



**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

**ESCUELA POLITÉCNICA  
SUPERIOR DE ÁVILA**



**PROYECTO FIN DE MASTER**  
**MÁSTER DE GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS**  
**EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

Asimilación de datos en un modelo de  
incendios forestales e integración en GIS

---

AUTOR: Diego Prieto Herráez

TUTORES: Manuela Chaves Tolosa

Inmaculada Picón Cabrera

Septiembre de 2013



**TITULO:** Asimilación de datos en un modelo de incendios forestales e integración en GIS

**AUTOR:** Diego Prieto Herráez

**TUTOR:** Manuela Chaves Tolosa

**DEPARTAMENTO:** Matemática Aplicada

**TUTOR:** Inmaculada Picón Cabrera

**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Cartográfica y del Terreno

## **Resumen del Proyecto**

Este trabajo se ha desarrollado dentro del contexto de la investigación de la simulación numérica de incendios forestales llevada a cabo dentro del grupo de *Simulación Numérica y Cálculo Científico* de la Universidad de Salamanca.

Con su realización se ha pretendido dar respuesta a las líneas de investigación abiertas en la actividad del grupo tratando de aportar los conocimientos adquiridos a lo largo del máster. De esta forma, el desarrollo de este proyecto se divide en dos subproyectos.

Durante el primero de ellos se lleva a cabo una etapa de investigación sobre la aplicación de técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo del *Filtro de Kalman* para la identificación de parámetros en un determinado modelo o función. En concreto, se valida el uso de estas técnicas para el ajuste de parámetros en un modelo de propagación de incendios unidimensional.

En una segunda parte, se pretende realizar una investigación sobre los diferentes recursos de información geográfica disponibles y como se pueden aprovechar estos para construir un servicio de valor añadido.

Una vez realizado este estudio, se seleccionan y reúnen aquellos recursos que proporcionan la información que puede servir, bien directamente o bien mediante un proceso de adaptación, como datos de entrada a un modelo de propagación de incendios forestales, y se lleva a cabo la integración de este modelo dentro de un cliente GIS pesado como es la suite *ArcGIS Desktop* de *ESRI*.

El objetivo final de este segundo subproyecto es desarrollar una herramienta que permita automatizar la adquisición y el procesamiento de la información geográfica de forma que se obtengan los datos necesarios para lanzar el modelo de propagación de incendios forestales y llevar a cabo la simulación en un determinado entorno. Una vez procesados los datos de entrada, se deben representar los resultados sobre un mapa base, fácilmente entendible por el usuario.

## **Abstract**

This work has been developed within the research context of the numerical simulation of forest fires carried out in the group of *Simulación Numérica y Cálculo Científico* from the University of Salamanca.

With its realization we have tried to answer the research lines opened in the group activity trying to provide the knowledge acquired during the master. Thus, the development of this project is divided into two sub-projects.

During the first one it is carried out a stage of research on the applications of data assimilation techniques based on the use of the *Kalman Filter* to identify parameters of a particular model or function. Specifically, we validate the use of these techniques for parameter adjustment in a one-dimensional fire propagation model.

In the second part, a study on the various geographic information resources available and how they can be used to build a value-added service is carried out.

After this study, some of these resources that can be used, either directly or through a process of adaptation, as input to a windland forest fire propagation model are selected and combined for the integration of this model within a heavy GIS client as *ArcGIS Desktop* suite from *ESRI*.

The ultimate goal of this subproject is to develop a tool that automates the acquisition and processing of geographic information so as to obtain the data necessary to launch the windland forest fire propagation model and perform the simulation in a given environment. After processing the input data, the results shall be shown on a base map easily understood by the users.

## **Palabras Clave**

data assimilation, ensemble Kalman filter, parameter adjustment, parameter identification, wildland forest fire modelling, wildfire, GIS, ArcGIS, arcpy



*Me gustaría dar las gracias en primer lugar a mis padres, familiares y amigos por el apoyo recibido durante estos meses.*

*Quiero también agradecer a mis tutores de proyecto, Dña. Manuela Chaves Tolosa y Dña. Inmaculada Picón Cabrera, el tiempo y la atención que me han dedicado.*

*Igualmente, quiero expresar mi agradecimiento a mis compañeros del grupo de Simulación Numérica y Cálculo Científico de la Universidad de Salamanca -Luis, Mabel, Manel y Manuela- por el apoyo y asesoramiento a la hora de realizar este trabajo.*

*También merecen especial atención Ignacio Juárez Relaño y Esther Lobo Cortés, de la Sección de Protección de la Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Salamanca, por poner a mi disposición el mapa de combustibles de la comunidad, un recurso sin el cual no habría sido posible realizar la segunda parte de este proyecto.*

*A todos vosotros, MUCHAS GRACIAS.*





# ÍNDICE DE CONTENIDOS

**ÍNDICE DE CONTENIDOS.....ix**

**ÍNDICE DE FIGURAS .....xiii**

**CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN ..... 1**

**1.1. ORIGEN ..... 1**

**1.2. OBJETIVOS ..... 3**

**1.3. METODOLOGÍA A SEGUIR ..... 4**

**1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO ..... 5**

**CAPÍTULO 2: MODELOS DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS  
FORESTALES ..... 7**

**2.1. ANTECEDENTES ..... 7**

**2.2. CONCEPTOS GENERALES..... 10**

**2.2.1. Conceptos generales sobre el fuego forestal ..... 10**

**2.2.2. Tipos de incendios ..... 12**

**2.2.3. Propagación del fuego ..... 14**

**2.2.4. Comportamiento del fuego ..... 15**

**2.3. MODELO UNIDIMENSIONAL..... 16**

**2.3.1. El problema ..... 16**

**2.4. MODELO BIDIMENSIONAL ..... 19**

**2.4.1. El problema ..... 20**

<b><i>CAPÍTULO 3: ASIMILACIÓN DE DATOS E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN PROCESOS DE CALIBRACIÓN</i></b> .....	<b>25</b>
<b>3.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>25</b>
3.1.1. Objetivos .....	26
3.1.2. Metodología a seguir.....	26
<b>3.2. EL FILTRO DE KALMAN</b> .....	<b>27</b>
3.2.1. Predicción .....	28
3.2.2. Corrección .....	28
<b>3.3. EL FILTRO DE KALMAN EN PROBLEMAS NO LINEALES</b> ..	<b>30</b>
3.3.1. Extended Kalman Filter (EKF) .....	30
3.3.2. Ensemble Kalman Filter (EnKF) .....	31
<b>3.4. CORRECCIÓN DE ESTADOS MEDIANTE ASIMILACIÓN DE DATOS</b> .....	<b>34</b>
3.4.1. Modelo bidimensional .....	34
3.4.2. Modelo unidimensional .....	41
<b>3.5. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE ASIMILACIÓN DE DATOS</b> .....	<b>45</b>
3.5.1. Definición del problema .....	45
3.5.2. Solución del problema .....	47
<b>3.6. EJEMPLO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE ASIMILACIÓN DE DATOS</b> .....	<b>49</b>
<b><i>CAPÍTULO 4: INTEGRACIÓN EN GIS</i></b> .....	<b>57</b>
<b>4.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>57</b>
4.1.1. Objetivos .....	58
4.1.2. Metodología a seguir.....	59
<b>4.2. MODELO A INTEGRAR EN EL GIS</b> .....	<b>59</b>
4.2.1. Datos de entrada .....	60
4.2.2. Datos de salida .....	62
4.2.3. Modificaciones realizadas sobre el modelo .....	63
<b>4.3. FUENTES DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZADAS</b> 64	
4.3.1. Identificación de las capas temáticas necesarias.....	64

4.3.2. Marco de referencia .....	65
4.3.3. Localización de las posibles fuentes de datos .....	66
4.3.4. Mapa base .....	67
4.3.5. Altimetría .....	69
4.3.6. Usos de suelo .....	71
4.3.7. Tipología de combustibles .....	73
4.4. ELECCIÓN DEL SOFTWARE GIS .....	77
4.5. ESTUDIO DEL GIS Y DESARROLLO DE LA INTERFAZ VISUAL .....	79
4.5.1. Estudio previo.....	79
4.5.2. Desarrollo de la interfaz visual .....	80
4.5.3. Depuración y validación del resultado .....	81
<b><i>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....</i></b>	<b>83</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	83
5.1.1. Conclusiones sobre las técnicas de asimilación de datos .....	83
5.1.2. Conclusiones sobre la integración en GIS.....	84
5.1.3. Aportaciones personales .....	84
5.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	85
<b><i>APÉNDICE I: PROGRAMAS DESARROLLADOS PARA LA ASIMILACIÓN DE DATOS .....</i></b>	<b>87</b>
I.1. COMPILACIÓN Y EJECUCIÓN DEL CÓDIGO DESARROLLADO .....	88
I.1.1. Requerimientos.....	88
I.1.2. Compilación en sistemas UNIX (Linux, OSX).....	88
I.1.3. Compilación en Windows .....	90
I.1.4. Configuración de la simulación .....	91
I.2. ESTRUCTURA DEL CÓDIGO DESARROLLADO.....	93
I.2.1. Código común .....	94

I.2.2. Corrección de estados .....	95
I.2.3. Identificación de parámetros .....	96

**APÉNDICE II: CÓDIGO DESARROLLADO PARA LA  
INTEGRACIÓN EN ARCGIS .....** 97

II.1. INSTALACIÓN DE LA EXTENSIÓN DESARROLLADA .....	97
II.1.1. Requerimientos .....	97
II.1.2. Instalación .....	98
II.2. ESTRUCTURA DEL CÓDIGO DESARROLLADO .....	100
II.2.1. config.xml .....	100
II.2.2. FireSimulator_addin.py .....	103
II.3. MANUAL DE USO .....	111

**BIBLIOGRAFÍA .....** 117

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Definición de fuego .....	10
<b>Figura 2:</b> Partes de un incendio.....	13
<b>Figura 3:</b> Formas básicas de propagación del fuego .....	14
<b>Figura 4:</b> Formas básicas de propagación del fuego .....	15
<b>Figura 5:</b> Momento inicial después de iniciarse un fuego a partir de un foco puntual. Se supone una gran incertidumbre en la situación del foco inicial .....	38
<b>Figura 6:</b> Antes de la primera asimilación de datos, después de una hora del inicio del fuego .....	38
<b>Figura 7:</b> Después de la primera asimilación de datos, después de una hora del inicio del fuego .....	39
<b>Figura 8:</b> Antes de la tercera asimilación de datos. 3 horas del inicio del fuego.....	39
<b>Figura 9:</b> Después de la tercera asimilación de datos. 3 horas después inicio del fuego.....	40
<b>Figura 10:</b> Caso con viento. Después de la tercera asimilación de datos. 3 horas después del inicio del fuego .....	40
<b>Figura 11:</b> Momento inicial después de iniciarse el fuego a partir de un foco puntual. Se supone una gran incertidumbre en la situación del foco inicial .....	43
<b>Figura 12:</b> Resultado de la asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones. Se ha tomado una varianza de 0,09 para la perturbación de las mediciones .....	43

**Figura 13:** Resultado de la asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones. Se ha tomado una varianza de 0,36 para la perturbación de las mediciones.....44

**Figura 14:** Resultado de la asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones. Se ha tomado una varianza de 0,64 para la perturbación de las mediciones.....44

**Figura 15:** Experimento 1: Parámetros con dist. gaussiana con varianza 0,16 para el valor de  $\lambda$  y 0,0009 para el valor de  $\beta$ . Varianza observaciones 0,09.....51

**Figura 16:** Experimento 2: Parámetros con dist. gaussiana con varianza 0,16 para el valor de  $\lambda$  y 0,0009 para el valor de  $\beta$ . Varianza observaciones 0,36.....52

**Figura 17:** Experimento 3: Parámetros con dist. gaussiana con varianza 0,16 para el valor de  $\lambda$  y 0,0009 para el valor de  $\beta$ . Varianza observaciones 0,64.....52

**Figura 18:** Experimento 4: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos (0,1) para  $\lambda$  y (0,01;0,05) para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,09.....53

**Figura 19:** Experimento 5: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos (0,1) para  $\lambda$  y (0,01;0,05) para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,36.....54

**Figura 20:** Experimento 6: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos (0,1) para  $\lambda$  y (0,01;0,05) para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,36.....55

**Figura 21:** Experimento 7: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos (0,1) para  $\lambda$  y (0,01;0,05) para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,64.....55

**Figura 22:** Formato *ASCII GRID*.....61

**Figura 23:** Entrada y salida de datos en la *caja negra* .....63

**Figura 24:** Mapa base proporcionado por el servicio WMS del Instituto Geográfico Nacional .....68

---

<b>Figura 25:</b> Mapa Autonómico Histórico de 2008 utilizado como mapa base .....	69
<b>Figura 26:</b> Visualización del MDE 10x10 descargado del servidor FTP del ITACyL.....	70
<b>Figura 27:</b> Mapa de cortafuegos creado a partir del SIOSE .....	73
<b>Figura 28:</b> Entrada y salida de datos en la <i>caja negra</i> .....	76
<b>Figura 29:</b> Mapa de combustibles .....	77
<b>Figura 30:</b> Ejemplo de simulación realizada con la integración en GIS llevada a cabo en este trabajo.....	82
<b>Figura 31:</b> Utilidad para la instalación de add-ins ArcGIS de ESRI ....	99
<b>Figura 32:</b> Abrimos ArcGIS y cargamos el mapa base .....	113
<b>Figura 33:</b> Ubicamos en el mapa la zona en la que queremos simular el incendio forestal.....	113
<b>Figura 34:</b> Ubicamos sobre el mapa los posibles focos del incendio	114
<b>Figura 35:</b> Ubicamos sobre el mapa los posibles cortafuegos .....	115
<b>Figura 36:</b> Lanzamos la simulación .....	115





# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una breve introducción de este proyecto fin de master, indicando el origen del mismo, los objetivos a cumplir y la metodología a seguir; así como se presenta brevemente la estructura de este documento.

## 1.1. ORIGEN

El presente trabajo se ha desarrollado dentro del contexto del trabajo desarrollado en el grupo de *Simulación Numérica y Cálculo Científico* (SINUMCC), dirigido por el catedrático *Luis Ferragut Canals*, de la Universidad de Salamanca, al cual pertenezco.

Para la elección del tema de estudio de este proyecto, se hizo una revisión de las líneas de investigación futuras relacionadas con la actividad del grupo y pendientes de continuidad.

También se hizo un repaso de los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de las diversas materias que constituyen este máster, buscando una aplicación directa de los mismos en el trabajo desarrollado por el grupo.

De esta forma surgen los dos subproyectos que podemos encontrar en este trabajo:

1. En un área similar a la estudiada dentro de la asignatura *Sensores Híbridos*, el grupo de trabajo ha probado con éxito el uso de técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo

del *filtro de Kalman* para la incorporación de datos experimentales en la simulación de incendios forestales con el objetivo de corregir las predicciones obtenidas por los diferentes modelos, obteniendo así una predicción final más realista (Ferragut, et al., 2013; Cascón, et al., 2011).

A raíz de estos trabajos, se había planteado el uso de las técnicas de asimilación de datos para la identificación de parámetros, pero no se había llegado a validar el uso de estas técnicas con esta finalidad. De este modo surge el primer área de estudio de este proyecto: el uso de la asimilación de datos para el ajuste de parámetros en un modelo de propagación de incendios unidimensional.

2. Dentro del grupo de trabajo SINUMCC también se han desarrollado varios modelos físicos de diferentes fenómenos medioambientales: modelos de viento de alta definición, modelos de propagación de incendios forestales y modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera.

En el momento de partida de este proyecto, la principal barrera para que estos modelos puedan ser utilizados por sus potenciales usuarios en escenarios reales es la carencia de una interfaz de usuario que automatice la adquisición de datos y que haga posible su uso de forma rápida, sencilla e intuitiva, sin ser necesario ningún tipo de conocimiento previo del modelo.

Así, en línea con los conocimientos adquiridos durante el estudio de las asignaturas *Herramientas Informáticas para el Geoprocesado y Gestión de la Información Espacial*, surge el segundo área de estudio de este proyecto: estudiar los recursos de información geográfica disponibles en Internet y realizar los desarrollos necesarios para que estos recursos puedan ser integrados en los modelos desarrollados por el grupo SINUMCC. A su vez, se llevará a cabo el desarrollo de una interfaz visual que nos permitirá extraer de forma automática los datos necesarios desde las diferentes cartografías disponibles vía Internet y que nos permitirá visualizar los resultados de la simulación de un incendio forestal sobre un mapa base fácilmente entendible por el usuario.

## 1.2. OBJETIVOS

Tal y como se ha expuesto en la sección anterior, en este proyecto se distinguen dos líneas de trabajo, cada una de ellas con sus propios objetivos aunque con la finalidad común de proporcionar nuevas herramientas dentro del contexto de la simulación numérica dirigida a la prevención y control de incendios forestales. A continuación se enumeran los objetivos buscados en cada uno de los subproyectos:

1. Identificación de parámetros utilizando técnicas de asimilación de datos basadas en el filtro de Kalman:
  - a. Investigación y valoración sobre la incorporación de técnicas de asimilación de datos basadas en el filtro de Kalman en procesos de calibración, como puede ser el ajuste de parámetros de un modelo.
2. Integración en GIS de un modelo de propagación de incendios forestales:
  - a. Estudiar los diferentes recursos de información geográfica disponibles en Internet.
  - b. Reunir y adaptar estos recursos para su utilización en un modelo de propagación de incendios forestales, prestando especial atención a la incorporación de construcciones y elementos que pueden hacer función de cortafuegos, e incluir estos en el modelo.
  - c. Generar una extensión para un GIS que permita un uso rápido, sencillo e intuitivo por parte de los usuarios, y que permita visualizar los resultados de la simulación.

## 1.3. METODOLOGÍA A SEGUIR

De igual forma que se ha hecho en el punto referente a los objetivos, en este punto también se distingue la metodología a seguir en cada uno de los subproyectos.

1. Identificación de parámetros utilizando técnicas de asimilación de datos basadas en el filtro de Kalman:
  - a. Estudio de referencias bibliográficas acerca de la asimilación de datos, especialmente en el caso en que esta esté orientada al ajuste de parámetros.
  - b. Estudio de la posibilidad de utilizar estas técnicas en un modelo de propagación de incendios unidimensional simplificado.
  - c. Implementación en el lenguaje de programación C++ del proceso de identificación de parámetros.
  - d. Validación de los resultados obtenidos.
2. Integración en GIS de un modelo de propagación de incendios forestales:
  - a. Estudio del modelo a integrar en el GIS.
  - b. Estudio de los diferentes recursos de información geográfica disponibles en Internet.
  - c. Estudio de los diferentes GIS existentes y elección del GIS en el cual integraremos el simulador de incendios.
  - d. Estudio de la estructura del GIS elegido.
  - e. Adaptación de los recursos de información geográfica según los datos necesarios en el modelo de simulación de incendios.
  - f. Desarrollo de una interfaz visual.
  - g. Pruebas, depuración y validación del trabajo realizado.

## 1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se organiza en capítulos, de los cuales el primero de todos presenta el origen y la motivación del proyecto, los problemas que se pretenden resolver, los objetivos del proyecto y la metodología a seguir para su consecución.

En el segundo capítulo se lleva a cabo una breve descripción de los modelos de simulación de incendios utilizados en el desarrollo de este proyecto. No se profundiza en ellos puesto que no es el objetivo.

Es importante destacar que tanto el proceso de asimilación de datos como la integración en GIS realizada es prácticamente independiente del modelo seleccionado. En este sentido la extensión a otro tipo de modelos es prácticamente directa.

En el tercer capítulo se hace un repaso de las técnicas de incorporación de datos experimentales en los modelos matemáticos mediante el uso del filtro de Kalman. Se hace una pequeña revisión sobre el filtro de Kalman y sus variantes, seguida de un estudio sobre la incorporación de datos experimentales para obtener una predicción más precisa, y por último se profundiza en el uso de la asimilación de datos en el ajuste de parámetros.

En el cuarto capítulo se presenta el proceso seguido para integrar en el GIS elegido el modelo de propagación de incendios: selección de las fuentes de información, elección de GIS, implementación, etc.

En el quinto y último capítulo, se recogen todas las conclusiones alcanzadas al finalizar el proyecto así como las posibles líneas de investigación futuras para la continuidad del mismo.

Para finalizar, vienen los apéndices, que contienen una explicación sobre la estructura del código desarrollado para las pruebas realizadas en los capítulos 3 y 4, y que se adjunta en el DVD; y la bibliografía utilizada en la realización de este proyecto.



# **CAPÍTULO 2:**

## **MODELOS DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES**

### **2.1. ANTECEDENTES**

Los incendios forestales son uno de los problemas medioambientales, sociales y económicos más significativos que amenazan a las superficies de nuestros bosques.

Según el informe anual de la EFFIS - *European Forest Fire Information System* - (European Forest Fire Information System, 2012) los incendios suponen una amenaza actual y futura para nuestros bosques. En Europa, los países situados en la Cuenca Mediterránea son los que registran el mayor número de incendios. España es, después de Portugal, el segundo país europeo con mayor superficie afectada por incendios forestales.

Según fuentes del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013), en el período comprendido entre 2002 y 2012 se han producido en España un total de 65.145 incendios (entendiendo como incendio únicamente cuando la superficie quemada es superior a 1 ha) afectando en conjunto cada año, de media, una superficie de 114.734,10 ha, lo que supone el 0,415% de la superficie nacional.

Los incendios forestales suponen el principal riesgo de cara a la conservación de los bosques y, según los expertos, se cree que la amenaza de grandes daños por incendios en vidas humanas, propiedades privadas y recursos naturales es creciente. También se advierte sobre un cambio en la distribución temporal y espacial de los mismos existiendo varias razones para ello, entre ellas cambios en los patrones de la actividad humana, condiciones climáticas favorables,

incursión humana en zonas forestales, reducción de presupuesto para la lucha contra incendios, etc.

Por todo ello se puede afirmar que existe un interés social, medioambiental y económico por minimizar el riesgo ante incendios forestales y mitigar los daños derivados de los mismos.

En este sentido, la simulación de incendios forestales tiene una aplicación directa tanto en las labores de prevención como en las de extinción, alcanzando el objetivo de disminuir los riesgos derivados del fuego:

1. Labores de prevención: Por un lado, mediante el uso de mapas de modelos de combustible, los modelos de propagación de incendios forestales proporcionan información acerca de posibles áreas peligrosas y permiten crear mapas de riesgo. Por otra parte, estos modelos también son de utilidad en el diseño a priori de barreras cortafuegos o de políticas de repoblación forestal.
2. Labores de extinción: Una primera aproximación de la evolución del frente de fuego en un incendio puede ayudar a los equipos de extinción de incendios a optimizar sus actividades y a evitar situaciones de riesgo que pueden poner en peligro vidas humanas.

Un incendio forestal es una enrevesada combinación de energía (en forma de calor) liberada debido a reacciones químicas (combustión) y el transporte de dicha energía hacía el combustible no quemado hasta el punto de su consiguiente ignición. Esta suma de procesos hace del modelado de incendios forestales un problema muy complejo.

En la actualidad existen diversos modelos de diferente naturaleza dedicados a la simulación de incendios forestales. A continuación se mencionan los principales tipos siguiendo un creciente grado de complejidad:

1. Modelos de propagación de fuego basados en la *teoría de autómatas celulares* (Beer, 1990). Este tipo de modelos describe la evolución del fuego mediante leyes estadísticas universales, pero, lamentablemente, las probabilidades de transición no están relacionadas a priori con ningún parámetro físico medible tales como la humedad, la capacidad calorífica del combustible, etc.
2. Modelos geométricos, en los que la propagación del frente de fuego se calcula utilizando el *Principio de Huygens* según el cual todo punto del frente se considera un nuevo foco emisor



puntual, obteniéndose la nueva posición del frente calculando la envolvente de los frentes de fuego producidos individualmente por cada uno de los focos puntuales (Richards, 1990). Estos modelos son muy rápidos, pero los parámetros geométricos son difíciles de relacionar con los parámetros físicos.

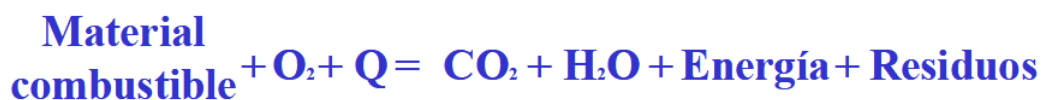
3. *Modelos empíricos o semifísicos*, en los que se considera un balance de energía en el frente de fuego aunque la velocidad de avance se obtiene mediante leyes empíricas (Rothermel, 1972). La velocidad del frente se supone que es una función escalar de parámetros locales: masa de combustible, humedad, pendiente, viento, etc. Al igual que el modelo anterior, se basa en el concepto de propagación en la dirección normal al frente.
4. *Modelos de reacción-difusión-convección o cuasifísicos*, basados en la física del problema y que se deducen a partir de las leyes de conservación de la masa, la energía y el momento (Séro-Guillaume & Margerit, 2002; Ferragut, Asensio et al., 2002, 2005, 2007a, 2007b). En estos modelos se considera un sistema de ecuaciones en derivadas parciales correspondientes a los procesos físicos que intervienen. La salida de estos modelos proporciona, además de la posición del frente, el valor de variables físicas tales como la temperatura del combustible sólido o del combustible gaseoso y que puede ser contrastado mediante experimentos. La principal limitación de estos modelos es el elevado tiempo de simulación requerido para su ejecución, siendo necesario en su implementación el empleo de técnicas de *High Performance Computing* para que el tiempo empleado en la simulación sea inferior al tiempo real simulado.
5. *Modelos físicos o teóricos*, en los que se representan tanto el problema físico como el problema químico de la propagación del fuego (Sullivan, 2009).

Durante los últimos años el equipo de investigación en el cual se ha elaborado este proyecto ha desarrollado modelos de propagación de incendios forestales de tipo cuasifísico (Ferragut, Asensio et al., 2002, 2005, 2007a, 2007b). Se trata de modelos simplificados que tienen como objetivo la simulación de la propagación del fuego en pequeños ordenadores empleando tiempos de cálculo notablemente inferiores al tiempo real, pero teniendo en cuenta a su vez los mecanismos de propagación del fuego más importantes tales como la radiación no local o la humedad.

## 2.2. CONCEPTOS GENERALES

### 2.2.1. Conceptos generales sobre el fuego forestal

**Fuego:** Es el resultado de un proceso químico de oxidación llamado combustión donde a un material combustible se le aplica calor en presencia de oxígeno ( $O_2$ ) obteniendo energía, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ) y unos residuos sólidos o cenizas.



**Figura 1:** Definición de fuego [5]

Para que se produzca un incendio forestal es imprescindible que haya tres factores básicos: combustible, comburente (oxígeno) y calor. Para que se inicie la reacción es necesario un punto de ignición que genere un exceso de calor que haga las veces de iniciador de la reacción.

**Combustión:** Este proceso químico no es un proceso instantáneo, sino que necesita de una serie de pasos más o menos rápidos en función de las condiciones atmosféricas:

1. *Calentamiento previo:* Si a un combustible forestal le suministramos calor, desde la temperatura ambiental hasta los  $100^\circ C$ , primero va perdiendo contenido de humedad y luego se va calentando. De momento el combustible sigue sin arder.
2. *Pirólisis o rotura a partir del calor:* Si seguimos suministrando calor al combustible, a partir de los  $200^\circ C$  también se evaporan las resinas acumuladas en el interior del mismo. Estos gases pueden entrar en ignición a temperaturas no muy elevadas.
3. *Ignición:* Si continuamos aportando más calor, a partir de los  $300-400^\circ C$  los gases generados pueden llegar a auto inflamarse siendo este momento el *punto de ignición* donde el combustible ya se encuentra inflamado. A partir de ahora, todo el calor que genere el fuego se reinvierte en mantener la reacción y en

generar más calor que provocará un aumento de temperatura de los combustibles colindantes.

**Inflamabilidad:** La inflamabilidad es la propiedad de un combustible que indica si este puede arder o encenderse con facilidad. Esta propiedad tiene cuatro características (ignitabilidad, sostenibilidad, combustibilidad y consumibilidad) que en general dependen del contenido en volátiles, tamaño, contenido de humedad, densidad, continuidad, compactación y cantidad de combustible. Estos son los parámetros básicos de los combustibles forestales en el modelo de comportamiento del fuego de Rothermel (Rothermel, 1972).

Algunas de las variables que influyen en la inflamabilidad de un combustible forestal son:

1. Cuanto menos y menor relación peso-volumen tenga el combustible, mayor será su inflamabilidad.
2. El contenido de humedad tanto en combustibles vivos como muertos.
3. La composición química, de la que depende la riqueza en gases inflamables.
4. La continuidad, la compactación y la disposición de los combustibles también tienen un papel en la inflamabilidad.

Las cuatro características que influyen en la inflamabilidad son:

1. *Ignitabilidad:* es la capacidad del combustible para iniciar el proceso de combustión. La ignición de un material se da cuando la superficie se calienta hasta una cierta temperatura.

Anderson (Anderson, 1970) define ignitabilidad como el tiempo necesario (s) para la ignición dividido por la intensidad de energía por unidad de área ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) suministrada.

$$\text{Ignitabilidad} = \frac{\text{tiempo necesario para ignición (s)}}{\text{intensidad de energía por unidad de área (kW/m}^2\text{)}}$$

2. *Sostenibilidad:* es la capacidad del combustible para mantener el fuego. En los incendios forestales puede ser descrita en términos de si una partícula de combustible pasa o no el fuego a la siguiente, es decir, es la capacidad de mantener la propagación del incendio. Las partículas pequeñas son, en general, capaces de mantener la combustión por sí mismas mientras que en las partículas grandes la sostenibilidad se hace más dependiente de la compactación de esos combustibles. Así, las leñas de una hoguera necesitan el refuerzo de radiación de unas a otras. Si

separamos las leñas, el fuego se apaga en cada una de ellas al poco tiempo.

3. *Combustibilidad*: es la velocidad a la que se queman los combustibles. Está relacionada con la velocidad lineal a la que se propaga el fuego, o bien con la intensidad de liberación de calor. En un incendio forestal la combustibilidad será proporcional a la velocidad de propagación e inversamente proporcional al tiempo requerido para cada ignición sucesiva.
4. *Consumibilidad*: es la cantidad o porcentaje de combustible que se quema. El combustible puede inflamarse, sostener su combustión y pasar el fuego a otros combustibles, pero también puede consumirse en mayor o menor medida. Por ejemplo, los combustibles gruesos suelen sufrir una combustión superficial mientras que las partículas finas se consumen casi completamente.

## 2.2.2. Tipos de incendios

Existen diferentes clasificaciones para definir los diferentes tipos de incendios. A continuación se enumeran algunas de estas posibles clasificaciones y los tipos existentes dentro de cada una de ellas.

Según el medio en el que se propaga el fuego:

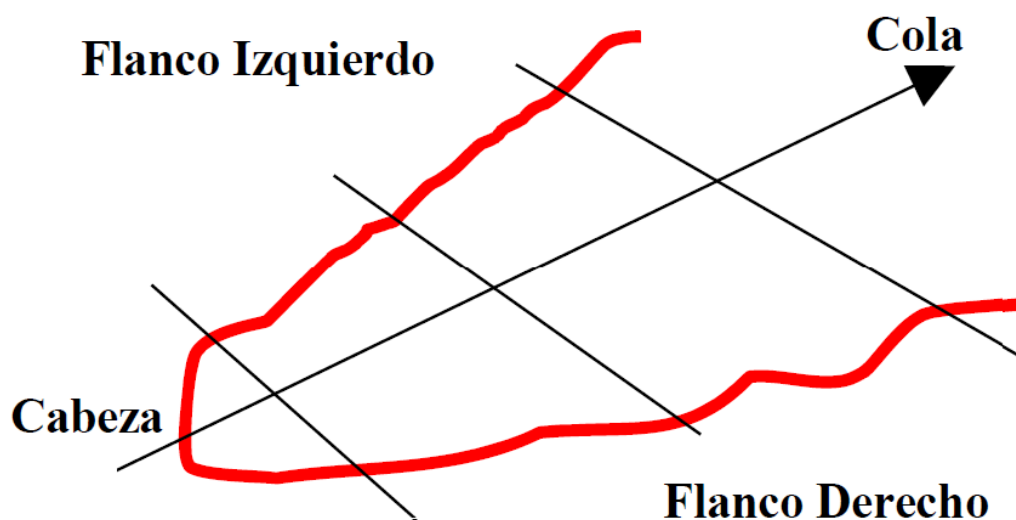
1. *Suelo*: el incendio se propaga por la materia orgánica en descomposición y las raíces. Casi siempre se queman despacio y en combustión incandescente (poca o ausencia de llama) al no disponer de suficiente oxígeno. Sólo se detecta por el calor residual que hay en el suelo orgánico y para detenerlo es necesario que se realice una discontinuidad como una línea de defensa hasta el suelo mineral. En según que zonas, este manto orgánico puede llegar a tener metros de espesor (turberas).
2. *Superficie*: el incendio se propaga por el combustible que encontramos sobre el suelo: hojarasca sin descomponer, hierbas, arbustos y leños.
3. *De Copas*:
  - a. *Antorcheo*: paso de fuego de superficie a fuego de copas pero sólo de forma puntual.
  - b. *Copas Pasivo*: el fuego avanza por las coronas de los árboles acoplado a un fuego de superficie y no

independiente de él. Su propagación principal es por la superficie por lo que si eliminamos éste, detenemos el incendio.

- c. *Copas Activo*: el fuego avanza por las coronas de los árboles independientemente de lo que ocurre en la superficie.

Según el factor que rige el incendio:

1. *Combustible*: influirá si éste está vivo o muerto (más seco); si es subterráneo, superficial o aéreo; la cantidad, el grosor, su continuidad vertical y horizontal, su densidad y compactación, su contenido en resinas y en humedad. Estos puntos influirán determinando la intensidad y velocidad de propagación del incendio. Hay que buscar la oportunidad de extinción en un cambio del modelo de combustible a uno favorable o en una modificación en la estructura.
2. *Topográfico*: influirá tanto la pendiente como la exposición al sol y la rugosidad. Son incendios que tienden a quemar ollas enteras y vaguadas con lo que cabe esperar que el incendio tenga igual comportamiento tanto de cabeza como de flancos. Hay que buscar la oportunidad de extinción donde el factor topográfico esté de nuestro lado, es decir, cuando el fuego avance en contra de la topografía.



**Figura 2:** Partes de un incendio [5]

3. *Viento*: influirá la dirección de donde proviene y su módulo de intensidad-velocidad, aportando oxígeno y desecando el combustible. Son incendios que tienden a buscar crestas divisorias y puntos altos, debiendo buscar la oportunidad de extinción en una zona donde el viento no le rija y se convierta en uno topográfico o de combustible.

4. *Hambriento*: se trata de un Gran Incendio Forestal que ha creado sus propias condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa ambiental y velocidad de viento), haciendo sólo factible un ataque indirecto.

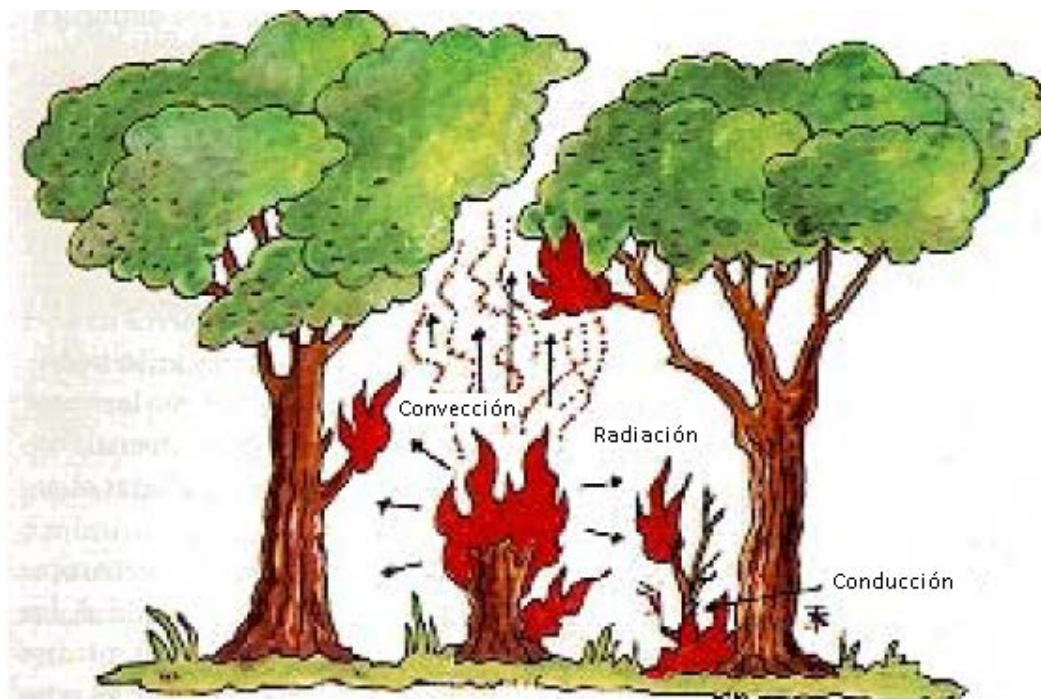
### 2.2.3. Propagación del fuego

De forma simplificada, las formas básicas de propagación del fuego en un incendio forestal se pueden clasificar según el medio utilizado para su propagación:

1. *Radiación*: la transferencia de energía calórica se realiza a través del espacio sin contacto directo entre los elementos. No es necesario el contacto físico.
2. *Conducción*: la transferencia del calor se realiza por contacto directo entre objetos. En el caso de los combustibles forestales no es muy importante debido a que son malos conductores térmicos y a la discontinuidad de los mismos.
3. *Convección*: la transmisión del calor se realiza a través de masas de fluidos como por ejemplo el aire. Es la forma de transmisión más peligrosa al ser una de las formas de propagación de incendios a gran distancia debido a que se generan volátiles incandescentes llamados pavesazos.



**Figura 3:** Formas básicas de propagación del fuego [5]



**Figura 4:** Formas básicas de propagación del fuego [5]

## 2.2.4. Comportamiento del fuego

En este punto se analizan los diferentes factores que condicionan el comportamiento de un incendio forestal. Para cada uno de los factores se expondrán tres subgrupos teniendo uno de ellos más importancia que el resto.

### 1. Meteorología:

- a. Temperatura
- b. Humedad Relativa
- c. Viento: Factor más importante dentro de los factores relacionados con la meteorología.

### 2. Topografía:

- a. Orientación (exposición al sol)
- b. Rugosidad
- c. Pendiente: Factor de mayor importancia dentro de los factores relacionados con la topografía.

3. *Combustible:*

- a. Tipología de combustibles
- b. Humedad del combustible-Tiempo de retardo
- c. Cantidad-Carga: Factor más importante dentro de los factores relacionados con los combustibles.

4. *Ambiente de Fuego:* Este factor se tiene en cuenta en los Grandes Incendios Forestales que generan sus propias condiciones atmosféricas de temperatura, humedad relativa ambiental y velocidad de viento.

## 2.3. MODELO UNIDIMENSIONAL

En este apartado se presenta el modelo simplificado de propagación de fuego utilizado para validar el proceso de asimilación de datos enfocado a un proceso de calibración como puede ser la identificación de parámetros.

Se trata de un modelo simplificado que se ha utilizado como prototipo con el objetivo de experimentar y familiarizarse con el comportamiento del ajuste de parámetros mediante asimilación de datos.

### 2.3.1. El problema

Antes de presentar el modelo, se define el significado de cada uno de los términos que serán utilizados en él (Mandel, et al., 2008):

1.  $T$  representa la temperatura del combustible sólido (K).
2.  $S$  representa la fracción másica del combustible sólido.  $S \in [0,1]$ .
3.  $k$  representa la difusividad térmica ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ). El valor propuesto para este término es  $k = 2,136 \times 10^{-1} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .



4.  $A$  representa el incremento de temperatura por segundo en el momento de máxima combustión ( $\text{K s}^{-1}$ ). El valor propuesto para este término es  $A = 1,8793 \times 10^2 \text{K s}^{-1}$ .
5.  $B$  representa el coeficiente de proporcionalidad en la *ley de Arrhenius* modificada (K). El valor propuesto para este término es  $B = 5,5849 \times 10^2 \text{K}$ .
6.  $C$  representa el coeficiente de transferencia de calor al entorno ( $\text{K}^{-1}$ ). El valor propuesto para este término es  $C = 4,8372 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ .
7.  $C_s$  representa la pérdida de combustible sólido debido a la combustión ( $\text{s}^{-1}$ ). El valor propuesto para este término es  $C_s = 1,6250 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ .
8.  $T_a$  representa la temperatura ambiente (K).
9.  $v$  representa la velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ). Este dato se puede proporcionar bien desde una fuente de datos meteorológicos o bien desde el respectivo modelo.

Las ecuaciones que gobiernan este modelo se derivan del principio de conservación de la energía y del balance del combustible. Las ecuaciones dimensionales de este modelo son (Mandel, et al., 2008):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) - v \frac{dT}{dx} + A \left( S e^{-B/T - T_a} - C(T - T_a) \right) \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -C_s S e^{-B/T - T_a}, T > T_a \quad (2)$$

El problema se completa con las condiciones iniciales:

$$S(t_{init}) = 1 \text{ y } T(t_{init}) = T_{init} \quad (3)$$

En la ecuación (1), el término  $\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right)$  representa la energía transferida mediante radiación. El término  $v \frac{dT}{dx}$  representa la energía transportada por convección debida al viento.  $S e^{-B/T - T_a}$  representa la pérdida de combustible sólido debido a la combustión. Y por último,  $AC(T - T_a)$  representa la energía transportada por convección natural en la dirección vertical.

El término  $e^{-B/T-T_a}$  se obtiene mediante la modificación de la ley de Arrhenius ( $e^{-B/T}$ ) mediante la adicción de un *offset* con la finalidad de forzar a cero la reacción a temperatura ambiente.

La determinación de los coeficientes físicos  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $C_s$  y  $k$  es una ardua tarea. En general se requieren procesos de ajustes combinados con la toma de información insitu. En este trabajo propondremos una estrategia para la estimación de estos parámetros basada en el *Filtro de Kalman*.

En lo siguiente, se eliminará el término correspondiente a la convección debida al viento, ya que por simplicidad en las pruebas llevadas a cabo con la asimilación de datos no se ha tenido en cuenta este.

Con la finalidad de analizar el comportamiento cualitativo del modelo, se llevará a cabo los siguientes cambios de variable para adimensionalizar el modelo:

$$\tilde{T} = \frac{T - T_a}{B}, \quad \tilde{x} = \frac{x}{k^{1/2} B^{1/2} A^{-1/2}} \quad \text{y} \quad \tilde{t} = \frac{tA}{B} \quad (4)$$

Dando como resultado:

$$\frac{d\tilde{T}}{d\tilde{t}} = \frac{d}{d\tilde{x}} \left( \frac{d}{d\tilde{x}} \tilde{T} \right) + \tilde{S} e^{-1/\tilde{T}} - \lambda \tilde{T} \quad (5)$$

$$\frac{d\tilde{S}}{d\tilde{t}} = -\beta \tilde{S} e^{-1/\tilde{T}} \quad (6)$$

Y donde ya se tiene un modelo dependiente de dos coeficientes adimensionales:

$$\lambda = CB \quad \text{y} \quad \beta = \frac{BC_s}{A} \quad (7)$$

En las ecuaciones (5) y (6) podemos ver como, después de la adimensionalización del modelo, el comportamiento cualitativo de la solución del modelo es determinado únicamente por dos coeficientes adimensionales:  $\lambda$  (término de pérdidas de calor) y  $\beta$  (tasa de combustión), los cuales pueden modificarse de forma independiente. Los valores propuestos en (Mandel, et al., 2008) para estos dos parámetros son  $\lambda = 0,027$  y  $\beta = 0,4829$ .

En (Mandel, et al., 2008) se propone una estrategia para determinar el valor de los coeficientes físicos  $A$ ,  $B$  y  $C$  a partir de los coeficientes adimensionales  $\lambda$  y  $\beta$ , y mediciones tomadas experimentalmente.

En este trabajo abordaremos únicamente la determinación de los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ , es decir, trabajaremos únicamente con el modelo adimensional.

En el punto 3.6. *Ejemplo de identificación de parámetros mediante asimilación de datos* se supondrá que estos dos parámetros siguen una distribución de probabilidad normal en un primer experimento y una distribución uniforme en una segunda etapa. El objetivo final es estimar el valor de estos dos parámetros en base a medidas experimentales.

## 2.4. MODELO BIDIMENSIONAL

En este apartado se presenta el modelo de propagación de incendios forestales desarrollado por el grupo SINUMCC y que será el modelo a integrar dentro del sistema de información geográfica durante el desarrollo de este proyecto.

Se trata de un modelo de tipo cuasifísico que tiene en cuenta los tres medios para la propagación del fuego descritos en la sección 2.2.3. *Propagación del fuego*: radiación, conducción y convección. En el caso de los incendios forestales los medios de propagación con mayor influencia son la radiación y la convección, siendo posible desprestigiar la conducción debido a la continuidad discreta de los combustibles y a su mala conducción térmica.

En condiciones de ausencia de viento, el medio de propagación que predomina es la convección, mientras que cuando existe viento el medio predominante es la radiación. No obstante, no tiene sentido modelar uno de ellos sin tener en cuenta el otro, y ambos procesos deben ser modelados de forma simultánea.

El modelo de propagación de incendios a utilizar es un modelo bidimensional simplificado que considera algunos efectos tridimensionales. En concreto, el modelo tiene en cuenta (Ferragut, et al., 2013):

1. La humedad contenida en el combustible.
2. La energía transportada por convección en el gas pirolizado.

3. La energía transportada por convección natural en la dirección vertical.
4. La radiación de las llamas sobre la superficie en la cual se propaga el fuego.

Se podrían tener en cuenta mayor número de efectos, pero ello influiría negativamente en el tiempo de ejecución, llegando al punto de requerir más tiempo para llevar a cabo la ejecución de una simulación que el tiempo real simulado. De esta forma, la consideración de un mayor número de procesos sería inútil y, por tanto, solo se tienen en cuenta los principales procesos de propagación del fuego con el objetivo de obtener un tiempo de simulación razonable.

En cuanto al comportamiento del fuego, el modelo tiene en cuenta los tres principales factores vistos en el punto 2.2.4. *Comportamiento del fuego*: viento, pendiente y cantidad-carga de combustible. A mayores, también consideran los siguientes factores: temperatura, tipología y humedad de combustible.

El viento es el factor más importante a la hora de determinar el tipo de incendio (Blanco, et al., 2007). En este modelo, las condiciones de viento se pueden incorporar bien desde fuentes de datos meteorológicos y considerandos constantes en todo el dominio, o bien calculadas mediante el empleo de un modelo de viento de alta definición (Ferragut, et al., 2009) también desarrollado dentro del grupo de trabajo SINUMCC. Para el cálculo de este campo de viento local de alta definición será necesario proporcionar la dirección y la velocidad del viento en al menos un punto dentro del dominio de simulación.

### 2.4.1. El problema

Consideremos el rectángulo  $d = [0, l_x] \times [0, l_y] \in \mathbb{R}^2$  resultado de proyectar la superficie en la que tiene lugar el fuego. Esta superficie  $S$  está definida por:

$$S: d \rightarrow \mathbb{R}^3$$
$$(x, y) \rightarrow (x, y, h(x, y))$$

Con la finalidad de tener en cuenta los efectos tridimensionales y considerando que la altura de la llama  $F$  está acotada por  $\delta$ , consideraremos también el siguiente dominio tridimensional:

$$D = \{(x, y, z) : x, y \in d, h(x, y) < z < h(x, y) + \delta\}$$

Antes de presentar el modelo, se define el significado de cada una de las variables que serán utilizadas en él. Comenzaremos por las variables dimensionales y seguiremos con las variables adimensionales.

Variables dimensionales:

1.  $T$  representa la temperatura del combustible sólido (K).
2.  $T_\infty$  representa la temperatura de referencia o temperatura ambiente (K).
3.  $E$  representa la entalpía ( $\text{J m}^{-2}$ ).
4.  $M$  representa la vegetación mediante la carga de combustible ( $\text{kg m}^{-2}$ ).
5.  $M_0$  representa la carga inicial de combustible ( $\text{kg m}^{-2}$ ).
6.  $M_v$  representa el contenido de humedad del combustible (kg de agua / kg de combustible seco).
7.  $C$  representa la capacidad calorífica del combustible sólido ( $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ).
8.  $H$  representa el coeficiente de convección natural ( $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ).
9.  $I$  representa la intensidad de radiación ( $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).
10.  $a$  representa el coeficiente medio de absorción (1/m).
11.  $\Lambda_v$  representa la evaporación del calor latente ( $\text{J kg}^{-1}$ ).
12.  $F$  representa la altura de la llama (m).
13.  $[l]$  representa la escala espacial (m).
14.  $[t]$  representa la escala temporal (s).

Variables adimensionales:

1.  $u$  representa la temperatura adimensional del combustible sólido ( $u = \frac{T - T_\infty}{T_\infty}$ ).
2.  $u_g$  representa la temperatura adimensional de la llama ( $u_g = \frac{T_g - T_\infty}{T_\infty}$ ).

3.  $e$  representa la entalpía adimensional ( $e = \frac{E}{MCT_{\infty}}$ ).
4.  $y$  representa la fracción másica del combustible sólido ( $y = \frac{M}{M_0}$ ).
5.  $\alpha$  representa el coeficiente de convección natural adimensional ( $\alpha = \frac{H[t]}{MC}$ ).
6.  $i$  representa la intensidad de radiación adimensional ( $i = \frac{I[t]}{MCT_{\infty}}$ ).
7.  $\varepsilon$  representa el coeficiente de radiación adimensional ( $\varepsilon = \frac{[l][t]a\sigma[T]^3}{MC\pi}$ ).  $\sigma$  representa la *constante de Stefan-Boltzmann*.  $\sigma = 5,6699 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$
8.  $\lambda_v$  representa la evaporación del calor latente adimensional  $\lambda_v = \frac{M_v \Lambda_v}{CT_{\infty}}$ .
9.  $u_v$  representa la temperatura de evaporación del agua.
10.  $u_p$  representa la temperatura de pirólisis del combustible sólido.
11.  $\gamma$  representa el coeficiente de variación de la masa del combustible debido a la pirólisis.
12.  $v$  representa la velocidad del viento adimensional.
13.  $\beta$  representa el factor de corrección  $\beta \propto \frac{(MCT)_{flame}}{(MCT)_{solidFuel}}$ .

Las ecuaciones que gobiernan este modelo de propagación de incendios están basadas en las ecuaciones de conservación de la energía y de la masa en la superficie  $S$ , y en la ecuación de radiación en el volumen  $D$ . Las ecuaciones adimensionales simplificadas de este modelo son (Ferragut Canals, et al., 2013):

$$\partial_{\tau} e + \beta v \cdot \nabla e + \alpha u = r \quad \text{in } S \quad \tau \in (0, \tau_{max}), \quad (1)$$

$$e \in G(u) \quad \text{in } S \quad \tau \in (0, \tau_{max}), \quad (2)$$

$$\partial_{\tau} y = -g(u)y \quad \text{in } S \quad \tau \in (0, \tau_{max}). \quad (3)$$

El problema se completa con las *condiciones de contorno homogéneas de Dirichlet* y las siguientes condiciones iniciales:

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y) \quad \text{in } S, \quad (4)$$

$$y(x, y, 0) = y_0(x, y) \quad \text{in } S. \quad (5)$$

En la ecuación (2) aparece el operador  $G(u)$ , que es un operador de entalpía multievaluado dado por:

$$G(u) = \begin{cases} u & \text{if } u < u_v \\ [u_v, u_v + \lambda_v] & \text{if } u = u_v \\ u + \lambda_v & \text{if } u_v < u < u_p \\ [u_p + \lambda_v, \infty] & \text{if } u = u_p \end{cases}$$

En la ecuación (1), el término  $\beta v \cdot \nabla e$  representa la energía transportada por convección en el gas pirolizado. El término  $au$  representa la energía transportada por convección natural en la dirección vertical. El segundo miembro de esta ecuación describe la radiación térmica que incide sobre la superficie  $S$  procedente de las llamas.

A partir de las siguientes ecuaciones de radiación (Ferragut, et al., 2013), puede calcularse la intensidad de radiación en la dirección  $\Omega$ .

$$\Omega \cdot \nabla i + a^* i = \epsilon(1 + u_g)^4 \quad \text{in } D, \quad (6)$$

$$i = 0 \quad \text{on } \partial D \cap \{\mathbf{x}; \Omega \cdot \mathbf{N} < 0\}, \quad (7)$$

La energía o radiación térmica incidente sobre la superficie  $S$  por unidad de tiempo y superficie debida a la radiación de la llama puede obtenerse sumando la radiación procedente de todas las direcciones según la siguiente fórmula:

$$r(\mathbf{x}) = \int_{\omega=0}^{2\pi} i(\mathbf{x}, \Omega) \Omega \cdot \mathbf{N} \, d\omega \quad (8)$$

Donde únicamente se ha considerado el hemisferio ubicado sobre la capa de combustible.  $\mathbf{N}$  representa el vector normal a la superficie.

El segundo miembro de la ecuación (3) representa la pérdida de combustible sólido debido a la combustión. De esta forma, cuando  $u < u_p; g(u) = 0$ , y cuando  $u = u_p; g(u) = cte$ . Esta constante será proporcional al tiempo de vida medio de la combustión en cada tipo de combustible.





# **CAPÍTULO 3:**

## **ASIMILACIÓN DE DATOS E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN PROCESOS DE CALIBRACIÓN**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se abordan todas las cuestiones planteadas en este proyecto relativas a la asimilación de datos en procesos de calibración.

Al comienzo de este proyecto, el grupo de trabajo SINUMCC había probado con éxito el uso de técnicas de asimilación de datos basadas en el empleo del filtro de Kalman para la incorporación de datos experimentales en la simulación de incendios forestales con el objetivo de corregir las predicciones obtenidas por los diferentes modelos, obteniendo así una predicción final más realista (Ferragut, et al., 2013; Cascón, et al., 2011).

A raíz de estos trabajos, se había planteado el uso de estas técnicas de asimilación de datos para la identificación de parámetros en un modelo de propagación de incendios forestales, pero no se había llegado a validar su uso con esta finalidad.

De este modo surge el trabajo que se desarrolla a lo largo de este capítulo: el uso de la asimilación de datos en procesos de calibración. Concretamente se abordara este problema para realizar el ajuste de parámetros de un modelo de propagación de incendios unidimensional.

### 3.1.1. Objetivos

Los objetivos buscados en el trabajo desarrollado a lo largo de este capítulo son:

1. Repaso del filtro de Kalman para problemas lineales.
2. Estudio del filtro de Kalman para problemas no lineales.
3. Estudio de las técnicas de asimilación de datos basadas en el filtro de Kalman.
4. Investigación y valoración sobre la incorporación de técnicas de asimilación de datos en procesos de calibración, como puede ser el ajuste de parámetros.
5. Aplicación del proceso de identificación de parámetros basado en asimilación de datos a un modelo de propagación de incendios.

### 3.1.2. Metodología a seguir

La metodología a seguir para cumplir los anteriores objetivos será la siguiente:

1. Repaso del funcionamiento del filtro de Kalman en su versión lineal y estudio de las extensiones de esta herramienta para problemas no lineales.
2. Estudio del uso de asimilación de datos para la incorporación de datos experimentales en un modelo de propagación de incendios forestales con la finalidad de corregir las predicciones obtenidas por el modelo.
3. Estudio de referencias bibliográficas acerca de la asimilación de datos enfocada al ajuste de parámetros de un problema.
4. Estudio de la posibilidad de utilizar estas técnicas en un modelo de propagación de incendios unidimensional.
5. Implementación en el lenguaje de programación C++ del proceso de identificación de parámetros. Se utilizará el entorno de desarrollo *QtCreator*<sup>1</sup> para su desarrollo y el compilador *GNU 4.6* para la compilación del código desarrollado.

---

<sup>1</sup> <http://qt-project.org/wiki/Category:Tools:QtCreator>

6. Validación de los resultados obtenidos.

## 3.2. EL FILTRO DE KALMAN

Existen numerosas aproximaciones para estimar el estado de un proceso a partir de una serie de mediciones, pero la mayoría de ellas no tiene en consideración la naturaleza ruidosa de las medidas y no proporciona información sobre la incertidumbre de la solución.

La incertidumbre de la solución puede obtenerse mediante el uso de un proceso de muestreo estadístico basado por ejemplo en el método de Monte Carlo (Evensen, 2009), pero se seguirá sin tener en cuenta el error en las medidas.

La ausencia de error en las medidas no se corresponde siempre con la realidad, ya que todos los sensores utilizados en la práctica llevan asociado un ruido debido a factores como la tolerancia del mismo o el ruido térmico procedente de los circuitos electrónicos. La consecuencia directa de la presencia de ruido es que la lectura obtenida de cualquier sensor debe tratarse como una estimación con sus características estadísticas asociadas.

A principios de los años 60 Rudolf E. Kalman desarrolló lo que posteriormente pasaría a ser conocido como el *filtro de Kalman* (Welch & Bishop, 2001). Se trata de un procedimiento matemático que permite obtener estimaciones óptimas de un estado combinando la predicción proporcionada por un modelo con los datos experimentales obtenidos a partir de un proceso de medición ruidoso.

El filtro de Kalman es una herramienta matemática muy potente que revolucionó la teoría de control y que en la actualidad está ganando importancia en numerosos campos debido a la incorporación del mundo real en la modelización de problemas. Por ejemplo, el filtro de Kalman está presente en muchas ramas de la ingeniería, meteorología o incluso economía.

En esencia, esta herramienta consiste en un conjunto de ecuaciones que implementan un proceso de predicción-corrección que proporciona una estimación que es óptima en el sentido de que minimiza la varianza del error.

En este punto se aborda la problemática de como combinar la predicción obtenida por un determinado modelo  $x^f \in \mathfrak{R}^n$  a partir de un estado  $x \in \mathfrak{R}^n$  con un conjunto de mediciones disponibles en un determinado instante de tiempo  $d \in \mathfrak{R}^d$  para obtener la mejor estimación posible del estado real  $x^a \in \mathfrak{R}^n$ .

### 3.2.1. Predicción

El modelo utilizado para analizar el problema será:

$$x^f = Ax + w \quad (1)$$

donde  $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  es una matriz que relaciona el estado predicho  $x^f$  con el estado en el instante anterior  $x$  en ausencia de ruido; y  $w \in \mathfrak{R}^n$  es el error asociado al modelo, cuya matriz de covarianza es  $Q \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ .

Por otra parte, tenemos el modelo de medida:

$$d = Hx + v \quad (2)$$

donde  $H \in \mathfrak{R}^{d \times n}$  es una matriz que relaciona la medida  $d$  con el estado medido  $x$ ; y  $v \in \mathfrak{R}^d$  es el ruido presente en la medición, cuya matriz de covarianza es  $R \in \mathfrak{R}^{d \times d}$ .

Para el error del modelo  $w$  y el ruido de medida  $v$  se asumirán las suposiciones estadísticas habituales: independencia, distribución de probabilidad normal, media nula y matrices de varianza-covarianza  $Q$  y  $R$  respectivamente.

### 3.2.2. Corrección

La siguiente ecuación proporciona una estimación óptima en el sentido de que minimiza la varianza del error  $x^a - x$ . Esta estimación se expresa como una combinación lineal del estado predicho  $x^f$  y la sopesada diferencia entre la medición realizada  $d$  y la predicción de la medición  $Hx^f$ :

$$x^a = x^f + K(d - Hx^f) \quad (3)$$

En la anterior ecuación, la diferencia  $(d - Hx^f)$  es el residuo que refleja la discrepancia entre la medición realizada  $d$  y la predicción de la medición  $Hx^f$ .

El problema se encuentra ahora calcular el valor de  $K \in \mathfrak{R}^{n \times d}$  que hace mínima la matriz de covarianza  $P$  del error  $x^a - x$ .

Desarrollando a partir de (3):

$$P = E[(x^a - x)(x^a - x)^t] = \dots = (I - KH)Q(I - KH)^t + KRK^t \quad (4)$$

Buscamos el valor de  $K$  que minimiza la varianza del error  $x^a - x$ , esto es, el valor de  $K$  que hace mínima la traza de  $P$  la cual, teniendo en cuenta que  $Q$  y  $R$  son simétricas, queda:

$$tr(P) = tr(Q) + tr(KHQH^t K^t) - 2tr(QH^t K^t) + tr(KRK^t) \quad (5)$$

Derivando (5) en función de  $K$  e igualando a cero para minimizar la función obtenemos el valor de  $K$  buscado, llamado *ganancia de Kalman*:

$$K = QH^t (HQH^t + R)^{-1} \quad (6)$$

En la ecuación (6) se puede ver como a medida que la varianza  $R$  de las mediciones se aproxima a cero,  $K$  tiene un valor que hace que se dé más peso a la medición realizada  $d$ .

$$\lim_{R \rightarrow 0} K = H^{-1} \quad (7)$$

De igual forma que antes, a medida que la varianza  $Q$  del estado predicho se aproxima a cero,  $K$  tiende a cero de forma que se desprecie el residuo  $(d - Hx^f)$  y se dé más peso a la predicción del modelo.

$$\lim_{Q \rightarrow 0} K = 0 \quad (8)$$

Finalmente, sustituyendo (6) en (4) obtenemos la varianza  $P$  del error  $x^a - x$ :

$$P = (I - KH)Q \quad (9)$$

### 3.3. EL FILTRO DE KALMAN EN PROBLEMAS NO LINEALES

El proceso expuesto en el punto anterior es válido únicamente para su uso en problemas lineales. En problemas no lineales, como el que estudia la propagación del fuego, el anterior planteamiento no es válido.

Existen diversas variantes del filtro del Kalman que amplían su uso a problemas no lineales, entre ellas los denominados *Extended Kalman Filter* (EKF) y *Ensemble Kalman Filter* (EnKF).

#### 3.3.1. Extended Kalman Filter (EKF)

El Extended Kalman Filter (EKF) propone la aproximación del problema por uno lineal seguido de la versión clásica del filtro (Chui & Chen, 2009).

Consideremos un modelo no lineal de la forma:

$$x^f = f(x) + w \tag{10}$$

donde  $f$  es un operador no lineal.

La aproximación EKF pasa por linealizar el problema anterior sustituyendo el operador  $f$  por su aproximación de Taylor de primer orden en el punto  $x$ , y dando lugar al sistema:

$$x^f = Ax + u + w \tag{11}$$

formalmente:

$$A = \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \right] (x) \tag{12}$$

$$u = f(x) - Ax \tag{13}$$

y donde  $u$  representa el error de linealización.

Una vez linealizado el problema, se aplicará la versión lineal del filtro de Kalman estudiado en el punto anterior, utilizando la ecuación (11) como ecuación del proceso.

El comportamiento del EKF puede ser deficiente en modelos con no linealidades fuertes (Chui & Chen, 2009). Además requiere el cálculo de la derivada del operador, lo cual no es sencillo en nuestro caso. Por todo esto, no insistiré más en este algoritmo y lo descartaremos en nuestras aplicaciones.

### 3.3.2. Ensemble Kalman Filter (EnKF)

El Ensemble Kalman Filter (EnKF) combina el filtro de Kalman con un *método de Monte Carlo* (Evensen, 1994) como alternativa al EKF.

Este método aplica el Filtro de Kalman a un conjunto de predicciones las cuales se obtienen mediante la perturbación de la solución inicial.

La distribución de probabilidad del estado se representa por el conjunto de predicciones. La estimación óptima se toma a partir de la media del conjunto y su varianza se reemplaza por la varianza muestral.

El EnKF requiere menos coste computacional que el EKF (en el que el cálculo de los jacobianos puede ser muy costoso) y supera algunas de sus limitaciones. Aun así, para que los resultados del EnKF supongan una buena aproximación, se precisa de la simulación de un gran número de estados. La implementación eficiente este proceso requiere técnicas de computación de altas prestaciones y el uso de grandes equipos informáticos.

El algoritmo del EnKF es el siguiente. Dada una estimación del estado inicial  $x^0$  y la varianza del error de las observaciones  $R$ , se genera un conjunto de  $m$  estados  $X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0]$  perturbando el estado inicial  $x^0$ .

A partir de las respectivas ecuaciones de proceso y de medida, se aplicará el operador no lineal  $f$  a cada elemento del conjunto de estados para calcular su predicción  $x_j^f$ :

$$x_j^f = f(x_j) + w \quad \forall \quad j = 1, \dots, m \quad (14)$$

$$d = Hx + v \quad (15)$$

siendo  $x^f$  la estimación de la predicción y que se calcula a partir de la media de la predicción de cada uno de los estados  $x_j^f$ .

$$x^f = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j^f \quad (16)$$

En la ecuación de corrección (3), los estados  $x^a$  y  $x^f$  pasarán a ser las matrices  $X^a \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  y  $X^f \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  donde cada una de las columnas representa un estado del conjunto. De esta forma el proceso de corrección se aplica a la predicción del conjunto:

$$X^a = [x_1^a, x_2^a, \dots, x_m^a] \quad (17)$$

$$X^f = [x_1^f, x_2^f, \dots, x_m^f] \quad (18)$$

quedando la ecuación (3):

$$X^a = X^f + K(D - HX^f) \quad (19)$$

donde  $D \in \mathfrak{R}^{d \times m}$  es una matriz con todas sus columnas iguales (o no si tenemos en cuenta la naturaleza aleatoria de la medición). Para el cálculo de la ganancia de Kalman se utiliza la ecuación (6), con la diferencia de que la matriz de covarianza  $Q$  del error del modelo es reemplazada por la matriz de covarianza  $Q \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  del conjunto, que se calcula como sigue:

$$Q = \frac{1}{m-1} X^f (X^f)^t \quad (20)$$

La estimación óptima  $x^a$  se toma a partir de la media del conjunto después de aplicar la corrección:

$$x^a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j^a \quad (21)$$

Este algoritmo es un proceso iterativo, de forma que una vez calculada la mejor estimación posible del estado  $x^a$ , se volverá a aplicar el operador no lineal  $f$  a cada elemento del conjunto de estados para calcular su nueva predicción. A esta predicción se le volverá a aplicar el proceso de corrección y se volverá a comenzar el ciclo.



### **Deterministic Ensemble Kalman Filter (DEnKF)**

Existen varias variantes del EnKF entre las que destacaremos el Deterministic Ensemble Kalman Filter (DEnKF). Esta variante será la utilizada en los casos prácticos por los buenos resultados proporcionados en problemas altamente dimensionales (Sakov & Oke, 2008).

El algoritmo del DEnKF es el siguiente:

1. Partiendo de un conjunto de estados iniciales  $X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0]$  obtenidos mediante perturbación del estado inicial  $x^0$ , se calcula el conjunto de predicciones y su valor estimado como la media del conjunto:

$$x_j^f = f(x_j) + w \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (22)$$

$$x^f = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j^f \quad (23)$$

2. Se calcula la matriz de desviaciones de cada uno de los estados  $A \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  según la siguiente ecuación:

$$A^f = [x_1^f - x^f, x_2^f - x^f, \dots, x_m^f - x^f] \quad (24)$$

3. Se calcula la matriz de covarianza de la matriz de desviaciones:

$$Q = \frac{1}{m-1} A^f (A^f)^t \quad (25)$$

4. Se calcula la ganancia de Kalman:

$$K = QH^t (HQH^t + R)^{-1} \quad (26)$$

5. Se aplica la corrección sobre el estado estimado:

$$x^a = x^f + K(d - Hx^f) \quad (27)$$

6. Se actualiza la matriz de desviaciones:

$$A^a = A^f - \frac{1}{2} KHA^f \quad (28)$$

7. Y por último se actualiza la matriz de estados:

$$X^a = A^a + [x^a, \dots, x^a] \quad (29)$$

## 3.4. CORRECCIÓN DE ESTADOS MEDIANTE ASIMILACIÓN DE DATOS

En este apartado se recogen algunas aplicaciones del uso de la asimilación de datos desarrolladas hasta el momento por el grupo de investigación SINUMCC, y que han constituido el origen de este trabajo.

Un aspecto importante en la simulación de la propagación de incendios forestales es la incorporación de datos adquiridos experimentalmente en situaciones reales. La asimilación de datos permite así reducir el error acumulado en las predicciones obtenidas por el cálculo (debidas tanto a la incertidumbre en las mediciones y en los parámetros como a las simplificaciones en el modelo) y proporciona predicciones más fiables en los instantes de tiempo siguientes. Se trata por tanto de un proceso de dos fases, corrección y predicción, que se repiten de modo alterno con el objetivo de proporcionar un pronóstico más probable.

En este punto se ven algunos ejemplos sobre las mejoras logradas gracias a la incorporación de técnicas de asimilación de datos basadas en el Filtro de Kalman a los modelos de incendios forestales desarrollados en el grupo de trabajo SINUMCC.

### 3.4.1. Modelo bidimensional

En lo siguiente se explicará el proceso de aplicación de técnicas de asimilación de datos al modelo de propagación de incendios bidimensional analizado en el punto 2.4. *Modelo bidimensional* de este proyecto.

El conjunto de datos de entrada de este modelo está compuesto por:

1. Altura en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.

2. Fracción másica de combustible en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.
3. Tipología del combustible en cada punto de la malla, medida de forma cualitativa.
4. Temperatura en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.
5. Viento en cada punto de la malla, medido de forma cuantitativa.
6. Parámetros del modelo:
  - a. El primer parámetro está relacionado con el coeficiente de absorción de la radiación dentro de la llama.
  - b. El segundo parámetro está relacionado con las pérdidas de calor en la dirección vertical.
  - c. El tercer parámetro está relacionado con la tasa de combustión, y determina el tiempo de vida medio del combustible que se está quemando. Este parámetro determina el ancho del frente de llama.
  - d. El cuarto parámetro representa la humedad del combustible.

El conjunto de datos de salida de este modelo está compuesto por:

1. Fracción másica de combustible en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.
2. Temperatura del combustible sólido en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.

Para la integración de los datos en el correspondiente modelo no-lineal usamos el filtro de Kalman conjuntista en su variante determinista (DEnKF). El conjunto de estados se obtiene mediante la perturbación de la posición inicial del foco del incendio, lo cual representa la incertidumbre presente en un primer momento sobre la ubicación en la que comenzó el fuego.

Los datos asimilados corresponden a mediciones realizadas sobre la temperatura del sólido y la fracción másica de combustible en determinados instantes de tiempo y posiciones del dominio. Los ejemplos numéricos muestran que este procedimiento permite corregir las aproximaciones obtenidas por el modelo proporcionando simulaciones más realistas, incluso cuando existen importantes errores en la localización del foco inicial.

Otro paso será definir el patrón que se seguirá para tomar las observaciones y con que precisión se tomarán éstas. Así hemos llegado

a dos posibilidades en la implementación: una primera versión que toma observaciones de forma uniforme en toda la malla y una segunda versión que toma observaciones únicamente en un entorno del frente de fuego.

Comparando ambas versiones, se puede decir que la primera variante tiene como ventaja reducir el error entre la aproximación de los resultados del modelo y la solución real en mayor medida, pero tiene como punto débil un mayor tiempo de procesado, ya que el orden del sistema que se tiene que resolver es bastante superior al caso de la versión en la que únicamente se toman observaciones dentro de la zona quemada.

La ejecución simultánea del elevado número de estados que forman el conjunto de Kalman requiere una carga computacional importante. Por ello, el proceso se ha implementado de forma eficiente utilizando técnicas de cálculo paralelo. En concreto se han utilizado dos técnicas para llevar a cabo una paralelización híbrida o doble paralelización:

1. Memoria compartida: Se ha utilizado la programación basada en hilos mediante *OpenMP*<sup>2</sup> dentro del modelo con el objetivo de aprovechar los múltiples núcleos de los que disponen los actuales procesadores y reducir así el tiempo de cálculo requerido para obtener la predicción de un estado.
2. Memoria distribuida: Para el cálculo de las numerosas predicciones correspondientes a cada uno de los elementos del conjunto se han utilizado varios equipos configurados como un clúster. Para ello se ha utilizado el protocolo MPI –*Message Passing Interface*– para distribuir la carga de trabajo entre los diferentes equipos. En concreto, se ha utilizado la implementación de MPI *MPICH3*<sup>3</sup>.

El uso de estas técnicas de cálculo paralelo son esenciales ya que es fundamental poder obtener los resultados fruto de la simulación en un tiempo inferior al real simulado. De nada sirve predecir un proceso con gran precisión si para ello hemos empleado un tiempo superior al tiempo simulado.

---

<sup>2</sup> <http://openmp.org/>

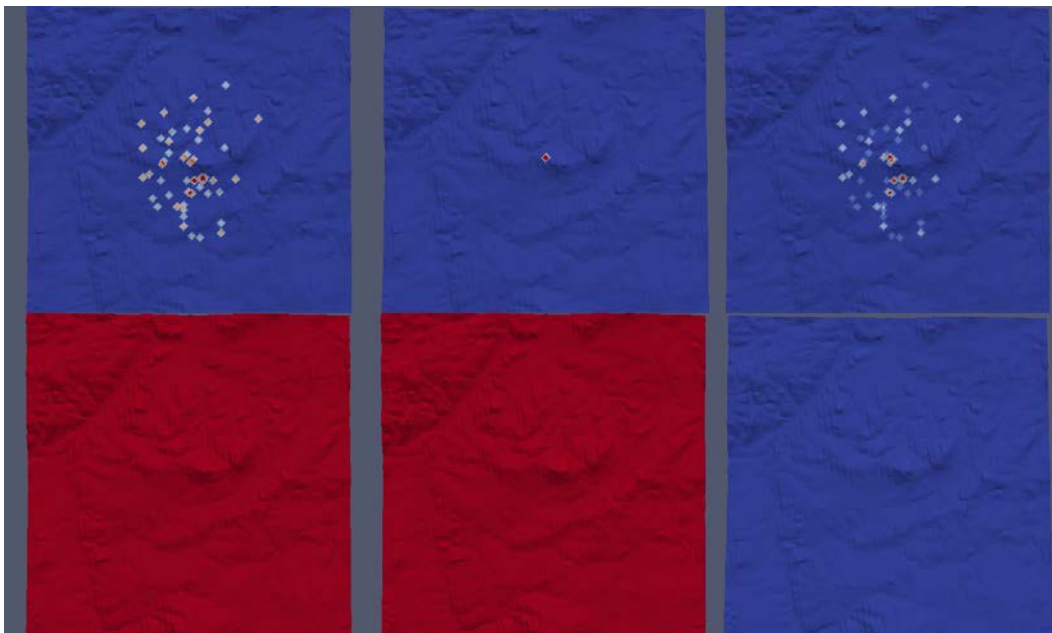
<sup>3</sup> <http://www.mpich.org/>

### **EJEMPLO**

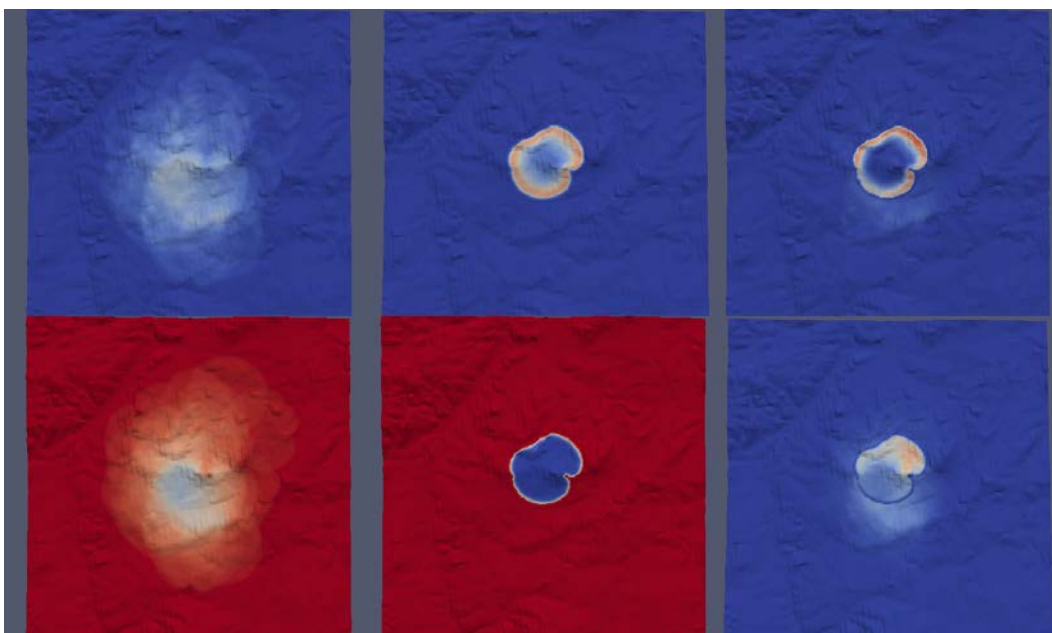
A continuación se muestran los resultados de la ejecución de un ejemplo de asimilación de datos en el modelo bidimensional estudiado para un fuego generado a partir de un foco puntual en una zona con combustible homogéneo. Este ejemplo representa una simulación sobre un dominio 5000x5000 m y 3 horas de duración, en el que se han asimilado datos cada hora. Se han realizado dos asimilaciones distintas: una con un conjunto de Kalman de 50 elementos y otra con 25 elementos. El conjunto inicial se genera mediante la perturbación de la posición inicial siguiendo una distribución normal de media el punto de emisión y desviación típica 500 m, lo que supone una gran incertidumbre en la localización del foco inicial. Se toman observaciones cada 150 m de forma regular.

En las figuras de la 5 a la 10, la columna de la izquierda representa la solución estimada con ayuda del modelo y la asimilación de datos, la columna del centro representa el frente de fuego que se toma como referencia (es decir la solución real, que en un caso práctico será desconocida) y a partir del cual se simula una toma de datos perturbando dicha solución de referencia, la columna de la derecha se representa el error en la estimación con respecto a la solución de referencia, es decir la diferencia entre la columna central y la columna de la izquierda. La primera fila representa las temperaturas y la segunda fila el combustible.

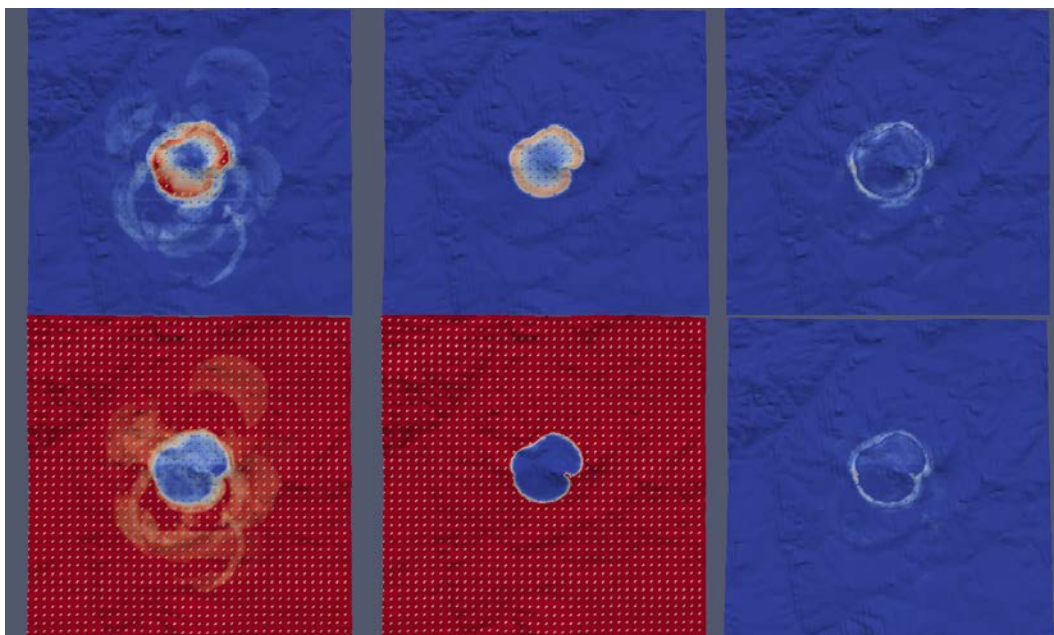
La figura 5 representa la situación en los primeros momentos de iniciarse el fuego. El aspecto difuso en la columna de la izquierda indica que hay bastante incertidumbre en la posición inicial del foco del incendio. En la figura 10 se representa el caso con viento a las 3 horas, después de la asimilación de datos.



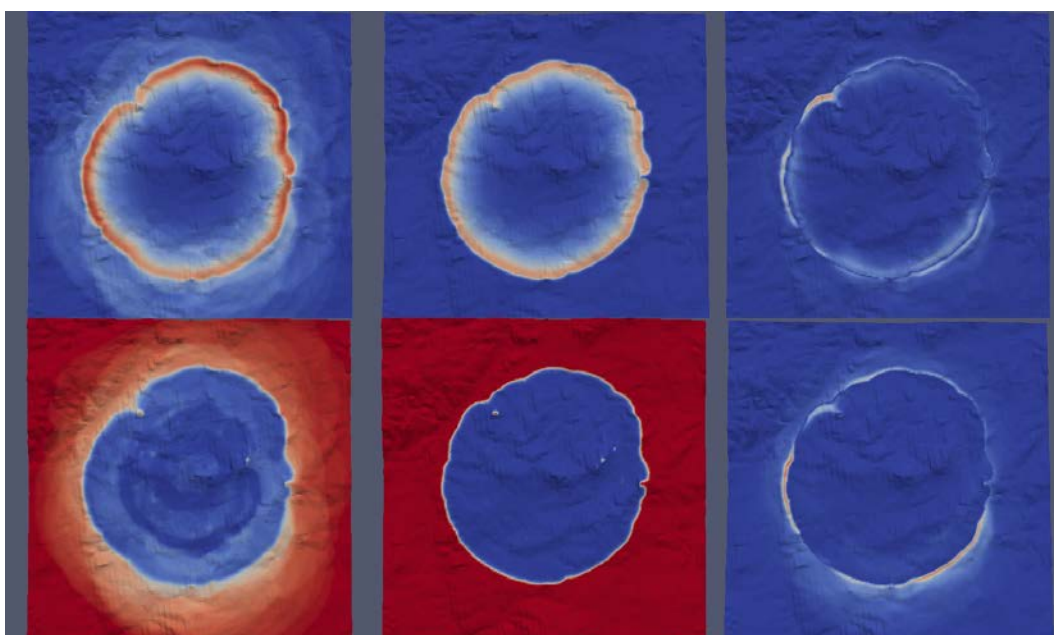
**Figura 5:** Momento inicial después de iniciarse un fuego a partir de un foco puntual. Se supone una gran incertidumbre en la situación del foco inicial



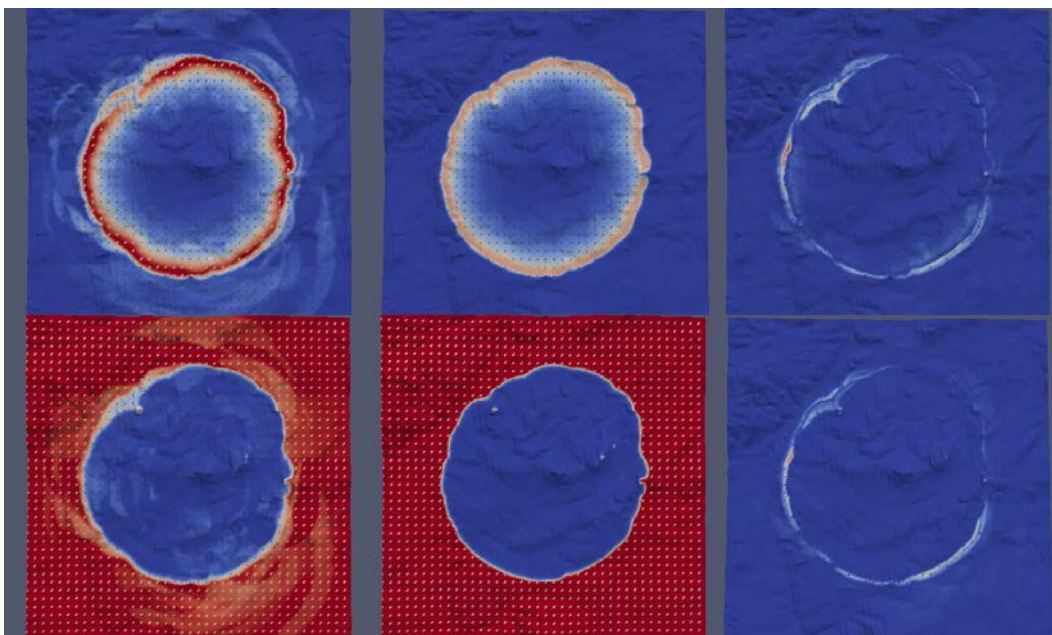
**Figura 6:** Antes de la primera asimilación de datos, después de una hora del inicio del fuego



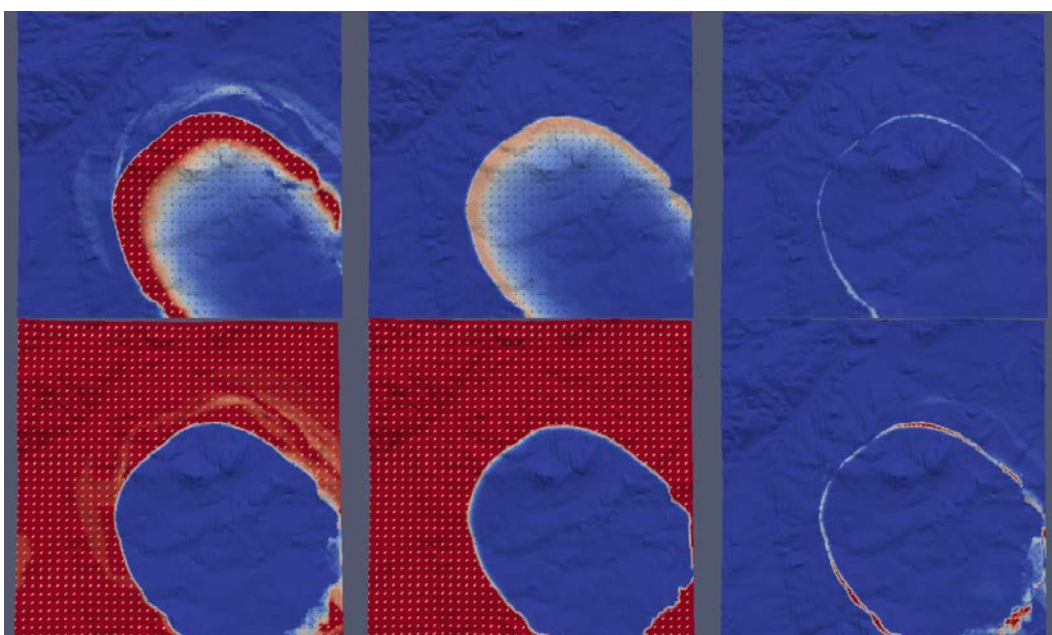
**Figura 7:** Después de la primera asimilación de datos, después de una hora del inicio del fuego



**Figura 8:** Antes de la tercera asimilación de datos. 3 horas del inicio del fuego



**Figura 9:** Después de la tercera asimilación de datos. 3 horas después inicio del fuego



**Figura 10:** Caso con viento. Después de la tercera asimilación de datos. 3 horas después del inicio del fuego



### 3.4.2. Modelo unidimensional

Como fase introductoria al apartado 3.6. *Ejemplo de identificación de parámetros mediante asimilación de datos*, donde se analizará el uso de la asimilación de datos para la identificación de parámetros en un modelo simplificado de propagación de incendios unidimensional (analizado en el punto 2.3. *Modelo unidimensional* de esta memoria), se ha implementado en el lenguaje de programación C++ el proceso de corrección de estados mediante asimilación de datos en este modelo. La explicación de la estructura del código implementado y las instrucciones para su compilación y ejecución pueden verse en el *Apéndice I: Programas desarrollados para la asimilación de datos*.

Esto me ha permitido conocer mejor el modelo y ver los problemas que me podría encontrar en el siguiente punto al extender el uso de la asimilación de datos.

El conjunto de datos de entrada de este modelo está compuesto por:

1. Fracción másica de combustible en cada punto de la recta, medida de forma cuantitativa.
2. Temperatura en cada punto de la recta, medida de forma cuantitativa.
3. Parámetros del modelo:
  - a.  $\lambda$ : Término de pérdidas de calor.
  - b.  $\beta$ : Tasa de combustión.

El conjunto de datos de salida de este modelo está compuesto por:

1. Fracción másica de combustible en cada punto de la recta, medida de forma cuantitativa.
2. Temperatura del combustible sólido en cada punto de la recta, medida de forma cuantitativa.

Al igual que en modelo bidimensional, para este modelo también se toman como posibles variables a observar la fracción másica de combustible y la temperatura del sólido. En este caso tomaremos muestras de las dos variables siguiendo un patrón uniforme y equiespaciado.

Para la asimilación de datos, también se utilizara el DEnKF, estudiado en el punto 3.2.2.

Los diferentes elementos del conjunto se han generado mediante la perturbación de la posición del foco inicial. Concretamente se ha variado su posición y su anchura siguiendo una distribución de probabilidad normal.

En las siguientes figuras, en la columna de la izquierda podemos ver los datos correspondientes a la temperatura, y en la columna de la derecha los datos correspondientes al combustible.

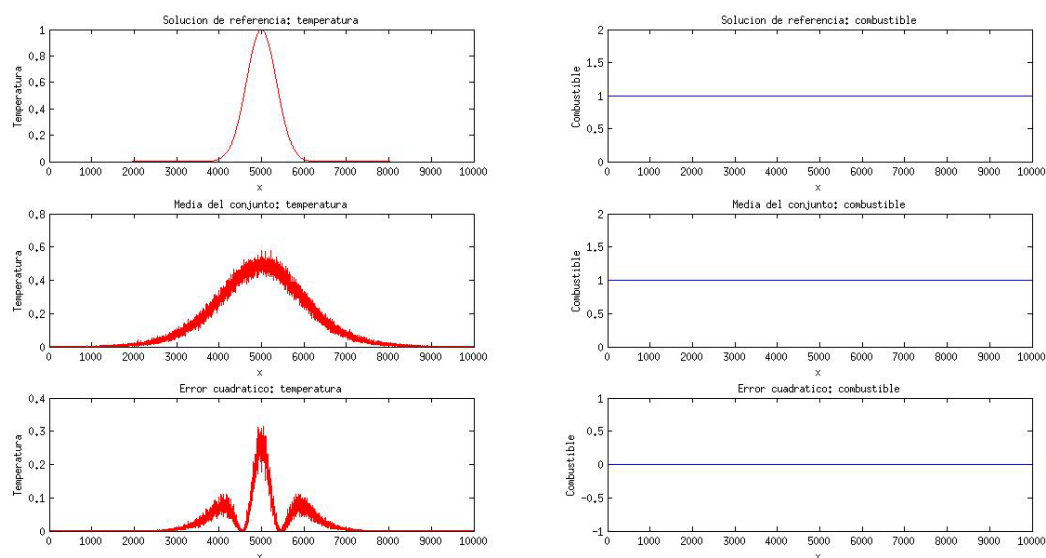
La primera fila representa los datos correspondientes a la solución que se considera de referencia, es decir, aquella sobre la que se realizaran las mediciones y a la que deberá tender la estimación proporcionada después de la asimilación de datos. La segunda fila representa la solución estimada con ayuda del modelo y la asimilación de datos (la media del conjunto). La tercera fila representa el error existente en la estimación con respecto a la solución de referencia, es decir, la diferencia entre la primera y la segunda fila.

Hay que mencionar que si en lugar de tomar las mediciones sobre una simulación considerada como referencia, las mediciones procedieran de una situación real estas deberían adimensionalizarse según la ecuación (4) del apartado 2.3. *Modelo unidimensional*, ya que estamos trabajando con un modelo adimensional.

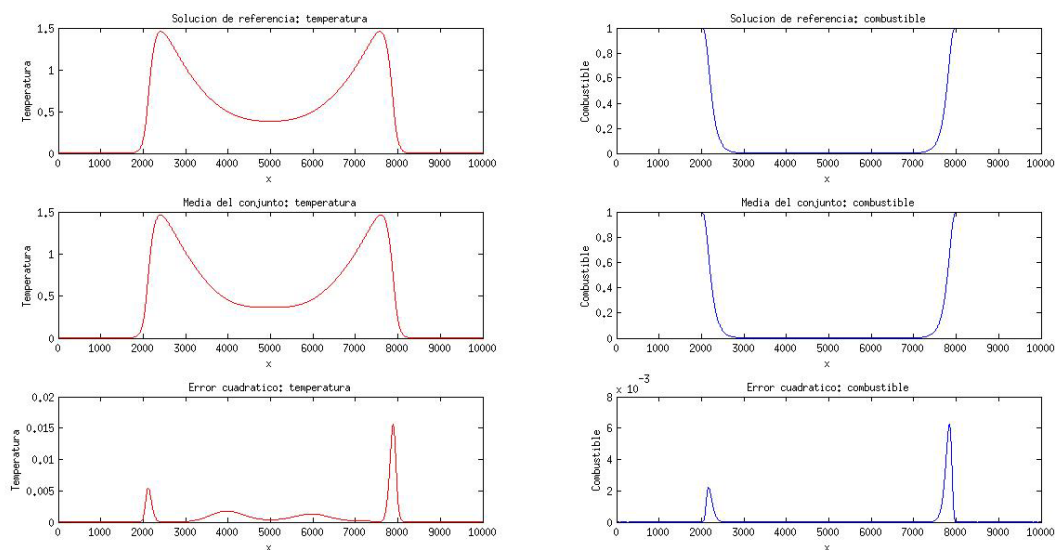
En la figura 11 se representan los datos iniciales utilizados en las diferentes simulaciones. En concreto, se ha utilizado una gaussiana con varianza 10 y media la posición central del dominio de estudio como solución de referencia. Para generar el conjunto de estados se ha perturbado siguiendo una distribución normal la posición central y el ancho de la gaussiana con una varianza de 200 para ambos casos. En este caso se ha trabajado con viento nulo.

En las figuras 12, 13 y 14 se representan los resultados del proceso de asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones para diferentes magnitudes de la perturbación de las mediciones. El tamaño del conjunto de elementos es de 200 estados. Como se puede ver, la solución estimada prácticamente coincide con la solución de referencia, y la magnitud del error es mínima en los tres casos, lo que nos indica el buen funcionamiento de la asimilación de datos.

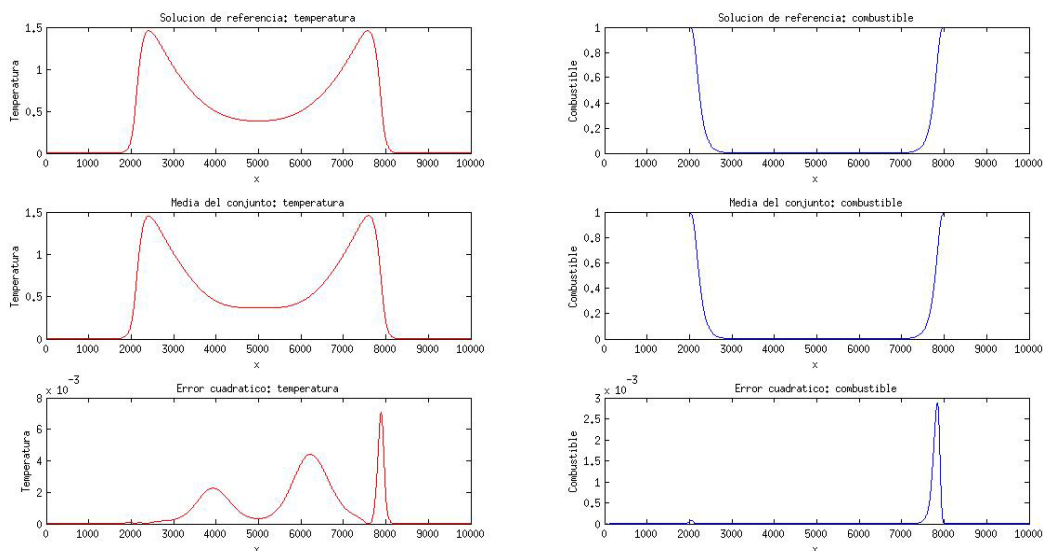
Después de realizar 50 asimilaciones, no se aprecian grandes diferencias entre los resultados obtenidos para las diferentes magnitudes de ruido asociadas al proceso de medición.



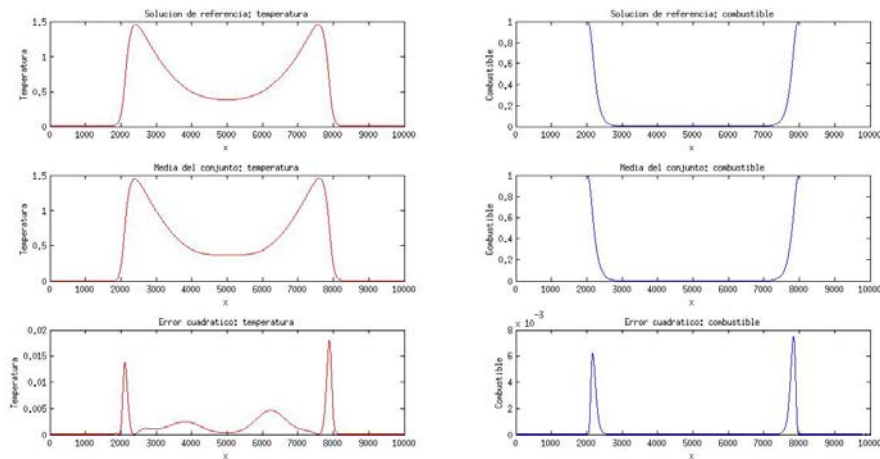
**Figura 11:** Momento inicial después de iniciarse el fuego a partir de un foco puntual. Se supone una gran incertidumbre en la situación del foco inicial



**Figura 12:** Resultado de la asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones. Se ha tomado una varianza de 0,09 para la perturbación de las mediciones



**Figura 13:** Resultado de la asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones. Se ha tomado una varianza de 0,36 para la perturbación de las mediciones



**Figura 14:** Resultado de la asimilación de datos después de realizar 50 asimilaciones. Se ha tomado una varianza de 0,64 para la perturbación de las mediciones

## 3.5. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE ASIMILACIÓN DE DATOS

El filtro de Kalman conjuntista en su variante determinista (DEnKF) puede ser utilizado para resolver problemas de optimización no dependientes del tiempo. Un ejemplo típico de este tipo de problemas puede ser la estimación del conjunto de parámetros de entrada  $\alpha \in \mathfrak{R}^l$  de una función o modelo cuya salida es un vector  $x \in \mathfrak{R}^n$ .

Si disponemos de una serie de mediciones del campo real  $x$ , es posible abordar el problema mediante asimilación de datos, consistiendo este en encontrar el conjunto de parámetros  $\alpha$  que proporcionan unos resultados para la simulación lo más aproximados posible a las observaciones tomadas (Evensen, 2009).

Normalmente estos problemas se resuelven mediante la definición de una función de coste y su posterior minimización. En problemas no lineales, como los abordados por el EnKF, la función de coste puede tener mínimos locales que entorpecen la detección del mínimo global. Además, estas técnicas no tienen en cuenta el posible error del modelo y tampoco proporcionan ningún tipo de información sobre la incertidumbre de la solución.

### 3.5.1. Definición del problema

#### **PARÁMETROS**

Para comenzar la definición del problema, se estimará una primera aproximación para el conjunto de parámetros  $\alpha^f \in \mathfrak{R}^l$ , que pueden ser bien constantes o bien funciones dependientes de la posición espacial, y asumiremos que contiene un error asociado  $u \in \mathfrak{R}^l$ , por definición modelado como un ruido de media 0 y varianza conocida:

$$\alpha^f = \alpha + u \quad (30)$$

Esto nos lleva a la condición de que la primera estimación de los parámetros  $\alpha^f$  debe estar cercana al valor óptimo buscado  $\alpha$ , lo cual no siempre es posible.

### **MODELO**

El siguiente punto en la definición del problema será definir la función o modelo que relaciona el conjunto de parámetros a estimar  $\alpha$  con el proceso modelado.

$$x^f = f(\alpha) + w \quad (31)$$

donde  $f$  es un operador no lineal y  $w \in \mathfrak{R}^n$  es el error derivado de la predicción del modelo. Se asume que este error tiene distribución gaussiana con media cero y varianza conocida.

Al partir de la ecuación (31) podremos calcular la predicción del estado correspondiente a cada parámetro del conjunto.

### **MEDICIONES**

Por otra parte, tenemos el modelo de medida:

$$d = Hx + v \quad (32)$$

donde  $H \in \mathfrak{R}^{d \times n}$  es una matriz que relaciona la medida  $d$  con el estado medido  $x$ ; y  $v \in \mathfrak{R}^d$  es el ruido presente en la medición, cuya matriz de covarianza es  $R \in \mathfrak{R}^{d \times d}$ . Al igual que en el punto anterior, también se asume que este error tiene una distribución gaussiana con media cero y varianza conocida.

La matriz  $H$  permitirá calcular la predicción de las observaciones a partir de la predicción obtenida para cada estado según la ecuación (31).

### 3.5.2. Solución del problema

El DEnKF no trata de minimizar la función de coste directamente, sino que basa su funcionamiento en la estadística y en la realización de un elevado número de ensayos  $m$ . El algoritmo del DEnKF para la estimación del conjunto de parámetros de entrada  $\alpha$  es el siguiente:

1. Dada una estimación inicial  $\alpha^0$  para el conjunto de parámetros a estimar, se genera el conjunto  $A^0 \in \mathfrak{R}^{l \times m}$  de  $m$  estados perturbando la estimación inicial del conjunto de parámetros según una distribución gaussiana de media cero y varianza conocida.

$$\alpha_j^0 = \alpha^0 + u_j \quad (33)$$

$$A^0 = [\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_m^0] \quad (34)$$

2. A continuación se calcula la predicción  $x_j^f$  correspondiente a cada uno de los estados  $\alpha_j$ :

$$x_j^f = f(\alpha_j) + w \quad (35)$$

De esta forma generamos el conjunto de estados predichos  $X^f = [x_1^f, x_2^f, \dots, x_m^f]$ .

3. El siguiente paso será obtener la predicción de las observaciones a partir de la ecuación (32):

$$d_j = Hx_j^f + v \quad (36)$$

Así generamos el conjunto de predicciones de las medidas  $D = [d_1, d_2, \dots, d_m]$ .

Los pasos 1, 2 y 3 podrían realizarse de forma unificada mediante la ecuación:

$$d_j = H(f(\alpha_j + u_j) + w) + v \quad (37)$$

donde el estado está formado únicamente por el conjunto de parámetros  $\alpha_j \in \mathfrak{R}^l$ .

4. A continuación combinaremos en un nuevo estado  $\psi_j^f \in \mathfrak{R}^{l+n+d}$  los datos correspondientes al conjunto de parámetros de cada

elemento del conjunto  $\alpha_j$ , la predicción del estado utilizando estos parámetros  $x_j^f$  y la predicción de la medición  $d_j$ :

$$\psi_j^f = \begin{pmatrix} \alpha_j \\ x_j^f \\ d_j \end{pmatrix} \quad (38)$$

este nuevo conjunto de estados será agrupado en la matriz de estados  $\Psi^f \in \mathfrak{R}^{(l+n+d) \times m}$   $\Psi^f = [\psi_1^f, \psi_2^f, \dots, \psi_m^f]$ .

5. La estimación óptima del estado  $\psi^f$  se obtendrá a partir de la media del conjunto:

$$\psi^f = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \psi_j^f \quad (39)$$

6. También definiremos una nueva función de medida  $H' \in \mathfrak{R}^{(l+n+d) \times n}$  que permitirá obtener la predicción de las mediciones a partir de los nuevos estados  $\psi_j^f$ .

$$H' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \quad (40)$$

donde  $I \in \mathfrak{R}^{d \times d}$  es la matriz identidad.

7. Una vez construidos los nuevos vectores de estado, que serán los utilizados en la asimilación de datos, se calcula la matriz de desviaciones de cada uno de los estados  $A \in \mathfrak{R}^{(l+n+d) \times m}$  según la siguiente ecuación:

$$A^f = [\psi_1^f - \psi^f, \psi_2^f - \psi^f, \dots, \psi_m^f - \psi^f] \quad (41)$$

8. A continuación se construirá la matriz de covarianza de las desviaciones del conjunto  $Q \in \mathfrak{R}^{(l+n+d) \times (l+n+d)}$ :

$$Q = \frac{1}{m-1} A^f (A^f)^T \quad (42)$$

9. Se calcula la ganancia de Kalman:

$$K = QH'^T (H'QH'^T + R)^{-1} \quad (43)$$

10. Se aplica la corrección sobre el estado estimado:



$$\psi^a = \psi^f + K(d - H\psi^f) \quad (44)$$

11. Se actualiza la matriz de desviaciones:

$$A^a = A^f - 0.5KHA^f \quad (45)$$

12. Por último se actualiza la matriz de estados:

$$\Psi^a = A^a + [\psi^a, \dots, \psi^a] \quad (46)$$

13. Volvemos al punto 2 y repetimos el proceso.

### 3.6. EJEMPLO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS MEDIANTE ASIMILACIÓN DE DATOS

Este es el último punto de lo que puede considerarse el primer subproyecto de este trabajo, y en él se abordará de forma práctica el problema de la aplicación del proceso de identificación de parámetros mediante técnicas de asimilación de datos, estudiado en el punto 3.5. *Identificación de parámetros mediante asimilación de datos*, a un modelo de propagación de incendios unidimensional, estudiado en el punto 2.3. *Modelo unidimensional*.

Como parte final de la investigación, se ha implementado en el lenguaje de programación C++ el proceso para la estimación de los parámetros en este modelo con el objetivo de validar los resultados teóricos estudiados a lo largo de este capítulo. La explicación de la estructura del código implementado y las instrucciones para su compilación y ejecución pueden verse en el *Apéndice I: Programas desarrollados para la asimilación de datos*.

Como se vio en el punto 2.3. *Modelo unidimensional*, el comportamiento cualitativo de la solución del modelo de propagación de incendios unidimensional depende únicamente de dos coeficientes adimensionales:

1.  $\lambda$  Término de pérdidas de calor.
2.  $\beta$  Tasa de combustión.

Partiendo de esto, las pruebas a realizar consisten básicamente en lanzar una simulación con unos parámetros  $\lambda$  y  $\beta$  conocidos y utilizar esta simulación para realizar las mediciones. Esta simulación representará el problema real.

Hay que mencionar que si en lugar de tomar las mediciones sobre una simulación considerada como referencia, las mediciones procedieran de una situación real estas deberían adimensionalizarse según la ecuación (4) del apartado 2.3. *Modelo unidimensional*, ya que estamos trabajando con un modelo adimensional.

A parte de la simulación considerada de referencia, se lanzaran un conjunto de  $m$  simulaciones con valores aleatorios para los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ , representando cada una de estas simulaciones un elemento del conjunto de estados para la asimilación de datos.

Vistos los datos de entrada y de salida de este modelo en el punto 3.4.2. *Modelo unidimensional*, se toman como posibles variables a observar la fracción másica del combustible y la temperatura del sólido. Las muestras de estas dos variables se toman siguiendo un patrón uniforme y equiespaciado.

Para la asimilación de datos, se utilizara el DEnKF estudiado en el punto 3.2.2. *Ensemble Kalman Filter*. En las simulaciones realizadas se ha utilizado un conjunto de tamaño  $m=200$  elementos, y se ha repetido el proceso empleando 50 asimilaciones.

Los diferentes elementos del conjunto se han generado utilizando la misma solución inicial y perturbando los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$  en cada uno de los elementos del conjunto con un ruido gaussiano de media nula y varianza conocida.

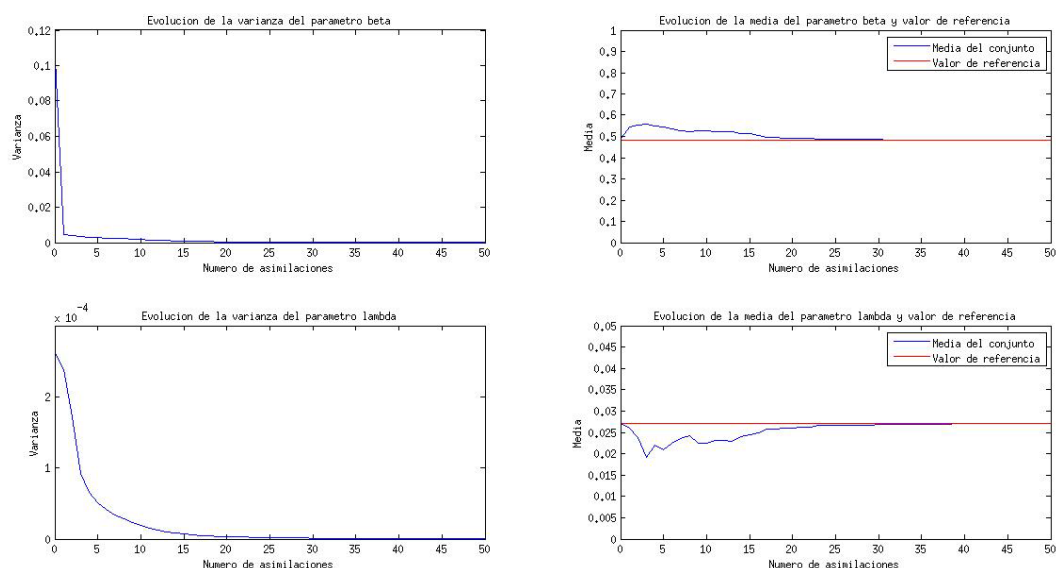
En las figuras sucesivas, se representan los resultados obtenidos. En la columna de la izquierda de cada figura podemos ver como evoluciona la varianza de los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$  en las sucesivas asimilaciones de datos. En la columna de la derecha se puede ver la evolución del valor estimado para los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$  (calculado a partir de la media del conjunto). En rojo se representa el valor de la solución de referencia y en azul el valor estimado.

La primera fila representa los datos correspondientes al parámetro  $\beta$  y en la segunda los datos correspondientes al parámetro  $\lambda$ .

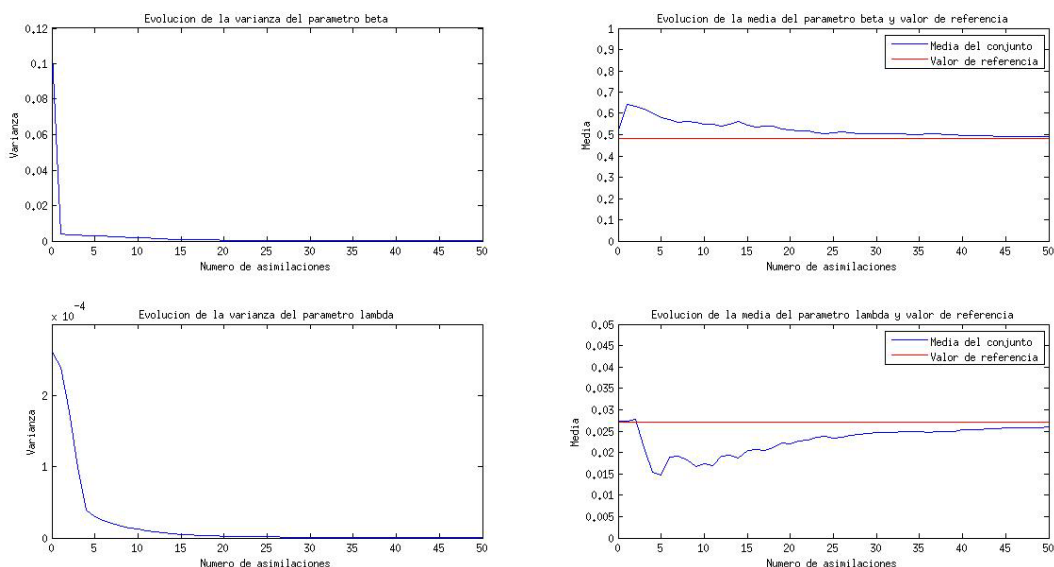
El objetivo del proceso es que tras la asimilación de datos la varianza de la estimación de ambos parámetros disminuya, a la vez que el valor estimado para los parámetros tienda al valor de la solución de referencia.

En las figuras 15, 16 y 17 se ha probado la implementación tomando una distribución gaussiana para la generación de los parámetros del conjunto de estados, con varianzas de 0,16 para el parámetro  $\lambda$  y de 0,0009 para el parámetro  $\beta$ . Como puede verse, la varianza disminuye con el número de asimilaciones y la media se aproxima al valor de referencia, aunque en un inicio se aleja. Se observa igualmente que cuanto mayor sea la varianza de las observaciones, más lenta será la aproximación de la estimación al valor de referencia.

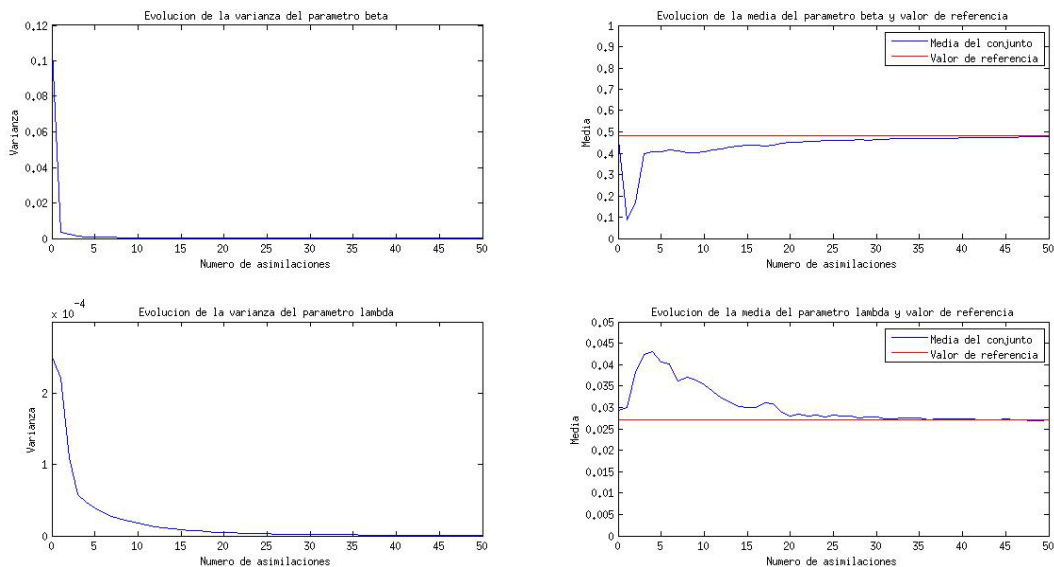
También se han realizado idénticas simulaciones empleando otras varianzas para los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ , obteniendo idénticos resultados.



**Figura 15:** Experimento 1: Parámetros con dist. gaussiana con varianza 0,16 para el valor de  $\lambda$  y 0,0009 para el valor de  $\beta$ . Varianza observaciones 0,09



**Figura 16:** Experimento 2: Parámetros con dist. gaussiana con varianza 0,16 para el valor de  $\lambda$  y 0,0009 para el valor de  $\beta$ . Varianza observaciones 0,36



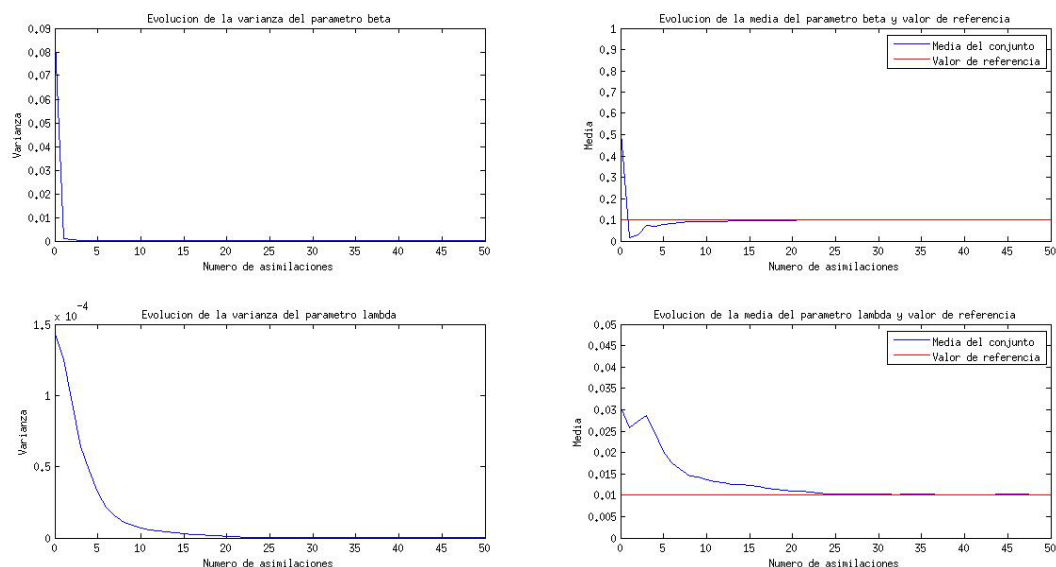
**Figura 17:** Experimento 3: Parámetros con dist. gaussiana con varianza 0,16 para el valor de  $\lambda$  y 0,0009 para el valor de  $\beta$ . Varianza observaciones 0,64

A partir de estos resultados, se concluye que la asimilación de datos es válida para el proceso de identificación de parámetros, siempre y cuando se tenga una estimación inicial aproximada de los parámetros.

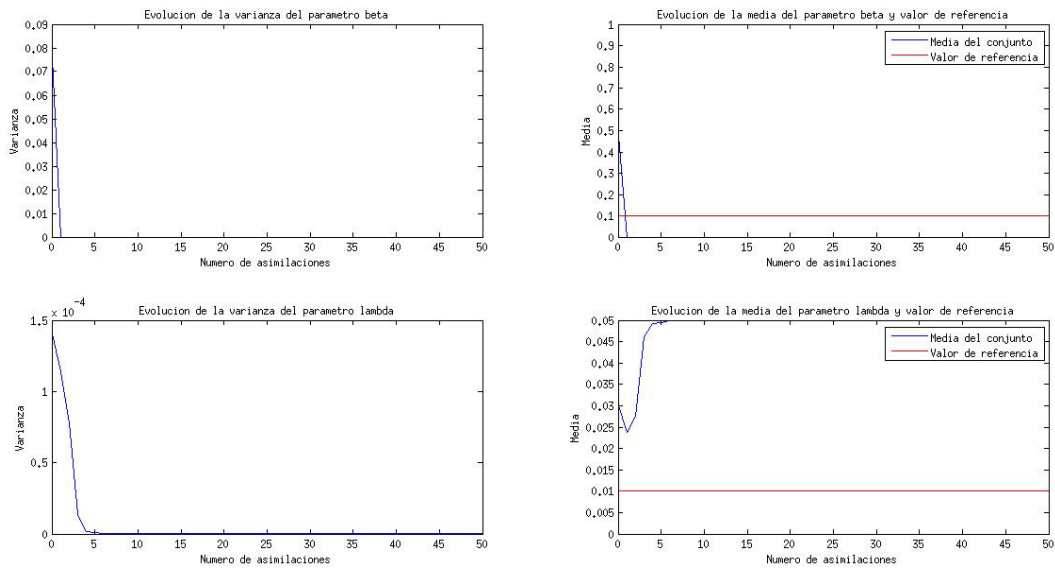
Aunque en los anteriores experimentos partimos de las condiciones necesarias para estimar el conjunto de parámetros de acuerdo a lo expuesto en (Evensen, 2009), es decir, el conjunto de parámetros sigue una distribución gaussiana de media nula y varianza determinada, no me parece lo más apropiado ya que en muchos casos no se tiene una primera estimación del valor de los parámetros.

De esta forma se ha querido experimentar y forzar más el método empleado usando una distribución para los parámetros distinta a la teóricamente necesaria. En concreto, se ha utilizado para generar el conjunto de estados una distribución uniforme para los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ , dando a estos siempre un valor dentro de un intervalo lógico. Según (Kim, 2001), valores aceptables para el parámetro  $\lambda$  se encuentran en el intervalo (0,1), mientras que para el parámetro  $\beta$  se encuentran en el intervalo (0,01; 0,05).

En las figuras 18 y 19 se ha probado la implementación tomando una distribución uniforme en los intervalos adecuados para la generación de los parámetros del conjunto de estados. Como puede verse, la varianza disminuye con el número de asimilaciones y la media se aproxima al valor de referencia en la figura 18 (varianza observaciones 0,09), mientras que en la figura 19 (varianza observaciones 0,36) el método falla.



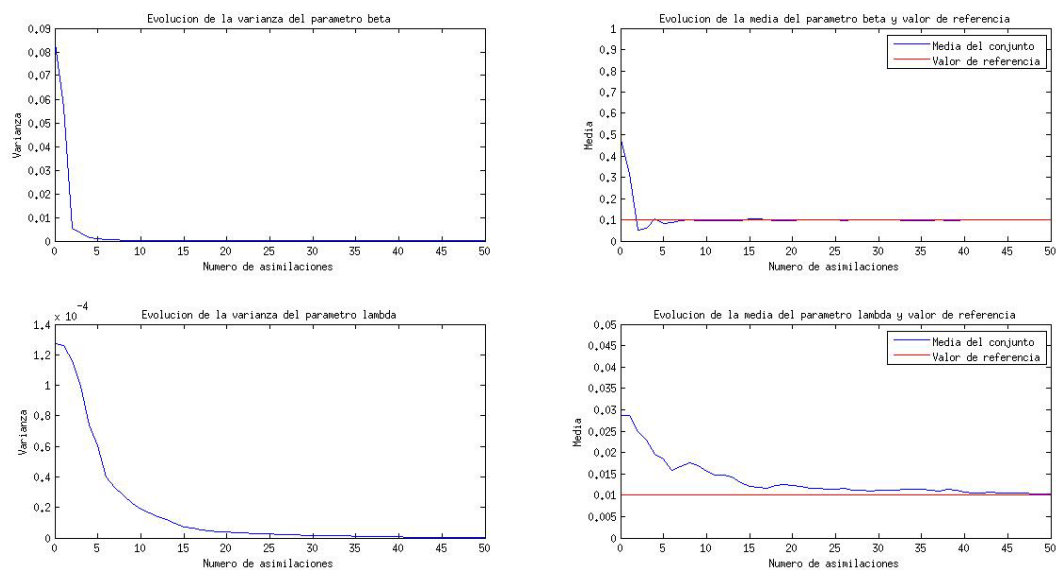
**Figura 18:** Experimento 4: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos (0,1) para  $\lambda$  y (0,01;0,05) para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,09



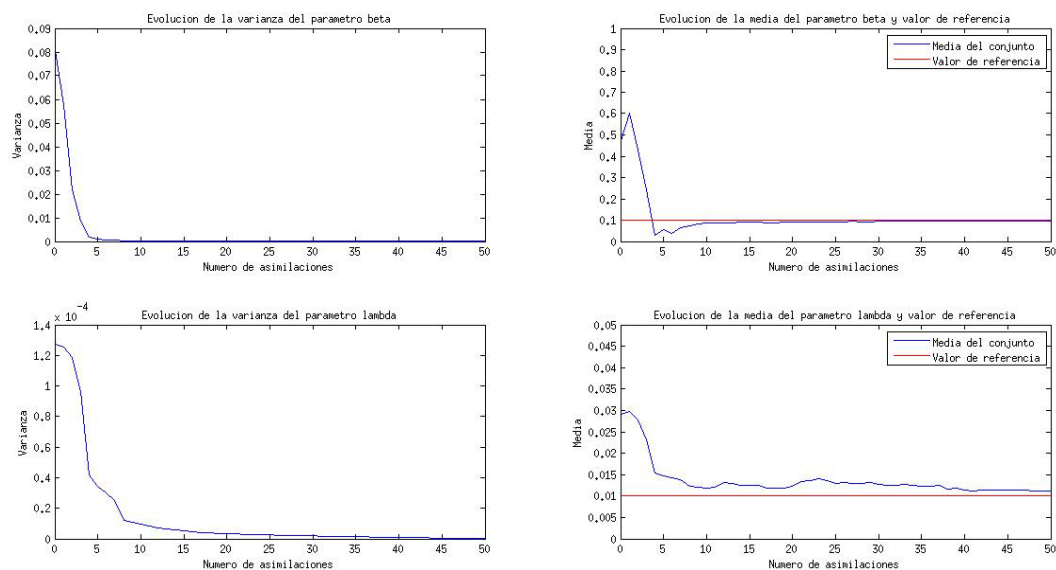
**Figura 19:** Experimento 5: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos (0,1) para  $\lambda$  y (0,01;0,05) para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,36

Buscando el punto en el que colapsa el método se ha llegado a la conclusión de que los resultados están viéndose afectados por la fuerte dependencia no lineal de los resultados del modelo de propagación de incendios unidimensional con los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ .

Para solucionar este problema se decide aumentar el número de asimilaciones y disminuir el tiempo simulado entre cada asimilación, pasando de 200 a 100 pasos de tiempo entre asimilaciones. Este cambio está motivado por la idea de que al transcurrir menos tiempo entre las asimilaciones, los diferentes estados no se distancian tanto unos de otros debido a los diferentes parámetros. De esta forma se han repetido las pruebas que pueden verse en las figuras 20 y 21.



**Figura 20:** Experimento 6: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos  $(0,1)$  para  $\lambda$  y  $(0,01;0,05)$  para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,36



**Figura 21:** Experimento 7: Parámetros con dist. uniforme en los intervalos  $(0,1)$  para  $\lambda$  y  $(0,01;0,05)$  para  $\beta$ . Varianza observaciones 0,64

Como puede verse en las figuras 18 y 19 y en las figuras 20 y 21, todo indica que es posible debilitar una de las condiciones requeridas (uso de una distribución uniforme para el conjunto de parámetros iniciales en lugar de una distribución normal) en el marco

teórico de la asimilación de datos a cambio de tomar muestras con una frecuencia mayor.

Aunque la necesidad de disminuir el periodo de las labores de medición puede resultar un problema cuando el objetivo es reconstruir un estado para obtener predicciones más realistas en los instantes siguientes, ya que la simulación completa puede requerir más tiempo que el real simulado, hay que señalar que este enfoque está orientado a un proceso de calibración de un modelo, en el que se pretende determinar el valor de unos parámetros que serán utilizados repetitivamente en lo sucesivo al considerarse válidos.

Así, aunque puede que no sea posible el abordaje del problema durante un escenario real, si pueden tomarse las observaciones necesarias para llevar a cabo la simulación posteriormente y ajustar así los parámetros de nuestro modelo para sucesivas simulaciones.



# CAPÍTULO 4: INTEGRACIÓN EN GIS

## 4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordan todas las cuestiones planteadas en este proyecto relativas a la integración en un Sistema de Información Geográfico de un modelo de propagación de incendios forestales.

El grupo de trabajo SINUMCC ha desarrollado varios modelos físicos de diferentes fenómenos medioambientales: modelos de viento de alta definición, modelos de propagación de incendios forestales y modelos de dispersión de contaminantes en la atmosfera.

En el momento de partida de este proyecto, la principal barrera para que estos modelos puedan ser utilizados por sus potenciales usuarios en escenarios reales, o incluso por los propios autores en las labores de investigación, es la carencia de una interfaz de usuario que automatice la adquisición de datos y que haga posible su uso de forma rápida, sencilla e intuitiva sin ser necesario ningún tipo de conocimiento previo del modelo.

Hasta ahora cada vez que se quería reproducir algún escenario real utilizando los modelos desarrollados se debía acudir a organismos externos para obtener los datos necesarios con la pérdida de tiempo y dinero que esto suponía.

En numerosas ocasiones se había planteado la necesidad de incluir estos modelos en un sistema de información geográfica (GIS - *Geographic Information System*), pero no se había abordado el problema por no ser un campo en el que el grupo tuviese experiencia.

De este modo, partiendo de los conocimientos adquiridos sobre los sistemas de información geográfica a lo largo del máster, surge el trabajo que se desarrolla a lo largo de este capítulo y que pretende no

solo solucionar esta problemática, sino también crear una herramienta que permita dar visibilidad al trabajo desarrollado dentro del grupo.

Este trabajo no será ninguna novedad, ya que desde hace algunos años existen en el mercado simuladores de incendios forestales basados en otros modelos, principalmente de tipo empírico debido a su rapidez de ejecución. Un ejemplo de este tipo de productos es el simulador *WildFire Analyst*<sup>4</sup>, desarrollado por la compañía leonesa *Tecnosylva S.A.*<sup>5</sup>.

La innovación de este trabajo vendrá dada por ser una herramienta que incorpore un modelo físico simplificado capaz de competir en tiempo con los modelos empíricos.

### 4.1.1. Objetivos

Los objetivos buscados en el trabajo desarrollado a lo largo de este capítulo son:

1. Estudiar los diferentes recursos de información geográfica disponibles en Internet.
2. Reunir y adaptar estos recursos para su utilización en un modelo de propagación de incendios forestales, prestando especial atención a la incorporación de elementos que puedan hacer función de cortafuegos, como por ejemplo carreteras, líneas de ferrocarril o los propios cortafuegos, e incluir estos en el modelo.
3. Realizar los desarrollos necesarios para que estos recursos puedan ser utilizados dentro de los modelos desarrollados.

En la primera etapa de este subproyecto, con el planteamiento de estos primeros tres objetivos se pretende adquirir los conocimientos necesarios para autoabastecer la demanda de información geográfica que pueda surgir durante las labores de investigación del grupo.

4. Generar bien una interfaz visual independiente o bien una extensión para algún sistema de información geográfica existente que nos permita extraer de forma automática todos los datos necesarios para la ejecución de nuestros modelos desde las diferentes cartografías disponibles vía Internet y que nos

---

<sup>4</sup> <http://www.tecnosylva.com/index.php/productos/desarrollos/wildfire-analyst>

<sup>5</sup> <http://www.tecnosylva.com/>

permita también visualizar los resultados de la simulación de un incendio forestal sobre un mapa base fácilmente entendible por el usuario.

5. En definitiva, se pretende crear una herramienta que permita realizar simulaciones de incendios forestales de forma rápida, sencilla e intuitiva por parte de los usuarios y que permita visualizar los resultados de las simulaciones.

### **4.1.2. Metodología a seguir**

La metodología a seguir para cumplir los anteriores objetivos será la siguiente:

1. Estudio del modelo a integrar en el GIS.
2. Estudio de los diferentes recursos de información geográfica disponibles en Internet.
3. Adaptación de los recursos de información geográfica según los datos necesarios en el modelo de simulación de incendios forestales.
4. Estudio de los diferentes GIS existentes y elección del GIS en el cual integraremos el simulador de incendios.
5. Estudio de la estructura del GIS elegido.
6. Desarrollo de una interfaz visual.
7. Pruebas, depuración y validación del trabajo realizado.

## **4.2. MODELO A INTEGRAR EN EL GIS**

El modelo elegido para la integración en el GIS ha sido un modelo físico simplificado para la propagación de incendios forestales,

concretamente el modelo presentado en el punto 2.4. *Modelo bidimensional*.

El motivo de la elección de este modelo frente al resto de modelos desarrollados en el grupo ha sido el de que este modelo es el que más tipos de datos de entrada requiere y el que más interacción con el usuario necesita.

Como ejemplo de lo anterior, el modelo de propagación de incendios forestales es el único que precisa de los datos correspondientes a la posición de los posibles cortafuegos y al modelo de combustibles en cada punto del terreno.

Además, aparte de extraer datos desde sus correspondientes fuentes y proporcionarlos al motor de simulación, este modelo requiere cierta interacción con el usuario de cara a establecer elementos esenciales a la hora de modelar el comportamiento del fuego, como puede ser por ejemplo un cortafuegos construido al efecto.

Dicho esto, queda claro que la integración del resto de modelos en una herramienta GIS sigue un procedimiento similar al empleado en el modelo de propagación de incendios, pero con algunas simplificaciones. En cualquier caso es un trabajo que se desarrollará en los próximos meses.

Por no ser tema de estudio en este momento, no se analizarán los detalles internos del modelo ya que para la integración se tratará como una caja negra que recibe unos datos de entrada y proporciona unos datos de salida.

No obstante si se comentará alguna modificación interna que ha sido necesaria para poder adaptar la información disponible a la requerida por el modelo. Estos cambios se verán en el punto 4.2.3. *Modificaciones realizadas sobre el modelo*.

### **4.2.1. Datos de entrada**

Dejando de lado los parámetros para la configuración del modelo y considerando únicamente los datos de entrada que contienen información georreferenciada, el conjunto de datos de entrada de este modelo está compuesto por:

1. Altura en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.
2. Fracción másica de combustible en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.



El significado de cada uno de los campos presentes en la cabecera de estos ficheros es el siguiente:

1. `ncols`: este campo hace referencia al número de columnas de la malla.
2. `nrows`: este campo hace referencia al número de filas de la malla.
3. `xllcorner`: este campo hace referencia a la coordenada horizontal del límite izquierdo de la malla. Estas coordenadas pueden indicarse en formato entero o en formato decimal, pero no en formato sexagesimal.
4. `yllcorner`: este campo hace referencia a la coordenada vertical del límite inferior de la malla.

De forma resumida, (`xllcorner`, `yllcorner`) son las coordenadas del vértice inferior izquierdo de la malla.

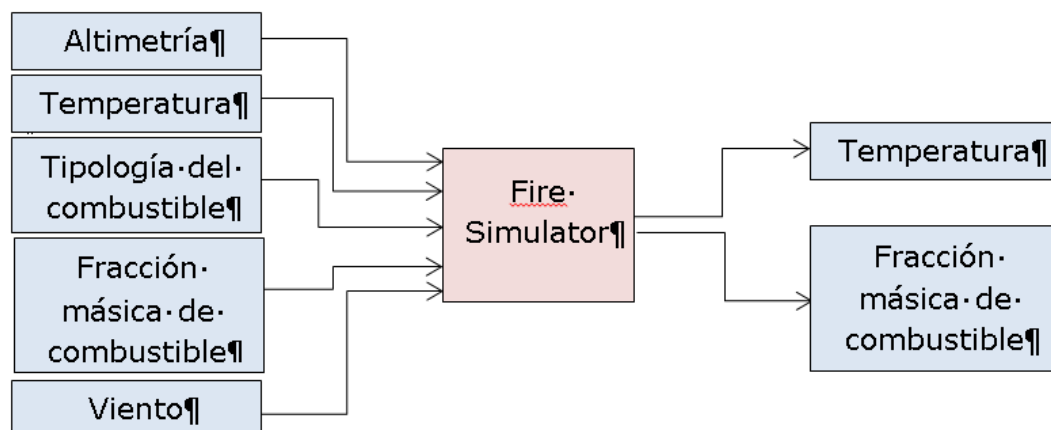
5. `cellsize`: este campo hace referencia a la resolución de la malla.
6. `nodata_value`: este campo hace referencia al valor que indica que no se dispone de información en el punto de la malla cuyo valor sea igual a `nodata_value`. El valor por defecto es `-9999`.
7. Valores en cada punto de la malla. En el ejemplo representado en la Figura 22 se representa la elevación del terreno en cada punto.

#### 4.2.2. Datos de salida

Como se vio en el punto 3.4.1. *Modelo bidimensional*, el conjunto de datos de salida de este modelo está compuesto por:

1. Fracción másica de combustible en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.
2. Temperatura del combustible sólido en cada punto de la malla, medida de forma cuantitativa.

Al igual que los datos de entrada, los datos de salida se proporcionan en el formato *ASCII GRID*.



**Figura 23:** Entrada y salida de datos en la *caja negra*

### 4.2.3. Modificaciones realizadas sobre el modelo

En este modelo se pueden incorporar las tácticas llevadas a cabo en la lucha contra el incendio en una situación real (por ejemplo la construcción de cortafuegos) mediante la modificación de los datos correspondientes a la tipología y a la fracción másica de combustible.

El problema surge cuando la presencia de estas tácticas está presente en la entrada del modelo en forma de modificación de la fracción másica del combustible, ya que estos elementos se trasladan a la salida pudiéndose interpretar la presencia de un cortafuegos (fracción másica de combustible igual a 0) como una zona quemada en la que se ha consumido todo el combustible.

Inicialmente se decidió representar únicamente la temperatura para evitar este problema, pero el resultado no era fácilmente entendible ya que solamente se podía representar la posición del frente del fuego en cada instante de tiempo, ignorando por completo el recorrido que pudiese haber seguido este.

Finalmente, para superar esta limitación y añadir la zona quemada a la representación ha sido necesaria la modificación de la salida de datos del modelo para eliminar la presencia de los cortafuegos en los datos de salida, eliminando así cualquier error de interpretación.

## 4.3. FUENTES DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZADAS

### 4.3.1. Identificación de las capas temáticas necesarias

En el punto 4.2.1. *Datos de entrada* se ha visto que el modelo de propagación de incendios forestales desarrollado por el grupo de trabajo SINUMCC requiere cinco tipos de datos de entrada georreferenciados. De estos cinco tipos:

1. El viento procede de otro modelo, pero por simplicidad lo consideraremos constante en toda la malla. Por tanto no será necesario buscar una fuente de información que contenga esta información.
2. La temperatura en cada punto de la malla será el dato de entrada que indique la ubicación del punto de ignición. El objetivo es crear esta capa de forma interactiva de forma que los focos del incendio se establezcan mediante un simple clic de ratón sobre el mapa base en el punto en el que se ubicará el foco, por lo que tampoco será necesario buscar una fuente de información que contenga estos datos.
3. La fracción másica de combustible indicará los puntos en los que hay o no combustible. En principio se parte de la idea de que existe combustible en toda la malla. Si queremos considerar aquellos elementos presentes en un entorno real que puedan hacer función de cortafuegos o bien no puedan quemarse (por ejemplo canchales, dunas, etc.), estos deberán representarse en esta capa como un punto en el que no hay combustible. Así esta capa debe contener aquellos elementos o zonas por los que no es posible que se propague el fuego. Estos datos provendrán de un mapa de usos de suelo.

A mayores también se pretende añadir de forma interactiva mediante un movimiento de ratón sobre el mapa base aquellos cortafuegos que desee agregar el usuario de acuerdo con el escenario real. Estos se añadirán a los datos provenientes del mapa de usos de suelo.

4. La tipología del combustible en cada punto de la malla (si es una zona de matorrales, pastos o monte por ejemplo). Estos datos provienen de un mapa de modelos de combustible.



5. La altimetría del terreno en cada punto de la malla. Estos datos proceden de un *Modelo Digital de Elevaciones* (MDE).

En cuanto a la cobertura de las capas temáticas, en una primera versión se pretende que se disponga de toda información necesaria para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal en cualquier punto del territorio de Castilla y León.

### 4.3.2. Marco de referencia

Una vez identificadas las diferentes capas de información que formarán parte de este proyecto, se definirá un marco de referencia común para todos los datos a utilizar. En caso de que alguna de las fuentes de información necesarias se haya creado utilizando un marco de referencia diferente, deberá transformarse de acuerdo al marco común.

#### **SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA**

Para todo el territorio de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, el Sistema de Referencia será el nuevo Sistema de Referencia Europeo (ERTS89) establecido reglamentariamente y constituido por (Junta de Castilla y León, 2008, 2009) (BOE, 2007):

Elipsoide GRS80 (~WGS84):

- $a$  (semieje mayor) = 6.378.137 metros
- $\alpha$  (aplanamiento) de 1: 298,257222101.

Orígenes de coordenadas geodésicas:

- Latitudes referidas al Ecuador y consideradas positivas al Norte.
- Longitudes referidas al Meridiano de Greenwich y consideradas positivas al Este y negativas al Oeste del mismo.

Las altitudes geodésicas de los vértices, obtenidas desde las nuevas líneas de Nivelación de Alta Precisión establecidas por el

Instituto Geográfico Nacional quedan referidas al nivel medio del mar definido por el mareógrafo fundamental de Alicante.

### **SISTEMA CARTOGRÁFICO DE REPRESENTACIÓN**

El sistema cartográfico de representación plana será la Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM - *Universal Transverse Mercator*) en el huso 30 ( $-6^{\circ}, -0^{\circ}$ ), que es el que corresponde a la mayoría del territorio de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.

Parte del territorio de la comunidad pertenece al huso 29, pero se utilizará el huso 30 ya que la cartografía correspondiente al huso 29 se entrega en el huso 30 (Junta de Castilla y León, 2009).

#### **4.3.3. Localización de las posibles fuentes de datos**

En el inicio de este proyecto se fijó como objetivo que la herramienta desarrollada utilizara fuentes de datos disponibles vía Internet mediante servicios OGC (*Open Geospatial Consortium*) como son:

1. Servicio de Mapas en la Web (WMS - *Web Map Service*): Este servicio permite la visualización de información geográfica de cualquier tipo, con independencia del servidor en el que se encuentren físicamente los datos, de su formato, de su sistema de referencia y de su proyección cartográfica.
2. Servicio de Fenómenos en Web (WFS - *Web Feature Service*): este servicio permite consultar fuentes de información geográfica de tipo vectorial. Además de permitir visualizar la información de este tipo, también permite acceder y consultar todos los atributos de un fenómeno (*feature*) geográfico representado en modo vectorial como es por ejemplo un río, una ciudad o un lago.
3. Servicio de Coberturas en Web (WCS - *Web Coverage Service*): es similar al WFS pero para datos ráster. Además de permitir visualizar la información ráster, también permite consultar el valor del atributo o atributos almacenados en cada píxel.

La idea de utilizar las fuentes de datos vía Internet estaba motivada principalmente para evitar la necesidad de fusionar las diferentes hojas cartográficas y de disponer de cartografía actualizada en todo momento. Sin embargo, a medida que se fue avanzando en el desarrollo de la herramienta y realizando las primeras pruebas, surgieron varios problemas que hicieron replantear la idea de descargar la cartografía necesaria en el equipo de trabajo:

1. Los tiempos de descarga de información desde Internet son excesivamente elevados. En el grupo de trabajo SINUMCC se lleva tiempo trabajando en reducir el tiempo de ejecución del motor de simulación de incendios forestales, y un retardo añadido no sería aceptable para el problema que se pretende resolver.
2. No se encontró ninguna fuente de información disponible mediante los anteriores servicios que proporcione información sobre la tipología de combustibles.

Si a esto le unimos el hallazgo de la cartografía autonómica buscada sin necesidad de fusionar las múltiples hojas, llegamos al punto en el que, salvo el mapa base, se decidió descargar y utilizar la cartografía almacenada en el disco duro del equipo de trabajo.

#### 4.3.4. Mapa base

El mapa base es el mapa que se utiliza en la visualización para que el usuario pueda situarse en él. Sobre este mapa se ubicarán los puntos de inicio del incendio y se construirán los diferentes cortafuegos. También se utilizará este mapa como soporte de los resultados de la simulación.

Entre las posibles localizaciones para estas fuentes de datos encontramos:

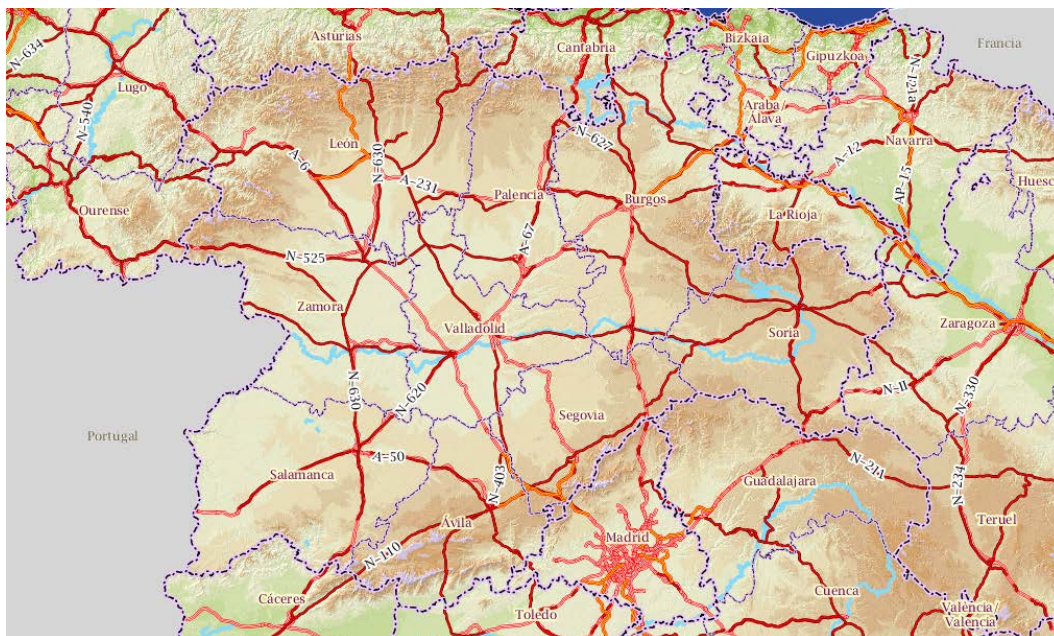
1. Mapa base de España proporcionado mediante un servicio WMS del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN):  
<http://www.ign.es/wms-inspire/ign-base>
2. Ortofoto proporcionada mediante un servicio WMS de la *Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León* (IDECyL):  
<http://www.idecyl.jcyl.es/IGCyL/services/PaisajeCubierta/Ortofoto/MapServer/WMSServer?>
3. Mapa Autonómico Histórico 2008: Este mapa ha sido descargado del *Centro de Descargas* del IGN, y procede del escaneado de un

mapa en papel conservado en la cartoteca del IGN. Este mapa utilizaba el sistema geodésico de referencia ED50, por lo que para su uso en el marco de referencia establecido ha sido necesaria su proyección en el sistema geodésico de referencia *ETRS89 UTM zona 30*.

Como se ha comentado en el punto anterior, se pretende tener todas las fuentes de datos descargadas en el equipo local. En este caso, el Mapa Autonómico Histórico hacía su función pero su aspecto no era demasiado agradable.

Dejando de lado su estética, después de asegurarme de que todos los mapas utilizaban el mismo sistema de proyección (el único que no era proporcionado en el sistema ETRS89 UTM zona 30 era precisamente este), en este mapa base había elementos como por ejemplo las carreteras que no estaban correctamente alineados con los datos disponibles en el SIOSE (de donde extraigo los cortafuegos). Esto hacía que los fuegos cruzasen las carreteras y se parasen en un punto donde aparentemente no había nada que impidiese la continuidad del fuego.

Por este motivo, se descartó la utilización de un mapa base almacenado en nuestro disco duro, y se optó por utilizar uno de los servicios WMS preseleccionados. En concreto se eligió el Mapa base de España del Instituto Geográfico Nacional debido a la fácil identificación de los diferentes elementos (carreteras, ferrocarril, etc.) sobre él.



**Figura 24:** Mapa base proporcionado por el servicio WMS del Instituto Geográfico Nacional



**Figura 25:** Mapa Autnómico Histrico de 2008 utilizado como mapa base

#### 4.3.5. Altimetría

Los datos correspondientes a la altimetría del terreno proceden de un Modelo Digital de Elevación. Entre las posibles localizaciones para estas fuentes de datos encontramos:

1. Servicio WCS del IDECyL: <http://www.idecyl.jcyl.es/IGCyL/services/MedioFisico/MDT/MapServer/WCS/Server?>

Los datos proporcionados por este servicio tienen una resolucin original de 15m x 15m.

2. Servicio WCS del *Instituto Tecnol3gico Agrario de Castilla y Le3n* (ITACyL): <http://cobertura.wcs.itacyl.es/>

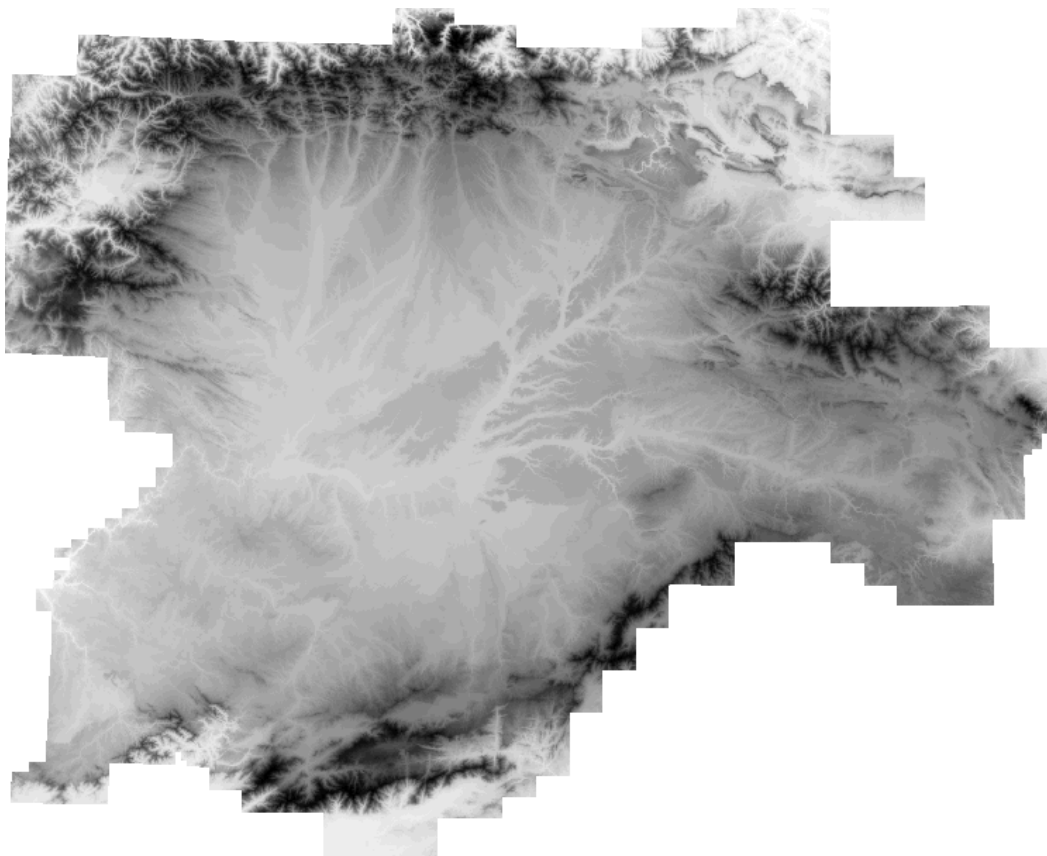
Los datos proporcionados por este servicio tienen una resolucin original de 5m x 5m.

3. Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles en el servidor FTP del ITACyL.

- a. MDE con resolución de 20x20m.
- b. MDE con resolución de 10x10m.

El Modelo Digital de Elevación elegido para nuestro proyecto es el modelo disponible en el servidor FTP del ITACyL con resolución de 10x10m.

De acuerdo con el Error Cuadrático Medio del mapa de usos de suelo, que es inferior a 5m ( $EMC < 5m$ ) (SIOSE, 2005), este ráster ha sido remuestreado para proporcionar los datos necesarios para el modelo de propagación de incendios forestales con una resolución de 5x5m.



**Figura 26:** Visualización del MDE 10x10 descargado del servidor FTP del ITACyL

### 4.3.6. Usos de suelo

Los datos correspondientes a los diferentes usos de suelo proceden del SIOSE (*Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España*). Estos datos son utilizados para extraer aquellos elementos que puedan hacer la función de cortafuegos, como pueden ser carreteras, líneas de ferrocarril, etc. Entre las posibles localizaciones para estas fuentes de datos encontramos:

1. Servicio WFS del ITACyL: <http://siose.wfs.itacyl.es?>
2. Mapa SIOSE: Este mapa es el mismo que el proporcionado vía servicio WFS anterior, y ha sido descargado del *Centro de Descargas* del IGN.

En este caso la elección es sencilla, ya que las dos fuentes de datos proporcionan el mismo recurso. Por tanto utilizamos el mapa SIOSE correspondiente a la Comunidad Autónoma de Castilla y León descargado del *Centro de Descargas* del IGN.

#### **ADAPTACIÓN**

El mapa de usos de suelo se utilizará para crear el mapa vectorial que contenga todos los elementos que o bien pueden hacer función de cortafuegos o bien no pueden considerarse como una zona con combustible que quemarse.

Para crear este mapa se han filtrado del SIOSE aquellos elementos que tienen función propia de cortafuegos (atributo *fc*) y aquellas coberturas que puedan servir como tal (terrenos sin vegetación, coberturas de agua, infraestructuras de transporte, etc.). Este filtrado está basado principalmente en las coberturas simples del SIOSE, debido la dificultad de interpretar los miles de tipos de usos compuestos presentes en esta fuente de datos. En cualquier caso la interpretación de las coberturas compuestas del SIOSE queda pendiente para trabajos futuros.

En concreto, para realizar este filtrado se ha utilizado la herramienta de selección de ArcGIS utilizando la siguiente secuencia SQL:

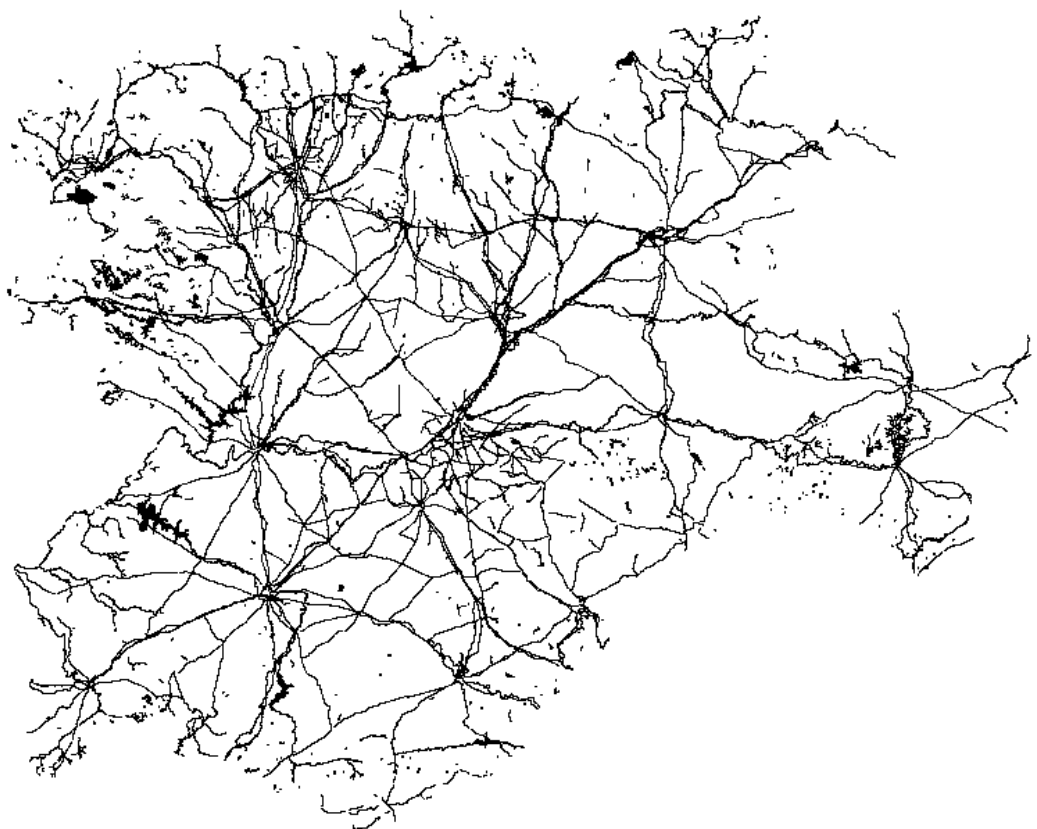
```
"SIOSE_CODE" LIKE '___fc' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'PDA' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'RMB' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'RQD' OR
```

```
"SIOSE_CODE" LIKE 'ACM' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'ARR' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'CLC' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'CCH' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'SDN' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'ZQM' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'GNP' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'LAA' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'VAP' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'ACU' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE '%ACU%' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'ALL' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'AEM' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'ALC' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'AES' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'AMO' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'NRV' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE '%NRV%' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'NRF' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE '%NRF%' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'NPO' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'NAP' OR  
"SIOSE_CODE" LIKE 'NCC'
```

con la que se han extraído los siguientes elementos: elementos con función propia de cortafuegos; playas, dunas y arenales; ramblas; roquedos; acantilados marinos; afloramientos rocosos y roquedos; coladas lávicas cuaternarias; canchales; suelos desnudos; zonas quemadas; glaciares y nieves permanentes; laminas de agua artificial; viales, aparcamientos y zonas peatonales sin vegetación; cursos de agua; lagos y lagunas; embalses; lagunas costeras; estuarios; mares y océanos; red viaria; red ferroviaria; portuario y conducciones y canales (EquipoControl de Calidad - Tragsatec, 2007).

El mapa de cortafuegos generado se puede ver en la siguiente figura:





**Figura 27:** Mapa de cortafuegos creado a partir del SIOSE

#### **4.3.7. Tipología de combustibles**

Esta fue la fuente de información que más dificultades planteó. El primer problema surgió por el desconocimiento preciso de los datos que habían sido utilizados en las labores de investigación hasta el inicio de este proyecto.

Hasta entonces, la tipología del combustible había sido proporcionada de forma externa y se había ajustado el modelo de propagación de incendios de acuerdo a los datos suministrados, pero se desconocía su origen. Se trataba de una fuente de datos de 10 tipos de combustible clasificada según la masa de combustible presente por unidad de área.

Tras una revisión de las posibles fuentes de información forestal encontradas, ninguna coincidía con la clasificación utilizada hasta el momento:

1. SIOSE: clasifica las diferentes parcelas en función del tipo de uso que se les dé. Teniendo en cuenta las coberturas compuestas tenemos miles de tipos de combustible, y por tanto se requiere una clasificación que no sería objetiva. No es la fuente de datos que buscamos.
2. MFE50 (*Mapa Forestal Español 1:50.000*): clasifica las diferentes parcelas en función del porcentaje de suelo cubierto por la vegetación o, dicho de otro modo, el porcentaje de suelo visto desde el aire. Esta clasificación podría ser válida para nuestro modelo, pero volvemos al mismo problema de que es necesaria una reclasificación que no sería objetiva.

Ante el primer acercamiento a estos dos recursos, decido descartar el uso del SIOSE y seguir investigando sobre el MFE. De este modo llegamos a la base de datos del *Tercer Inventario Forestal Nacional* (IFN3) construida sobre la cartografía del MFE50.

Analizando la base de datos IFN3 encontramos un gran hallazgo para lo que será este trabajo. Esta base de datos contiene un campo llamado *ModComb* que contiene la tipología de combustible de cada parcela siguiendo la clasificación de Rothermel (ver Figura 28) (Tracsatec, 2007).

En 1972 Rothermel estableció 13 modelos de combustibles forestales que responden a la mayoría de las situaciones en Estados Unidos. Estos modelos standard son aplicables a España y el ICONA ha desarrollado una clave fotográfica para permitir su clara identificación en nuestros montes. Estos modelos se distribuyen en cuatro grupos: *pastos, matorral, hojarasca bajo arbolado y restos de operaciones selvícolas* (Blanco, et al., 2007).

No es la clasificación que buscaba, pero debido a que se trata de una clasificación internacionalmente aceptada y tras la consulta sobre su posible adaptación al modelo de propagación de incendios forestales, decidí quedarme con ella.

El siguiente paso sería trasladar la información del IFN3 al MFE50, pero en su lugar seguí el estudio sobre los diferentes recursos cartográficos disponibles en Internet y llegué al MFE25 (*Mapa Forestal Español 1:25.000*).

Analizando el modelo de datos del MFE25, veo que también contiene el campo referente a la tipología de combustible *ModComb*, por lo que decido usar esta cartografía. Un nuevo inconveniente surge al ver que este mapa se encuentra aún en fase de elaboración habiéndose culminado su realización en la zona norte de la península, aunque los resultados aún no han sido publicados.

Ante este inconveniente se decidió contactar con *Ignacio Juárez Relaño* y *Esther Lobo Cortés* de la Sección de Protección de la

Naturaleza del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Salamanca para evaluar la posibilidad de proporcionarnos alguna muestra esta cartografía.

Tras explicar lo que se necesitaba, no fue posible conseguir una muestra del MFE25, pero si nos proporcionaron el *Mapa de Modelos de Combustibles Rothermel de Castilla y León*. Se trata de un mapa vectorial que utiliza la distribución parcelaria del MFE y que incorpora el campo *ModComb* indicando el tipo de combustible en cada parcela siguiendo la distribución de Rothermel (Tracsatec, 2013). Este mapa será el finalmente utilizado para obtener la tipología de combustibles.

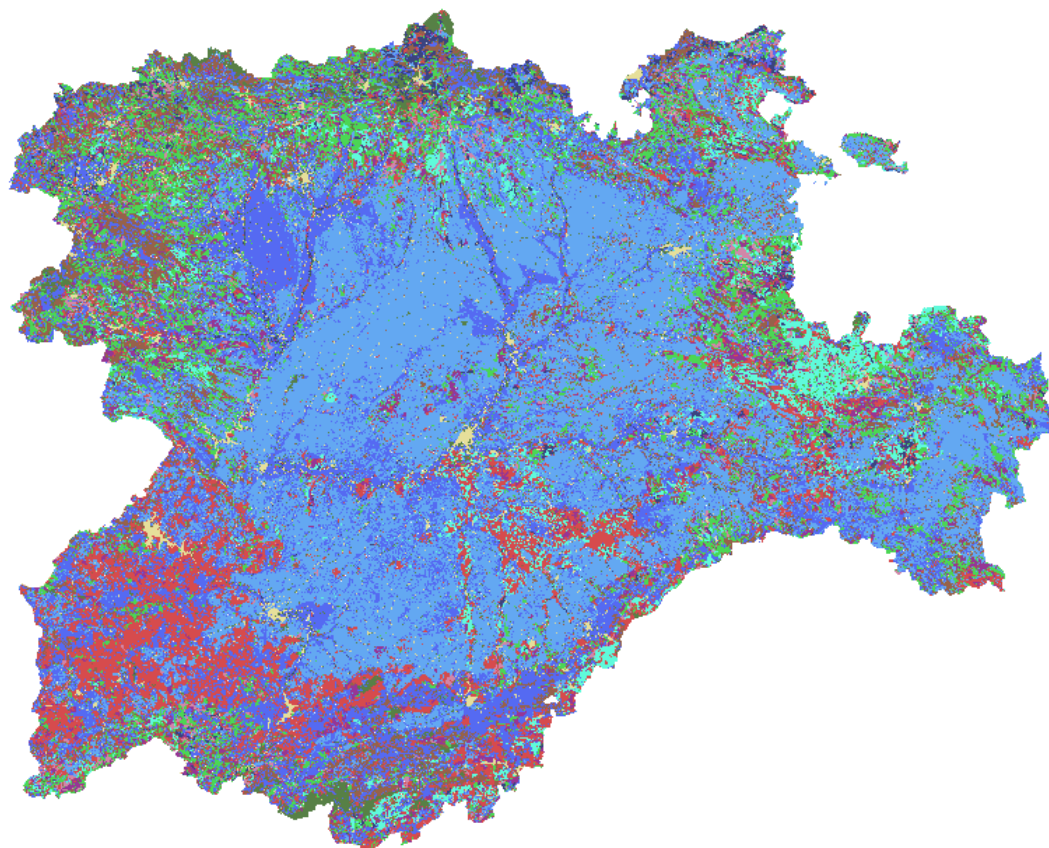
En la Figura 28 se muestra la tabla descriptiva de los modelos de combustible de Rothermel. El mapa proporcionado incluye todos los tipos a excepción de los correspondientes a los restos de cortas (tipos 11, 12 y 13), que no se tienen en cuenta por considerar que tienen un carácter temporal y se carece de datos suficientes para identificarlos.

A mayores, el campo *ModComb* puede tomar los valores 777 y 999 que, aunque no están documentados, la identificación mediante ortofotos indica que estos valores hacen referencia a infraestructuras y construcciones artificiales. De momento, las zonas donde se da este tipo de combustible serán consideradas zonas sin combustible.

En la Figura 29 se representa el *Mapa de Modelos de Combustibles Rothermel de Castilla y León*. Para facilitar su interpretación se ha utilizado un color diferente para cada parcela de acuerdo al tipo de combustible que presente.

MODELOS DE COMBUSTIBLE		
GRUPO	MODELO	DESCRIPCION
Pastos	1	Pasto fino seco y bajo, que recubre completamente el suelo. El matorral o el arbolado cubren menos de 1/3 de la superficie. El fuego se propaga rápidamente por el pasto seco.
	2	Pastizal con presencia de matorral o arbolado claro que cubren entre 1/3 y 2/3 de la superficie. El combustible está formado por el pasto seco, la hojarasca y ramillas caídas de la vegetación leñosa. El fuego corre rápidamente por el pasto seco.
	3	Pastizal espeso y alto ( $\geq 1$ m.). Es el modelo típico de las sabanas. Los campos de cereales son representativos de este modelo. Los incendios son los más rápidos y de mayor intensidad.
Matorral	4	Matorral o arbolado muy denso de unos 2 m. de altura. Continuidad horizontal y vertical del combustible. Abundancia de combustible leñoso muerto (ramas) sobre plantas vivas. El fuego se propaga rápidamente sobre las copas del matorral con gran intensidad y llamas grandes. La humedad del combustible vivo tiene gran influencia en el comportamiento del fuego.
	5	Matorral denso pero bajo, de altura no superior a 0,6 m. Cargas ligeras de hojarasca del mismo matorral, que contribuye a propagar el fuego con vientos flojos. Fuegos de intensidad moderada.
	6	Matorral más viejo que en el modelo 5, con alturas entre 0,6 y 1,2 m. Los combustibles vivos son más escasos y dispersos. El conjunto es más inflamable que el modelo 5. El fuego se propaga a través del matorral con vientos de moderados a fuertes.
	7	Matorral inflamable de 0,6 a 2,0 m de altura que propaga el fuego bajo el arbolado. El incendio se desarrolla con contenidos más altos en humedad del combustible muerto que en los otros modelos debido a la naturaleza más inflamable de los combustibles vivos.
Hojarasca bajo arbolado	8	Hojarasca en bosque denso de coníferas ó frondosas, La hojarasca forma una capa compacta al estar formada por acículas cortas (5 cm o menos) o por hojas planas no muy grandes. Los fuegos son de poca intensidad, con llamas cortas y velocidades de avance bajas. Solamente en condiciones meteorológicas desfavorables (altas temperaturas, bajas humedades relativas y vientos fuertes) este modelo puede volverse peligroso.
	9	Hojarasca en bosque denso de coníferas ó frondosas, que se diferencia del modelo 8 en que forma una capa esponjada poco compacta, con mucho aire interpuesto. Está formada por acículas largas, como en masas de <i>Pinus pinaster</i> , o por hojas grandes y rizadas como las de <i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Castanea sativa</i> , etc. Los fuegos son más rápidos y con llamas más largas que en el modelo 8.
	10	Restos leñosos originados naturalmente, incluyendo leña gruesa caída como consecuencia de vendavales, plagas intensas, o excesiva madurez de la masa, con presencia de vegetación herbácea y matorral que crece entre los restos leñosos.
Restos de corta y operaciones selvícolas	11	Restos ligeros ( $\varnothing < 7,5$ cm.) recientes, de tratamientos selvícolas o de aprovechamientos, formando una capa poco compacta de escasa altura (alrededor de 30 cm.). La hojarasca y el matorral presentes ayudarán a la propagación del fuego. Los incendios tendrán intensidades altas y pueden generar pavesas.
	12	Restos más pesados que en el modelo 11, formando una capa continua de mayor altura (hasta 60 cm.). Más de la mitad de las hojas están aún adheridas a las ramas sin haberse secado completamente. No hay combustibles vivos que influyan en el fuego. Los incendios tendrán intensidades altas y pueden generar pavesas.
	13	Grandes acumulaciones de restos gruesos ( $\varnothing < 7,5$ cm) y pesados, cubriendo todo el suelo.

Figura 28: Entrada y salida de datos en la caja negra



**Figura 29:** Mapa de combustibles

## 4.4. ELECCIÓN DEL SOFTWARE GIS

Al inicio de este proyecto (antes de cursar la asignatura *Gestión de la Información Espacial*) no poseía conocimientos sobre ningún Sistema de Información Geográfica. De esta manera no tenía predilección por ningún cliente y solamente traté de investigar para saber cuáles eran las herramientas más usadas y con más facilidades de extensión.

Tras una primera etapa preseleccioné tres herramientas GIS:

1. *ArcGIS de ESRI*: este GIS fue inicialmente descartado por tratarse de una versión de pago, necesitándose las correspondientes licencias para su uso. Otra desventaja de este

software es que está disponible únicamente para en sistema operativo Windows.

2. *GRASS*: una opción libre, de código abierto y multiplataforma.
3. *gvSIG (Generalitat Valenciana Sistema de Información Geográfica)*: otra opción libre, de código abierto y multiplataforma. Además, este software es de desarrollo español con mucha documentación en nuestro idioma y, por si fuera poco, durante la etapa inicial de documentación comprobé como muchas administraciones han desarrollado extensiones para esta herramienta de acuerdo a sus necesidades. Por ejemplo, en la misma línea que este trabajo, la Junta de Castilla y León ha desarrollado un módulo de incendios para gvSIG<sup>6</sup>. Con todos estos puntos a su favor, estaba claro que gvSIG tenía que ser la opción escogida.

Tras la elección de gvSIG comencé a trabajar en el proyecto surgiendo los primeros problemas. El primer inconveniente surgió debido a que este software está desarrollado utilizando el lenguaje de programación Java, provocando esto una lentitud considerable en el manejo de la herramienta. A mayores, sufrí bastantes problemas de ejecución incluso en una instalación limpia (que más tarde descubrí que solo se daban en las versiones de 64 bits). Estos contratiempos con esta herramienta me llevaron a reconsiderar mi elección sobre el GIS a utilizar.

Tras ver las múltiples posibilidades de extensión de las que dispone el software ArcGIS de ESRI, habiendo estudiado algunas de ellas durante el desarrollo de la asignatura *Herramientas Informáticas para el Geoprocesado*, y haber probado la ejecución del programa de forma más o menos fiable, decidí que sería el nuevo GIS a utilizar.

---

6

<http://www.cartografia.jcyl.es/web/jcyl/Cartografia/es/Plantilla66y33/1236756171520>  
[///](#)

## 4.5. ESTUDIO DEL GIS Y DESARROLLO DE LA INTERFAZ VISUAL

### 4.5.1. Estudio previo

El primer punto en la integración en ArcGIS del modelo de propagación de incendios forestales desarrollado en el grupo de investigación SINUMCC fue la realización de forma manual de todas las transformaciones necesarias sobre los datos geográficos descargados para poder proveer al modelo con los datos necesarios: los ficheros en formato *ASCII GRID de ArcInfo* identificados en el punto 4.2.1. *Datos de entrada*.

Entre las tareas llevadas a cabo sobre los datos geográficos descargados para su adaptación al simulador de incendios podemos citar:

1. Delimitación de la zona de interés, mediante el recorte de las diferentes capas de datos.
2. Conversión a ráster en el caso de que los datos sean de tipo vectorial. Aquí surgió el problema de que los rústeres resultantes tuviesen el mismo tamaño que la zona de interés, ya que ArcGIS transforma el recorte vectorial de forma que el ráster sea lo más pequeño posible. Para solucionar este inconveniente, se utilizó un *snap ráster*<sup>7</sup>. Mediante esta solución, también se superaron los problemas referentes a la alineación de los diferentes rústeres de salida.
3. Operaciones de tipo lógico con los rústeres para, por ejemplo, crear la capa de correspondiente a la fracción másica de combustible que contenga la información referente a los cortafuegos.
4. Transformación del formato ráster al formato *ASCII GRID de ArcInfo*.

---

<sup>7</sup> El *snap ráster* es un ráster que se toma como referencia por todas las herramientas de ArcGIS que proporcionan rústeres a su salida. Por ejemplo, se toma la alineación, la extensión, etc. del ráster tomado como referencia.

Una vez comprobada la posibilidad de obtener los datos necesarios para ejecutar el modelo de incendios, se lanzó el modelo para comprobar el correcto funcionamiento con los datos extraídos, y se representaron los resultados obtenidos de la simulación sobre el mapa base.

Tras este estudio previo, quedaba probado que era posible la integración en ArcGIS de nuestro modelo. Ahora solo queda automatizar el proceso.

#### **4.5.2. Desarrollo de la interfaz visual**

La primera aproximación para automatizar la adquisición y adaptación de datos fue emplear la herramienta *Model Builder* de ArcGIS.

Tras el estudio del funcionamiento de este constructor de modelos y las pruebas realizadas, fue posible automatizar la adquisición de datos de cada fuente de información de forma individual, pero al intentar montar la herramienta final surgieron una serie de limitaciones que me llevó a descartar todo el trabajo realizado hasta el momento y comenzar desde el principio empleando otra metodología:

1. Los rásteres proporcionados desde las diferentes salidas de datos no estaban alineados.
2. Dificultad de definir el área de interés de forma transparente al usuario.
3. Dificultad de definir los puntos de ignición sobre el mapa base de forma intuitiva para el usuario. El objetivo inicial era que fuera posible crear una capa vectorial con los puntos que constituirían los focos del incendio mediante un simple clic de ratón.
4. Dificultad de definir los posibles cortafuegos creados en la lucha contra el incendio, y no contemplados en el SIOSE, sobre el mapa base de forma intuitiva para el usuario. El objetivo inicial era establecer estos cortafuegos de forma que con un clic de ratón comience la edición de una capa vectorial lineal, en la que se almacenaran los cortafuegos al hacer doble clic con el ratón después de haber establecido el alcance del cortafuegos.

Tras ver las dificultades surgidas a la hora de implementar la herramienta, se decidió analizar otras posibilidades de extensión disponibles para ArcGIS. Así llegué a la opción utilizada finalmente: el



uso del asistente *ArcGIS Python Add-In Wizard* para generar la interfaz que manejará el usuario (botones, menús, etc.) y la librería ArcPy para implementar las operaciones llevadas a cabo al pulsar cada botón. Además, la posibilidad de exportar al lenguaje de programación Python los modelos desarrollados en *Model Builder* fue de gran ayuda a la hora de identificar los métodos Python que realizan cada función del geoprocesado de datos.

Con el uso del lenguaje de programación Python y la librería ArcPy gané gran flexibilidad a la hora de manejar los datos geográficos. Además se logró superar todas las limitaciones surgidas con el uso de Model Builder y construir una herramienta muchísimo más interactiva y fácil de usar, logrando cumplir todas las especificaciones marcadas inicialmente.

El código implementado y las instrucciones para su instalación y ejecución pueden verse en el *Apéndice II: Código desarrollado para la integración en ArcGIS*.

### **4.5.3. Depuración y validación del resultado**

Tras el desarrollo, se han realizado una serie de pruebas con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento de la herramienta en los diferentes casos de uso, habiéndose realizado las correcciones oportunas según ha sido necesario.

En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de los resultados de una simulación de un incendio forestal en el *Puerto del Pico (Ávila)*. En este ejemplo se ha tomado un viento constante en dirección suroeste. El fuego se ha originado a partir de dos focos. Se ha introducido un cortafuegos para detener el fuego.

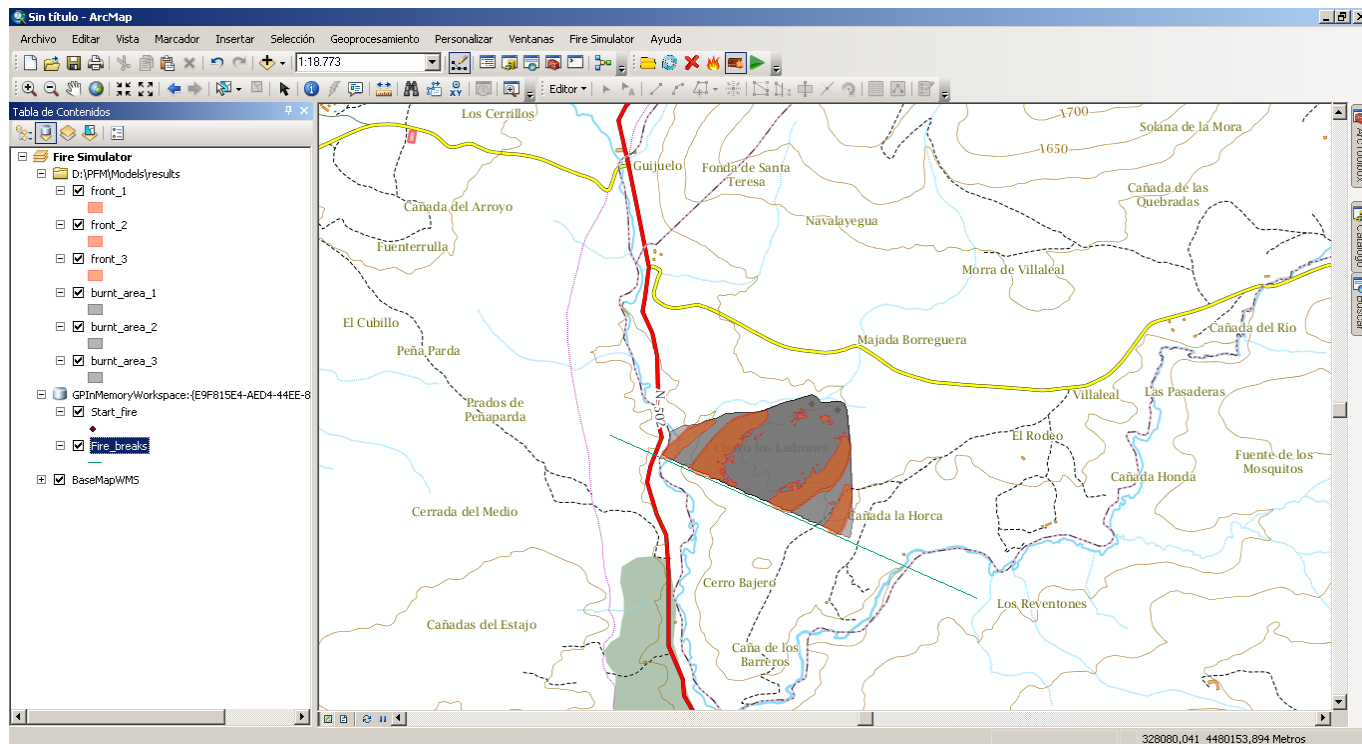


Figura 30: Ejemplo de simulación realizada con la integración en GIS llevada a cabo en este trabajo

En el fichero comprimido Ejemplos.zip del DVD entregado se pueden ver videos de otros ejemplos de simulaciones.

# **CAPÍTULO 5:**

## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS**

### **5.1. CONCLUSIONES**

En este punto se ven algunas de las conclusiones obtenidas tras la finalización del presente proyecto, así como las aportaciones personales al mismo.

#### **5.1.1. Conclusiones sobre las técnicas de asimilación de datos**

Durante el desarrollo de este proyecto se han estudiado las diferentes técnicas de asimilación de datos para incorporar datos experimentales en las modelizaciones matemáticas de un proceso.

En particular, el trabajo se ha enfocado al empleo de estas técnicas como un medio para llevar a cabo la estimación de los parámetros de un determinado modelo a partir de las medidas experimentales.

Tras su estudio a nivel teórico, se ha implementado en el lenguaje de programación C++ el procedimiento a seguir para estimar los parámetros de un modelo de propagación de fuego unidimensional adimensionalizado para comprobar el funcionamiento y ver las limitaciones del procedimiento de asimilación de datos con esta finalidad.

Se ha experimentado con la implementación realizada para comprobar la necesidad de cumplir todas las condiciones requeridas en el marco teórico de la asimilación de datos.

En concreto, se analizó con especial interés la condición de partir de una estimación aproximada del valor de los parámetros con la idea de extender el problema a un caso en el que no sea posible obtener dicha estimación. Los resultados indican que es posible suavizar esta condición a cambio de tomar muestras con mayor frecuencia, lo que no supone ningún problema en un proceso de calibración debido a que no es necesario llevar a cabo el procesamiento de los datos experimentales en tiempo real.

### **5.1.2. Conclusiones sobre la integración en GIS**

A lo largo de la realización del segundo subproyecto de este trabajo se han estudiado los diferentes recursos de información geográfica disponibles en Internet para su libre uso y como se pueden aprovechar estos para obtener los datos necesarios para resolver un problema complejo como es la simulación de un incendio forestal.

También se ha trabajado con herramientas para automatizar el procesado de la información geográfica, y se ha hecho uso de estas herramientas para resolver un problema concreto.

Como último punto, se han estudiado y probado diferentes opciones para extender la funcionalidad de un cliente GIS pesado como es ArcGIS.

Combinando estos tres puntos, tras el desarrollo de este proyecto se ha obtenido una herramienta capaz de realizar simulaciones de incendios forestales de forma rápida, sencilla e intuitiva.

### **5.1.3. Aportaciones personales**

La realización de este proyecto me ha aportado valiosos conocimientos. Además, el desarrollo del mismo ha sido de gran satisfacción personal al poder contribuir, dando respuesta a algunas de las cuestiones abiertas dentro del grupo de investigación SINUMCC, a

la conservación de nuestros bosques mediante su protección frente a los incendios forestales.

## 5.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

En este apartado se comentan algunas de las posibles líneas de investigación futuras que han surgido tras el desarrollo de este proyecto.

A pesar de que los objetivos iniciales han sido alcanzados con éxito, la lista de trabajos futuros puede llegar a ser infinita, por lo que solo comentaremos algunas de las tareas cuya realización puede ser interesante.

Es importante destacar que tanto el proceso de asimilación de datos como la integración en GIS realizada es prácticamente independiente del modelo seleccionado. En este sentido la extensión a otro tipo de modelos es prácticamente directa.

Por ejemplo, respecto al ajuste de parámetros, el hecho de comenzar a utilizar una tipología de combustibles distinta a la utilizada inicialmente hace que sea necesario un nuevo ajuste de los parámetros asociados a cada uno de los tipos de combustible de Rothermel. Este puede ser un problema a abordar mediante asimilación de datos.

Por simplicidad, en este trabajo solo se ha integrado en ArcGIS el modelo de propagación de incendios forestales. Para facilitar las labores de investigación y dar visibilidad al trabajo desarrollado por el grupo, la integración del resto de modelos en este entorno puede ser muy beneficiosa.

En el desarrollo de este proyecto también ha quedado pendiente el estudio pormenorizado de algunas de las fuentes de información geográfica disponibles. Por ejemplo, puede ser interesante la interpretación de las coberturas compuestas del mapa de usos de suelo para, al pasar al simulador unos datos más realistas, obtener unos resultados de mayor calidad.

En la integración en ArcGIS realizada, la cobertura de la cartografía utilizada está limitada al territorio de la Comunidad

Autonómica de Castilla y León, por lo que otra de las posibles líneas de trabajo puede ser la localización del conjunto de recursos cartográficos que abarquen una cobertura mayor.

Las especificaciones definidas para el trabajo de integración en GIS iniciales únicamente recogían como situación de partida el uso de focos puntuales de forma simultánea. Parece razonable poder establecer los diferentes focos con un desfase temporal, de forma que se pueda interpretar que no han comenzado los dos a la vez.

En la misma línea que la propuesta anterior, también se plantea la posibilidad de establecer un estado inicial para la simulación distinto a un foco puntual. Esto puede entenderse como la capacidad de simular la evolución de un incendio partiendo de etapas intermedias.

# APÉNDICE I:

## PROGRAMAS DESARROLLADOS PARA LA ASIMILACIÓN DE DATOS

En este primer apéndice se recoge una explicación sobre los programas desarrollados con la finalidad de experimentar y validar los resultados teóricos estudiados en el *Capítulo 3: Asimilación de datos*.

La estructura de este apéndice es la siguiente:

1. Primero se indican las instrucciones necesarias para compilar y ejecutar el código desarrollado. Para evitar duplicidades en el contenido, solamente se indican las instrucciones a seguir para el primer ejemplo, en el que se usa la asimilación de datos con la finalidad de corregir la predicción obtenida por el modelo. Para el caso de la estimación de parámetros, solamente hay que sustituir la palabra *DataAssimilation* por la palabra *ParamAdjustment* para obtener las instrucciones correspondientes.
2. A continuación se analiza la estructura del código desarrollado, tanto para el ejemplo en el que se pretende corregir la predicción de un estado como para el caso de la estimación de parámetros.

## I.1. COMPILACIÓN Y EJECUCIÓN DEL CÓDIGO DESARROLLADO

### I.1.1. Requerimientos

- CMake versión 2.8 o superior. Disponible en <http://www.cmake.org/cmake/resources/software.html>
- Compilador de C++. Durante este trabajo se ha utilizado el compilador de GNU en su versión 4.6. Puede utilizarse MinGW (*Minimalist GNU for Windows*) en Windows. Está disponible en: <http://www.mingw.org>
- Librería matemática de algebra lineal *CLAPACK*. Se proporciona ya compilada para sistemas Linux x86\_64. Se puede descargar el código fuente para su compilación en otros sistemas en el siguiente enlace: <http://www.netlib.org/clapack/>
- *MatLab Compiler Runtime*. Disponible en la página Web de *Mathworks* en el siguiente enlace: <http://www.mathworks.es/products/compiler/mcr/index.html>

### I.1.2. Compilación en sistemas UNIX (Linux, OSX)

Instrucciones detalladas para compilar el proyecto *DataAssimilation* utilizando la terminal. El procedimiento a seguir para compilar el proyecto *ParamAdjustment* es exactamente igual. Solamente hay que sustituir la palabra *DataAssimilation* por la palabra *ParamAdjustment* para obtener las instrucciones correspondientes.

1. Editar el fichero `CMakeList.txt` (ubicado en la carpeta `DataAssimilation/src`) para proporcionar la ubicación de la librería *CLAPACK* en caso de que sea necesario. Esta se indicará utilizando la instrucción `LINK_DIRECTORIES(directorio_contenedor_librería)`.

```
cd DataAssimilation/src
```



```
vi CMakeLists.txt
```

En este fichero también se pueden modificar otros parámetros de configuración, de los cuales se enumeran a continuación los más destacados:

- a. Tipo de ejecutable creado (*CMAKE\_BUILD\_TYPE*). Los posibles valores para esta variable son: *Debug Release RelWithDebInfo* y *MinSizeRel*.

Por ejemplo: *CMAKE\_BUILD\_TYPE "Release"* para generar un programa con todas las optimizaciones de compilación posibles.

- b. Paralelismo (*USE\_OPENMP*). Posibilidad de crear un ejecutable que utilice todos los núcleos de procesamiento disponibles en el ordenador para reducir el tiempo de ejecución. Los posibles valores para esta variable son: *True* y *False*.

Por ejemplo: *USE\_OPENMP "True"* para utilizar todos los núcleos disponibles en el procesador de nuestro equipo.

- c. Tipo de linkado de librerías (*BUILD\_SHARED\_LIBS*). Permite crear un programa ejecutable que incorpore o no las librerías necesarias, según se utilice un linkado estático o dinámico. Los posibles valores para esta variable son: *True* y *False*.

Por ejemplo: *BUILD\_SHARED\_LIBS "False"* para utilizar un linkado estático de forma que el ejecutable final incorpore todas las librerías utilizadas en el programa.

- d. Carpeta de datos de entrada por defecto (*DATA\_PATH*): ubicación donde el programa buscará los ficheros que contienen los datos de configuración o los datos iniciales. El nombre de este directorio se almacenará en la variable *DATA\_PATH*.

- e. Carpeta de resultados por defecto (*OUTPUT\_PATH*): ubicación donde se almacenarán los diferentes ficheros de salida, ya sean ficheros de resultados o registros *log*. El nombre de este directorio se almacenará en la variable *OUTPUT\_PATH*.

## 2. Crear un directorio para la compilación del proyecto:

```
cd ..  
mkdir build  
cd build
```

3. Crear el Makefile utilizando CMake:

```
cmake ../src
```

4. Compilar el proyecto:

```
make
```

Estos pasos se podrían haber realizado simultáneamente ejecutando el script `compilar_DataAssimilation`:

```
cd DataAssimilation  
./compilar_DataAssimilation
```

5. Ejecutar el programa:

```
./DataAssimilation
```

### I.1.3. Compilación en Windows

Instrucciones detalladas para compilar el proyecto *DataAssimilation* bajo el sistema operativo Windows. El procedimiento a seguir para compilar el proyecto *ParamAdjustment* es exactamente igual. Solamente hay que sustituir la palabra *DataAssimilation* por la palabra *ParamAdjustment* para obtener las instrucciones correspondientes.

1. Editar el fichero `CMakeList.txt` (ubicado en la carpeta `DataAssimilation/src`) para proporcionar la ubicación de la librería *CLAPACK*. Esta se indica utilizando la instrucción `LINK_DIRECTORIES(directorio_contenedor_librería)`.

En este fichero también se pueden modificar otros parámetros de configuración, de los cuales se enumeran a continuación los más destacados:

- a. Tipo de ejecutable creado (`CMAKE_BUILD_TYPE`). Los posibles valores para esta variable son: *Debug Release RelWithDebInfo* y *MinSizeRel*.

Por ejemplo: `CMAKE_BUILD_TYPE "Release"` para generar un programa con todas las optimizaciones de compilación posibles.

- b. Paralelismo (`USE_OPENMP`). Posibilidad de crear un ejecutable que utilice todos los núcleos de procesamiento disponibles en el ordenador para reducir

el tiempo de ejecución. Los posibles valores para esta variable son: *True* y *False*.

Por ejemplo: *USE\_OPENMP "True"* para utilizar todos los núcleos disponibles en el procesador de nuestro equipo.

- c. Tipo de linkado de librerías (*BUILD\_SHARED\_LIBS*). Permite crear un programa ejecutable que incorpore o no las librerías necesarias, según se utilice un linkado estático o dinámico. Los posibles valores para esta variable son: *True* y *False*.

Por ejemplo: *BUILD\_SHARED\_LIBS "False"* para utilizar un linkado estático de forma que el ejecutable final incorpore todas las librerías utilizadas en el programa.

- d. Carpeta de datos de entrada por defecto (*DATA\_PATH*): ubicación donde el programa buscará los ficheros que contienen los datos de configuración o los datos iniciales. El nombre de este directorio se almacenará en la variable *DATA\_PATH*.
- e. Carpeta de resultados por defecto (*OUTPUT\_PATH*): ubicación donde se almacenarán los diferentes ficheros de salida, ya sean ficheros de resultados o registros *log*. El nombre de este directorio se almacenará en la variable *OUTPUT\_PATH*.

2. Crear un directorio para la compilación del proyecto.
3. Utilizar CMake para generar el proyecto que podremos abrir con cualquier entorno de desarrollo (p.e. Microsoft Visual Studio).
4. Abrir el proyecto creado en el paso anterior y compilarlo.
5. Ejecutar el programa.

### **I.1.4. Configuración de la simulación**

Los diferentes parámetros para la simulación del proceso de asimilación de datos se encuentran en el fichero *parametros.asc* (ubicado en las carpetas *DataAssimilation/datos* y *ParamAdjustment/datos*). El significado de los diferentes parámetros se enumera a continuación.

1. *beta*: tasa de combustión en el modelo unidimensional.

2.  $\lambda$ : término de pérdidas de calor en el modelo unidimensional.
3.  $v$ : velocidad del viento en el modelo unidimensional.
4.  $dt$ : paso de tiempo en el modelo unidimensional.
5.  $numnp$ : número de nodos utilizados para el cálculo en el modelo unidimensional.
6.  $imax$ : número de pasos de tiempo entre asimilaciones.
7.  $num\_sim$ : número de simulaciones o estados que formarán el conjunto de estados para la asimilación de datos.
8.  $num\_asim$ : número de asimilaciones que se realizarán en la simulación.
9.  $obs\_rate$ : tasa de muestreo a la hora de tomar observaciones. Las mediciones se realizarán cada  $obs\_rate$  nodos.
10.  $L$ : longitud del dominio.
11.  $\sigma$ : desviación tipo de la función gaussiana que constituirá la condición inicial.
12.  $x_0$ : media de la función gaussiana que constituirá la condición inicial.
13.  $var\_obs\_temp$ : varianza de las observaciones tomadas de temperatura.
14.  $var\_obs\_fuel$ : varianza de las observaciones tomadas de combustible.
15.  $var\_sigma$ : varianza de la desviación tipo de la función gaussiana que constituirá la condición inicial. Este parámetro únicamente está presente en el caso del uso de la asimilación de datos para corregir las predicciones, y se utiliza para generar el conjunto de estados que sirven de condición inicial en cada uno de los elementos del conjunto.
16.  $var\_x_0$ : varianza de la media de la función gaussiana que constituirá la condición inicial. Este parámetro únicamente está presente en el caso del uso de la asimilación de datos para corregir las predicciones, y se utiliza para generar el conjunto de estados que sirven de condición inicial en cada uno de los elementos del conjunto.
17.  $var\_beta$ : varianza del parámetro beta utilizada para generar el conjunto de estados iniciales. Este parámetro únicamente está

presente en el caso del uso de la asimilación de datos para la identificación de parámetros.

18. *var\_lambda*: varianza del parámetro lambda utilizada para generar el conjunto de estados iniciales. Este parámetro únicamente está presente en el caso del uso de la asimilación de datos para la identificación de parámetros.
19. *rand\_sist*: generador de números aleatorios: "0 *versión estándar*" o "1 *versión polar*"

## I.2. ESTRUCTURA DEL CÓDIGO DESARROLLADO

En este punto se analiza la estructura del código desarrollado tanto para el ejemplo en el que se pretende corregir la predicción de un estado como para el caso de la estimación de parámetros.

Se distinguirá el código común a ambos métodos y el código específico de cada uno de ellos.

No se incluye el código desarrollado en este documento debido a su extensión. Solamente se enumeran los archivos que lo componen y se comenta su función a grandes rasgos. Para más información se puede consultar el código en las siguientes carpetas del DVD entregado:

- `DataAssimilation/src` en el caso del problema de corrección de la predicción de un estado.
- `ParamAdjustment/src` en el caso del problema de la estimación de parámetros.

### I.2.1. Código común

En este punto se enumeran y comentan los ficheros de código común a los dos ejemplos desarrollados utilizando asimilación de datos.

- `Assert.h`: En este fichero de cabecera se define la macro `ASSERT`, que se utiliza en sustitución de la función `assert()` de C++. Su implementación vino motivada por la necesidad de incorporar un mensaje de información personalizado que sea visualizado cuando ocurre una situación anómala en el programa.
- `blaswrap.h`, `clapack.h` y `f2c.h`: Estos ficheros de cabecera son necesarios para la compilación de cualquier programa que haga uso de la librería `CLAPACK`, en la cual se incluyen.
- `DENSE_matrix.h` y `DENSE_matrix.cpp`: Estos ficheros contienen la definición de la clase `DENSE_matrix`, que modeliza una matriz llena y todas las operaciones asociadas a estas que son necesarias en la asimilación de datos.
- `Fire1D.h` y `Fire1D.cpp`: Estos ficheros contienen la implementación del modelo de propagación de incendios unidimensional estudiado en el punto 2.3 *Modelo unidimensional*, y sobre el que se aplicarán las técnicas de asimilación de datos para la incorporación de datos experimentales. Esta implementación ha sido llevada a cabo por el profesor Luis Ferragut Canals, y ha sido cedida para el desarrollo de este trabajo.
- `In_out.h`: Este fichero contiene una serie de funciones desarrolladas para llevar a cabo la lectura y escritura de datos por fichero y por pantalla.
- `MatrizTridiag.h` y `MatrizTridiag.cpp`: Estos ficheros contienen la definición de la clase `MatrizTridiag`, que modeliza una matriz tridiagonal y todas las operaciones asociadas a estas que son necesarias en el modelo de propagación de incendios. Al igual que la implementación del modelo, esta clase ha sido programada por el profesor Luis Ferragut Canals.
- `Vector.h` y `Vector.cpp`: Estos ficheros contienen la definición de la clase `Vector`, que modeliza un vector y todas las operaciones asociadas a estos que son necesarias en el

modelo de propagación de incendios. Esta clase también ha sido implementada por el profesor Luis Ferragut Canals.

### I.2.2. Corrección de estados

En este punto se enumeran los ficheros de código desarrollados específicamente para experimentar y validar el funcionamiento de la asimilación de datos en la corrección de estados:

- `main_data_assimilation.cpp`: Este fichero es el programa principal de la asimilación de datos enfocada a la corrección de estados. Desde este se controla la secuencia del programa, se lleva a cabo la lectura y salida de datos y también se gestionan las llamadas al resto de funciones que hacen posible la simulación del problema.
- `KalmanFilter.h` y `KalmanFilter.cpp`: Estos ficheros contienen la definición de la clase *KalmanFilter*, que contiene todas las operaciones relacionadas con la asimilación de datos: generación del conjunto de estados iniciales, realización de las medidas sobre un estado considerado como referencia, resolución del filtro de Kalman, etc.
- `Visualizar.m`: A diferencia de los anteriores, el contenido de este fichero no está programado en C++. Contiene una función programada en *Matlab* que se encarga de leer los resultados almacenados por el programa principal en el disco duro y de elaborar las gráficas correspondientes para la interpretación de los resultados. En sí, no tienen ninguna función en el procesado de datos. Solamente se encarga de la visualización.

Esta función es invocada desde el programa principal como una llamada al sistema, por lo que debe ser compilada utilizando el compilador de Matlab.

### I.2.3. Identificación de parámetros

En este punto se enumeran los ficheros de código desarrollados específicamente para experimentar y validar el funcionamiento de la asimilación de datos en la estimación de parámetros:

- `main_param_adjustment.cpp`: Este fichero es el programa principal de la asimilación de datos enfocada al ajuste de parámetros. Desde este se controla la secuencia del programa, se lleva a cabo la lectura y salida de datos y también se gestionan las llamadas al resto de funciones que hacen posible la simulación del problema.
- `KalmanFilter.h` y `KalmanFilter.cpp`: Estos ficheros contienen la definición de la clase *KalmanFilter*, que contiene todas las operaciones relacionadas con la asimilación de datos: generación del conjunto de estados iniciales, realización de las medidas sobre un estado considerado como referencia, resolución del filtro de Kalman, etc.
- `Visualizar.m` y `VisualizarVars.m`: A diferencia de los anteriores, el contenido de este fichero no está programado en C++. Cada fichero contiene una función programada en *Matlab* que se encarga de leer los resultados almacenados por el programa principal en el disco duro y de elaborar las gráficas correspondientes para la interpretación de los resultados. La función *Visualizar* representa el estado final del conjunto, mientras que la función *VisualizarVars* representa la evolución de la estimación de los parámetros y su incertidumbre (varianza).



# APÉNDICE II:

## CÓDIGO DESARROLLADO PARA LA INTEGRACIÓN EN ARCGIS

En este segundo apéndice se recoge la información sobre el desarrollo llevado a cabo para integrar en ArcGIS el modelo de propagación de incendios forestales desarrollado dentro del grupo de investigación SINUMCC. La estructura de este apéndice es la siguiente:

1. Primero se indican las instrucciones necesarias para instalar la extensión desarrollada.
2. A continuación se analiza la estructura del código desarrollado.
3. Y para finalizar se indican los pasos a seguir para simular un incendio forestal utilizando la extensión desarrollada.

### II.1. INSTALACIÓN DE LA EXTENSIÓN DESARROLLADA

#### II.1.1. Requerimientos

- ArcGIS 10.1 o superior, con la extensión *Spatial Analyst* disponible.

## II.1.2. Instalación

Para la instalación de esta extensión distinguiré los siguientes tres puntos:

1. Instalación de la extensión para ArcGIS.
2. Instalación de la cartografía necesaria.
3. Instalación del modelo de propagación de incendios.

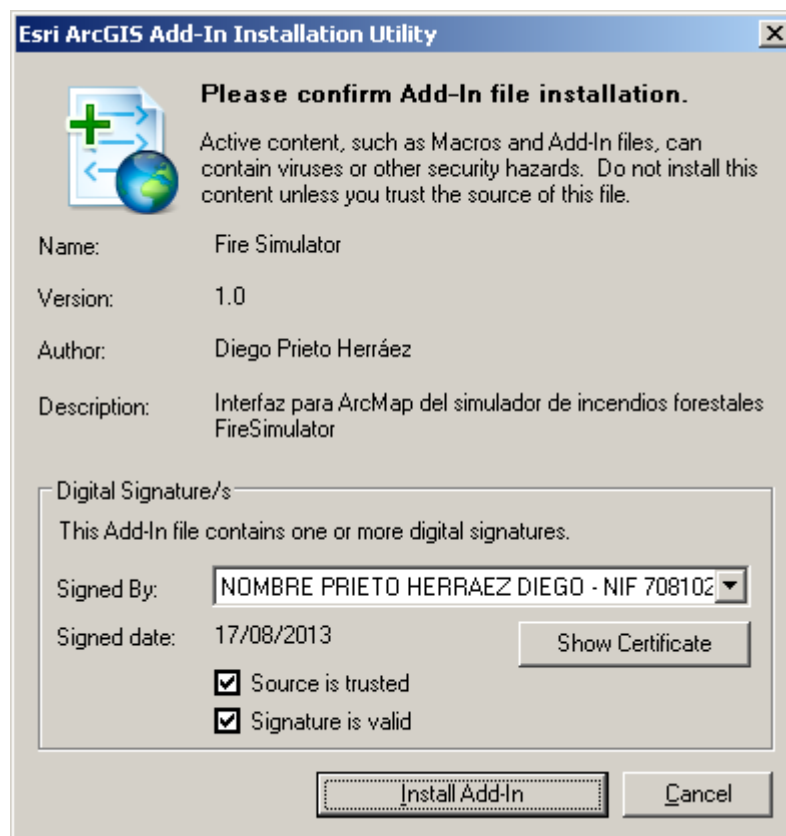
### **INSTALACIÓN DE LA EXTENSIÓN PARA ARCGIS**

Para instalar la extensión para ArcGIS desarrollada en este proyecto, el usuario solo tiene que instalar el archivo de *add-in* *FireSimulator.esriaddin*, ubicado en la carpeta *FireSimulator* del DVD entregado, en su equipo.

Para instalar este archivo, se deberá hacer doble clic sobre él y se abrirá la *Utilidad para la instalación de add-ins ArcGIS de ESRI*.

Cuando se inicia esta herramienta, analiza los metadatos del archivo de *add-in* seleccionado y muestra el nombre del autor, una descripción del *add-in* y si el *add-in* incluye una firma digital fiable. En la Figura 31 se puede ver la ventana visualizada para instalar el *add-in* desarrollado *Fire Simulator*.

Si estamos conformes con la información proporcionada, pulsaremos el botón *Install Add-in* para instalar *Fire Simulator*.



**Figura 31:** Utilidad para la instalación de add-ins ArcGIS de ESRI

### **INSTALACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA NECESARIA**

De momento la ubicación de la cartografía no está parametrizada, y por tanto para su instalación solamente deberá copiarse la carpeta Cartografía del DVD entregado a la ubicación D:\PFM\Cartografía. Esta carpeta deberá tener permisos de lectura y escritura. En futuras versiones se podrá modificar la ubicación de esta carpeta.

### **INSTALACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS**

De momento la ubicación del modelo de propagación de incendios tampoco está parametrizada, y por tanto para su instalación solamente deberá copiarse la carpeta Models del DVD entregado a la ubicación D:\PFM\Models. Esta carpeta deberá tener permisos de

lectura y escritura. En futuras versiones se podrá modificar la ubicación de esta carpeta.

## II.2. ESTRUCTURA DEL CÓDIGO DESARROLLADO

En este punto se analiza la estructura del código desarrollado para integrar en ArcGIS el modelo de propagación de incendios forestales desarrollado en el grupo de investigación SINUMCC.

Básicamente este código está dividido en dos archivos:

1. config.xml.
2. FireSimulator\_addin.py.

### II.2.1. config.xml

El fichero config.xml contiene el código XML utilizado por ArcGIS para ubicar y definir el funcionamiento de los diferentes botones que formarán la interfaz de la extensión desarrollada.

Este fichero ha sido desarrollado con la ayuda del asistente *ArcGIS Python Add-In Wizard*, aunque ha sido necesaria su modificación de forma manual para reordenar los botones de la interfaz.

A continuación se muestra el contenido de este fichero:

```
1. <ESRI.Configuration xmlns="http://schemas.esri.com/Desktop/AddIns"  
   xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">  
2.   <Name>Fire Simulator</Name>  
3.   <AddInID>{cdcd37f4-3d24-4255-aeff-e9d135a01701}</AddInID>  
4.   <Description>Interfaz para ArcMap del simulador de incendios for  
   estales FireSimulator</Description>  
5.   <Version>1.0</Version>
```

```

6.     <Image>Images\FireSimulator.png</Image>
7.     <Author>Diego Prieto Herráez</Author>
8.     <Company>SINUMCC. Universidad de Salamanca</Company>
9.     <Date>08/16/2013</Date>
10.    <Targets>
11.        <Target name="Desktop" version="10.1" />
12.    </Targets>
13.    <AddIn language="PYTHON" library="FireSimulator_addin.py" namesp
ace="FireSimulator_addin">
14.        <ArcMap>
15.            <Commands>
16.                <Button caption="Cargar cartografía" category="Fire Simula
tor" class="OpenViewData" id="FireSimulator_addin.OpenViewData" im
age="Images\OpenData.png" message="Este botón carga el mapa base s
obre el que visualizaremos los resultados de la simulación con Fir
eSimulator." tip="Cargar cartografía"><Help heading="Cargar cartog
rafía">Este botón carga el mapa base sobre el que visualizaremos l
os resultados de la simulación con FireSimulator.</Help></Button>
17.                <Button caption="Refresh" category="Fire Simulator" class=
"Refresh" id="FireSimulator_addin.Refresh" image="Images\Refresh.p
ng" message="Este botón actualiza el área de visualización." tip="
Recargar"><Help heading="Recargar">Este botón actualiza el área de
visualización.</Help></Button>
18.                <Button caption="Reset" category="Fire Simulator" class="R
eset" id="FireSimulator_addin.Reset" image="Images\Reset.png" mess
age="Este botón elimina los resultados de una posible simulación a
nterior, así como los focos y cortafuegos establecidos para comenz
ar de nuevo el proceso." tip="Reset"><Help heading="Reset">Este bo
tón elimina los resultados de una posible simulación anterior, así
como los focos y cortafuegos establecidos para comenzar de nuevo
el proceso.</Help></Button>
19.                <Tool caption="Foco del incendio" category="Fire Simulator
" class="EditSource" id="FireSimulator_addin.EditSource" image="Im
ages\Source.png" message="Esta herramienta se utiliza para ubicar
sobre el mapa los puntos en los que comenzara el incendio." tip="E
stablece el foco del incendio"><Help heading="Establece el foco de
l incendio">Esta herramienta se utiliza para ubicar sobre el mapa
los puntos en los que comenzara el incendio.</Help></Tool>
20.                <Tool caption="Cortafuegos" category="Fire Simulator" clas
s="EditFireBreaks" id="FireSimulator_addin.EditFireBreaks" image="
Images\FireBreaks.png" message="Esta herramienta se utiliza para u
bicar sobre el mapa los posibles cortafuegos que se hayan construi
do en la lucha contra el incendio." tip="Estable la ubicación de l
os posibles cortafuegos"><Help heading="Estable la ubicación de lo
s posibles cortafuegos">Esta herramienta se utiliza para ubicar so
bre el mapa los posibles cortafuegos que se hayan construido en la
lucha contra el incendio.</Help></Tool>
21.                <Button caption="Start" category="Fire Simulator" class="S
tartSimulation" id="FireSimulator_addin.StartSimulation" image="Im
ages\Start.png" message="Este botón extrae todos los datos necesar
ios del GIS y lanza la simulación utilizando el motor FireSimulato
r." tip="Inicio de la simulación"><Help heading="Inicio de la simu
lación">Este botón extrae todos los datos necesarios del GIS y lan
za la simulación utilizando el motor FireSimulator.</Help></Button
>
22.                <Button caption="Cargar cartografía" category="Fire Simula
tor" class="OpenViewDataBis" id="FireSimulator_addin.OpenViewDataB
is" image="Images\OpenData.png" message="Este botón carga el mapa
base sobre el que visualizaremos los resultados de la simulación c
on FireSimulator." tip="Cargar cartografía"><Help heading="Cargar
cartografía">Este botón carga el mapa base sobre el que visualizar

```

```

emos los resultados de la simulación con FireSimulator.</Help></Button>
23.     <Button caption="Refresh" category="Fire Simulator" class="RefreshBis" id="FireSimulator_addin.RefreshBis" image="Images\Refresh.png" message="Este botón actualiza el área de visualización." tip="Recargar"><Help heading="Recargar">Este botón actualiza el área de visualización.</Help></Button>
24.     <Button caption="Reset" category="Fire Simulator" class="ResetBis" id="FireSimulator_addin.ResetBis" image="Images\Reset.png" message="Este botón elimina los resultados de una posible simulación anterior, así como los focos y cortafuegos establecidos para comenzar de nuevo el proceso." tip="Reset"><Help heading="Reset">Este botón elimina los resultados de una posible simulación anterior, así como los focos y cortafuegos establecidos para comenzar de nuevo el proceso.</Help></Button>
25.     <Button caption="Start" category="Fire Simulator" class="StartSimulationBis" id="FireSimulator_addin.StartSimulationBis" image="Images\Start.png" message="Este botón extrae todos los datos necesarios del GIS y lanza la simulación utilizando el motor FireSimulator." tip="Inicio de la simulación"><Help heading="Inicio de la simulación">Este botón extrae todos los datos necesarios del GIS y lanza la simulación utilizando el motor FireSimulator.</Help></Button>
26.     <Button caption="Configurar tipos de combustible" category="Fire Simulator" class="EditFuelTypes" id="FireSimulator_addin.EditFuelTypes" image="Images\Settings.png" message="Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros para los distintos tipos de combustible." tip="Configurar tipos de combustible"><Help heading="Configurar tipos de combustible">Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros para los distintos tipos de combustible.</Help></Button>
27.     <Button caption="Configurar Fire Simulator" category="Fire Simulator" class="EditParamFire" id="FireSimulator_addin.EditParamFire" image="Images\Settings.png" message="Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros del simulador Fire Simulator." tip="Configurar Fire Simulator"><Help heading="Configurar Fire Simulator">Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros del simulador Fire Simulator.</Help></Button>
28.     <Button caption="Configurar tiempo de simulación" category="Fire Simulator" class="EditParamNum" id="FireSimulator_addin.EditParamNum" image="Images\Settings.png" message="Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros numéricos del simulador Fire Simulator." tip="Configurar tiempo de simulación"><Help heading="Configurar tiempo de simulación">Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros numéricos del simulador Fire Simulator.</Help></Button>
29.     </Commands>
30.     <Extensions>
31.     </Extensions>
32.     <Toolbars>
33.     <Toolbar caption="Fire Simulator" category="Fire Simulator" id="FireSimulator_addin.toolbar" showInitially="true">
34.         <Items>
35.             <Button refID="FireSimulator_addin.OpenViewData" />
36.             <Button refID="FireSimulator_addin.Refresh" />
37.             <Button refID="FireSimulator_addin.Reset" />
38.             <Tool refID="FireSimulator_addin.EditSource" />
39.             <Tool refID="FireSimulator_addin.EditFireBreaks" />
40.             <Button refID="FireSimulator_addin.StartSimulation" />
41.         </Items>
42.     </Toolbar>

```

```

43.     </Toolbars>
44.     <Menus>
45.         <Menu caption="Fire Simulator" category="Fire Simulator" i
           d="FireSimulator_addin.menu" isRootMenu="true" isShortcutMenu="fal
           se" separator="false">
46.             <Items>
47.                 <Button refID="FireSimulator_addin.OpenViewDataBis" />
48.                 <Button refID="FireSimulator_addin.RefreshBis" />
49.                 <Button refID="FireSimulator_addin.ResetBis" />
50.                 <Button refID="FireSimulator_addin.StartSimulationBis"
           />
51.                 <Button refID="FireSimulator_addin.EditFuelTypes" />
52.                 <Button refID="FireSimulator_addin.EditParamFire" />
53.                 <Button refID="FireSimulator_addin.EditParamNum" />
54.             </Items>
55.         </Menu>
56.     </Menus>
57. </ArcMap>
58. </AddIn>
59. </ESRI.Configuration>

```

## II.2.2. FireSimulator\_addin.py

El fichero `FireSimulator_addin.py` contiene la lógica que se ejecutará cada vez que se pulse un botón determinado en la extensión desarrollada.

Esta lógica está implementada en el lenguaje de programación *Python* y utilizando la librería *ArcPy* de ArcGIS. A continuación se muestra el contenido de este fichero:

```

1.     import arcpy
2.     import os
3.     import pythonaddins
4.     import re
5.     from arcpy.sa import *
6.
7.
8.     # Global variables
9.     install_dir = "D:/PFM"
10.    carto_dir = os.path.join(install_dir, "Cartografia")
11.    models_dir = os.path.join(install_dir, "Models")
12.    input_data_dir = os.path.join(models_dir, "data")
13.    output_data_dir = os.path.join(models_dir, "results")
14.    temp_dir = "in_memory"
15.    source_shapefile = "Start_fire"
16.    fire_breaks_shapefile = "Fire_breaks"
17.    source_shapefile_full = os.path.join(temp_dir, source_shapefile)
18.    fire_breaks_shapefile_full = os.path.join(temp_dir, fire_breaks_shapefile)
19.    NODATA = "-9999"
20.    Raster_size = 3000

```

```
21. Cell_size = 5
22.
23.
24. class EditFireBreaks(object):
25.     def __init__(self):
26.         self.enabled = False
27.         self.shape = "Line"
28.     def onLine(self, line_geometry):
29.         # Esta herramienta se utiliza para ubicar sobre el mapa lo
30.         # s posibles cortafuegos que se hayan construido en la lucha contra
31.         # el incendio.
32.         if not arcpy.Exists(fire_breaks_shapefile_full):
33.             sr = arcpy.SpatialReference(25830)
34.             arcpy.management.CreateFeatureclass(temp_dir, source_shapefile, "POINT", "", "", sr)
35.             arcpy.management.CreateFeatureclass(temp_dir, fire_breaks_shapefile, "POLYLINE", "", "", sr)
36.             del sr
37.             arcpy.management.Append(line_geometry, fire_breaks_shapefile_full)
38.             Reset.enabled = True
39.             ResetBis.enabled = True
40.             arcpy.RefreshActiveView()
41.             arcpy.RefreshTOC()
42.
43. class EditFuelTypes(object):
44.     def __init__(self):
45.         self.enabled = True
46.         self.checked = False
47.     def onClick(self):
48.         # Este boton lanza un editor de texto en el que podremos establecer
49.         # los parametros para los distintos tipos de combustible.
50.         file = os.path.join(input_data_dir, "param_fuel.asc")
51.         os.system("notepad.exe " + file)
52.         del file
53.
54. class EditParamFire(object):
55.     def __init__(self):
56.         self.enabled = True
57.         self.checked = False
58.     def onClick(self):
59.         # Este boton lanza un editor de texto en el que podremos establecer
60.         # los parametros del simulador FireSimulator.
61.         file = os.path.join(input_data_dir, "param_model_fire.asc")
62.         os.system("notepad.exe " + file)
63.         del file
64.
65. class EditParamNum(object):
66.     def __init__(self):
67.         self.enabled = True
68.         self.checked = False
69.     def onClick(self):
70.         # Este boton lanza un editor de texto en el que podremos establecer
71.         # los parametros numericos del simulador FireSimulator.
72.         file = os.path.join(input_data_dir, "param_num.asc")
73.         os.system("notepad.exe " + file)
74.         del file
```



```

74.
75.     class EditSource(object):
76.         def __init__(self):
77.             self.enabled = False
78.             self.shape = "NONE"
79.         def onMouseDownMap(self, x, y, button, shift):
80.             # Esta herramienta se utiliza para ubicar sobre el mapa lo
81.             # s puntos en los que comenzara el incendio. Para ello solo hay que
82.             # hacer clic en los puntos en los que se ubicaran los focos.
83.             if not arcpy.Exists(source_shapefile_full):
84.                 sr = arcpy.SpatialReference(25830)
85.                 arcpy.management.CreateFeatureclass(temp_dir, source_sh
86. apefile, "POINT", "", "", sr)
87.                 arcpy.management.CreateFeatureclass(temp_dir, fire_brea
88. ks_shapefile, "POLYLINE", "", "", sr)
89.                 del sr
90.                 source_point = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(x,y))
91.                 arcpy.management.Append(source_point, source_shapefile_full
92. )
93.                 StartSimulation.enabled = True
94.                 StartSimulationBis.enabled = True
95.                 Reset.enabled = True
96.                 ResetBis.enabled = True
97.                 arcpy.RefreshActiveView()
98.                 arcpy.RefreshTOC()
99.                 del source_point
100.
101.     class OpenViewData(object):
102.         def __init__(self):
103.             self.enabled = True
104.             self.checked = False
105.         def onClick(self):
106.             # Este boton carga el mapa base sobre el que visualizaremos
107.             # los resultados de la simulacion con FireSimulator.
108.             # Get the current map document and the first data frame. R
109.             # emove all its layers and change its name
110.             mxd = arcpy.mapping.MapDocument('current')
111.             mxd.author = "Diego Prieto Herraez"
112.             mxd.credits = "2013. SINUMCC. Universidad de Salamanca"
113.             mxd.title = "Fire Simulator"
114.             dataframe = arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd)[0]
115.             for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd, "", dataframe):
116.                 arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe, lyr)
117.             dataframe.name = "Fire Simulator"
118.             # Establish the spatial reference: ETRS_1989_UTM_Zone_30N
119.
120.             sr = arcpy.SpatialReference(25830)
121.             dataframe.spatialReference = sr
122.             # Create a new layer with the base map and load it
123.             BaseMapLayer = arcpy.mapping.Layer(os.path.join(carto_dir,
124. "BaseMapWMS.lyr"))
125.             arcpy.mapping.AddLayer(dataframe, BaseMapLayer, "TOP")
126.             # Zoom to Castilla y Leon
127.             extent_CyL = arcpy.Extent(61162.1271348, 4421735.18056, 7057
128. 18.615425, 4806563.98047)
129.             dataframe.extent = extent_CyL
130.             EditFireBreaks.enabled = True
131.             EditSource.enabled = True
132.             Refresh.enabled = True
133.             RefreshBis.enabled = True
134.             arcpy.RefreshActiveView()
135.             arcpy.RefreshTOC()

```

```

127.         del mxd, dataframe, sr, BaseMapLayer, extent_CyL
128.
129.
130.     class OpenViewDataBis(object):
131.         def __init__(self):
132.             self.enabled = True
133.             self.checked = False
134.         def onClick(self):
135.             # Este boton carga el mapa base sobre el que visualizaremos
136.             # los resultados de la simulacion con FireSimulator.
137.             OpenViewData.onClick()
138.
139.     class Refresh(object):
140.         def __init__(self):
141.             self.enabled = False
142.             self.checked = False
143.         def onClick(self):
144.             # Este boton actualiza el area de visualizacion.
145.             arcpy.RefreshActiveView()
146.             arcpy.RefreshTOC()
147.
148.
149.     class RefreshBis(object):
150.         def __init__(self):
151.             self.enabled = False
152.             self.checked = False
153.         def onClick(self):
154.             # Este boton actualiza el area de visualizacion.
155.             Refresh.onClick()
156.
157.
158.     class Reset(object):
159.         def __init__(self):
160.             self.enabled = False
161.             self.checked = False
162.         def onClick(self):
163.             # Este boton elimina los focos y cortafuegos establecidos
164.             # para comenzar de nuevo el proceso.
165.             mxd = arcpy.mapping.MapDocument('current')
166.             dataframe = arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd, "Fire Simulator")[0]
167.             # Remove sources and firebreaks
168.             arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe,arcpy.mapping.ListLayers(mxd,source_shapefile, dataframe)[0])
169.             arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe,arcpy.mapping.ListLayers(mxd,fire_breaks_shapefile, dataframe)[0])
170.             arcpy.management.Delete(source_shapefile_full)
171.             arcpy.management.Delete(fire_breaks_shapefile_full)
172.             for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd,"burnt_area*",dataframe):
173.                 arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe,lyr)
174.             for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd,"front*",dataframe):
175.                 arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe,lyr)
176.             StartSimulation.enabled = False
177.             StartSimulationBis.enabled = False
178.             Reset.enabled = False
179.             ResetBis.enabled = False
180.             arcpy.RefreshActiveView()
181.             arcpy.RefreshTOC()
182.         del mxd, dataframe

```

```

183.
184. class ResetBis(object):
185.     def __init__(self):
186.         self.enabled = False
187.         self.checked = False
188.     def onClick(self):
189.         # Este boton elimina los focos y cortafuegos establecidos
190.         # para comenzar de nuevo el proceso.
191.         Reset.onClick()
192.
193. class StartSimulation(object):
194.     def __init__(self):
195.         self.enabled = False
196.         self.checked = False
197.         arcpy.env.cellSize = Cell_size
198.         arcpy.env.nodata = NODATA
199.         arcpy.env.overwriteOutput = True
200.         # Check out any necessary licenses
201.         arcpy.CheckOutExtension("spatial")
202.     def onClick(self):
203.         # Este boton extrae todos los datos necesarios del GIS, la
204.         # nza la simulacion utilizando el motor FireSimulator y muestra los
205.         # resultados.
206.         # Remove any old data from disc
207.         out_file = os.path.join(input_data_dir, "height.asc")
208.         try: os.remove(out_file)
209.         except: pass
210.         out_file = os.path.join(input_data_dir, "fuel.asc")
211.         try: os.remove(out_file)
212.         except: pass
213.         out_file = os.path.join(input_data_dir, "fcc.asc")
214.         try: os.remove(out_file)
215.         except: pass
216.         out_file = os.path.join(input_data_dir, "source.asc")
217.         try: os.remove(out_file)
218.         except: pass
219.         results = os.listdir(output_data_dir)
220.         for files in results:
221.             if re.search(".asc", files):
222.                 files_name = os.path.join(output_data_dir, files)
223.                 try: os.remove(files_name)
224.                 except: pass
225.         # Remove results of a previous simulation from the datafra
226.         me
227.         arcpy.env.addOutputsToMap = False
228.         mxd = arcpy.mapping.MapDocument('current')
229.         dataframe = arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd, "Fire Simulat
230.         or")[0]
231.         for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd, "burnt_area*", data
232.         frame):
233.             arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe, lyr)
234.         for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd, "front*", dataframe
235.         ):
236.             arcpy.mapping.RemoveLayer(dataframe, lyr)
237.         # Calc the middle point of the area of interest. The centr
238.         # oid of the source points is the centroid of the Area of Interest(A
239.         # oI). The Area of Interest is a rectangle of Raster_size*Raster_siz
240.         # e meters.
241.         temp_file = os.path.join(temp_dir, "temp_source_points")
242.         arcpy.management.MinimumBoundingGeometry(source_shapefile_
243.         full, temp_file, "ENVELOPE", "ALL")
244.         rows = arcpy.SearchCursor(temp_file)

```

```
235.         for row in rows:
236.             geom = row.Shape
237.             X_Central = geom.centroid.X
238.             Y_Central = geom.centroid.Y
239.         del row, rows, geom
240.         arcpy.management.Delete(temp_file)
241.         # I create a extent object which is used for creating a sh
apefile, which is used for clipping other layers
242.         d = Raster_size/2
243.         Clipping_extent = arcpy.Extent(X_Central-d,Y_Central-
d,X_Central+d,Y_Central+d)
244.         Clipping_polygon = arcpy.Polygon(arcpy.Array([Clipping_ext
ent.lowerLeft, Clipping_extent.lowerRight, Clipping_extent.upperRi
ght, Clipping_extent.upperLeft]),dataframe.spatialReference)
245.         del X_Central, Y_Central, d, Clipping_extent
246.         # Clip and export height
247.         MDE = os.path.join(carto_dir,"MDE_CyL/MDE_CyL_10x10m_ETRS8
9_hu30_16bits_EGM08.tif")
248.         temp_snapRaster = os.path.join(temp_dir,"temp_MDE")
249.         temp_snapRaster2 = os.path.join(temp_dir,"temp_MDE2")
250.         out_file = os.path.join(input_data_dir,"height.asc")
251.         arcpy.management.Clip(MDE,"",temp_snapRaster2,Clipping_pol
ygon,NODATA,"ClippingGeometry")
252.         arcpy.management.Resample(temp_snapRaster2,temp_snapRaster
,arcpy.env.cellSize,"CUBIC")
253.         arcpy.env.snapRaster = temp_snapRaster
254.         arcpy.env.extent = (Raster(temp_snapRaster)).extent
255.         arcpy.conversion.RasterToASCII(temp_snapRaster,out_file)
256.         arcpy.management.Delete(temp_snapRaster2)
257.         del MDE, temp_snapRaster2
258.         # Clip and export fuel_types
259.         fuel_types = os.path.join(carto_dir,"ModelosCombustible_Cy
L_2013/ModelosCombustible_CyL_2013_ETRS89_hu30.shp")
260.         temp_file = os.path.join(temp_dir,"temp_fuel_types")
261.         temp_file2 = os.path.join(temp_dir,"temp_fuel_types2")
262.         out_file = os.path.join(input_data_dir,"fuel.asc")
263.         arcpy.analysis.Clip(fuel_types,Clipping_polygon,temp_file,
"")
264.         arcpy.conversion.PolygonToRaster(temp_file,"Mod_comb",temp
_file2,"MAXIMUM_COMBINED_AREA","NONE","")
265.         arcpy.management.Delete(temp_file)
266.         arcpy.gp.Con_sa(temp_file2,0,temp_file,temp_file2,"\"Value
\" = 777 OR \"Value\" = 999")
267.         arcpy.conversion.RasterToASCII(temp_file,out_file)
268.         arcpy.management.Delete(temp_file)
269.         arcpy.management.Delete(temp_file2)
270.         del fuel_types
271.         # Clip and export fcc
272.         fcc = os.path.join(carto_dir,"SIOSE_CyL_2005/FireBreaks_Cy
L_2005_ETRS89_hu30.shp")
273.         temp_file = os.path.join(temp_dir,"temp_fcc")
274.         temp_file2 = os.path.join(temp_dir,"temp_fcc2")
275.         temp_file3 = os.path.join(temp_dir,"temp_fcc3")
276.         out_file = os.path.join(input_data_dir,"fcc.asc")
277.         arcpy.analysis.Clip(fcc,Clipping_polygon,temp_file,"")
278.         arcpy.conversion.PolygonToRaster(temp_file,"FID",temp_file
2,"MAXIMUM_COMBINED_AREA","NONE","")
279.         arcpy.gp.IsNull_sa(temp_file2,temp_file3)
280.         arcpy.management.Delete(temp_file)
281.         arcpy.management.Delete(temp_file2)
282.         arcpy.analysis.Buffer(fire_breaks_shapefile_full,temp_file
,str(2.5*int(arcpy.env.cellSize)) + " Meters","FULL","ROUND","ALL",
"")
```

```

283.         arcpy.analysis.Clip(temp_file,Clipping_polygon,temp_file2,
        "")
284.         arcpy.management.Delete(temp_file)
285.         arcpy.conversion.PolygonToRaster(temp_file2,"OID",temp_file,
        e,"MAXIMUM_COMBINED_AREA","NONE","")
286.         arcpy.management.Delete(temp_file2)
287.         arcpy.gp.IsNull_sa(temp_file,temp_file2)
288.         arcpy.gp.BooleanAnd_sa(temp_file2,temp_file3,temp_file)
289.         arcpy.conversion.RasterToASCII(temp_file,out_file)
290.         arcpy.management.Delete(temp_file)
291.         arcpy.management.Delete(temp_file2)
292.         arcpy.management.Delete(temp_file3)
293.         del fcc
294.         # Clip and export source
295.         temp_file = os.path.join(temp_dir,"temp_source")
296.         temp_file2 = os.path.join(temp_dir,"temp_source2")
297.         out_file = os.path.join(input_data_dir,"source.asc")
298.         arcpy.analysis.Buffer(source_shapefile_full,temp_file,str(
        2.0*int(arcpy.env.cellSize)) + " Meters","FULL","ROUND","ALL","")
299.         arcpy.analysis.Clip(temp_file,Clipping_polygon,temp_file2,
        "")
300.         arcpy.management.Delete(temp_file)
301.         arcpy.conversion.PolygonToRaster(temp_file2,"OID",temp_file,
        e,"MAXIMUM_COMBINED_AREA","NONE","")
302.         arcpy.management.Delete(temp_file2)
303.         arcpy.gp.IsNull_sa(temp_file,temp_file2)
304.         arcpy.gp.BooleanNot_sa(temp_file2,temp_file)
305.         arcpy.gp.Times_sa(temp_file,9,temp_file2)
306.         arcpy.conversion.RasterToASCII(temp_file2,out_file)
307.         arcpy.management.Delete(temp_file)
308.         arcpy.management.Delete(temp_file2)
309.         arcpy.management.Delete(temp_snapRaster)
310.         del temp_snapRaster
311.         # Launch FireSimulator
312.         exe = os.path.join(models_dir,"FastFireSimulator.exe")
313.         os.system(exe)
314.         # Load results
315.         results = os.listdir(output_data_dir)
316.         results.reverse()
317.         for files in results:
318.             if re.search("pure_fuel", files):
319.                 files_name = re.sub(".asc","",files)
320.                 front_name = re.sub("pure_fuel","burnt_area",files
        _name)
321.                 files_fullpath = os.path.join(output_data_dir,files
        s)
322.                 out_raster = os.path.join(temp_dir,"temp")
323.                 out_raster2 = os.path.join(temp_dir,"temp2")
324.                 out_feature = os.path.join(output_data_dir,front_n
        ame) + ".shp"
325.                 if arcpy.Exists(out_feature):
326.                     arcpy.management.Delete(out_feature)
327.                     arcpy.conversion.ASCIIToRaster(files_fullpath,out_
        raster,"INTEGER")
328.                     arcpy.gp.SetNull_sa(out_raster,out_raster,out_rast
        er2,"\"Value\" = 0")
329.                     arcpy.management.Delete(out_raster)
330.                     arcpy.conversion.RasterToPolygon(out_raster2,out_r
        aster,"SIMPLIFY","Value")
331.                     arcpy.management.CopyFeatures(out_raster,out_featu
        re)
332.                     BurntLayer = arcpy.mapping.Layer(out_feature)

```

```

333.             BurntLayer.transparency = 50
334.             arcpy.management.ApplySymbologyFromLayer(BurntLayer,os.path.join(input_data_dir,"burnt_area_symbology.lyr"))
335.             arcpy.mapping.AddLayer(dataframe,BurntLayer,"TOP")

336.             arcpy.management.Delete(out_raster)
337.             arcpy.management.Delete(out_raster2)
338.             del BurntLayer
339.         for files in results:
340.             if re.search("temperature", files):
341.                 files_name = re.sub(".asc","",files)
342.                 front_name = re.sub("temperature","front",files_name)
343.                 files_fullpath = os.path.join(output_data_dir,files_name)
344.                 out_raster = os.path.join(temp_dir,"temp")
345.                 out_raster2 = os.path.join(temp_dir,"temp2")
346.                 out_feature = os.path.join(output_data_dir,front_name) + ".shp"
347.                 if arcpy.Exists(out_feature):
348.                     arcpy.management.Delete(out_feature)
349.                 arcpy.conversion.ASCIIToRaster(files_fullpath,out_raster,"FLOAT")
350.                 arcpy.gp.Con_sa(out_raster,1,out_raster2,0,"Value > 0")
351.                 arcpy.gp.SetNull_sa(out_raster2,out_raster2,out_raster,"Value = 0")
352.                 arcpy.management.Delete(out_raster2)
353.                 try:         arcpy.conversion.RasterToPolygon(out_raster,out_raster2,"SIMPLIFY","Value")
354.                 except: pass
355.                 arcpy.management.CopyFeatures(out_raster2,out_feature)
356.                 BurntLayer = arcpy.mapping.Layer(out_feature)
357.                 BurntLayer.transparency = 50
358.                 arcpy.management.ApplySymbologyFromLayer(BurntLayer,os.path.join(input_data_dir,"front_symbology.lyr"))
359.                 arcpy.mapping.AddLayer(dataframe,BurntLayer,"TOP")


360.             arcpy.management.Delete(out_raster)
361.             arcpy.management.Delete(out_raster2)
362.             del BurntLayer
363.         del exe, results, files, files_name, front_name, files_fullpath, out_raster, out_raster2, out_feature
364.         arcpy.env.addOutputsToMap = True
365.         dataframe.extent = arcpy.env.extent
366.         arcpy.RefreshActiveView()
367.         arcpy.RefreshTOC()
368.         del mxd, dataframe, Clipping_polygon
369.
370.
371.     class StartSimulationBis(object):
372.         def __init__(self):
373.             self.enabled = False
374.             self.checked = False
375.         def onClick(self):
376.             # Este boton extrae todos los datos necesarios del GIS, lanza la simulacion utilizando el motor FireSimulator y muestra los resultados.
377.             StartSimulation.onClick()







```

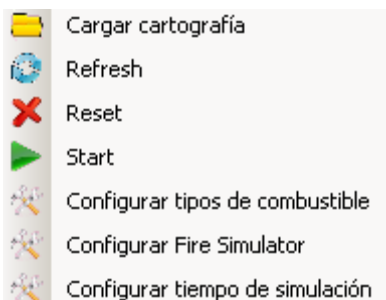
## II.3. MANUAL DE USO

En este punto se proporciona una breve guía sobre el uso de la interfaz desarrollada para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal.








La extensión generada consiste de una barra de herramientas y un menú.

La barra de herramientas es la siguiente , en la que de izquierda a derecha, cada botón es:


1.  Cargar cartografía: este botón carga el mapa base sobre el que nos ubicaremos para definir el origen del incendio y sobre el que visualizaremos los resultados de la simulación con FireSimulator.
2.  Refresh: este botón actualiza el área de visualización.
3.  Reset: este botón elimina los resultados de una posible simulación anterior, así como los focos y cortafuegos establecidos para comenzar de nuevo el proceso.
4.  Foco del incendio: esta herramienta se utiliza para ubicar sobre el mapa los puntos en los que comenzará el incendio.
5.  Cortafuegos: esta herramienta se utiliza para ubicar sobre el mapa los posibles cortafuegos que se hayan construido en la lucha contra el incendio.
6.  Start: este botón extrae todos los datos necesarios del GIS y lanza la simulación utilizando el motor FireSimulator.



El menú es el siguiente arriba a abajo, cada botón es:

1.  Cargar cartografía: este botón carga el mapa base sobre el que nos ubicaremos para definir el origen del incendio y sobre el que visualizaremos los resultados de la simulación con FireSimulator.
2.  Refresh: este botón actualiza el área de visualización.
3.  Reset: este botón elimina los resultados de una posible simulación anterior, así como los focos y cortafuegos establecidos para comenzar de nuevo el proceso.
4.  Start: este botón extrae todos los datos necesarios del GIS y lanza la simulación utilizando el motor FireSimulator
5.  Configurar tipos de combustible: Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros para los distintos tipos de combustible.
6.  Configurar Fire Simulator: Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros del simulador FireSimulator.
7.  Configurar tiempo de simulación: Este botón lanza un editor de texto en el que podremos establecer los parámetros numéricos del simulador FireSimulator.

Para llevar a cabo la simulación de un incendio forestal, seguiremos los siguientes pasos:

1. Abrimos ArcGIS y cargamos el mapa base utilizando el botón .



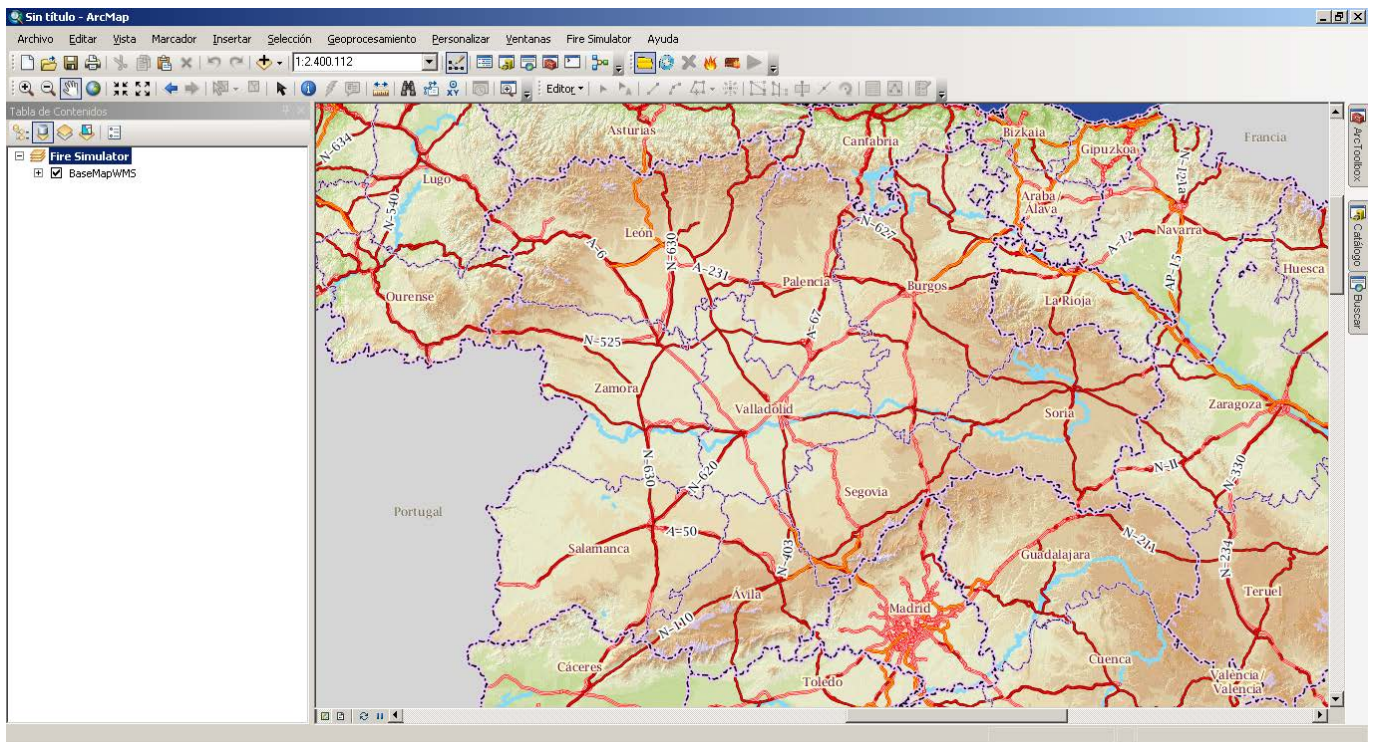


Figura 32: Abrimos ArcGIS y cargamos el mapa base

2. Ubicamos en el mapa la zona en la que queremos simular el incendio forestal.

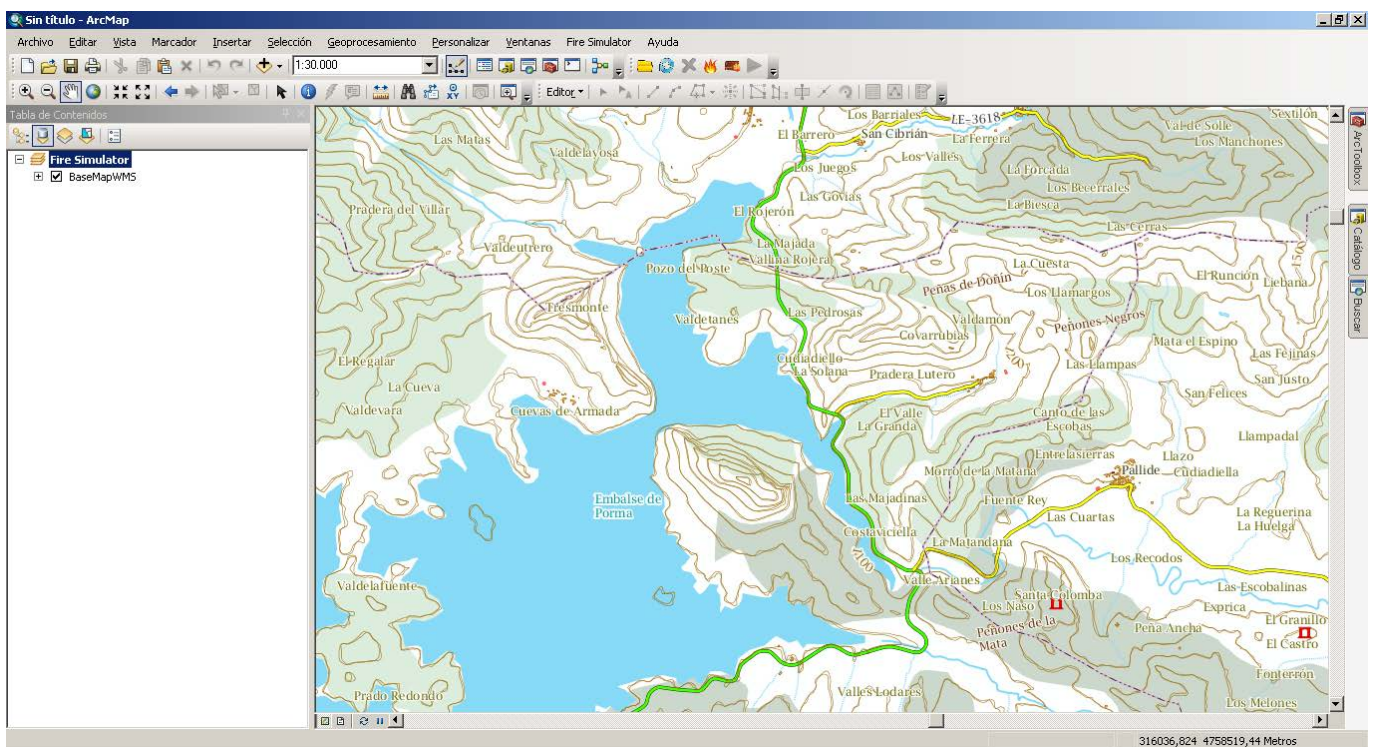

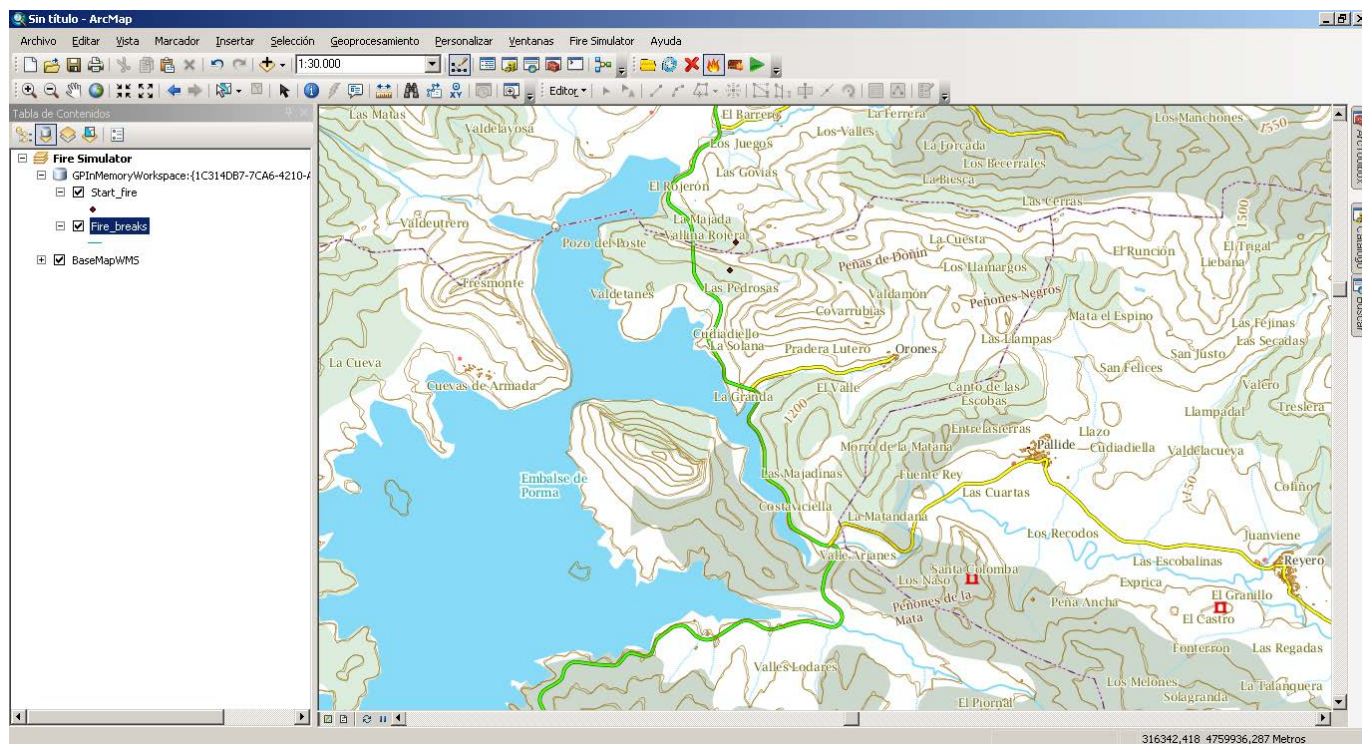



Figura 33: Ubicamos en el mapa la zona en la que queremos simular el incendio forestal

3. Ubicamos sobre el mapa los posibles focos del incendio utilizando el botón .



**Figura 34:** Ubicamos sobre el mapa los posibles focos del incendio

4. Ubicamos sobre el mapa los posibles cortafuegos utilizando el botón .

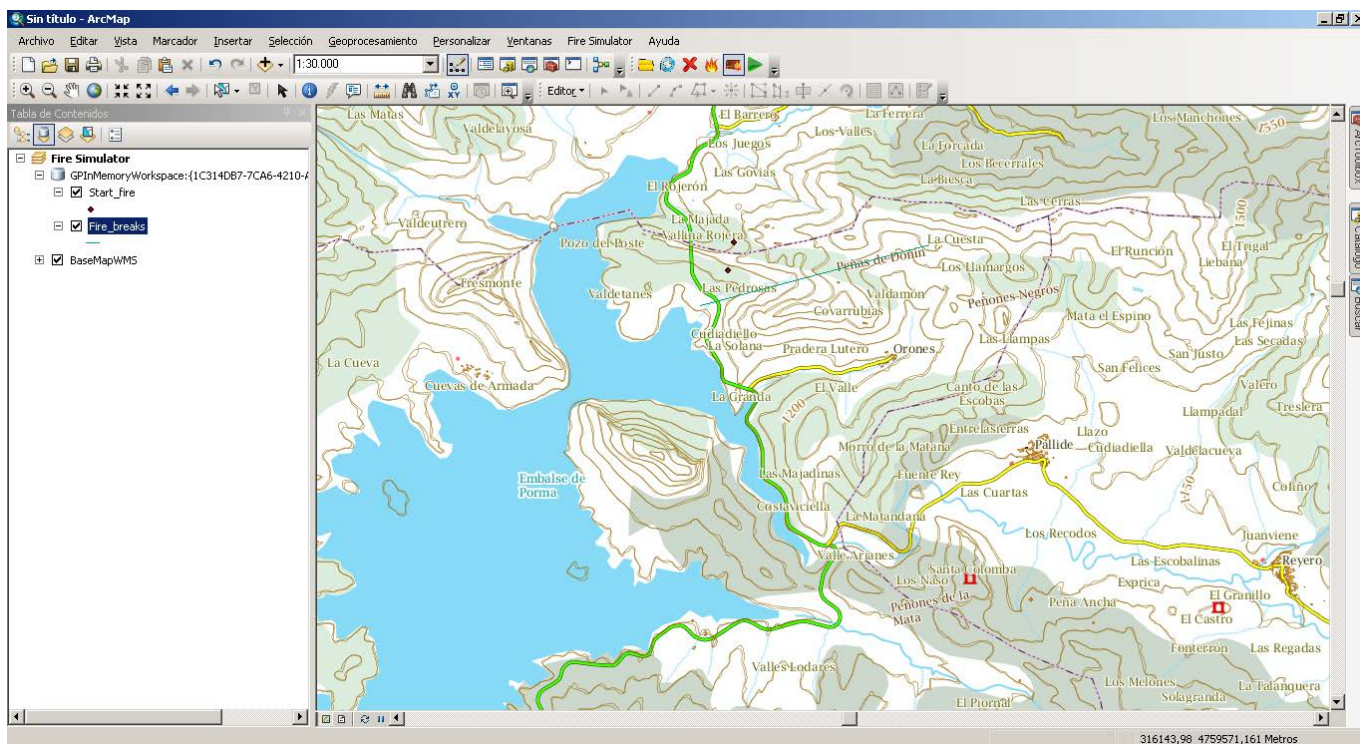


Figura 35: Ubicamos sobre el mapa los posibles cortafuegos

5. Y para finalizar lanzamos la simulación utilizando el botón .

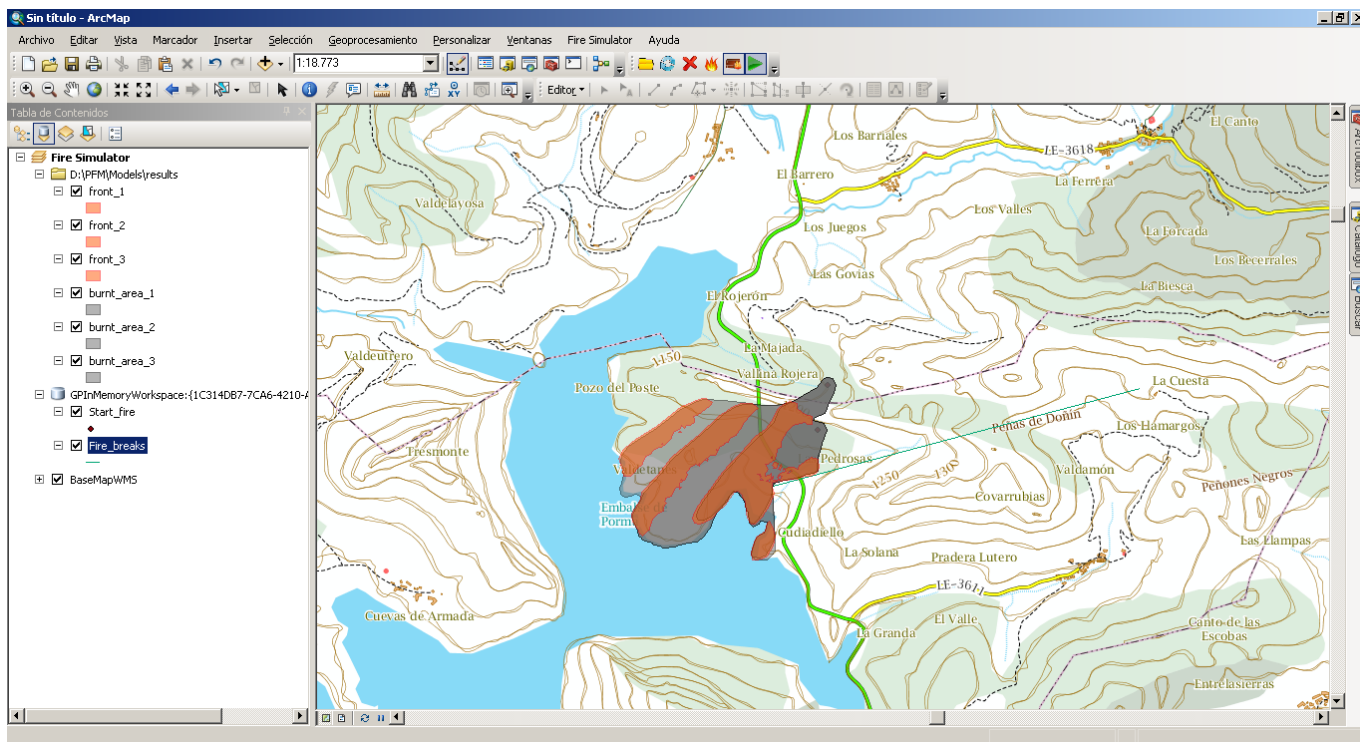


Figura 36: Lanzamos la simulación



# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anderson, R. C., 1970. Prairies in the prairie state. *Illinois State Academy of Science Transactions*, Volume 63, pp. 214-221.
- [2] Asensio Sevilla, M. I. & Ferragut Canals, L., 2002. On a wildland fire model with radiation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 54(1), p. 137–157.
- [3] Asensio Sevilla, M. I., Ferragut Canals, L. & Simon, J., 2005. A convection model for fire spread simulation. *Applied Mathematics Letters*, 18(6), p. 673–677.
- [4] Beer, T., 1990. Percolation theory and fire spread. *Combustion Science and Technology*, 72(4-6), pp. 297-304.
- [5] Blanco, J. y otros, 2007. *Curso básico de incendios forestales destinado a personal de operaciones de extinción*. [En línea]  
Available at: <http://www.slideshare.net/gtfsaltominho/curso-basico-de-incendios-forestales>  
[Último acceso: 1 Julio 2013].
- [6] BOE, 2007. *Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el Sistema Geodésico de Referencia oficial en España.*, Madrid: BOE.
- [7] Cascón Barbero, J. M., Asensio Sevilla, M. I., Ferragut Canals, L. & Prieto Herráez, D., 2011. *Asimilación de datos en un modelo de simulación de incendios*. Palma (Mallorca), XXII CEDYA.
- [8] Chui, C. K. & Chen, G., 2009. *Kalman Filtering with Real-Time Applications*. 4 ed. s.l.:Springer.
- [9] Chui, C. K. & Chen, G., 2009. *Kalman Filtering: with Real-Time Applications*. 4 ed. s.l.:Springer.
- [10] EquipoControl de Calidad - Tragsatec, 2007. *Propuesta de creación de un rótulo sintético para los polígonos del SIOSE, a partir del modelo de datos*, s.l.: s.n.
- [11] ESRI, 2011. *Extending ArcGISwith Python*, s.l.: s.n.

- [12] ESRI, 2013. *ArcGIS Help Library*. [Online]  
Available at: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html>  
[Accessed 20 Agosto 2013].
- [13] European Forest Fire Information System, 2012. *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa*, s.l.: s.n.
- [14] Evensen, G., 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(5), p. 10143–10162.
- [15] Evensen, G., 2009. *Data assimilation, The Ensemble Kalman Filter*. 2 ed. Bergen (Norway): Springer.
- [16] Ferragut Canals, L., Asensio Sevilla, M. I., Cascón Barbero, J. M. & Prieto Herráez, D., 2013. A simplified wildland fire model applied to a real case. *International Journal of Thermal Sciences*, p. 35.
- [17] Ferragut Canals, L. et al., 2013. An efficient algorithm for solving a multi-layer Convection-Diffusion Problem applied to air pollution problems. *Advances in Engineering Software*, Volume 65, p. 191–199.
- [18] Ferragut Canals, L., Asensio Sevilla, M. I., Cascón Barbero, J. M. & Prieto Herráez, D., 2013. *Fire Modelling with Data Assimilation*. Madrid, MathGEO.
- [19] Ferragut Canals, L., Asensio Sevilla, M. I. & Monedero, S., 2007a. A numerical method for solving convection-reaction-diffusion multivalued equations in fire spread modelling. *Advances in Engineering Software*, 38(6), pp. 366-371.
- [20] Ferragut Canals, L., Asensio Sevilla, M. I. & Monedero, S., 2007b. Modeling Radiation and Moisture Content in Fire Spread. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 23(9), p. 819–833.
- [21] Ferragut Canals, L., Asensio Sevilla, M. I. & Simon, J., 2009. High definition local adjustment model of 3D wind fields performing only 2D computations. *Communications in Numerical Methods in Engineering*.
- [22] Junta de Castilla y León, 2008. *Prescripciones técnicas de la Cartografía básica a escala 1:1.000*, s.l.: s.n.
- [23] Junta de Castilla y León, 2009. *Prescripciones técnicas de la Cartografía básica a escala 1:5.000*, s.l.: s.n.
- [24] Kim, M., 2001. *Reaction diffusion equations and numerical wildland fire models*, s.l.: University of Colorado Denver.
- [25] Mandel, J. et al., 2008. A wildfire model with data assimilation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(3), pp. 584-606.

- [26] Mas, R., 2011. *Guía sobre recursos cartográficos en Internet*, Madrid: s.n.
- [27] Mas, R., 2011. *Tutorial (nivel básico) para la elaboración de mapas con ArcGIS*, Madrid: s.n.
- [28] Mas, R., 2011. *Tutorial de Servidores WMS (Web Map Service)*, Madrid: s.n.
- [29] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013. *Incendios Forestales en España 1 enero – 31 diciembre 2012*, s.l.: s.n.
- [30] Moreno Jimenez, A., 2008. *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. 2 ed. Madrid: Ra-Ma.
- [31] Richards, G. D., 1990. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30(6), p. 1163–1179.
- [32] Rothermel, R. C., 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USA: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- [33] Sakov, P. & Oke, P. R., 2008. A deterministic formulation of the ensemble Kalman filter: an alternative to ensemble square root filters. *Tellus*, 60(2), p. 361–371.
- [34] Séro-Guillaume, O. & Margerit, J., 2002. Modelling forest fires. Part I: a complete set of equations derived by extended irreversible thermodynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(8), p. 1705–1722.
- [35] SIOSE, E. T. N., 2005. *Documento Técnico SIOSE 2005*, s.l.: s.n.
- [36] Sullivan, A. L., 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Windland Fire*, 18(4), p. 349–368.
- [37] Sullivan, A. L., 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Windland Fire*, 18(4), p. 369–386.
- [38] Sullivan, A. L., 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Windland Fire*, 18(4), p. 387–403.
- [39] Tracsatec, 2007. *Tercer Inventario Forestal Nacional: Descripción de los códigos de la base de datos de campo*, s.l.: s.n.
- [40] Tracsatec, 2013. *Mapa de Modelos de Combustibles Rothermel de Castilla y León*, s.l.: s.n.

- [41] Vélez, R., 2009. *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. 2 ed. s.l.:McGraw-Hill Interamericana de España S.L..
- [42] Welch, G. & Bishop, G., 2001. *An Introduction to the Kalman Filter*. Chapel Hill: University of North Carolina at Chapel Hill. Department of Computer Science.