en la mayoría de los casos. Añadido a esto, el método evolutivo guiado por datos logra responder de forma más rápida a los cambios que se producen en las condiciones meteorológicas.

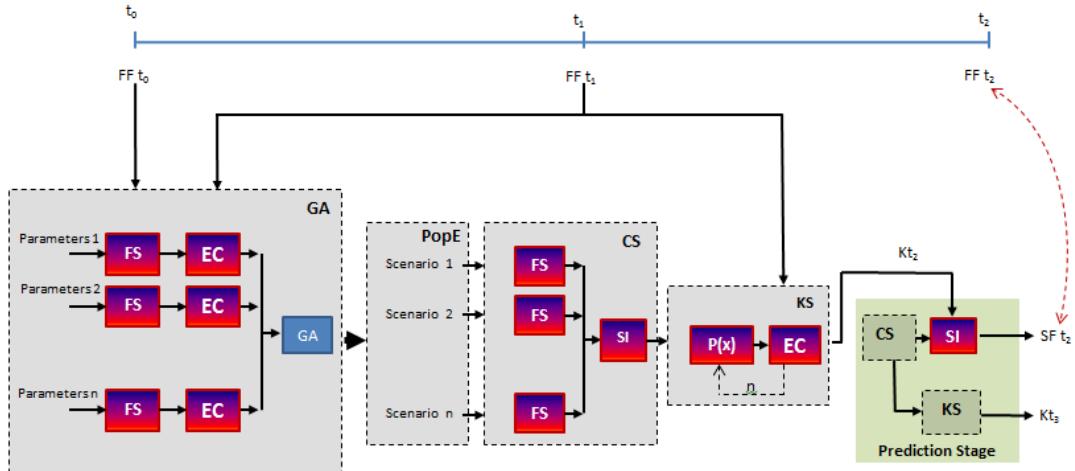
Cabe destacar que la calidad de las predicciones de este método se basa en la completitud y calidad de la base de conocimiento que se utilice.

### **2.3.4 Método híbrido estadístico-evolutivo (SAPIFE<sup>3</sup>)**

Una vez estudiados los dos métodos descritos anteriormente, y vistos cuáles son sus virtudes e inconvenientes, se desarrolla un nuevo método para combinar sus capacidades en un método híbrido que explote las bondades de ambas estrategias.

Es por ello que se desarrolla el método SAPIFE<sup>3</sup> [21] (Sistema Adaptativo para la Predicción de Incendios Forestales basados en Estrategias Estadístico-Evolutivas). Este método aprovecha las bondades de los dos métodos y minimiza sus puntos débiles.

La idea básica es utilizar el algoritmo genético, no para generar una sola solución (o individuo) válida, sino un conjunto de soluciones que serán las que serán tratadas por el método estadístico (ver Figura 2.11). Esto reduce drásticamente la necesidad de cómputo del algoritmo estadístico ya que el espacio de búsqueda se reduce significativamente. Esto podría contravenir la naturaleza propia del método basada en la búsqueda exhaustiva, pero se ha demostrado que el hecho de utilizar un conjunto optimizado de individuos no afecta gravemente al método y mejora muy notablemente los tiempos de predicción.



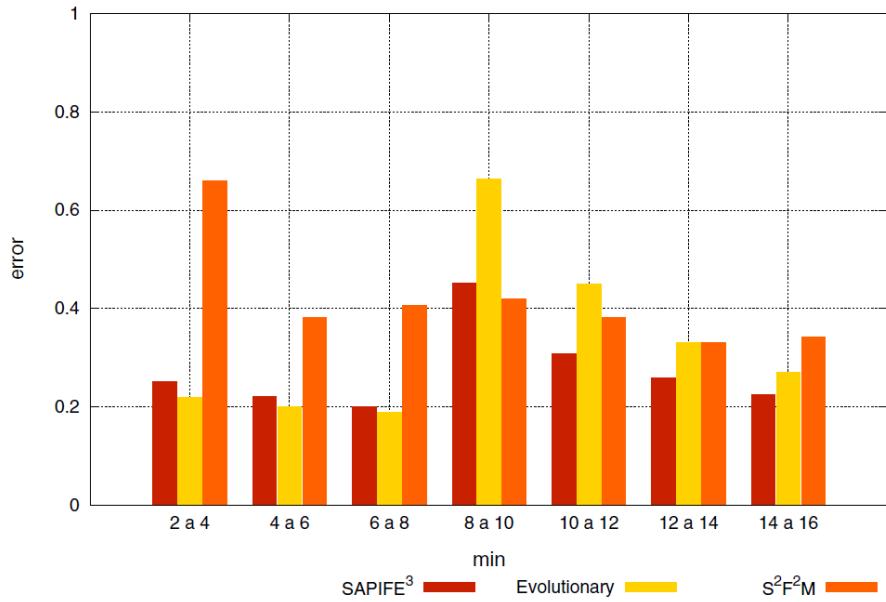
**Figura 2.11 Método de calibración SAPIFE<sup>3</sup>**

Por tanto, para implementar este método se tuvo que modificar el algoritmo genético para que, en vez de devolver tan solo el mejor individuo, nos proporcionara una población de individuos optimizada, que son la entrada al método estadístico, que ya no realiza la explosión combinatoria para cubrir todo el espacio de búsqueda, sino que se ciñe únicamente a los conjuntos de parámetros que le proporciona el algoritmo genético.

Con esta población el método estadístico hace la búsqueda del factor  $k_{ign}$  y devuelve el mapa predicho para el siguiente instante de tiempo, utilizando la misma metodología descrita en el anterior apartado de este trabajo.

Las ventajas de este método son producto del acoplamiento de los métodos predecesores, y aprovecha la rápida y eficiente optimización de parámetros que nos brinda el método evolutivo junto con la mejor y más rápida adaptación a los cambios en las condiciones del método estadístico.

Los resultados muestran que cuando las condiciones se mantienen estables los errores se sitúan muy cercanos a los que nos ofrece el algoritmo genético, mientras que cuando se produce un cambio en estas condiciones y el método evolutivo genera errores en la predicción muy altos en los siguientes intervalos, comparado con el método estadístico, el SAPIFE<sup>3</sup> se comporta de manera similar a éste último y actúa con más celeridad ante este cambio [22]. Este comportamiento podemos observarlo en los resultados de un experimento sintético (ver Figura 2.12), en el cual se simula un incendio con unas condiciones iniciales de viento de 5 millas por hora y una dirección de 180° de los 0 a los 8 minutos, que son cambiadas en este instante para pasar a un viento de 10 mph y 270°.



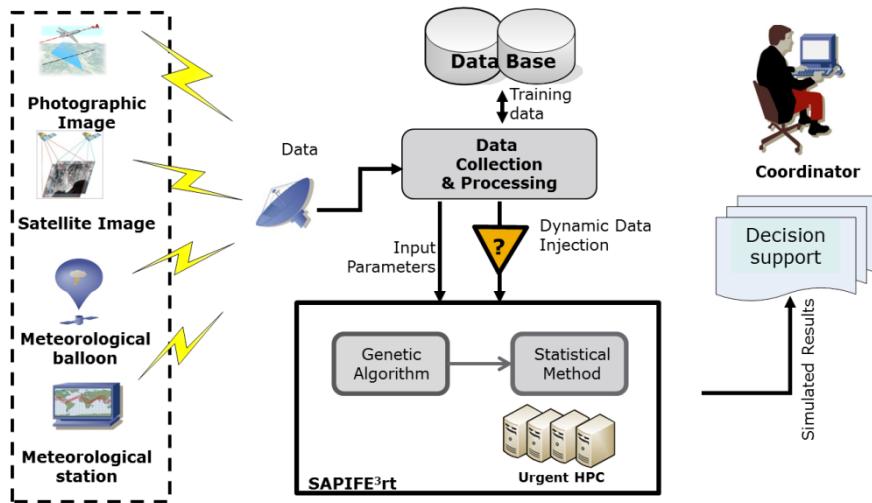
**Figura 2.12 Comparativa GA, S2F2M y SAPIFE<sup>3</sup>**

Los resultados, tal y como hemos comentado antes, nos muestran que hasta llegar a los 8 minutos, SAPIFE<sup>3</sup> se acerca mucho a los errores del evolutivo. Cuando las condiciones cambian, el evolutivo dispara su error mientras que tanto S2F2M y SAPIFE<sup>3</sup> amortiguan este error siendo mejores que el evolutivo hasta el final de la simulación.

### 2.3.5 Método SAPIFE<sup>3rt</sup>

En el 2010 se presenta la evolución del método *SAPIFE<sup>3</sup>*, renombrada como *SAPIFE<sup>3rt</sup>* [12], cuyas siglas *rt* significan *real time* (tiempo real).

El propósito de este método es utilizar fuentes de datos de información real (estaciones meteorológicas, globos meteorológicos, sensores...) para detectar cambios bruscos en el entorno y poder actuar en función de estos cambios (ver Figura 2.13).



**Figura 2.13 Estructura de SAPIFE<sup>3</sup>rt**

Para ello se añade un módulo encargado de la adquisición de datos que, cuando detecte un cambio brusco, actuará reemplazando ciertos individuos provenientes del GA.

Con este trabajo se ha establecido una metodología para trabajar con datos inyectados en tiempo real y también se ha comprobado que es necesario definir una política de inyección de datos, ya que no siempre es conveniente adoptar todos los datos que recibimos de las diferentes fuentes.

El objetivo pendiente es, por lo tanto, definir una política que determine, cuando se produce un cambio, medidas para determinar qué es un cambio brusco y, una vez implementada esta entidad de decisión, inyectar o no más datos al sistema.

Los experimentos realizados demuestran que la inyección de datos es muy positiva para el sistema cuando los cambios son realmente bruscos, pero que inyectar datos siempre empeora las predicciones.



# **Capítulo 3: Incorporación del modelo de vientos en la predicción en 2 etapas**

## **3.1 Introducción al modelo**

Gracias a los métodos desarrollados hasta el momento podemos hacer el calibrado de los parámetros utilizando diversas técnicas, con sus ventajas e inconvenientes pero alcanzando unas mejoras en las predicciones notables.

Ahora bien, cuando aplicamos nuestras metodologías en terrenos muy complejos con condiciones no controladas, las predicciones se ven deterioradas por estos factores. Como se ha comentado anteriormente, el terreno y el viento son los componentes que más influyen en la propagación de un incendio forestal y desde nuestro grupo de investigación se ha puesto un énfasis especial en tratar de hacer más realistas nuestras predicciones.

Hasta el momento las componentes del viento (velocidad y dirección) se han tratado como uniformes a todo el terreno estudiado, sin tener en cuenta las inevitables distorsiones que sufre cuando se encuentra con una superficie irregular. Por ello se plantea la necesidad de introducir un modelo que calcule las componentes de viento de forma individual para cada celda del terreno, en función de la pendiente y orientación de dicha celda.

Los métodos que se han ido desarrollando hasta ahora solo toman estas dos componentes generales para realizar las predicciones, debido en cierta parte a la naturaleza propia de los métodos.

En el caso del algoritmo genético (guiado o no, por datos), el hecho de introducir estas dos componentes por cada celda a cada individuo, en un caso sencillo de un mapa de 100 celdas x 100 celdas, supondría añadir 20.000 genes nuevos por individuo. Si tenemos que evolucionar poblaciones más o menos grandes, durante una serie de generaciones, ésto requeriría una potencia de cálculo enorme que no nos permitiría dar una predicción en un tiempo adecuado debido a la gran cantidad de parámetros a optimizar por individuo.

Para el método estadístico el problema se agrava aún más debido a que las posibles combinaciones de parámetros se dispararían exponencialmente y nos encontraríamos con un problema sino imposible de tratar, casi intratable.

Por lo tanto se ha planteado el problema desde otra perspectiva para poder mantener la velocidad de los métodos y alcanzar resultados mejores. La idea es seguir trabajando en la etapa de calibración con dos componentes generales de viento, pero antes de realizar cualquier simulación para calcular el error de los individuos respecto al frente real, éstas serán traducidas a un campo de vientos. De esta forma el simulador trabajará internamente con componentes individuales a cada celda sin afectar directamente a la forma en que se calibran los parámetros.

### 3.1.1 Campo de vientos

Los campos de vientos o el flujo del viento sobre la superficie, han sido estudiados ampliamente para diferentes áreas y propósitos, utilizando modelos más o menos complejos según el propósito que se persigue [23] [24] [25] [26].

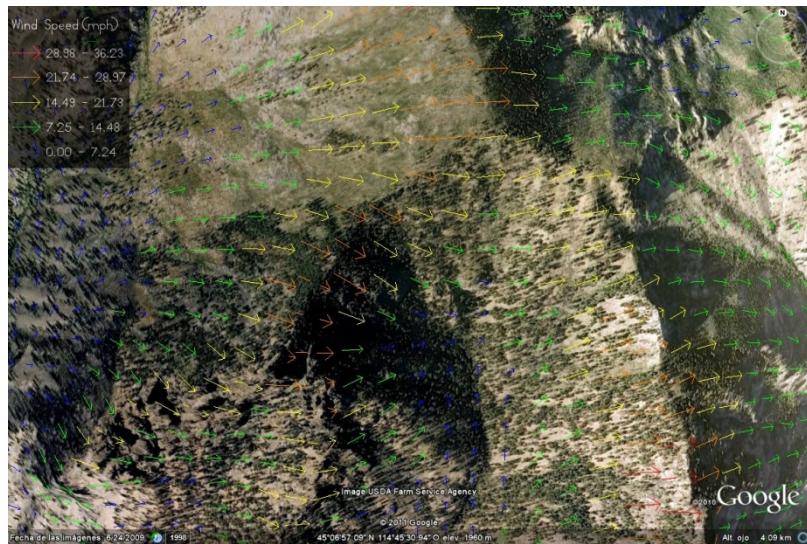
En el ámbito de la Ingeniería son especialmente importantes por el efecto sobre construcciones humanas (edificios, puentes, etc.), en la planificación de sistemas de energía eólica, en aerodinámica y otros campos donde el viento es un factor determinante.

Uno de los campos dónde es especialmente importante es en la predicción numérica del tiempo (*NWP Numerical Weather Prediction*), donde los flujos de viento son determinantes a la hora de dar predicciones meteorológicas con un cierto grado de exactitud. Los modelos que se suelen utilizar para este menester son modelos de mesoescala (baja resolución, unos 10 Km), y por tanto, no son especialmente indicados para el estudio de la propagación de incendios forestales, los cuales requieren de modelos a muy baja escala con una resolución alta, del orden de decenas a unos pocos cientos de metros.

El efecto del viento y la gran influencia que tiene en la propagación de un incendio se puede observar en el trabajo de Catchpole [27], es por ello que se comienza a buscar un modelo que se adapte a nuestras necesidades. En los modelos más complejos se describe la necesidad de trabajar con campos de viento tridimensionales, para poder abordar con ciertas garantías los problemas que pretenden solventar. La realidad es, que en nuestro caso, queremos trabajar con un modelo bidimensional más sencillo (ver Figura 3.1 y 3.2), porque únicamente queremos aproximar el viento general a un campo de vientos que tenga en cuenta el terreno. Además un modelo muy complejo podría retardar nuestras predicciones, debido a la cantidad de simulaciones que requieren nuestros métodos de calibración.



**Figura 3.1 Terreno y medición hipotética del viento atmosférico**



**Figura 3.2 Campo de vientos aplicado al terreno en función del viento general**

El modelo utilizado es el propuesto por Forthofer [28], basado en un modelo numérico especialmente destinado a la simulación espacial del viento en terrenos complejos y con una resolución alta, con el fin de ser aplicado a la ayuda a la predicción de incendios forestales. No en vano, dicho modelo ha sido desarrollado por el mismo departamento que FARSITE [14], que es el simulador de incendios forestales más utilizado por la comunidad científica. El modelo de vientos propuesto se basa en los modelos de masa consistente que, respecto a los de dinámica de fluidos, proporcionan una solución de forma mucho más rápida pasando del orden de las horas, a segundos o unos pocos minutos.

Este modelo ha sido validado experimentalmente y ha demostrado que introduce beneficios respecto a la simulación con viento uniforme, basándose en los resultados de una serie de experimentos sintéticos.

Es por ello que hemos decidido adoptar este modelo e integrarlo en nuestro sistema de predicción en 2 etapas, para comparar la calidad de las predicciones respecto a experimentos anteriores.

## 3.2 Descripción de los objetivos

Pese a que el objetivo principal ya ha sido explicado ampliamente en este trabajo, existen una serie de objetivos secundarios o derivados que también hemos estudiado y, en algunos casos, implementado.

Acoplar un modelo a un sistema de predicción de incendios forestales no es tarea fácil ya que debemos conocer bien las entradas y salidas del modelo a acoplar, así como las características de nuestro sistema. Las diferentes partes en que ha consistido nuestro trabajo y los objetivos, cumplidos o pendientes, son:

- Estudio del modelo de vientos y del simulador.
- Acoplamiento del simulador de campos de vientos al simulador de incendios.
- Diseño de los módulos de interconexión entre los dos modelos.
- Comparación de la propagación de incendios aplicando campos de vientos o no.
- Experimentación con los métodos de calibración de parámetros desarrollados en el departamento añadiendo el modelo de vientos
- Realizar un experimento con un fuego real (post-mortem) para evaluar el error del sistema completo.

### **3.2.1 Estudio del modelo de vientos**

Nuestra área de trabajo es multidisciplinar y requerimos de la ayuda de expertos y herramientas que nos ayuden a conseguir nuestro objetivo. En nuestro caso, requeríamos de un modelo de vientos que nos permitiera realizar nuestro propósito.

No hemos implementado un modelo de vientos, pues desconocemos las leyes físicas que lo rigen y, además, ya existen herramientas y personas que han trabajado y trabajan en este campo.

Nuestro trabajo ha sido, entonces, escoger aquel modelo que mejor podía solventar nuestro problema, y estudiar los requerimientos del modelo, su implantabilidad en nuestro sistema y las salidas que nos da, para saber si nos proporciona aquello que buscamos.

### **3.2.2 Acoplamiento de los modelos**

La Computación de Altas Prestaciones (HPC), pretende solventar problemas que difícilmente tendrían solución sin las arquitecturas y modelos de programación que se proponen. Para que nuestras simulaciones y predicciones sean útiles, deben tener una calidad aceptable y un tiempo para la solución acorde a los requerimientos que nos impongan. Para conseguirlo nuestras simulaciones son paralelizables, y deben continuar siéndolo con la introducción del nuevo modelo. Desafortunadamente, no disponemos aún del núcleo del simulador de campos de vientos desacoplado de su interface gráfica lo que supone un problema que debemos solventar a corto plazo para poder realizar experimentos de mayor tamaño que los realizados en este trabajo.

### **3.2.3 Diseño de los módulos de interconexión**

Para poder trabajar con dos modelos independientes se han de implementar módulos que permitan la conexión correcta entre ambos. Por ello, se han desarrollado dos módulos necesarios para tratar los parámetros de entrada para que sean aceptados por nuestro simulador de vientos, y otro para transformar las salidas de este simulador a entradas compatibles con el simulador de incendios. Estos módulos serán explicados con más detalle en el próximo capítulo de este trabajo.

### **3.2.4 Experimentación básica con el sistema**

Pese a no tener desacoplado el simulador de vientos, esto no nos ha impedido realizar ciertas experimentaciones con él, eso sí, añadiendo una carga de trabajo extra.

Los primeros experimentos que realizamos fueron enfocados a demostrar que la introducción de campos de vientos afecta directamente a la forma y fuerza con que el fuego se propaga, utilizando para ello un simulador de incendios.

### **3.2.5 Experimentación con la predicción en 2 etapas**

La principal aportación de nuestro departamento, que no la única, es la predicción en dos etapas y la etapa de calibración, con la que conseguimos mejorar nuestras predicciones independientemente del simulador de incendios utilizado.

Se ha realizado un experimento para mostrar unos resultados iniciales de la aplicación de los campos de vientos utilizando la predicción en 2 etapas. Una vez tengamos acoplados los simuladores de viento e incendios, se podrá profundizar en esta experimentación y arrojar resultados más exhaustivos.

### **3.2.6 Experimentación con un fuego real**

Por último, y como parte de los objetivos a corto plazo que, en este caso, no ha sido alcanzado, está el estudio de nuestro sistema en un incendio real *post-mortem*, es decir, un incendio pasado del cual tenemos datos almacenados y podemos estudiar y recrear para validar nuestra metodología.

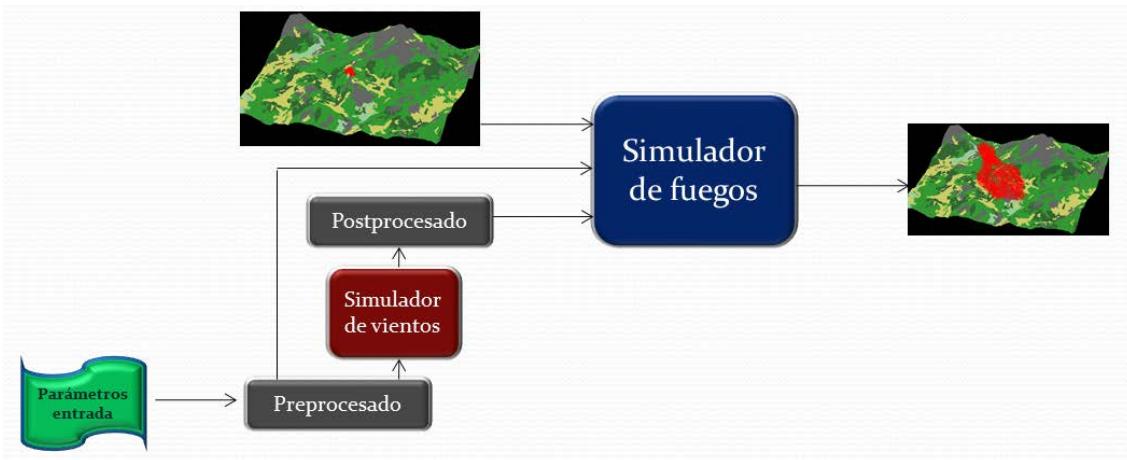
Se trata de una serie de incendios sucedidos en Grecia durante el año 2007, de los cuales disponemos datos sobre las condiciones meteorológicas y el estado de los frentes de fuego en diferentes instantes de tiempo.

Se trata de incendios de gran magnitud lo que hace que el estudio de estos incendios sea tremadamente complicado.

## **3.3 Partes del modelo**

El modelo que se propone para dar solución al problema, consiste en tres módulos que se interponen entre los parámetros de entrada y el simulador de incendios.

Por una parte, los parámetros de entrada deben pasar por una etapa de preprocesado para ser tratados por los simuladores, se debe generar el campo de vientos y hacer una serie de trasformaciones a la salida del simulador de vientos, para generar entradas válidas al simulador de incendios.



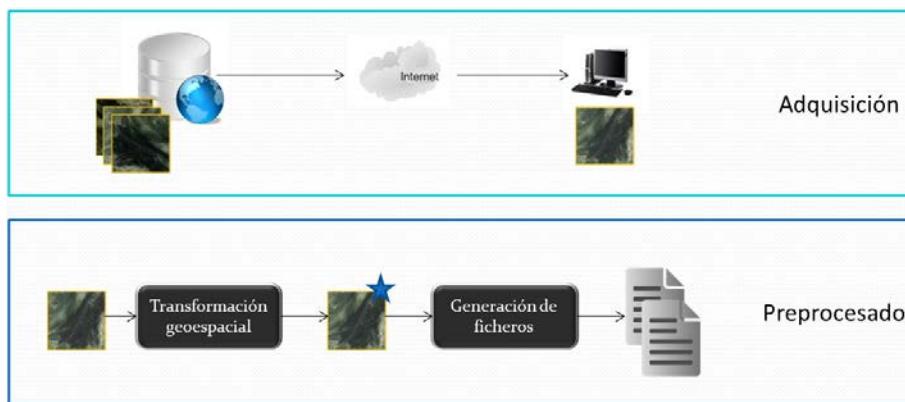
**Figura 3.3 Estructura del sistema con el modelo de vientos acoplado**

### 3.3.1 Preprocesado de los parámetros

Cuando queremos estudiar el comportamiento de un incendio debemos disponer de los datos que definen el entorno del incendio. Básicamente, necesitamos el mapa sobre el que queremos trabajar y las condiciones meteorológicas que definen el estado del incendio.

Los mapas reales de las zonas de estudio suelen estar almacenadas en repositorios, pertenecientes a gobiernos o entidades, y son imágenes satelitales de zonas de las cuales debemos extraer la información relevante para nuestro sistema.

Estas imágenes no son directamente aceptadas por nuestro sistema y se deben hacer una serie de transformaciones de georeferenciación y de formato para poder ser utilizadas por nosotros (ver Figura 3.4).



**Figura 3.4 Etapa de preprocesado de los parámetros**

La georeferenciación [29] [30], es el proceso mediante el cual podemos trasladar los puntos de un mapa o archivo, a su posición real en la superficie terrestre. Pese a que este proceso pueda parecer sencillo, se manejan una serie de conceptos que se deben conocer cuando necesitamos trabajar con mapas, imágenes satelitales o archivos ráster que representan zonas concretas de la geografía terrestre.

Uno de los conceptos básicos en esta área son las proyecciones (ver Figura 3.5). Las proyecciones nos permiten trasladar la superficie terrestre a una representación en 2 dimensiones.

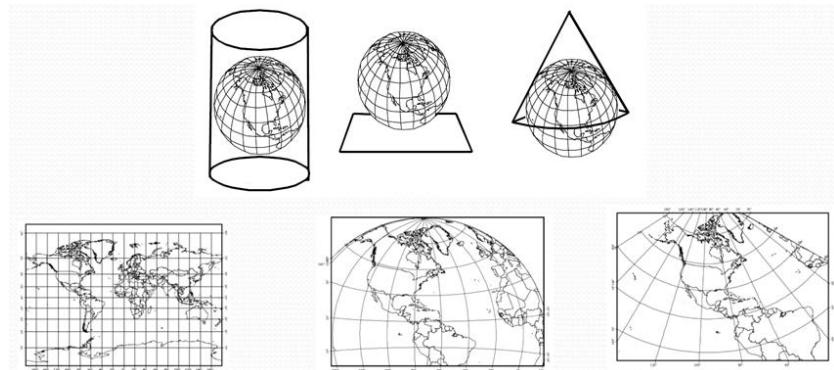


Figura 3.5 Tipos de proyecciones

La superficie terrestre es una superficie en 3 dimensiones, irregular y para trasladarla a una superficie en 2 dimensiones, requerimos de una forma de referencia donde plasmar la superficie real. Como se puede observar en la figura anterior, existen diferentes formas con las cuales aproximar la superficie real aunque todas ellas introducen distorsiones. Algunas intentan mantener la forma y ángulos de los objetos del mapa pero distorsionan el tamaño y las distancias de los mismos.

Otro tipo de proyecciones mantienen las áreas de los objetos pero los objetos se deforman. Así, se escoge un tipo u otro de proyección, según el uso que se les va a dar y las distorsiones que se quieren evitar.

El segundo aspecto básico a la hora de realizar transformaciones de georeferenciación es el datum. Sin entrar en detalles técnicos de este concepto, los datums definen los sistemas de referencia que nos permiten hacer la correspondencia entre los puntos de un mapa y su proyección en la superficie terrestre. Los datums suelen definirse en función de la zona a estudiar y describen una superficie de referencia que se aproxima a la superficie real de la zona concreta con la que se trabaja. Pese a esto, se pueden definir datums locales más precisos o datums globales para áreas más grandes, con lo que la

precisión en la correspondencia se ve afectada. Por poner un ejemplo, los navegadores GPS que cualquiera de nosotros podemos tener en el coche o en nuestro teléfono suelen utilizar el datum global WSG84 (*World Geodetic System 84*). Si descargamos los mapas de Europa en un datum como el ED50 (*European Datum 50*) los errores de precisión del navegador pueden alcanzar unos cientos de metros debido a la no concordancia de datums.

En nuestro trabajo, debemos conocer las características de los mapas (proyección y datum) con los cuales trabajamos para realizar las transformaciones adecuadas para que nuestro sistema sea capaz de interpretar y trabajar de forma correcta con el terreno que queremos simular. Por tanto, necesitaremos de herramientas que nos permitan realizar estas transformaciones y realizar nuestras simulaciones de forma correcta.

### 3.3.2 Simulador de vientos

Ya hemos hablado ampliamente del modelo de vientos y el propósito que debe cumplir el simulador de vientos. En el próximo capítulo hablaremos de forma más concreta del simulador utilizado y de sus características específicas.

### 3.3.3 Postprocesado de los parámetros

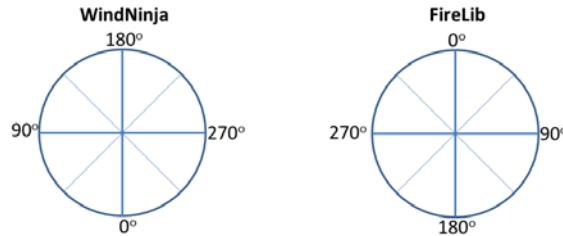
La etapa de postprocesado es mucho más liviana que la de preprocesado, ya que tan solo se trata de adaptar la salida de nuestro simulador de campo de vientos, a la entrada de nuestro simulador de incendios. Es por ello, que pese a ser una etapa sencilla, sea específica para cada simulador de incendios.

Para los experimentos que presentamos en el próximo capítulo, el simulador utilizado ha sido FireLib [31], un simulador de incendios que ha sido usado para la mayoría de los experimentos anteriores de nuestro grupo de investigación. Es por ello que para realizar las primeras pruebas de nuestro modelo hemos utilizado este simulador, pese a que estamos realizando la migración de nuestros métodos para utilizarlos con el simulador más reconocido en nuestro campo como lo es FARSITE.

En el caso de FireLib, hemos tenido que hacer una serie de transformaciones a los archivos de salida del simulador de vientos que detallamos seguidamente:

- Eliminación de las cabeceras de los archivos del campo de vientos.
- Conversión de la velocidad del viento de millas por hora (mph) a pies por minuto (ft/min).
- Conversión de las direcciones del viento, ya que el sistema de referencia es diferente (ver Figura 3.6). FireLib toma como referencia los grados del viento

desde el norte en sentido horario, mientras que nuestro simulador de vientos cuenta los grados desde el sur en sentido anti-horario.



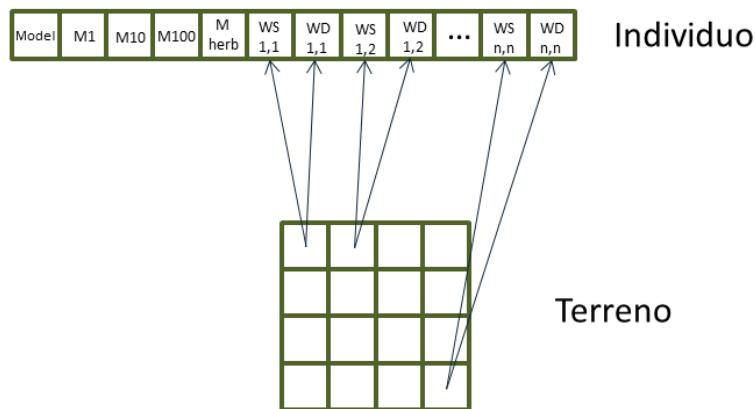
**Figura 3.6 Sistemas de referencia de la dirección del viento**

### 3.4 Integración del modelo de vientos en el método de dos etapas

La inclusión del modelo de campo de vientos en nuestro sistema, no solo ha de estar presente en la etapa de predicción, sino que además, queremos que nos ayude en la etapa de calibración de los parámetros.

Existen dos alternativas para la integración del modelo en la etapa de ajuste, y cada una tiene sus virtudes y defectos.

Por un lado cabe la posibilidad de extender el tamaño del individuo (caso del algoritmo genético) o conjunto de parámetros (método estadístico), para que contemplen 2 parámetros más por cada celda del mapa (ver Figura 3.7).



**Figura 3.7 Dos parámetros de viento por celda del terreno**

De este modo deberíamos añadir  $2*(N*M)$  parámetros (dónde N es el número de filas y M el de columnas), para que el individuo o conjunto de parámetros contemplará todos los posibles valores del viento en el terreno.

Como ventaja, la calibración sería más completa ya que trataría de optimizar cada uno de los parámetros del viento por cada celda, para que al final de la calibración obtuviéramos los valores que más aproximan el resultado al frente real.

Pero este método es muy costoso ya que requiere añadir una cantidad muy elevada de parámetros, puesto que los mapas suelen contener miles de celdas con sus respectivas componentes de velocidad y dirección del viento. Además, estamos optimizando todos los valores de viento de todas las celdas aunque el fuego esté lejos de alcanzarlas, y por tanto, su valor no influya en nada. Esto significa que se realiza una cantidad de cálculos inútiles en cada optimización y se puede dar el caso de que las optimizaciones de todos los valores de viento de las celdas del mapa, compongan un campo de vientos inconsistente.

Por estos motivos, hemos optado por una segunda estrategia, en la cual los parámetros de viento que se calibran son las dos componentes generales, como se ha realizado hasta el momento. Cuando queremos evaluar la calidad del individuo o conjunto de parámetros, generamos el campo de vientos a partir de las componentes generales e introducimos al simulador el campo de vientos y los parámetros restantes. De esta forma, ajustamos el viento general que nos produce un campo de vientos, que a su vez nos genera una mejor predicción del frente real.

Con este tipo de estrategia alteramos lo mínimo posible los métodos de calibración, por lo que no influimos en el tamaño del conjunto de parámetros, y solo nos interponemos justo antes de simular la propagación del conjunto de parámetros, momento en el que convertimos nuestro viento general a un campo de vientos que es lo que será introducido al simulador de incendios y se evaluará su error.



# Capítulo 4: Experimentación realizada y resultados obtenidos

## 4.1 Métricas

La principal unidad de medida de estos experimentos, para el trabajo que nos concierne no es por el momento, el tiempo de simulación sino la calidad de las predicciones.

La forma de medir la calidad que hemos venido utilizando hasta ahora es una medida de error relativamente sencilla (ver Figura 4.1) y con ciertas carencias, pero que nos da una idea de la precisión de nuestras predicciones.

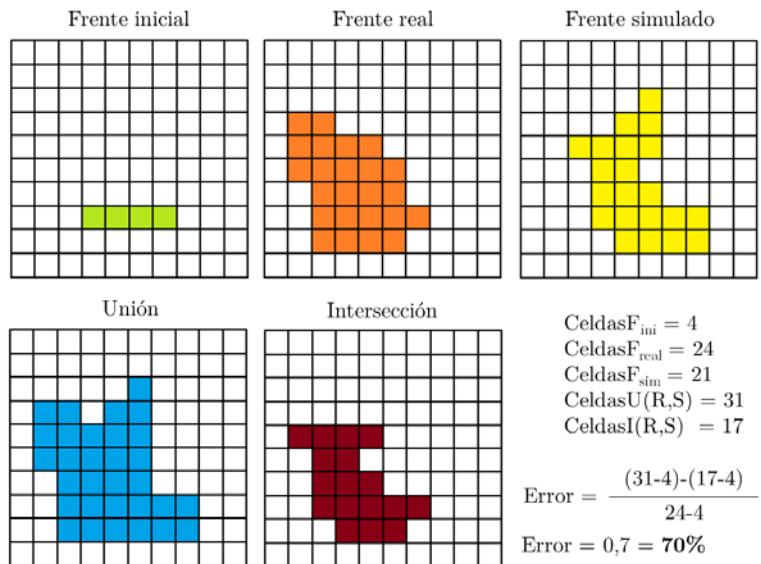
La fórmula de error tiene los siguientes factores, teniendo en cuenta la comparación entre tres conjuntos de celdas, relativos a los frentes de fuego a comparar y el frente inicial:

- CeldasF<sub>real</sub>: Número de celdas del frente real.
- CeldasF<sub>sim</sub>: Número de celdas del frente simulado.
- CeldasF<sub>ini</sub>: Número de celdas del frente inicial.
- CeldasU(R,S): Número de celdas correspondientes a la unión de los conjuntos de celdas de los frentes a comparar, real (R) y simulado (S).
- CeldasI(R,S): Número de celdas correspondientes a la intersección de los conjuntos de celdas de los frentes a comparar, real (R) y simulado (S).

La fórmula que describe el error es la que se muestra a continuación:

$$\text{Error}(R,S,\text{Fini}) = \frac{((\text{CeldasU}(R,S) - \text{CeldasF}_{\text{ini}}) - (\text{CeldasI}(R,S) - \text{CeldasF}_{\text{ini}}))}{\text{CeldasF}_{\text{real}} - \text{CeldasF}_{\text{ini}}}$$

Este error nos da una medida de la calidad de nuestra predicción respecto al fuego real, pero tiene como inconveniente que no nos muestra si el error es por defecto o por exceso, es decir si hemos sobreestimado el tamaño del fuego o lo hemos subestimado, además de no ser útil a la hora de comparar las formas o perímetros del fuego.



**Figura 4.1 Ejemplo de cálculo de error entre dos frentes**

Para los experimentos que hemos realizado esta medida ya nos es suficiente porque nos da la posibilidad de comparar nuestro modelo con experimentos anteriores, y ofrecer unas medidas de error iniciales, aunque para próximos experimentos debemos introducir algunas modificaciones en nuestra fórmula para ponderar los factores de la fórmula y encontrar los valores adecuados para dar más peso a aquellos factores más determinantes. De esta forma, podríamos dar más peso a la subestimación del frente en relación a la sobreestimación, según unos valores que para nada tendrían que ver con cuestiones científicas, sino con consideraciones completamente políticas.

## 4.2 Entorno

Para realizar nuestra investigación hemos necesitado de una serie de herramientas para poder llevar a cabo tanto el estudio del problema como la experimentación.

Por un lado, y como elemento nuevo en nuestro sistema de predicción, tenemos al simulador de campo de vientos, llamado WindNinja. El elemento central de todo sistema de predicción de incendios es el simulador y, para los experimentos realizados hasta el momento, hemos utilizado FireLib.

Como se ha explicado anteriormente, hemos necesitado una serie de herramientas para poder realizar transformaciones sobre los mapas que describen un terreno para que éstos fueran compatibles con nuestro simulador de campo de vientos. Hablaremos brevemente sobre dos herramientas como Miramon y Gdal.

Por último, para poder generar imágenes de los frentes de fuego y otros tipos de gráficas hemos utilizado la herramienta Gnuplot.

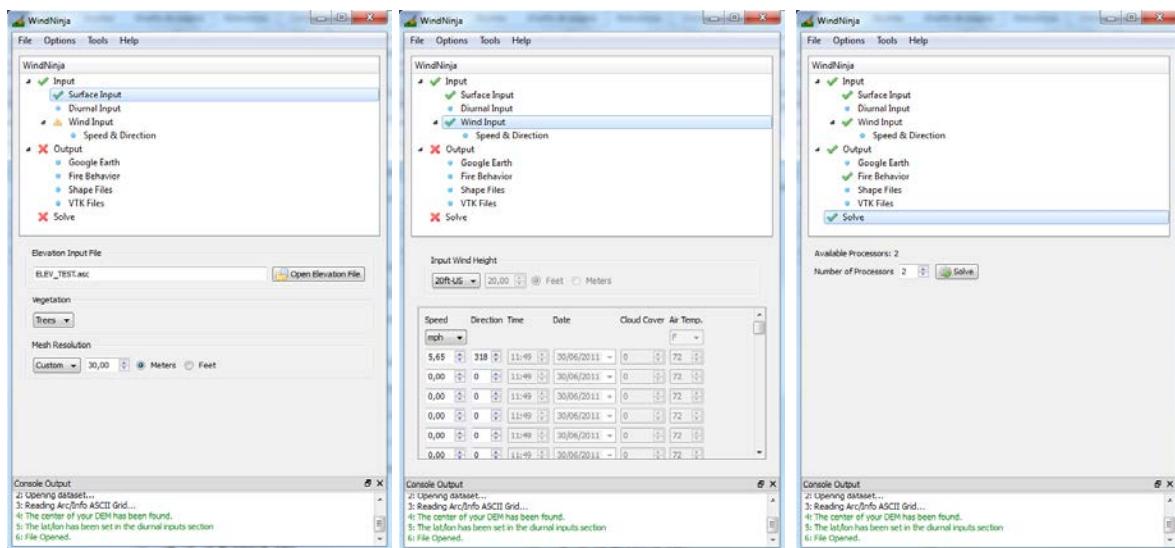
Vamos a explicar las características de cada una de estas herramientas.

### 4.2.1 WindNinja

WindNinja [32] [33], es una herramienta que simula el efecto de un viento atmosférico o general sobre la superficie de un terreno concreto. No es una simulación temporal, es decir, no hace ningún tipo de predicción de cómo el viento se va a comportar a lo largo del tiempo, sino que estima el comportamiento del viento sobre un terreno en un instante de tiempo concreto.

Para nuestro sistema de predicción es una buena herramienta, ya que disponemos de estos vientos generales en cada paso de calibración y predicción por lo que podemos utilizarlos como entrada al simulador.

La principal desventaja con la que nos hemos encontrado ha sido el hecho de que WindNinja es un proyecto que todavía está en fase de desarrollo y tiene ciertas limitantes que nos perjudican a la hora de utilizarlo en nuestro sistema. El problema más grave es que está acoplado a una interfaz gráfica (ver Figura 4.2) y solo dispone de una versión para entornos Windows.



**Figura 4.2 Interfaz de WindNinja**

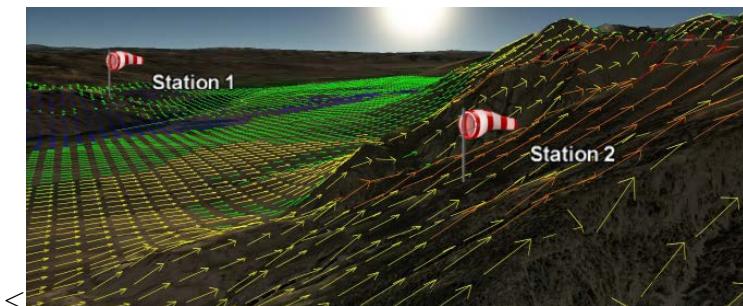
Esto nos impide poder acoplar de forma correcta el simulador para poder correr nuestras simulaciones en paralelo y así poder realizar cálculos del tiempo que añade WindNinja a nuestra predicción en dos etapas sin el modelo de viento, es decir, el *overhead* de cálculo que introduce.

Debido a este problema, hemos tenido que limitar nuestros experimentos, ya que no podemos abordar problemas con un alto número de simulaciones, hasta que el acoplamiento a nuestro sistema sea real.

De todas formas, estamos en contacto con el equipo de desarrollo de WindNinja [34], para colaborar de forma activa y son conscientes de nuestras necesidades y nos han asegurado que esta limitante estará resuelta a corto plazo.

Además, durante la realización de este trabajo, ha aparecido una nueva versión del simulador que introduce nuevas funcionalidades [35] [36], siendo las principales la inicialización del viento general en diferentes puntos del mapa y la posibilidad de añadir datos meteorológicos para refinar las simulaciones.

El primer punto permite definir diferentes puntos dónde el viento ha sido medido (Ver Figura 4.3), y que se pueden corresponder con las estaciones, globos meteorológicos o cualquier instrumento de medición del viento de que dispongamos. Esto permite no solo definir un viento general atmosférico o medido en alguna estación, sino que además nos posibilita introducir diferentes valores en diferentes puntos y hacer una estimación global del campo de vientos en todo el mapa.



**Figura 4.3 Definición de diferentes puntos de medición en el terreno**

La segunda característica añadida a WindNinja es la posibilidad de utilizar datos meteorológicos descargados de diferentes servicios de meteorología de los Estados Unidos. Con ello, pretenden crear un modelo híbrido que combine las bondades de un simulador a pequeña escala como WindNinja con los datos a gran escala de un servicio de meteorología que da predicciones para áreas relativamente grandes con una determinada frecuencia. WindNinja aprovecha los datos proporcionados por estos servicios para realizar simulaciones en cada instante de tiempo en que disponemos de datos meteorológicos. Como ya se ha comentado, esta funcionalidad está restringida a los centros que proveen datos meteorológicos de Estados Unidos, lo cual nos impide utilizar esta funcionalidad para incendios localizados en España o europeos.

## 4.2.2 FireLib

El simulador de incendios Firelib es una librería de funciones basada en los algoritmos de comportamiento del fuego de BEHAVE [13], y nos permite simular y predecir la propagación, intensidad y longitud de la llama sobre un terreno concreto.

Está desarrollada en C estándar por lo que puede ser compilada para cualquier plataforma ya sea UNIX, DOS o Windows. Está especialmente desarrollada para aplicaciones de predicción de incendios que requieran una librería altamente optimizada y totalmente libre, de forma que puede ser fácilmente utilizada, modificada o acoplada a cualquier sistema de predicción. Esta librería, actualmente, está en desuso y ha dejado paso a la librería Fire Behavior SDK [37] que es una evolución de ésta, desarrollada en C++, que contiene una serie de funciones y clases utilizadas por los principales simuladores de fuegos como FARSITE, BehavePlus [38] o FlamMap [39].

## 4.2.3 Miramon, GDAL

Para nuestro propósito de desarrollar el módulo de preprocesamiento de los parámetros, más en concreto del mapa que define el terreno para poder ser tratado tanto por el simulador de campo de vientos y el de incendios, hemos sondeado ciertas aplicaciones para conseguir dicho objetivo.

Gracias a nuestra estrecha relación con el CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), centro situado dentro del campus de la Universitat Autònoma de Barcelona, hemos podido disponer de licencias para su software GIS (*Geographic information system*), llamado Miramon [40], así como ayuda directa del personal del centro para resolver ciertos aspectos que escapaban a nuestro ámbito.

Miramón es una aplicación que nos permite la visualización, análisis y edición de mapas pertenecientes al terreno que queremos estudiar. Gracias a este software, podemos realizar las conversiones de proyección y datum, recortes del mapa e infinidad de utilidades más y además poder visualizar nuestro mapa ya que dispone de una potente interfaz gráfica.

El programa trata nuestros ficheros como capas con lo que podemos trabajar con multitud de ficheros y utilizar mapas globales que nos proveen, para comprobar la correcta localización de nuestras capas.

Otra opción que contemplamos es GDAL [41], siglas de *Geospatial Data Abstraction Library* (Librería de Abstracción de Datos Geoespaciales).

Se trata de una librería *Open Source*, que provee una gran cantidad de funciones para el tratamiento de formatos de ficheros geoespaciales. Es fácilmente acoplable a nuestro

sistema, rápida a la hora de realizar las transformaciones y es capaz de realizar el conjunto de trasformaciones que necesitamos.

Hemos de saber que la etapa de preprocesado solo se ha de realizar una vez, por lo que podemos integrar GDAL en nuestro sistema para tener todo el modelo acoplado de forma eficiente y, además, utilizar Miramon para visualizar y validar los resultados de GDAL de forma gráfica y amigable.

#### 4.2.4 Gnuplot

Gnuplot [42] es una aplicación para graficar datos, de propósito general, y que permite la transformación de ficheros de datos en gráficas que nos ayuden a interpretar y mostrar nuestros resultados. Es una aplicación que nos permite, en nuestro caso, mostrar los frentes de fuego que el simulador de incendios nos devuelve en un formato de texto plano llamado TOA (*Time Of Arrival*). Este fichero contiene un valor por cada celda de nuestro mapa que representa el instante en que el fuego ha quemado dicha celda.

Gnuplot convierte este fichero a un gráfico, fácilmente interpretable donde mediante una gama de colores que representa el tiempo, nos muestra cómo ha evolucionado la propagación de nuestro incendio a lo largo del tiempo.

## 4.3 Experimentos

Para hacer pruebas sobre nuestro sistema hemos realizado una serie de experimentos donde hemos pretendido comprobar el efecto de la inclusión del modelo de vientos y su efectividad cuando colabora activamente en la predicción en dos etapas.

Para ello, hemos generado una serie de mapas sintéticos, sobre los que estudiar el efecto del campo de vientos sobre terrenos irregulares. En los experimentos que presentamos a continuación, el mapa escogido es una especie de rampa, que se puede dividir en 4 zonas diferenciadas (ver Figura 4.4, 4.5):

Zona 1: superficie plana con una pendiente nula.

Zona 2: superficie plana con una pendiente del 50% de subida.

Zona 3: superficie plana con una pendiente del 50% de bajada.

Zona 4: superficie plana con una pendiente nula.

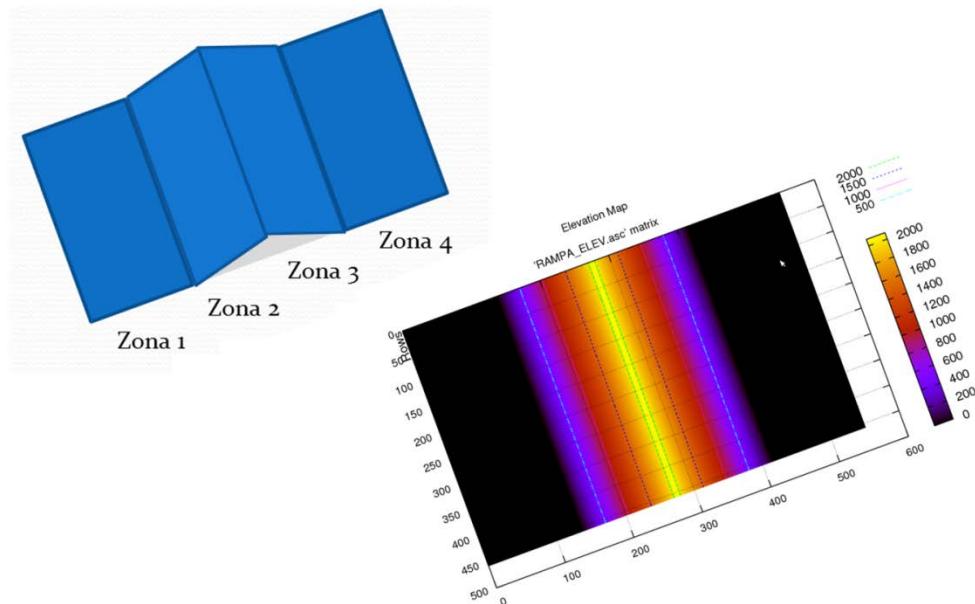


Figura 4.4 Esquema del terreno y mapa de elevación

El mapa tiene 459 filas por 550 columnas lo que hace un total de 252.450 celdas, con una resolución de 30 metros. Eso quiere decir que cada celda corresponde a un área de 900m<sup>2</sup> y por tanto el mapa tiene un área total de 227 km<sup>2</sup> (22.721 hectáreas).

La altitud máxima del mapa se sitúa en 2070m en la cresta de la rampa (lugar donde se unen la zona 2 y la zona 3).

Mapa topografico sintetico

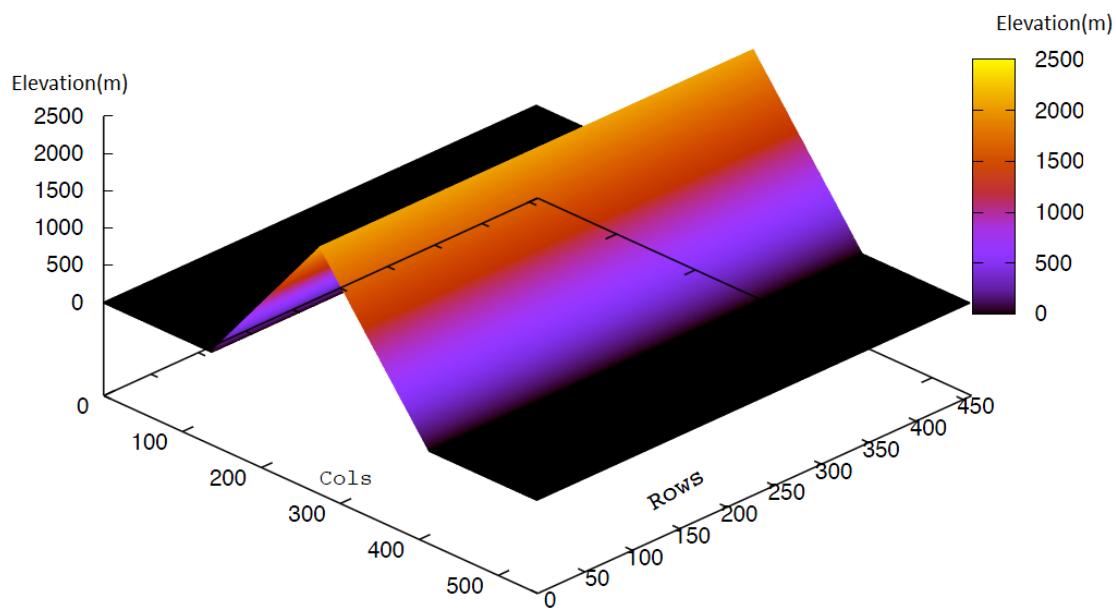
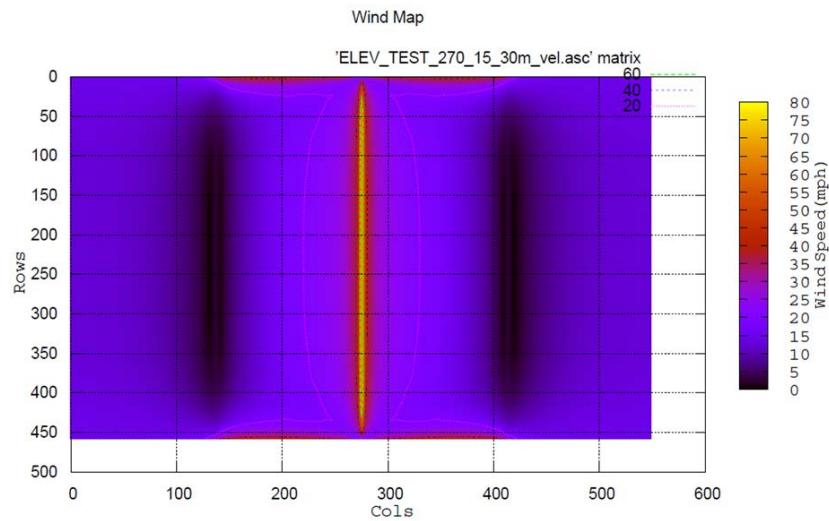


Figura 4.5 Esquema del terreno y mapa de elevación

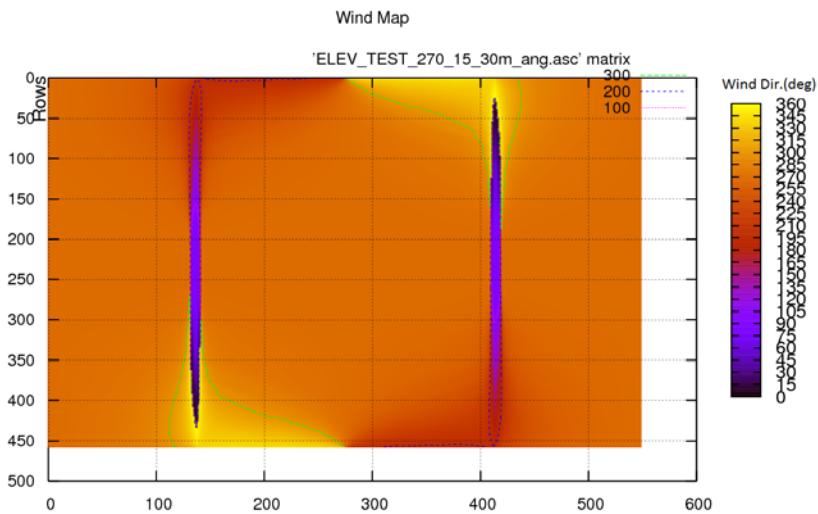
#### 4.3.1 Efecto del campo de vientos sobre la propagación de un incendio

Usando como base el mapa sintético explicado en el anterior apartado, mostramos uno de los experimentos realizados para observar como la introducción de un modelo de vientos afecta a la propagación de un incendio forestal.

Sobre este mapa se ha definido un viento general de 15 mph (millas por hora) con una orientación de  $270^\circ$ . Con el simulador de campo de vientos WindNinja se han generado los ficheros de dirección y velocidad del viento asociados al terreno (ver Figura 4.6 y 4.7).

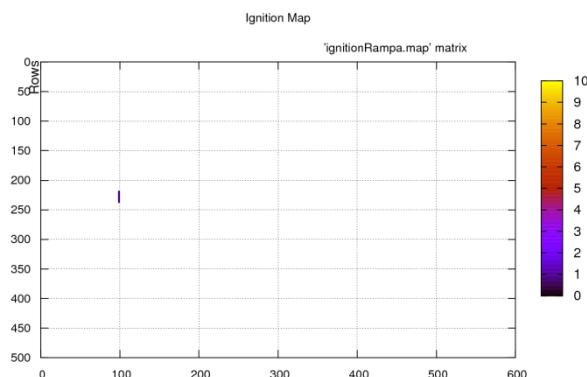


**Figura 4.6 Mapa de velocidades del viento**



**Figura 4.7 Mapa de direcciones del viento**

También se ha definido un área de ignición inicial (ver Figura 4.8), que será el lugar del mapa dónde el fuego comenzará a propagarse.



**Figura 4.8 Área de ignición inicial**

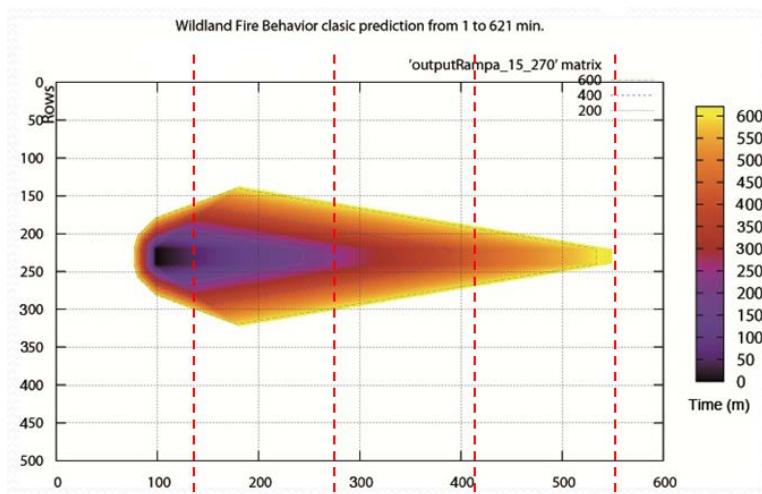
En el simulador definiremos ciertos parámetros para hacer las simulaciones con el fin de comparar el comportamiento del incendio a lo largo del tiempo utilizando campo de vientos y sin la utilización de éste. El modelo de vegetación que utilizaremos en esta simulación es el número 1, correspondiente a hierba corta (*short grass*), según los 13 modelos básicos definidos por Rothermel (1972) y revisados por Albini (1976).

Este modelo se caracteriza por una propagación muy rápida y es característico de praderas y sabanas donde se pueden encontrar pequeños arbustos pero con una concentración baja. Las variables relativas a la humedad se han mantenido iguales en las dos simulaciones para que no influyan en las diferencias entre ambas propagaciones.

Una vez definidos todos los parámetros necesarios para la simulación, dejaremos propagar el incendio en ambos escenarios hasta que el fuego llegue a alguno de los límites del mapa. Veremos así como influye el uso de campo de vientos, frente al viento atmosférico global a toda la superficie bajo las mismas condiciones.

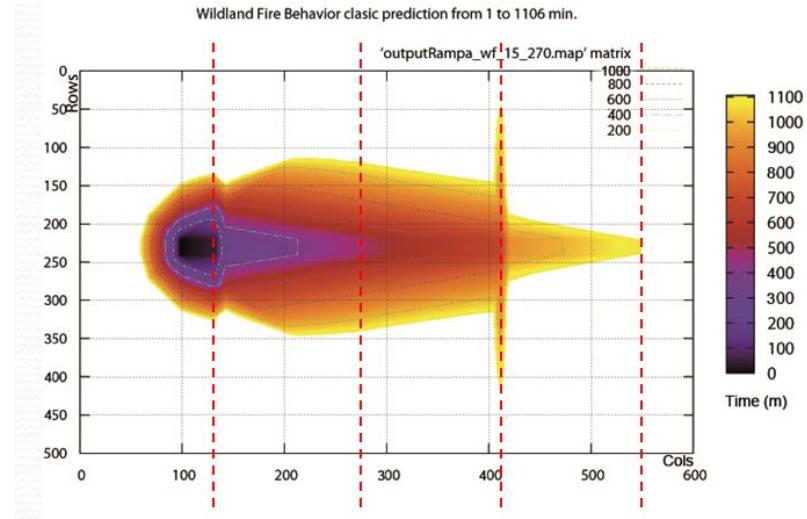
#### 4.3.1.1 Análisis de los resultados

La figura 4.9 representa la propagación del fuego con dirección y velocidad del viento uniformes en todas las celdas de la malla. El fuego tarda 621 minutos en alcanzar el borde derecho del mapa, momento en el que finaliza la simulación. Lo único que podemos extraer de momento es que el fuego tiene un comportamiento muy uniforme durante toda la simulación y solo se ve alterado cuando llega a la segunda zona dónde comienza a propagar más rápido por la influencia de la pendiente de subida. Los límites de las diferentes zonas están marcados con líneas discontinuas rojas.



**Figura 4.9 Propagación con viento uniforme**

El escenario varía notablemente cuando introducimos el campo de vientos a la simulación (ver Figura 4.10). Para empezar el fuego tarda mucho más en llegar al borde derecho del mapa (1106 minutos), lo que nos da una idea de la influencia en la velocidad de propagación del incendio que tiene la inclusión del campo de vientos.

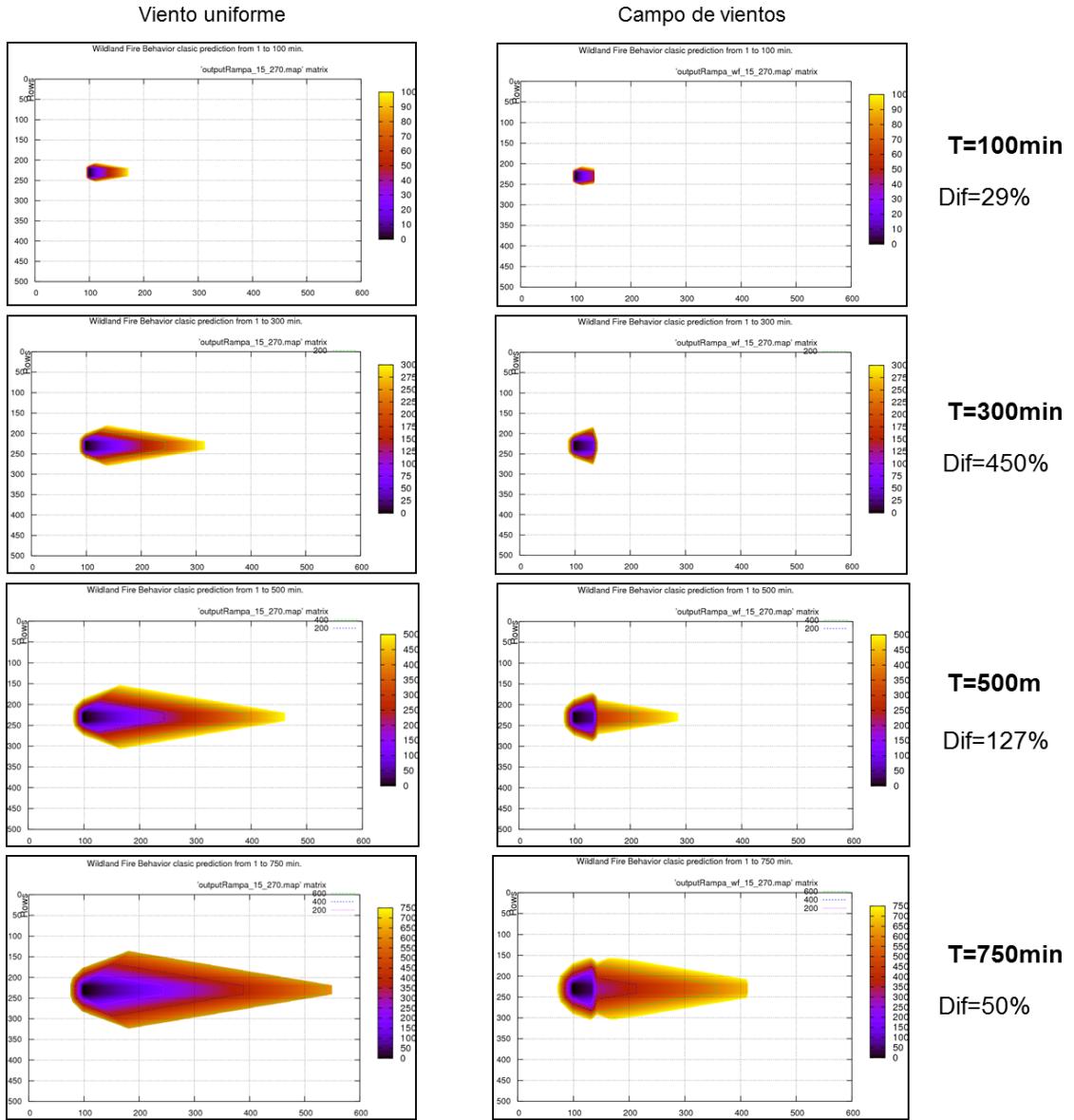


**Figura 4.10 Propagación con campo de vientos**

Además la forma en la que el fuego se propaga es mucho más irregular y se ve afectado por el cambio en las componentes de velocidad y dirección del viento debido a los cambios del terreno en cada una de las cuatro zonas definidas anteriormente.

Hemos realizado una serie de comparaciones en diferentes instantes de tiempo y hemos calculado la diferencia, usando la fórmula definida en el apartado 4.1.

En la figura 4.11 mostramos los diversos cortes realizados y la diferencia calculada.



**Figura 4.11 Comparación de los frentes en diferentes instantes de tiempo**

En el primer corte (100 minutos) ya se aprecia que el frente con viento uniforme se propaga más rápido que la simulación con campo de vientos, que se va frenando debido al valor de las componentes del viento en las celdas. En el segundo corte (300 minutos), esta tendencia continua y la diferencia aumenta hasta un 450% entre frentes.

En el siguiente corte, en el cual la simulación con campo de vientos llega al límite entre la zona 1 y la 2, vemos que la diferencia se ha reducido notablemente debido a que la simulación con campo de vientos acelera la propagación debido a la velocidad del viento que aumenta progresivamente y al efecto de la pendiente.

La diferencia se rebaja hasta un 50% a los 750 minutos, aunque en este momento la simulación con viento uniforme ya ha finalizado, mientras que la que utiliza campo de vientos aún no ha alcanzado el borde.

Por lo tanto, podemos concluir que el uso de estos campos de vientos en nuestras simulaciones afecta mucho en la velocidad y forma del fuego, cuando los terrenos son irregulares y el viento se ve afectado por esta superficie heterogénea. Consideramos que las condiciones reales de un incendio se asemejan más al segundo experimento ya que se ha observado y demostrado en muchos trabajos, que el viento no se mantiene inalterable a los cambios en el terreno y como fluido que es, modifica su comportamiento ante los obstáculos que encuentra en el terreno.

#### 4.3.2 Aplicación del modelo en la predicción en dos etapas

Nuestro siguiente propósito, después de comprobar el efecto de la inclusión del campo de vientos en la predicción, era incluir el modelo dentro de la metodología de predicción en dos etapas para ver si nos podría ayudar a mejorar nuestras predicciones.

Para ello, hemos decidido comenzar experimentando con el método evolutivo basado en un algoritmo genético (a partir de ahora le llamaremos GA) y compararlo con los resultados con este mismo método de ajuste, pero añadiéndole el modelo de campo de vientos, a partir de ahora GAwf (ver Figura 4.12).

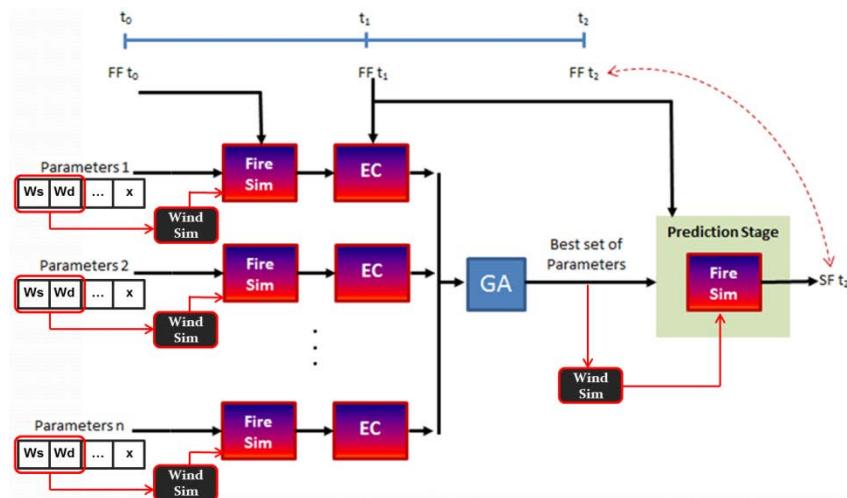


Figura 4.12 Esquema del método GAwf

El método GA, explicado en el apartado 2.2.1 del presente trabajo, requiere dar un valor a una serie de factores que influirán en la calidad de la calibración de los parámetros. Estos factores son el número de individuos de la población, el número de generaciones, elitismo, cruzamiento y mutación.

El gran problema con el cual nos hemos encontrado ha sido el hecho de que el simulador de campo de vientos no haya podido ser acoplado hasta el momento, debido a que no disponemos del núcleo del mismo hasta la fecha. Esto hace que tengamos que simular uno a uno cada individuo, para cada generación y esto repetirlo en cada intervalo de simulación.

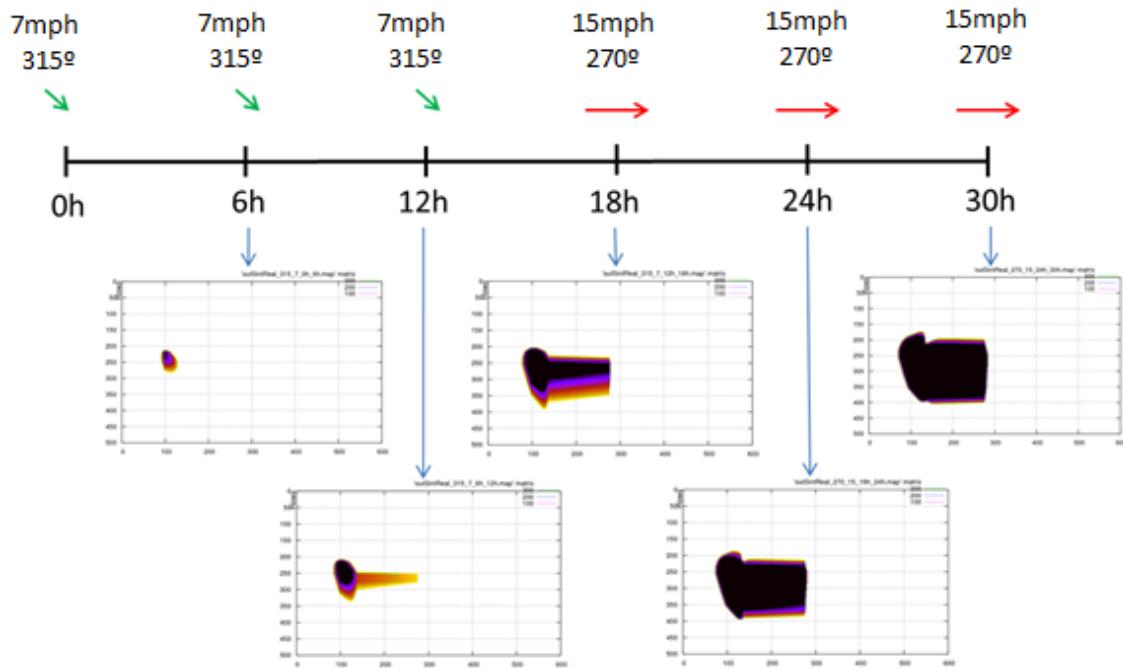
Para simular un individuo de forma manual, hemos de generar el campo de vientos extrayendo sus genes de viento general, pasar el resultado al simulador de incendios, calcular el error del individuo respecto al frente real y anotar este valor para la próxima generación. Este hecho hace inviable la experimentación con poblaciones relativamente grandes. Obviamente, nuestra idea no es trabajar de esta forma, pero para probar nuestra metodología en estos momentos, hemos tenido que reducir el tamaño de la población a tan solo 10 individuos y posponer experimentos más ambiciosos hasta que dispongamos de un sistema totalmente acoplado y paralelizable. Esto provoca que a medida que vamos evolucionando nuestra población, tienda a ser homogénea debido a la poca cantidad de individuos con los que trabajamos y las pocas posibilidades de cruzamiento que tenemos.

Por lo tanto, en este experimento utilizaremos una población de 10 individuos que serán evolucionadas hasta llegar a la quinta generación, con un elitismo de 2 (los 2 mejores sobreviven), probabilidad de cruzamiento de un 20% y un 1% de probabilidad de mutación.

A medida que hemos realizado este experimento nos hemos dado cuenta que para experimentos futuros debemos aumentar la población notablemente, que el elitismo para una población tan pequeña debería haber sido menor, y que para romper la homogeneidad en que incurre la población a medida que evoluciona, la probabilidad de mutación debería ser mayor. De todas formas, todas estas afirmaciones no dejan de ser hipótesis que deben ser probadas en un futuro.

Por ello, vamos a presentar el experimento realizado y dejaremos todos estos cambios para trabajos futuros, pero siendo conscientes de las precauciones que hemos de tener en mente a la hora de interpretar los resultados de este experimento.

Si queremos comparar el GA con el método modificado GAwf, debemos establecer un terreno con un incendio de referencia con el que compararnos. Hemos utilizado el mismo terreno y área de ignición del anterior experimento y lo hemos hecho propagar durante un cierto tiempo y con unas condiciones determinadas (Ver Figura 4.13).



**Figura 4.13 Incendio sintético de referencia (fuego real)**

Se han definido diferentes intervalos de simulación con unas condiciones de viento general de  $315^{\circ}$  y 7mph durante 3 intervalos y en el cuarto se modifica el viento general a  $270^{\circ}$  y 15mph, para ver cómo se adaptan al cambio ambos métodos. Antes de hacer la simulación para cada intervalo, se han generado los campos de vientos que serán introducidos en el simulador. En la figura anterior, se pueden ver los frentes reales resultantes al final de cada intervalo. A diferencia del experimento anterior, el fuego no pasa la cresta de la rampa y se extingue antes de llegar. Esto puede ser debido a que la velocidad del viento cuando llega a la cresta es menor y por el cambio en el modelo de vegetación.

Para este experimento hemos utilizado el modelo de vegetación 7 correspondiente a un terreno de arbustos a diferencia del anterior experimento, dónde se ha utilizado el modelo 1.

Se ha generado una población inicial, que es la que será utilizada por ambos métodos y que se detalla en la tabla 4.1.

	M1	M10	M100	Mherb	WindSpeed	WindDir
<b>Individuo 1</b>	0.095443	0.247312	0.194611	3.655759	13.801957	247.454403
<b>Individuo 2</b>	0.306020	0.375939	0.287421	3.912500	9.1989020	43.2585640
<b>Individuo 3</b>	0.154984	0.115495	0.016578	2.708352	4.1813410	113.187976
<b>Individuo 4</b>	0.001491	0.272494	0.272494	0.146105	4.0077530	331.191543
<b>Individuo 5</b>	0.100165	0.129333	0.054243	1.727749	7.7148000	136.054763
<b>Individuo 6</b>	0.238843	0.026356	0.395426	1.897879	10.121515	211.035867
<b>Individuo 7</b>	0.325973	0.073962	0.273188	2.192527	3.5455590	330.273008
<b>Individuo 8</b>	0.021729	0.028525	0.337001	1.364006	12.151100	60.1121380
<b>Individuo 9</b>	0.291346	0.269073	0.058337	2.492362	0.4649830	158.449562
<b>Individuo 10</b>	0.232406	0.374343	0.180614	1.244606	1.5527650	38.1485340

**Tabla 4.1 Población inicial para el método GA y GAwf**

Cada individuo tiene 6 propiedades o genes que representan una característica del entorno:

- M1: Humedad en la 1<sup>a</sup> hora del combustible muerto.
- M10: Humedad a las 10 horas del combustible muerto.
- M100: Humedad a las 100 horas del combustible muerto.
- Mherb: Humedad del combustible herbáceo vivo.
- WindSpeed: Velocidad global del viento.
- WindDir: Dirección global del viento.

Estos genes son los que se cruzaran entre individuos y podrán ser mutados para generar nuevos individuos y nuevas poblaciones evolucionadas.

Como vemos en la población inicial, nos olvidamos por completo de las condiciones del fuego sintético real y partimos de una población aleatoria, dentro de un rango de valores para cada gen, y será el algoritmo genético el que tratará de evolucionar los individuos para ir mejorando la población generación tras generación, basándose en el error de los individuos en comparación al frente real, sin saber que valores de los parámetros son los que han generado este frente real.

#### 4.3.2.1 Análisis de los resultados

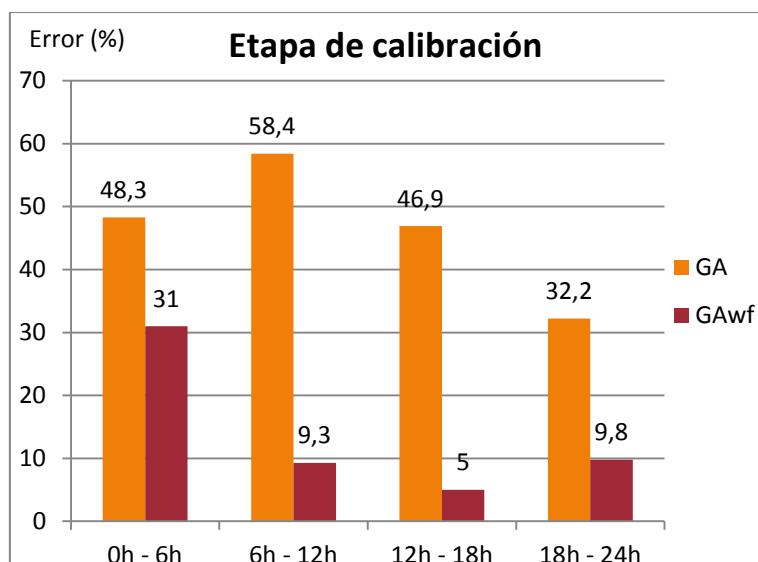
Con todas las entradas a los métodos bien definidas, se inicia cada uno de los métodos por separado para encontrar el individuo que produce un error más bajo en la etapa de calibración y utilizarlo como entrada al simulador para realizar la predicción del instante de tiempo posterior.

Es decir, el mejor individuo resultante de la calibración en el intervalo de las 0 a las 6 horas, será el elegido para predecir el frente de fuego a las 12 horas, y así sucesivamente.

Hemos realizado este proceso de calibración para los intervalos de 0 a 6 horas, de 6 a 12, de 12 a 18 y de 18 a 24 horas para ambos métodos y se ha calculado el error con el frente observado.

Con el mejor individuo resultante de cada calibración hemos hecho la predicción a las 12, 18, 24 y 30 horas, y calculado su error con el frente real en esos instantes. Además, con el mejor individuo resultante de la calibración a las 24 horas, no solo hemos realizado la predicción a las 30 horas, sino que lo hemos utilizado directamente para hacer la predicción a las 36 horas, sabiendo que las condiciones no cambian de un intervalo a otro.

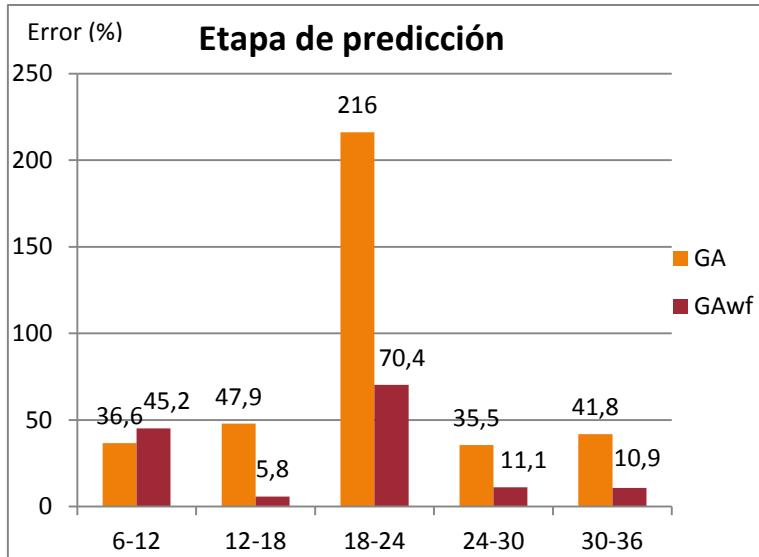
Los errores en la calibración en cada intervalo son los que se muestran en la gráfica de la Figura 4.14.



**Figura 4.14 Errores en la etapa de calibración**

Los errores obtenidos para ambos métodos son realmente altos en el primer intervalo pero vemos como a partir de este intervalo, el método GAwf consigue rebajar sustancialmente dichos errores mientras que el GA sigue cometiendo errores muy considerables.

En la Figura 4.15, vemos cuales son los errores de predicción con los mejores individuos de la etapa de calibración.



**Figura 4.15 Errores en la etapa de predicción**

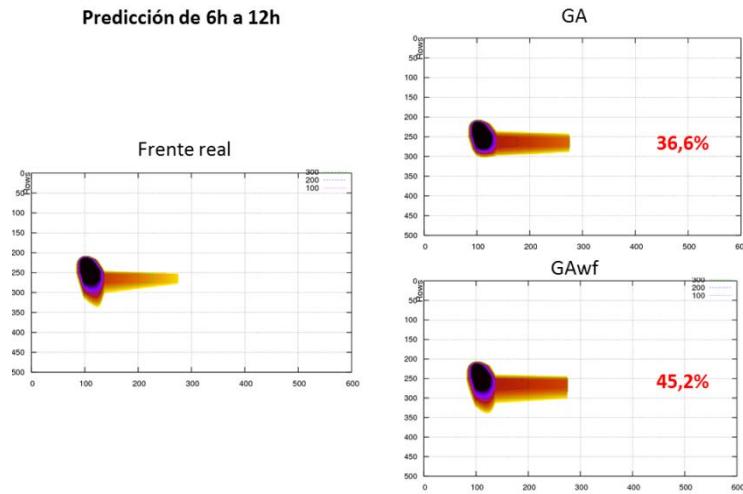
A diferencia que en la etapa de calibración, la predicción con el método GA es mejor en el primer intervalo, pero ya en el segundo vemos como el método GAwf consigue alcanzar un error muy por debajo de su competidor.

En el instante correspondiente a las 18 horas las condiciones del viento cambian sustancialmente y eso se ve reflejado en la calidad de las predicciones de ambos métodos. De todas formas, el método GAwf amortigua mucho más el error (70%) debido a este cambio que GA (216%), que dispara su error debido al cambio en las condiciones.

Cuando se realiza la siguiente calibración (18h-24h), ambos métodos consiguen rebajar sustancialmente el error, pasando de 216% a 35,5% el GA y de 70% a 11,1% el GAwf.

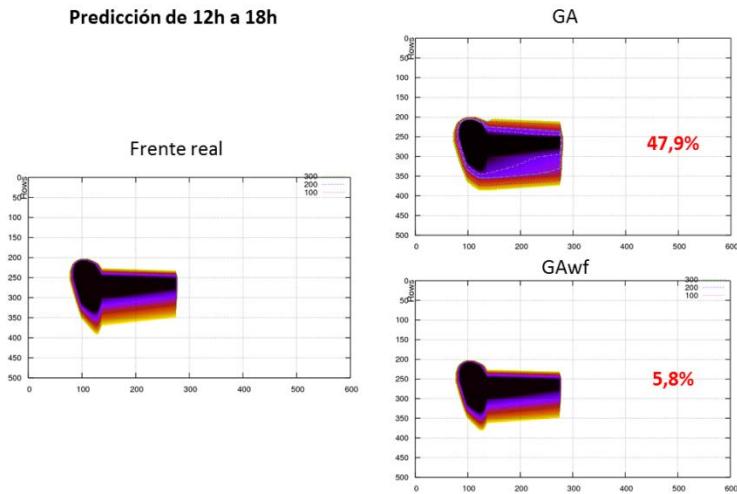
También vemos que sin utilizar la calibración en el intervalo de 24 a 30 horas, ambos métodos consiguen errores muy similares al predecir el frente para las 36 horas, utilizando el mejor individuo de la calibración de 18 a 24 horas. Esto se debe a que las condiciones del viento no han variado durante estos intervalos.

Veamos ahora visualmente los frentes obtenidos en las diferentes etapas de predicción.



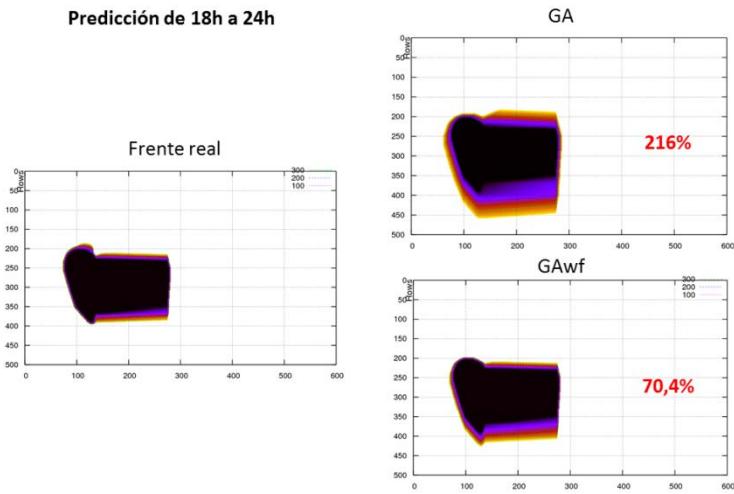
**Figura 4.16 Comparativa de frentes de 6 a 12 horas**

En la figura 4.16 podemos ver como en la predicción del frente a las 12 horas, el error es menor en el método GA pese a que la forma de la propagación es más similar con el método GAwf.



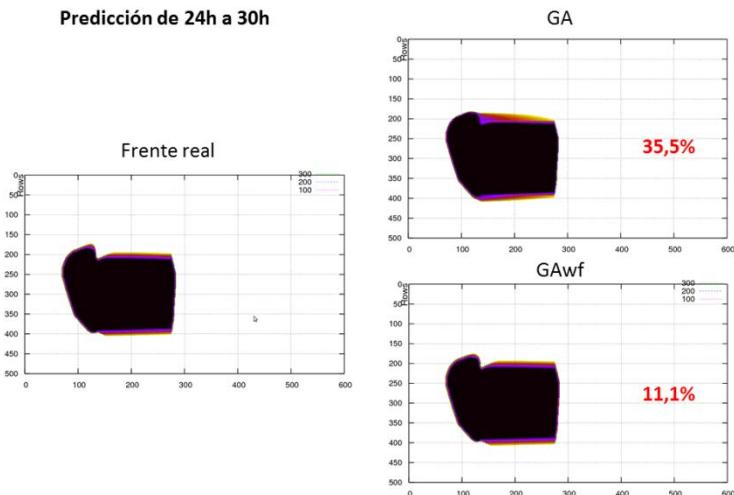
**Figura 4.17 Comparativa de frentes de 12 a 18 horas**

La figura 4.17, que muestra la predicción a las 18 horas, nos muestra claramente como la calibración ha funcionado mucho mejor con GAwf y ahora el error es muy bajo y la forma de la propagación es muy similar.



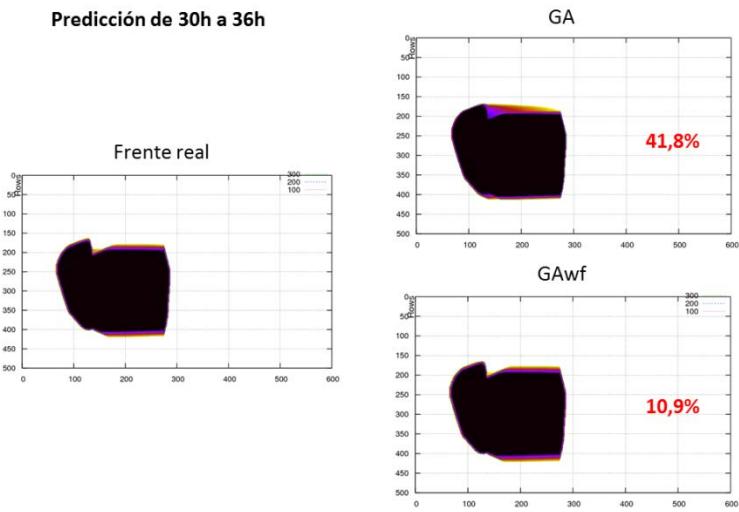
**Figura 4.18 Comparativa de frentes de 18 a 24 horas**

Cuando las condiciones del viento cambian a las 18 horas, la calibración hecha con anterioridad no da buenos resultados como vemos en la Figura 4.18.



**Figura 4.19 Comparativa de frentes de 24 a 30 horas**

El calibrado de 18 a 24 horas consigue reducir el error en ambos métodos y rebajar los errores cometidos en la anterior predicción como se ve en la Figura 4.19.



**Figura 4.20 Comparativa de frentes de 30 a 36 horas**

En la figura 4.20, mostramos la predicción hecha con el mejor individuo de la etapa de calibración de 18 a 24h, y seguimos comprobando que el método GAwf mantiene unos niveles de error muy bajos.



# Capítulo 5: Conclusiones y trabajo futuro

A través de los diversos experimentos que hemos realizado hemos verificado que el viento influye en gran medida en el comportamiento de un fuego. Las características del terreno modifican las componentes de dirección y velocidad, y esto hace que la utilización de un viento atmosférico global no sea suficiente cuando nos enfrentamos a incendios reales, dónde la topografía es irregular y las condiciones son dinámicas a lo largo del tiempo.

En este trabajo queremos romper la homogeneidad del viento que habíamos asumido hasta ahora, y tratar de mejorar los métodos de calibración de parámetros utilizados en nuestro departamento, añadiendo un modelo de campo de vientos que nos permita hacer más realistas nuestras predicciones. Con este cambio esta homogeneidad se puede solucionar pero no somos sensibles a los cambios que se produzcan en las condiciones meteorológicas dentro de un mismo intervalo. Para ello deberíamos encontrar soluciones de otro tipo.

Se ha demostrado que la introducción del simulador de campo de vientos mejora notablemente nuestras predicciones con la predicción en 2 etapas, aunque estos resultados se han de valorar en su justa medida, ya que el fuego que se ha tomado como real, es un fuego sintético generado bajo unas condiciones constantes dentro de los intervalos de tiempo y con unos vientos generados con nuestro modelo.

Creemos en la validez de estos resultados porque aceptamos la hipótesis de que el comportamiento real del viento es mucho más cercano a la de nuestro modelo de vientos, que a la de un viento uniforme a todo el terreno.

Este trabajo debe ser la base sobre la que realizar experimentaciones mucho más exhaustivas, con poblaciones mayores cuando el sistema esté totalmente acoplado y utilizando diversos métodos de calibración a parte del GA.

Además, debemos probar este sistema con fuegos reales para poder valorar con mayor certeza la mejora real que supone la inclusión de este modelo de campo de vientos.

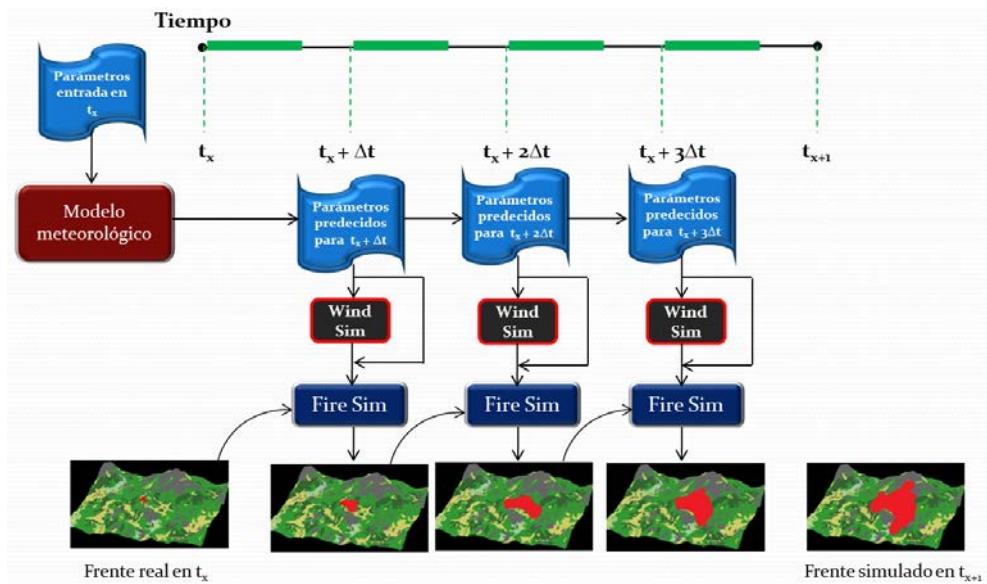
Para finalizar, consideramos los resultados muy esperanzadores, hemos definido la metodología, se han establecido contactos y colaboraciones con expertos en otras áreas que nos han ayudado y nos podrán ayudar en un futuro, y se concluye que el camino que se ha iniciado puede ser de gran interés y aportarnos resultados muy interesantes y útiles en un futuro.

## 5.1 Trabajo futuro

El objetivo a más corto plazo es conseguir acoplar el modelo de forma efectiva para poder trabajar de forma desatendida y utilizar nuestros recursos para poder realizar predicciones en un espacio de tiempo relativamente corto, paralelizando nuestras simulaciones.

Una vez esto sea una realidad, pretendemos realizar una experimentación más exhaustiva para extraer resultados con una mayor relevancia. Seguidamente, nos gustaría trabajar sobre una serie de incendios acontecidos en Grecia el año 2007 de los cuales poseemos todos los datos necesarios para reproducirlos y así, probar nuestro sistema con un incendio real.

Como objetivo a más largo plazo, queremos intentar solventar la falta de sensibilidad a cambios en las condiciones meteorológicas, incorporando un modelo meteorológico que nos permita hacer predicciones en puntos intermedios de nuestros intervalos, y utilizar estos datos para realizar simulaciones intermedias que nos devuelvan predicciones finales más cercanas a la realidad (ver Figura 5.1).



**Figura 5.1 Sistema con modelo meteorológico acoplado**

De esta forma, podríamos romper la homogeneidad espacial de los parámetros que se ha tratado en este trabajo, y al mismo tiempo adelantarnos a los posibles cambios en las condiciones mediante un modelo meteorológico de predicción, como por ejemplo el ampliamente utilizado WRF [43].

Son muchas y muy diversas las mejoras que queremos introducir y esperamos que en los años sucesivos y, con las personas que están y estarán, podamos alcanzarlos.

# Referencias

- [1] R. Tapia and C. Lanius, *Computational Science: Tools for a changing world*, 2001, <http://ceee.rice.edu/Books/CS/index.html>.
- [2] Guido Schmuck et al., "Forest Fires in Europe 2009," European Comission - Joint Research Center, JRC - Scientific and Technical Reports 10, 2010.
- [3] Domingos Xavier Viegas, "Recent Forest Fire Related Accidents in Europe," European Comission - Joint Research Center, <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/11111111/8272> ISBN:978-92-79-14604-6, 2009.
- [4] Luís Guadalupe Zárate López, "Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales," Barcelona, ISBN: 8468867381 (<http://hdl.handle.net/10803/6436> ), 2004.
- [5] F.A. Albini, "A model for fire spread in wildland fuels by radiation," *Combustion science and technology*, vol. 43, no. 5-6, pp. 229-258, 1985.
- [6] R.O. Weber, "Analytical models for fire spread due to radiation," *Combustion and Flame*, vol. 78, pp. 398-408, December 1989.
- [7] J.L. Dupuy, "Fire spread through a porous forest fuel bed: A radiative and convective model including fire-induced flow effects," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 9, pp. 155–172, 1997.
- [8] A.G. McArthur, "Wheather and grassland fire behaviour," *Forestry and Timber Bureau*, no. Leaflet 100, 23, 1967.
- [9] H.E. Anderson, E.A. Catchpole, N.J. de Mestre, and T. Parkes, "Modelling the spread of grass fires," *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*, vol. 23, pp. 451-466, 1982.
- [10] D.G. Green, "Shapes of simulated fires in discrete fuels," *Ecological Modelling*, vol. 20, pp. 21-32, October 1983.

- [11] R. C. Rothermel, "*How to predict the spread and intensity of forest and range fires,*" Ogden, UT, tech. report INT 143, 1983.
- [12] R. Rodríguez, "*Towards dynamic data driven forest fire propagation prediction,*" Universitat Autònoma de Barcelona. Departament d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Bellaterra, PhD Thesis 2010.
- [13] P.L Andrews, "*BEHAVE: Fire Behavior prediction and modeling systems - Burn subsystem part 1,*" Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Odgen, UT, General Technical Report INT-194, 1986.
- [14] M. A. Finney, "*FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation,*" United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT, Res. Pap. RMRS-RP-4, 1998.
- [15] FIRE.ORG - Public Domain Software for the Wildland fire Community. [Online].  
<http://www.fire.org>
- [16] John H. Holland, "*Genetic algorithms,*" Scientific American, vol. 267, no. 1, July 1992.
- [17] B. Abdalhaq, "*A methodology to enhance the Prediction of Forest Fire Propagation,*" Universitat Autònoma de Barcelona. Departament d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Bellaterra, PhD Thesis, 2004.
- [18] G. Bianchini, "*Wildland Fire Prediction based on Statistical Analysis of Multiple Solutions,*" Universitat Autònoma de Barcelona. Departament d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Bellaterra, PhD Thesis, 2006.
- [19] G. Bianchini, "*Sistema de Ayuda a la Decisión Para la Gestión de Incendios Forestales,*" Universitat Autònoma de Barcelona. Departament d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Bellaterra, Master Thesis 2004.
- [20] M. Denham, "*Predicción de la Evolución de los Incendios Forestales Guiada Dinámicamente por los Datos,*" Universitat Autònoma de Barcelona. Departament d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Bellaterra, Master Thesis, 2007.

- [21] Rodríguez R., "Sistema Adaptativo para la Predicción de Incendios Forestales basados en Estrategias Estadístico-Evolutivas (SAPIFE3)," Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Master Thesis, 2004.
- [22] R. Rodríguez, A. Cortés, T. Margalef, and E. Luque, "An Adaptive System for Forest Fire Behavior Prediction," in 11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, Sao Paolo, Brasil, 2008, pp. 275-282.
- [23] E.F. Bradley, "An experimental study of the profiles of wind speed, shearing stress and turbulence at the crest of a large hill," Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 106, pp. 101–123, January 1980.
- [24] Nigel Wood, "Wind Flow Over Complex Terrain: A Historical Perspective and the Prospect for Large-Eddy Modelling," Boundary-Layer Meteorology, vol. 96, pp. 11–32, Aug. 2000.
- [25] N.O. Jensen and E.W. Peterson, "On the escarpment wind profile," Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 104, pp. 719-728, July 1978.
- [26] A.M.G. Lopes, "WindStation—a software for the simulation of atmospheric flows over complex topography," Environmental Modelling & Software, vol. 18, pp. 81–96, January 2003.
- [27] W.R. Catchpole et al., "Rate of Spread of Free-Burning Fires in Woody Fuels in a Wind Tunnel," Combustion science and technology, Taylor & Francis, vol. 131, pp. 1-37, 1998.
- [28] J. M. Forthofer, "Modeling wind in complex terrain for use in fire spread prediction," Colorado State University, Fort Collins, Colorado, Degree of Master of Science 2007.
- [29] Ignacio Alonso Fernández-Coppel, "Las Coordenadas Geográficas y la Proyección UTM," Universidad de Valladolid, 2001, Febrero.
- [30] Jorge Fallas, "Proyecciones Cartográficas y Datum ¿Qué son y para qué sirven?," TeleSig-Universidad Nacional, Costa Rica, 2003.
- [31] Collin D. Bevins. (1996) *fireLib User Manual and Technical Reference*. [Online]. <http://www.fire.org/downloads/fireLib/1.0.4/doc.html>

- [32] Kyle S. Shannon, *WindNinja: Tutorial 1: The Basics and Tutorial*, 2009, Tutorials included in WindNinja 2.0 Software.
- [33] Kyle S. Shannon, *WindNinja Tutorial 2: Diurnal Winds*, 2009, Tutorials included in WindNinja 2.0 Software.
- [34] FireModels.org. WindNinja team. [Online].  
<http://www.firemodels.org/index.php/windninja-support/windninja-contact-us>
- [35] Kyle S. Shannon, *WindNinja Tutorial 3: Point Initialization*, 2011, Tutorials included in WindNinja 2.1 BETA Software.
- [36] Kyle S. Shannon, *WindNinja Tutorial 4: Weather Model Initialization*, 2011, Tutorials included in WindNinja 2.1 BETA Software.
- [37] Collin D Bevins, "Fire Behavior SDK Reference Manual," Fire.org, www.fire.org/downloads/fbsdk/docs/refman.pdf 2006.
- [38] Patricia L. Andrews, Collin D. Bevins, and Robert C. Seli, "BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide," Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT, 2005.
- [39] Mark A. Andrews, P.L., Butler, B.W. Finney, "An Overview of FlamMap Fire Modeling capabilities," in USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P-41, Portland, OR, 2006, pp. 213–220.
- [40] CREAF. Miramon. [Online]. <http://www.creaf.uab.es/miramon/>
- [41] Open Source Geospatial Foundation. GDAL. [Online]. <http://www.gdal.org/>
- [42] GNUPLOT. [Online]. <http://www.gnuplot.info/>
- [43] Joseph Klemp, *RESEARCH-COMMUNITY PRIORITIES FOR WRF-SYSTEM DEVELOPMENT*, 2006  
[http://www.wrf-model.org/development/wrab/docs/wrab\\_plan\\_200701.php](http://www.wrf-model.org/development/wrab/docs/wrab_plan_200701.php).