



UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
MÁSTER UNIVERSITARIO EN MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

**Acoplamiento de modelos físicos
para la simulación de problemas
medioambientales.
Aplicación a casos reales.**

AUTORA: Laura Herrero García

TUTORES: María Isabel Asensio Sevilla

José Manuel Iglesias Pérez

Curso 2023-2024



VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
MÁSTER UNIVERSITARIO EN MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

Acoplamiento de modelos físicos para la simulación de problemas medioambientales.

Aplicación a casos reales.

AUTORA: Laura Herrero García

TUTORES: María Isabel Asensio Sevilla

José Manuel Iglesias Pérez

Curso 2023-2024

CERTIFICADO DE LOS/AS TUTORES/AS DE TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

D^a María Isabel Asensio Sevilla, profesora del Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Salamanca, y D. José Manuel Iglesias Pérez, investigador en el Departamento de Matemática Aplicada,

HACEN CONSTAR

Que el trabajo titulado "Acoplamiento de modelos físicos para la simulación de problemas medioambientales. Aplicación a casos reales", que se presenta, ha sido realizado por Laura Herrero García con DNI número ***02245 y constituye la memoria del trabajo realizado para la superación de la asignatura Trabajo Fin de Máster del Máster Universitario en Modelización Matemática de la Universidad de Salamanca

Salamanca, a fecha de la firma electrónica

Firmado. ...

ASENSIO
SEVILLA
MARIA
ISABEL -
07961048N

Firmado
digitalmente por
ASENSIO SEVILLA
MARIA ISABEL -
07961048N
Fecha:
2024.07.04
20:24:49 +02'00'

IGLESIAS
PEREZ JOSE
MANUEL -
70895665M



2024.07.04
20:10:32
+02'00'

Autorización de difusión

La abajo firmante, matriculada en el Máster en Modelización Matemática, autoriza a la Universidad de Salamanca (USAL) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autora el presente Trabajo Fin de Máster: «Acoplamiento de modelos físicos para la simulación de problemas medioambientales. Aplicación a casos reales.», realizado durante el curso académico 2023-2024 bajo la dirección de María Isabel Asensio Sevilla y José Manuel Iglesias Pérez, profesora e investigador del Departamento de Matemática Aplicada, y a la Biblioteca de la USAL a depositarlo en el Repositorio Institucional Gredos con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Laura Herrero García

5 de Julio de 2024

Resumen

Ante la problemática de los incendios forestales, desde los años 40 se han desarrollado diversos modelos matemáticos para predecir la evolución del fuego e intentar paliar las consecuencias socioeconómicas, sanitarias y mediambientales producidas por estos. En este trabajo se estudian tres modelos acoplados con el objetivo de realizar simulaciones sobre incendios y el humo generado.

En primer lugar, se realiza una revisión en profundidad de los modelos PhyFire, de propagación de incendios, HDWind, de campos de viento, y PhyNX, de dispersión atmosférica, desarrollados por el grupo de investigación en Simulación Numérica y Cálculo Científico (SINUMCC) de la Universidad de Salamanca. Estos modelos son adaptados para su funcionamiento acoplado en el marco del proyecto europeo H2020 TREEADS. Estos modelos acoplados son utilizados para realizar tres simulaciones de incendios forestales, estudiando la evolución espaciotemporal y el humo generado por el incendio. Dos de las simulaciones representan incendios ficticios, situadas en la garganta de Samaria y en la península de Sorrento; la otra simulación es sobre un incendio real ocurrido el 24 de julio de 2022 en la zona del Valle del Tiétar. De este último se disponen datos oficiales, permitiendo así realizar un estudio comparativo entre estos y los resultados obtenidos por la simulación.

Palabras clave: PhyFire, HDWind, PhyNX, modelización matemática, simulación de incendios forestales, simulación de humo

Abstract

Since the 40's, due to wildfire problems, an amount of mathematical models have been developed with the purpose of predicting the evolution of the fire spread and attempting to mitigate the socioeconomic, sanitary and climate consequences. In this work three models are studied with the purpose of simulating wildfires and the smoke they generate.

Firstly a revision is done over the models: PhyFire, fire spread, HDWind, wind fields and PhyNX, atmospheric dispersion, developed by the research group of Numerical Simulation and Scientific Calculation (SINUMCC) of the university of Salamanca. These models were adapted into their coupled state in the context of the European project H2020 TREEADS. The triad is used to produce three distinct wildfire simulations with the intention of studying the spatiotemporal evolution and the smoke released. Two simulations represent fictional fires, located in the Samaria Gorge and in the Sorrento peninsula; the last one is a real fire that happened on the 24 of July of 2022 in the Tiétar Valley. There is official data that allows a comparative study between the data produced by the simulation and official real world event.

Key-words: PhyFire, HDWind, PhyNX, mathematical modelling, wildfire simulation, smoke simulation

Resumo

Devido há problemática dos incêndios florestais, desde os anos 40, foram desenvolvidos diversos modelos matemáticos para estimar a evolução do fogo e tentar diminuir as consequências socioeconômicos, sanitárias e ambientais produzidas pelos mesmos. Neste trabalho estudasse três modelos acoplados com o objetivo de realizar simulações de incêndios e do fumo gerado.

Em primeiro lugar é feita uma revisão profunda dos modelos PhyFire, de propagação de incêndios, HDWind, de campos de vento, e PhyNX, de dispersão atmosférica, desenvolvidos pelo grupo de investigação de Simulação Numérica e Cálculo Científico (SINUMCC) da universidade de Salamanca. Estes modelos são adaptados ao seu funcionamento acoplado dentro do projeto europeu H2020 TREEADS. O conjunto é utilizado para realizar três simulações de incêndios florestais com foco no estudo da evolução espaçotemporal e do fumo produzido. Duas das simulações representam incêndios fictícios, situadas na garganta de Samariá e na península de Sorrento; a restante é sobre um incêndio real ocorrido a 24 de julho de 2022 na zona do vale Tiétar. Deste ultimo existem dados oficiais que permitem a realização de um estudo comparativo entre estes e os dados produzidos pela simulação.

Palavras chave: PhyFire, HDWind, PhyNX, modelização matemática, simulação de incêndios florestais, simulação de fumo

Índice general

1. Introducción	1
2. Estado del arte	6
3. Objetivos y Metodología	10
3.1. Objetivos	10
3.2. Metodología	10
4. Contexto del trabajo desarrollado	12
4.1. Modelo de viento HDWind	12
4.1.1. Descripción del modelo	13
4.1.2. Ecuaciones asintóticas	14
4.1.3. Problema de control	16
4.2. Modelo de Incendios PhyFire	17
4.2.1. Descripción del modelo	18
4.2.2. Contenido de humedad del combustible	20
4.2.3. Radiación no local	21
4.2.4. Altura de la llama	23
4.2.5. Temperatura de la llama	23
4.2.6. Método numérico	24
4.3. Modelo de dispersión atmosférica	25
4.3.1. Descripción del modelo	25
4.3.2. Método numérico	28
5. Resultados parciales y finales	29
5.1. Datos de entrada	29
5.1.1. Datos geoespaciales	29
5.1.2. Datos meteorológicos	32
5.2. Simulación en la garganta de Samaria	33
5.3. Simulación en la península de Sorrento	38
5.4. Simulación en el Valle del Tiétar	43
6. Discusión, conclusiones y líneas futuras de trabajo	49

Índice de figuras

1.1.	A la izquierda, evolución del número de conatos e incendios en España; a la derecha, evolución del número de hectáreas forestales afectadas en España [48].	1
1.2.	Media anual del número de incendios en cada país de Europa (EFFIS [24]).	2
1.3.	Imagen tomada el 21 de junio de 2024 a las 18:34h GMT+2[51]).	2
1.4.	Modelo conceptual de las relaciones entre los parámetros del fuego y sus impulsores [60].	4
1.5.	Triángulo del fuego [75].	5
2.1.	Túnel de viento utilizado en los estudios del comportamiento del fuego de Fons [36].	6
2.2.	Representación de un frente de fuego en un modelo de simulación de cuadrícula regular basado en raster. La imagen de la izquierda precede en tiempo a la de la derecha [68].	7
2.3.	El principio de Huygens aplicado a la propagación del fuego, con viento uniforme desde el suroeste [70].	8
2.4.	Diagrama de flujo del modelo WRF-SFIRE acoplado con un modelo de humedad del combustible y el transporte químico de emisiones (traducción propia basada en [55])	9
4.1.	Domino Ω	13
4.2.	Esquema del dominio 3D, la llama y el rayo incidente [31]	21
4.3.	Molécula de radiación [31]	22
4.4.	Cambio de coordeandas	26
5.1.	Mapa de tipos de combustibles en España (excepto Canarias), elaborado por el grupo de investigación SINUMCC.	30
5.2.	Mapa de combustibles en Europa [28].	30
5.3.	Ruta de senderismo por la garganta de Samaria [18].	34
5.4.	Mapa geolocalizado a través del sistema de coordenadas EPSG:4326-WGS 84. La zona a estudiar está delimitada por las líneas magentas. El punto amarillo representa el foco de ignición del incendio a simular.	34
5.5.	Arriba, la vegetación de la zona; abajo, se han resaltado las zonas sin combustible. Esta máscara de presencia de combustible fue proporcionada por la Universidad Técnica de Creta y generada a partir de imágenes de SentinelHub.. . . .	35

5.6.	Evolución del fuego. Hora de simulación, desde la esquina superior izquierda en sentido horario: 12:45h, 14:00h, 15:15h y 16:30h (GMT+0).	36
5.7.	Izquierda, evolución del ROS a lo largo del tiempo; derecha, acumulación de hectáreas afectadas en el caso de Grecia.	37
5.8.	Concentración de humo a las 16:00h GMT+0 por alturas, donde la capa 0 está a la altura de 1m, capa 1 a 5m, capa 2 a 10m, capa 3 a 20m y capa 4 a 40m.	38
5.9.	Sorrento (Italia) [27].	39
5.10.	Mapa geolocalizado a través del sistema de coordenadas EPSG:4326-WGS 84. La zona a estudiar está delimitada por las líneas rosas. El punto amarillo representa el foco de ignición del incendio a simular.	39
5.11.	Mapa con los tipos de combustibles clasificados por polígonos.	40
5.12.	Evolución del fuego en los primeros instantes de tiempo. Desde la esquina superior izquierda, en sentido horario: 00:10h, 00:20h, 00:30h y 00:40h. . .	41
5.13.	Evolución del fuego. A la izquierda, 01:10h; a la derecha, 02:00h.	41
5.14.	Izquierda, evolución del ROS a lo largo del tiempo; derecha, acumulación de hectáreas afectadas en el caso de Italia.	42
5.15.	Concentración de humo en las capas 0 (1m de altura) y 4 (40m de altura) a las 01:40h de la simulación.	42
5.16.	Incendio del Valle del Tiétar [26].	43
5.17.	Mapa geolocalizado a través del sistema de coordenadas EPSG:4326-WGS 84. El punto amarillo representa el foco de ignición del incendio a simular. . .	43
5.18.	Ortofoto del área de simulación. El punto amarillo representa el foco de ignición.	44
5.19.	Mapa con las zonas donde no hay combustible marcadas en amarillo; foco de ignición en azul.	44
5.20.	Hectáreas afectadas a lo largo de la simulación en el caso de España. . . .	45
5.21.	Evolución del fuego. Hora de simulación : 16:35h (derecha), 16:50h (izquierda).	46
5.22.	Evolución del fuego. Hora de simulación, desde la esquina superior izquierda en sentido horario: 17:35h, 18:35h, 19:50h y 21:50h.	46
5.23.	Simulación del incendio comparada con el área afectada por el incendio real (verde rayado).	47
5.24.	Concentración de humo en la capa 2 en los instantes de tiempo, desde la esquina superior izquierda en sentido horario: 16:20h, 18:20h, 19:50h y 21:50h.	48

Índice de cuadros

4.1.	Incógnitas adimensionales y su relación con magnitudes físicas	18
4.2.	Parámetros dependientes del tipo de combustible (F.c. = factor de corrección)	19
4.3.	Parámetros del modelo	19
5.1.	Tabla de valores de los parámetros dependientes del tipo de combustible. Por columnas, de izquierda a derecha: tipo de combustible, temperatura de la llama, temperatura de pirólisis, altura de la llama, factor de corrección de la altura de la llama por viento, factor de corrección de la altura de la llama por la pendiente, vida media de combustión, carga máxima de combustible inicial, humedad de referencia, capacidad calorífica, calor de combustión, coeficiente de emisión del combustible y longitud de la rugosidad.	32
5.2.	Longitudes de rugosidad en función del tipo de superficie (traducción propia de [73]).	33
5.3.	Datos meteorológicos medidos en la estación Samaria.	36
5.4.	Altura de la llama según el tipo de combustible.	40
5.5.	Datos meteorológicos del viento dominante.	45

Agradecimientos

A Mabel, Jose y Manel, por confiar en mi, guiarme durante todo este trabajo y ayudarme siempre.

A mi familia, quienes van a sufrir otra mudanza más después de entregar este trabajo y sé que van a seguir conmigo.

A Javi y Miguel, porque creo que en algún momento van a buscar este documento. Estoy esperando un mensaje diciendo que habéis visto esto. Apuesto a que Miguel lo encontrará antes y avisará a Javi.

A Afonso, por las veces que dije que iba a estudiar y acabamos en el cine... ¡el tiempo está después!

«And I've been a forest fire
I am a forest fire
And I am the fire and I am the forest
And I am a witness watching it
I stand in a valley watching it
And you are not there at all»

Mitski

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo se enmarca dentro de la problemática de los incendios forestales y las emisiones a la atmósfera que estos generan. En España, según el avance informativo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) de 2023 [48], tuvieron lugar 2.283 incendios. De estos, 20 fueron clasificados como grandes incendios¹. Según el Ministerio de Interior (MIR), estos estuvieron directamente correlacionados con las condiciones meteorológicas [47]. Además, según el Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación de Emergencias (CENEM), la campaña de 2023 fue la tercera con mayor número de personas evacuadas desde que hay registros [47]. En la Figura 1.1 se observa que, aunque el número de incendios parece estar disminuyendo ligeramente, no se puede decir lo mismo del número de hectáreas afectadas.



Figura 1.1: A la izquierda, evolución del número de conatos e incendios en España; a la derecha, evolución del número de hectáreas forestales afectadas en España [48].

Según el Servicio de Vigilancia Atmosférica de Copernicus (CAMs, por sus siglas en inglés), en el verano de 2022 las emisiones de carbono producidas por incendios forestales fueron las más altas desde 2007 en la UE y Reino Unido [24]. Ese mismo año, según el Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS, por sus siglas en inglés)[29], se alcanzó la cifra de 770.710 ha quemadas, la más alta desde que comenzaron los registros en 2006, siendo España el país en que se produjo el mayor número de hectáreas quemadas (299.436 ha). En 2023, España fue el tercer país con mayor superficie forestal afectada (91.220 ha), precedido por Grecia (174.773 ha) e Italia (97.984 ha). Además,

¹Se denominan grandes incendios forestales a los que arrasan superficies superiores a las 500 hectáreas.

observando las medias del número de incendios por año en cada país (Figura 1.2), Italia, Portugal, Rumanía y España resaltan en gran medida sobre el resto.

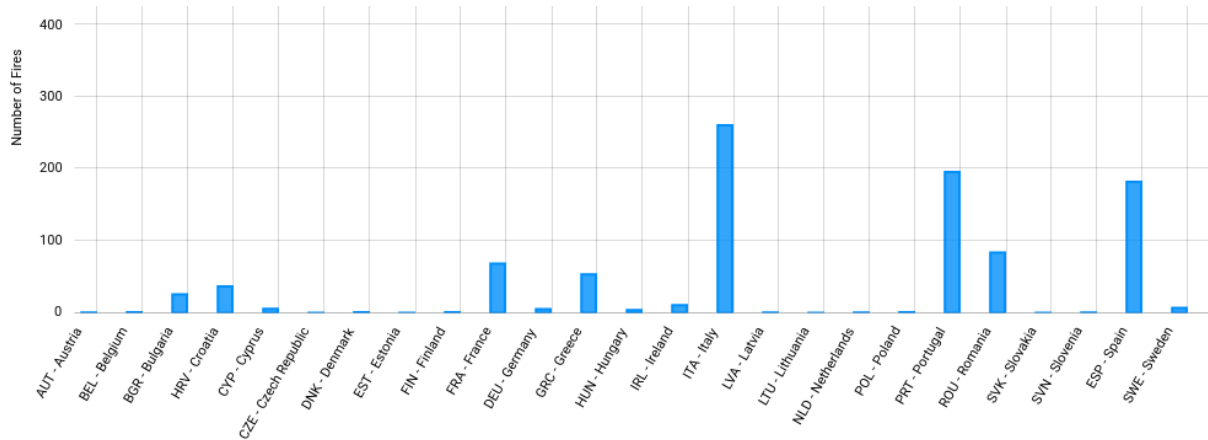


Figura 1.2: Media anual del número de incendios en cada país de Europa (EFFIS [24]).

Respecto a la situación mundial, destacan dos zonas: África, donde los incendios se utilizan ampliamente para despejar pastizales y sabanas, pues representa alrededor del setenta por ciento del área quemada a nivel mundial [4]; y Sudamérica, donde el humo de los incendios se estima que causó aproximadamente 12.000 muertes prematuras cada año entre 2014 y 2019 en todo el continente, alrededor de 230 de estas muertes en tierras indígenas [14]. Una visión del mundo puede verse en la Figura 1.3, donde se muestra un mapa de incendios de datos terrestres de la NASA del 21 de junio de 2024 a las 18:24h GMT+2. Este acumula las ubicaciones de los incendios y las anomalías térmicas detectadas por el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) a bordo de los satélites Terra y Aqua durante un período de 1 día.

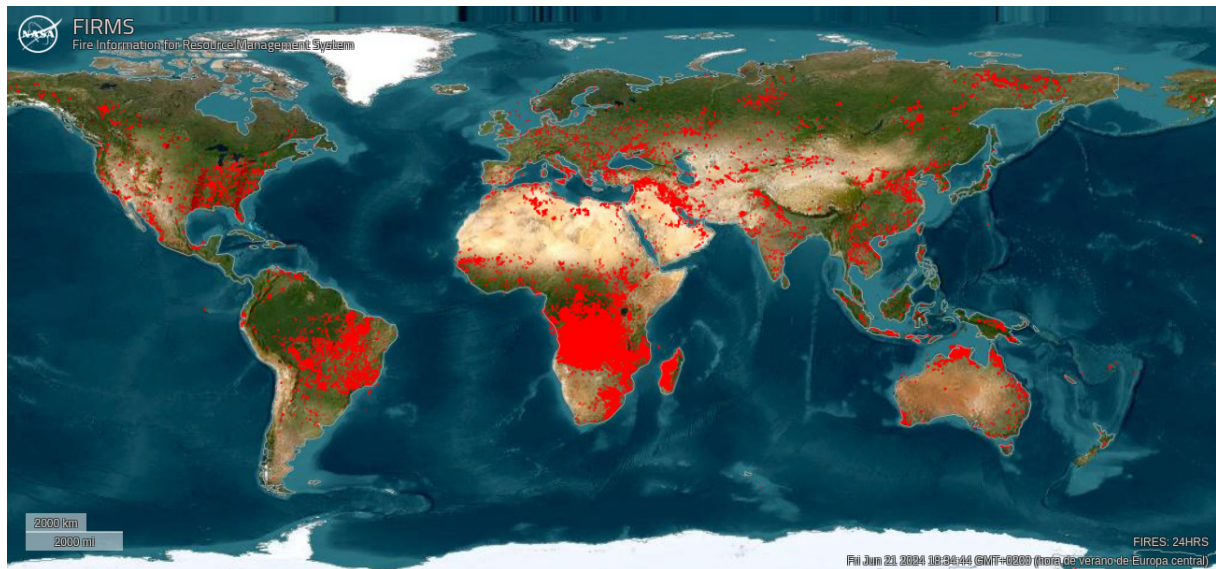


Figura 1.3: Imagen tomada el 21 de junio de 2024 a las 18:34h GMT+2[51]).

Ante esta situación la ONU advierte de la necesidad de adoptar diversas estrategias para frenar las consecuencias socioeconómicas, sanitarias y medioambientales que causan los incendios forestales y el humo que generan. [53].

En cuanto a las repercusiones socioeconómicas, los gastos surgen de diversos factores como los relacionados con la extinción de incendios por parte del sector público, los seguros, la pérdida de infraestructuras, la reforestación del terreno y la disminución de la disponibilidad de materias primas. Ejemplos directos de esto son los incendios de Australia de 2019-2020, los cuales se estima que tuvieron un coste de 23.000 millones de dólares [52], o la reciente problemática de las viviendas no asegurables en Estados Unidos debido al riesgo de incendios [64, 17].

Sobre las consecuencias sanitarias, se sabe que el humo emitido por los incendios forestales puede causar enfermedades en cualquier persona, llegando incluso a provocar la muerte. Existen diversos estudios que estiman la cantidad de muertes prematuras que pueden atribuirse a esta causa. Por ejemplo, en este reciente estudio [22] se estima que, en California, entre 52.480 y 55.710 muertes prematuras son atribuibles al $PM_{2,5}$ de incendios forestales durante el período de 2008-2018. A nivel mundial, se estima que el humo de los incendios forestales causa más de 339.000 muertes prematuras al año, una cifra considerablemente mayor al número de personas que pierden la vida directamente en estos incendios [41].

En relación a las consecuencias medioambientales, se encuentra la pérdida masiva de vegetación, la degradación del suelo, las muertes y desplazamientos de animales y el deterioro de la capa de ozono. Respecto a la tercera, se sabe que la combinación de altas temperaturas y llamas de los incendios, junto con el humo asociado, pueden causar lesiones, deterioro, desplazamiento y muerte de los animales. Aunque el impacto depende en gran medida del nivel de adaptación al fuego de cada especie, los grandes incendios forestales amenazan cada vez más la vida y su entorno. El Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT, por sus siglas en inglés) afirma que las partículas de humo en la estratosfera pueden desencadenar reacciones químicas que erosionan la capa de ozono [66]. Susan Solomon, una de las autoras de este artículo, asegura que *«si los futuros incendios forestales son más fuertes y frecuentes, como se prevé que ocurra con el cambio climático, la recuperación prevista del ozono podría retrasarse años»*. Datos de los incendios forestales de Australia de 2019-2020 reflejan las anteriores afirmaciones: causaron la muerte o desplazamiento de aproximadamente 3.000 millones de animales, mientras que casi 70 especies amenazadas vieron hasta un 50 % de su hábitat quemado [52]. Los ecosistemas de agua dulce también se vieron gravemente afectados, con una mortalidad récord de peces registrada en estuarios situados aguas abajo de las áreas quemadas [65]. Además, se estima que las partículas de humo ampliaron el agujero de ozono en un 10 % [66].

Así, nace la pregunta: ¿qué causa estos incendios? La literatura especializada coincide en que no existe un único factor que por sí solo produzca incendios forestales, sino más bien una combinación de tres: igniciones (naturales o humanas), vegetación densa y continua (combustible) y sequía [60]. Esta relación es de tipo umbral, es decir, existe cierto nivel de estos tres factores a partir del cual la probabilidad de incendio aumenta de manera exponencial. Además, las condiciones meteorológicas pueden reducir estos umbrales, aumentando así la probabilidad de incendio. En el estudio también se señala que, sin ser un factor determinante, el cambio climático incrementa la frecuencia con la que se cruzan

algunos de estos umbrales al propiciar la frecuencia de años secos y extender la duración de la temporada de incendios. Otros elementos influyentes son los patrones de ignición alterados y las estructuras de combustibles (por ejemplo, el incremento de incendios en España en los años 70 y 80 se explica principalmente por el aumento en continuidad de la vegetación debido al abandono rural [59]).

En la Figura 1.4 (a) puede verse de manera gráfica la relación entre la probabilidad de incidencia de incendio frente a igniciones, la propagación del fuego frente a la continuidad del combustible en el paisaje y la inflamabilidad del combustible frente a la sequía. Las líneas verticales discontinuas representan el umbral, indicando sobre esta con una flecha roja la posibilidad de desplazar el umbral hacia la izquierda si el clima es propicio para incendios (viento fuerte, temperatura alta o humedad baja). El diagrama de flujo muestra los principales factores que afectan a los impulsores del fuego. Las flechas indican interacciones positivas, con la excepción de los cambios en el combustible, que pueden aumentar o disminuir la continuidad del combustible dependiendo del sistema (por ejemplo, fragmentación del paisaje frente al aumento de campos abandonados).

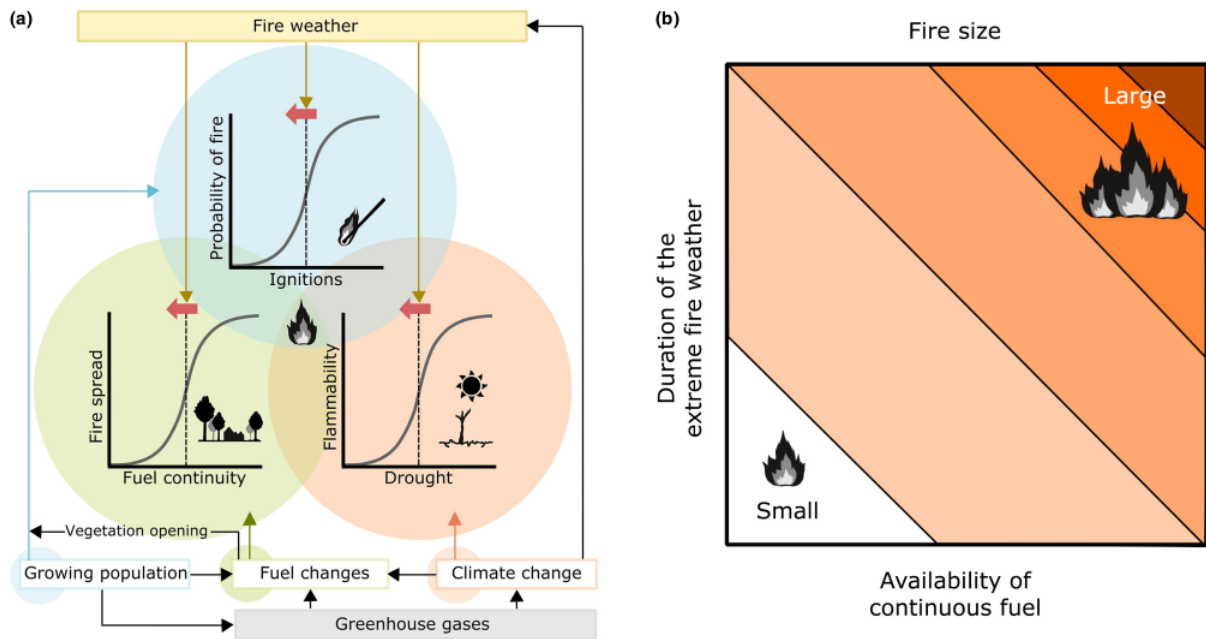


Figura 1.4: Modelo conceptual de las relaciones entre los parámetros del fuego y sus impulsores [60].

Una vez se han superado estos umbrales, en la Figura 1.4 (b) puede verse el tamaño del incendio determinado por la duración del clima favorable al fuego y la disponibilidad de combustibles continuos en el paisaje.

Junto a este modelo conceptual de las causas de incendios, existen otros como el *triángulo del fuego* (Figura 1.5) [75]. Este representa los tres elementos necesarios para que se produzca la combustión, explicando así como se puede extinguir un fuego eliminando alguno de los lados de este triángulo. Estos elementos son: combustible, comburente

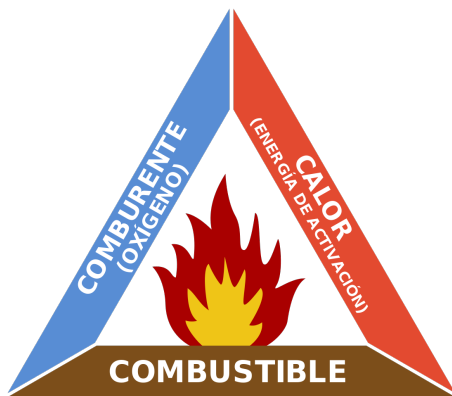


Figura 1.5: Triángulo del fuego [75].

(oxígeno) y energía de activación (calor). Modelos más modernos transforman este triángulo en un tetraedro incluyendo como cuarto elemento la reacción en cadena, que tiene lugar cuando el fuego desprende calor y lo transmite al combustible, realimentándolo y continuando la combustión.

Como puede verse tras este pequeño resumen, son diversas las consecuencias que conllevan los incendios forestales y el humo que emiten. Ante esta problemática, en los años 40 nace la modelización de incendios forestales con el objetivo de poder predecir la evolución espaciotemporal de estos y paliar sus consecuencias.

En el siguiente capítulo (§2) se realiza un recorrido histórico sobre la modelización de incendios forestales desde los años 40 a la actualidad, situando en contexto el presente estudio. Así pues, « *I would like, if I may, to take you on a strange journey...* »².

² *The Rocky Horror Picture Show* (1975)

Capítulo 2

Estado del arte

La modelización de incendios forestales comienza aproximadamente en los años 40 durante la II Guerra Mundial. Bajo la perspectiva de Estados Unidos, fue el ingeniero mecánico Wallace Fons el primero en abordar la modelización de estos incendios [37].

Fons realizó prácticas experimentales, tales como construir túneles de viento y fogatas de ensayo, para estudiar el comportamiento y las propiedades del fuego. En 1946, publicó el primer modelo matemático para predecir la velocidad de propagación del fuego con un enfoque esencialmente teórico. Este estaba basado en la ecuación de conservación de energía [36, 58].

Desde el modelo de Fons, se han desarrollado diversos modelos de incendios forestales. En [58], se propone la siguiente clasificación según la naturaleza de las ecuaciones que describen el modelo:

- Modelos teóricos: generados a partir de las leyes que gobiernan la mecánica de fluidos, la combustión y la transferencia de calor. La validación de estos modelos es extremadamente compleja.
- Modelos empíricos: compuestos por correlaciones estadísticas extraídas de experimentos o estudios históricos de incendios forestales. Solo son aplicables a sistemas en los cuales las condiciones son idénticas a las utilizadas en la formulación y prueba de los modelos.
- Modelos semi-empíricos: propuestos a partir de expresiones simples, generales y teóricas, y completados mediante experimentación. Su extrapolación es adecuada en situaciones similares a aquellas en las que se obtuvieron datos experimentales. La dificultad en la validación de estos modelos es menor que en la modelización teórica, aunque sigue siendo significativa.



Figura 2.1: Túnel de viento utilizado en los estudios del comportamiento del fuego de Fons [36].

Entre las décadas de 1960 y 1990, varios países desarrollaron nuevos modelos de incendios, siendo la mayoría de estos teóricos. Sin embargo, debido a la continua dificultad para evaluar la contribución parcial de cada mecanismo de transferencia de calor, surgieron los enfoques empíricos y semi-empíricos [58]. Esta nueva ola de modelos de incendios fue posible gracias a los experimentos y la recopilación de datos de las décadas anteriores, entre los que se sitúan los estudios de Fons. Australia y Rusia lanzaron los primeros modelos empíricos, por McArthur [46], y semi-empíricos, por Molchanov [50].

Uno de los modelos de incendios más influyentes es el modelo semi-empírico de Dick Rothermel, publicado en 1972 [63]. Este fue implementado en la primera versión del Sistema Nacional de Clasificación del Peligro de Incendios de EE.UU. (NFDRS, por sus siglas en inglés). Inicialmente, esta implementación consistía en tablas de consulta y nomogramas donde el personal de bomberos ingresaba manualmente el viento y el ángulo de pendiente para estimar la velocidad y la dirección de la propagación del fuego. Hoy en día, el NFDRS está computerizado, basándose aún en las ecuaciones de Rothermel [37]. Muchos otros paquetes de software de modelado de incendios, como el sistema de predicción del comportamiento del fuego Fire Area Simulator (FARSITE) [35], también implementan el este modelo.

A finales de los 80 y principios de los 90, gracias a la llegada de la computación personal económica y el uso creciente de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), comenzaron a desarrollarse diversos métodos para predecir la propagación de incendios a través del paisaje añadiendo la contribución de simples programas informáticos [21, 13]. La mayoría de métodos aceptados para simular incendios forestales en ese momento eran modelos unidimensionales derivados de estudios empíricos [68], lo que hizo necesaria la creación de un método para convertir el modelo de propagación hacia adelante en una sola dimensión en uno que pudiera propagar todo el perímetro en dos dimensiones a través de un paisaje [69]. En esta línea, la construcción de simuladores de incendios forestales pue-

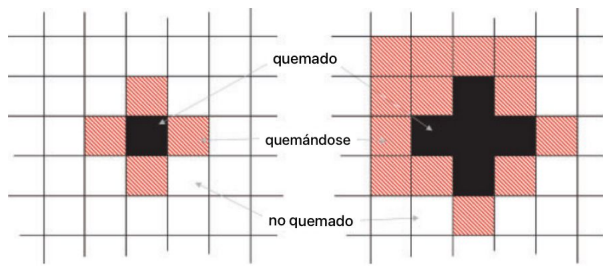


Figura 2.2: Representación de un frente de fuego en un modelo de simulación de cuadrícula regular basado en raster. La imagen de la izquierda precede en tiempo a la de la derecha [68].

de dividirse en dos categorías [3]: aquellos vinculados a un sistema de cuadrícula regular y aquellos vinculados al plano continuo [62]. El primero trata el fuego como un grupo de células independientes contiguas que crece en número, descrito en la literatura como una implementación raster. En la Figura 2.2 puede verse un ejemplo de esto con tres estados de combustible: no quemado (blanco), quemándose (rayado) y quemado (negro), donde el fuego comenzó en una sola celda en el centro y se extendió a aquellas celdas que comparten una frontera con la celda en llamas (vecindad de Von Neumann). Un tiempo después, el

fuego se expandió con una inclinación hacia la esquina superior izquierda. El segundo tipo trata el perímetro del fuego como una curva cerrada de puntos enlazados, descrito en la literatura como una implementación vectorial. La propagación del fuego se lleva a cabo en este caso utilizando algún tipo de algoritmo de expansión, basándose principalmente en dos

métodos: en la proximidad de contacto directo o vecino cercano (Figura 2.2) y en el principio de las ondas de Huygens, donde cada punto en un perímetro de fuego se considera una fuente teórica de un nuevo incendio, cuyas características se basan en el modelo de propagación del fuego dado y en las condiciones predominantes en la ubicación del origen del nuevo incendio [68]. En la Figura 2.3 puede verse un ejemplo de esto, donde se aplica el principio de Huygens a un dominio de tipo continuo. La elipse del centro representa el frente de fuego en el instante de tiempo t y la exterior en el instante $t + \Delta t$. En A, la propagación del fuego se da a través de un paisaje con un tipo de combustible uniforme; en B, a través de un paisaje con cuatro tipos diferentes de combustible. Un modelo que utiliza este segundo método de propagación es el de Knight y Coleman [42], el cual se emplea en el software SiroFire [21].

Más reciente es el uso de técnicas de inteligencia artificial en la modelización de incendios forestales. Vega-García realizó la primera aplicación del aprendizaje automático a la modelización de incendios forestales en 1996 [40, 72]. En el estudio, se utilizó una red neuronal artificial, entrenada y probada con datos históricos de incendios forestales, para predecir incendios causados por humanos en Alberta, Canadá, prediciendo correctamente el 85 % de las observaciones sin incendio y el 78 % de las observaciones con incendio. Desde entonces, son diversos los modelos que emplean esta técnica, mejorando la capacidad actual de obtener datos cada vez más confiables sobre incendios forestales para predecir su comportamiento [74].

Otra de las tendencias de los últimos años es la incorporación de la capa de aire en el procesos de simulación. Hasta la fecha, la mayoría de los enfoques de simulación empleaban una capa meteorológica muy simple en la que, generalmente, se asumían constantes el viento, la temperatura y la humedad relativa en todo el dominio computacional, dando como resultado predicciones aplicables solo a una región muy localizada en la que la suposición de un clima espacialmente constante era válida [68]. Gracias al avance tecnológico y al gran desarrollo de los SIG, tuvo lugar el primer modelo de propagación de incendios acoplado con un modelo numérico atmosférico: el modelo de Clark, llamado CAWFE [19]. Inicialmente, este se basó en el modelo empírico de propagación de incendios forestales de McArthur, pero posteriormente se revisó para incorporar el modelo de propagación de Rothermel [68]. Al acoplar estos modelos, se tiene en cuenta que la humedad atmosférica, la temperatura, la velocidad del viento y la dirección del viento afectan el entorno del fuego, y que el humo y los flujos de calor y humedad del fuego influyen la atmósfera. En [68] se menciona que, en su forma más básica, este tipo de modelos acoplados fuego-atmósfera que incorporan un modelo de propagación de incendios preexistentes pueden considerarse un tipo de algoritmo de propagación.

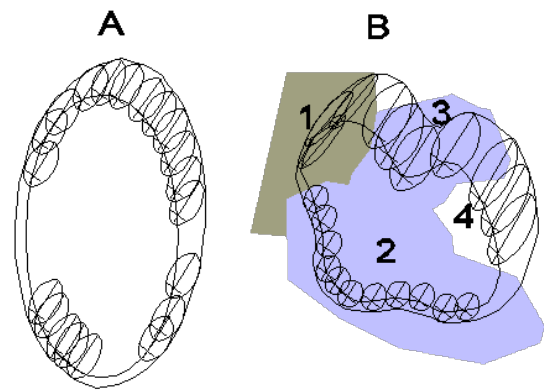


Figura 2.3: El principio de Huygens aplicado a la propagación del fuego, con viento uniforme desde el suroeste [70].

A día de hoy, los avances tecnológicos hacen posible que modelos complejos puedan ser una opción real. Así, la investigación se centra en modelos teóricos acoplados a la atmósfera, como WFDS¹. Sin embargo, estos sistemas siguen teniendo un elevado coste computacional. Por esto, existen alternativas que combinan modelos empíricos o semi-empíricos con modelos atmosféricos, como es el caso de WRF-SFIRE [12, 45]. Además, a parte de modelos atmosféricos se están acoplando otros de diversas naturalezas. Por ejemplo, en la Figura 2.4 puede verse el diagrama de flujo del modelo WRF-SFIRE acoplado con modelos de humedad del combustible y transporte químico de emisiones [43]. No obstante, el uso de la modelización de la propagación de incendios forestales y las herramientas desarrolladas en consecuencia ha sido relativamente limitado en la práctica debido al alto nivel de incertidumbre tanto en los modelos como en los datos disponibles para su inicialización y parametrización. En la actualidad, reducir el nivel de incertidumbre sigue siendo uno de los desafíos no resueltos de la modelización de incendios forestales [10].

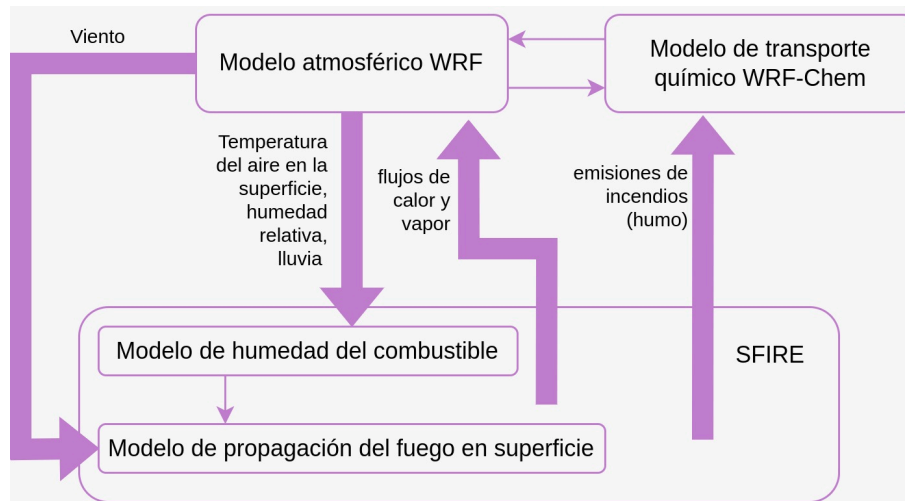


Figura 2.4: Diagrama de flujo del modelo WRF-SFIRE acoplado con un modelo de humedad del combustible y el transporte químico de emisiones (traducción propia basada en [55])

En este contexto, el presente trabajo estudia un modelo acoplado para simular la evolución espaciotemporal de incendios forestales y el humo generado por estos utilizando los modelos PhyFire [10], basado en la física fundamental de la combustión y la propagación del fuego, HDWind [32, 34, 16], basado en una aproximación asintótica de las ecuaciones de Navier-Stokes, genera un campo de viento de alta resolución que ajusta un conjunto de mediciones específicas del viento a factores locales dentro del dominio de simulación, y PhyNX [33], un modelo de dispersión atmosférica adaptado a la dispersión de la nube de humo generada por un incendio.

¹Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator [1]

Capítulo 3

Objetivos y Metodología

3.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo es comprobar el correcto funcionamiento de la herramienta de simulación de propagación de fuego y humo, basada en los modelos PhyFire de propagación de incendios, HDWind de campos de viento, y PhyNX de dispersión atmosférica, desarrollados por el grupo SINUMCC, y adaptados para su funcionamiento acoplado en el marco del proyecto europeo H2020 TREEADS (<https://treeads-project.eu/>) [71]. Para ello se han realizado una serie de simulaciones en diferentes zonas de Europa, y con diferentes objetivos:

- Simulación de un incendio forestal sintético en la zona de la garganta de Samaria (Creta, Grecia), donde se realizan varias rutas de senderismo. Este trabajo se llevó a cabo con el objetivo de ayudar a trazar las vías de escape adecuadas ante potenciales incendios.
- Simulación de un incendio forestal sintético en la zona de la península de Sorrento (Italia), con el objetivo de asesorar en la ubicación óptima de los pilares de un teleférico de nueva construcción.
- Simulación de un incendio forestal real en El Valle del Tiétar (Ávila), cerca de los pueblos San Juan de la Nava y El Barraco. Este ocurrió el 24 de julio de 2022 y dejó una cifra aproximada de 492,37 hectáreas afectadas. El objetivo de esta simulación es comprobar si las predicciones obtenidas con los modelos son correctas.

3.2. Metodología

Con la finalidad de realizar estas simulaciones, el presente trabajo sigue los siguientes pasos:

1. Estudiar la problemática actual de los incendios forestales, valorando la importancia de los modelos de simulación de incendios forestales y el humo que generan.
2. Conocer el estado del arte de la modelización de incendios forestales, así como los avances y limitaciones de los modelos desarrollados.

3. Estudiar en profundidad los modelos HDWind, PhyFire y PhyNX, su diseño, implementación y funcionamiento acoplado, para poder llevar a cabo las mencionadas simulaciones.
4. Obtener los datos geoespaciales y meteorológicos necesarios para las simulaciones.
5. Realizar las simulaciones utilizando las herramientas tecnológicas desarrolladas para la implementación de los modelos y los datos obtenidos.
6. Visualizar los datos obtenidos mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y gráficas.
7. Analizar y valorar los resultados obtenidos.

Capítulo 4

Contexto del trabajo desarrollado

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar simulaciones de incendios forestales y sus emisiones de humo utilizando tres modelos de simulación numérica desarrollados por el grupo de investigación SINUMCC de la Universidad de Salamanca: HDWind (§4.1), PhyFire (§4.2) y una versión adaptada de PhyNX (§4.3). El primero de estos simula campos de viento, el segundo la propagación de incendios forestales y el tercero la evolución temporal de la concentración de contaminantes en la atmósfera. La integración entre estos se da de la siguiente forma:

- HDWind proporciona datos de campos de viento necesarios para PhyFire y PhyNX. PhyFire, al ser un modelo bidimensional, utiliza solo la capa de viento próxima al suelo, mientras que PhyNX, al ser un modelo tridimensional, utiliza varias.
- PhyFire y PhyNX se relacionan mediante la concentración de contaminante: PhyFire calcula el humo emitido a la atmósfera como consecuencia de la cantidad de combustible quemado y PhyNX utiliza este dato y simula la dispersión de la nube de humo.

En esta sección se describen estos tres modelos, indicando también los métodos numéricos empleados para sus resoluciones.

4.1. Modelo de viento HDWind

HDWind —High Definition Wind Model— es un modelo para la simulación de campos de viento a escala local. La importancia de este modelo reside en su variada utilidad para estudiar problemas relacionados con la atmósfera como pueden ser el efecto del viento en la propagación de un incendio, el transporte de contaminantes o la estimación del rendimiento según la ubicación de parques eólicos.

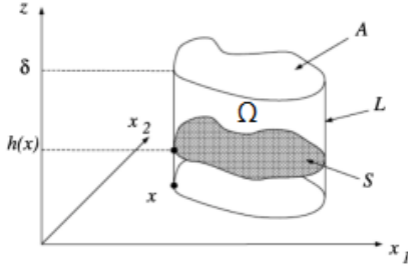
A continuación, se describen los aspectos más importantes del modelo. No obstante, la información completa relativa a HDWind puede encontrarse en diversos artículos y trabajos, como [32, 34, 16, 57].

4.1.1. Descripción del modelo

Se toma una superficie terrestre S como un dominio tridimensional definido por

$$\begin{aligned} \mathcal{S} : \omega &\longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ (x, y) &\mapsto (x, y, h(x, y)), \end{aligned} \quad (4.1)$$

siendo $\omega \subset \mathbb{R}^2$ la proyección de la superficie $\mathcal{S}$ y $h(x, y)$ una función conocida que representa la altura de la superficie $\mathcal{S}$. Sea $\mathbf{x} = (x, y) \in \omega$, t tiempo, δ altura máxima. La capa de aire estudiada se representa como $\Omega = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, h(\mathbf{x}) < z < \delta\}$, cuya frontera descompone como $\partial\Omega = S \cup A \cup L$ donde:



- $S = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, z = h(\mathbf{x})\}$ representa la superficie terrestre.
- $A = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, z = \delta\}$ representa la frontera horizontal superior de la capa de aire.
- $L = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \partial\omega, h(\mathbf{x}) < z < \delta\}$ representa la frontera vertical lateral de la capa de aire.

Figura 4.1: Dominio Ω

Se denota con el subíndice $\mathbf{x}$ a los operadores bidimensionales y con z a los operadores relativos a la dirección vertical. Los operadores tridimensionales son aquellos que no llevan ninguno de estos subíndices. Además, las letras minúsculas denotan variables bidimensionales, mientras que las letras mayúsculas denotan variables tridimensionales. En el campo de viento $\mathbf{U} = (U_1, U_2, U_3)$ se distinguen las componentes horizontales, $\mathbf{V} = (U_1, U_2)$, de la vertical, $W = U_3$. Se tiene que P denota el potencial, T la temperatura. El vector normal unitario interior a $\partial\Omega$ se denota por $\mathbf{N}$.

Se toman $\mathbf{U}$ y P satisfaciendo las ecuaciones de Navier-Stokes. Por un lado, la segunda ecuación de Newton (momento) queda

$$\partial_t \mathbf{U} + \mathbf{U} \cdot \nabla_{\mathbf{x}z} \mathbf{U} - \frac{1}{Re} \Delta_{\mathbf{x}z} \mathbf{U} + \nabla_{\mathbf{x}z} P = \frac{\lambda}{Re} T \mathbf{e}_3 \quad \text{en } \Omega, \quad (4.2)$$

donde Re es el número de Reynolds ¹, λ es un factor de expansión y $\mathbf{e}_3 = (0, 0, 1)$.

Por otro lado, se asume que el aire es incomprensible, cumpliéndose la ecuación

$$\nabla_{\mathbf{x}z} \cdot \mathbf{U} = 0 \quad \text{en } \Omega. \quad (4.3)$$

Se plantean algunas suposiciones simplificadoras como que el viento no atraviesa A . Teniendo también en cuenta que el viento no atraviesa el suelo en S y que la componente tangente depende de la rugosidad, se añaden al problema las siguientes condiciones de contorno:

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{N} = 0, \quad \left. \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{N}} \right|_{\tan} = \zeta \mathbf{U} \quad \text{en } S,$$

¹Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

$$U_3 = 0, \quad \partial_z U_1 = \partial_z U_2 = 0 \quad \text{en } A,$$

$$\mathbf{U}|_L = (\mathbf{v}_m, 0) \quad \text{en } L,$$

donde ζ es el coeficiente de fricción, $\mathbf{v}_m$ el viento meteorológico y $\tan$ denota la componente tangencial. Se asume que $\mathbf{v}_m$ es conocido, horizontal, no dependiente de z y con un flujo total nulo sobre la superficie lateral L , es decir,

$$\partial_z \mathbf{v}_m = 0, \quad \int_{\partial\omega} (\delta - h) \mathbf{v}_m \cdot \mathbf{n} ds = 0,$$

siendo $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$ el vector unitario normal interior a $\partial\omega$.

Se toma como condición inicial $\mathbf{U}|_{t=0} = \mathbf{U}_0$, donde se asume que la velocidad inicial $\mathbf{U}_0$ es conocida.

Separando las velocidades horizontales $V = (U_1, U_2)$ y vertical $W = U_3$, se define el flujo de viento horizontal como

$$\bar{\mathbf{V}}(t, \mathbf{x}) = \int_{h(\mathbf{x})}^{\delta} V(t, \mathbf{x}, z) dz.$$

Puesto que se asume que el aire es incomprensible y que no cruza S ni A , i.e., $\mathbf{U} \cdot \mathbf{N} = 0$, se tiene que el flujo horizontal también es incomprensible. Por lo tanto,

$$\nabla_{\mathbf{x}} \cdot \bar{\mathbf{V}} = 0 \quad \text{en } \omega. \quad (4.4)$$

4.1.2. Ecuaciones asintóticas

Considerando el grosor de la capa de aire δ muy pequeño comparado con la dimensión horizontal $\mathcal{D}$, se realiza un reescalado de las ecuaciones (4.2) y (4.3) determinando sus términos dominantes.

Suponiendo que la variación de $\mathbf{V}$ es despreciable en t , se puede despreciar la derivada temporal en la ecuación (4.2). Además, si se considera que el viento no es muy fuerte, i.e., $\delta^2 Re \ll 1$, se tiene que $\mathbf{U} \cdot \nabla_{\mathbf{xz}} \mathbf{U} \ll \frac{1}{Re} \Delta_{\mathbf{xz}} \mathbf{U}$ y se puede ignorar el término $\mathbf{U} \cdot \nabla_{\mathbf{xz}} \mathbf{U}$.

Se puede reescalar el sistema ². Abusando de la notación para las variables reescaladas en x, y, z , se reescribe la ecuación (4.2) en sus términos dominantes en sus componentes horizontales como

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{Re} (\Delta_{\mathbf{x}} V + \partial_{zz} V) + \nabla_{\mathbf{x}} P = 0 \Rightarrow \\ & -\frac{1}{Re} \left(\frac{1}{\mathcal{D}^2} \Delta_{\mathbf{x}} V + \frac{1}{\delta^2} \partial_{zz} V \right) + \frac{1}{\mathcal{D}} \nabla_{\mathbf{x}} P = 0 \Rightarrow \\ & -\Delta_{\mathbf{x}} V - \frac{\mathcal{D}^2}{\delta^2} \partial_{zz} V + Re \mathcal{D} \nabla_{\mathbf{x}} P = 0. \end{aligned}$$

Se tiene que $\mathcal{D} \gg \delta$, luego $\partial_{zz} V$ domina sobre $\Delta_{\mathbf{x}} V$ y se puede despreciar el primer término de la ecuación. Tomando $P = \frac{\mathcal{D}}{Re \delta^2} P'$ se tiene

$$\begin{aligned} & -\partial_{zz} V + \frac{\delta^2 Re}{\mathcal{D}} \nabla_{\mathbf{x}} P = 0 \Rightarrow \\ & -\partial_{zz} V + \nabla_{\mathbf{x}} P' = 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

²Más información sobre el reescalado en [57]

De manera análoga, la ecuación (4.2) en su componente vertical se reescribe como

$$\begin{aligned} -\frac{1}{Re}(\Delta_{\mathbf{x}}W + \partial_{zz}W) + \partial_z P &= \frac{\lambda}{Re}T \Rightarrow \\ -\frac{1}{Re}\left(\frac{1}{\mathcal{D}^2}\Delta_{\mathbf{x}}W + \frac{1}{\delta^2}\partial_{zz}W\right) + \frac{1}{\delta}\partial_z P &= \frac{\lambda}{Re}T \Rightarrow \\ -\Delta_{\mathbf{x}}W - \frac{\mathcal{D}^2}{\delta^2}\partial_{zz}W + \frac{\mathcal{D}^3}{\delta^3}\partial_z P' &= \lambda T. \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que se supone que el viento no es muy fuerte y y que varia de forma lineal en la dirección z (δ muy pequeña), despreciando los términos de menor orden se tiene :

$$\partial_z P' = \lambda T. \quad (4.6)$$

De manera similar, se reescala la condición de incompresibilidad,

$$\nabla_x \mathbf{V} + \partial_z W = 0 \quad \text{en } \Omega. \quad (4.7)$$

Además, se ajustan las condiciones de contorno,

$$\begin{aligned} (\mathbf{V}, W) \cdot \mathbf{N} &= 0, \quad \partial_z \mathbf{V} = \zeta \mathbf{V} \quad \text{en } S, \\ W &= 0, \quad \partial_z V = 0 \quad \text{en } A, \\ \bar{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{n} &= (\delta - h)\mathbf{v}_m \cdot \mathbf{n} \quad \text{en } \partial\omega. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Si se supone que la temperatura decrece linealmente con la altura, se puede expresar la temperatura del aire $T(\mathbf{x}, z)$ a partir de la superficial $T(\mathbf{x}, h(\mathbf{x}))$ como

$$T(\mathbf{x}, z) = T(\mathbf{x}, h(\mathbf{x})) \frac{\delta - z}{\delta - h(\mathbf{x})}.$$

Esto permite resolver analíticamente la ecuación (4.6),

$$P'(\mathbf{x}, z) = p(\mathbf{x}) + \frac{\lambda T(\mathbf{x}, h(\mathbf{x}))}{\delta - h(\mathbf{x})} \left(\delta z - \frac{1}{2} z^2 \right) = p(\mathbf{x}) + t(\mathbf{x}) \left(\delta z - \frac{1}{2} z^2 \right),$$

donde p es un potencial bidimensional que en la práctica representa la presión al nivel de altura máxima y t una temperatura re-escalada. Con esta expresión, es posible integrar la ecuación (4.5), que junto con las condiciones de contorno en permiten encontrar una solución analítica para V . De esta forma, se tiene que

$$V(\mathbf{x}, z) = m(\mathbf{x}, z) \nabla_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}, z) \nabla_{\mathbf{x}} t(\mathbf{x}), \quad (4.9)$$

donde

$$\begin{aligned} m(\mathbf{x}, z) &= \xi(h(\mathbf{x}) - \delta) + \frac{z^2}{2} - z\delta - \frac{h(\mathbf{x})^2}{2} + \delta h(\mathbf{x}), \\ n(\mathbf{x}, z) &= \xi \left(-\frac{\delta^3}{3} + \frac{\delta h(\mathbf{x})^3}{2} - \frac{h(\mathbf{x})^3}{6} \right) - \frac{\delta^3 z}{3} + \frac{\delta z^3}{6} - \frac{z^4}{24} + \frac{\delta^3 h(\mathbf{x})}{3} - \frac{\delta h(\mathbf{x})^3}{6} + \frac{h(\mathbf{x})^4}{24}, \end{aligned}$$

con $\xi = \frac{1}{\zeta}$. Utilizando esta expresión de V en las ecuaciones (4.4) y (4.8), se tiene que el potencial $p = p(t, \mathbf{x})$ satisface el siguiente problema bidimensional:

$$\begin{aligned} -\nabla_{\mathbf{x}} \cdot (a \nabla_{\mathbf{x}} p) &= \nabla_{\mathbf{x}} \cdot (b \nabla_{\mathbf{x}} t) \quad \text{en } \omega, \\ a \nabla_{\mathbf{x}} p \cdot \mathbf{n} &= -b \nabla_{\mathbf{x}} t \cdot \mathbf{n} + (\delta - h) \mathbf{v}_m \cdot \mathbf{n} \quad \text{en } \partial\omega, \end{aligned} \quad (4.10)$$

donde

$$\begin{aligned} a &= a(\mathbf{x}) = \frac{1}{3}(\delta - h(\mathbf{x}))^2(3\xi + \delta - h(\mathbf{x})), \\ b &= b(\mathbf{x}) = \frac{1}{30}(\delta - h(\mathbf{x}))^2(2\delta^2(2\delta + 5\xi) - 2\delta(\delta - 5\xi)h(\mathbf{x}) - (3\delta + 5\xi)h(\mathbf{x})^2 + h(\mathbf{x})^3). \end{aligned}$$

Sea $\mathcal{V}^0 = \{\phi \in L^2(\omega) : \nabla \phi \in L^2(\omega), \int_{\partial\omega} \phi = 0\}$. El problema puede escribirse de forma variacional como

Hallar $p \in \mathcal{V}^0$ tal que:

$$\int_{\omega} a \nabla p \cdot \nabla \phi = \int_{\partial\omega} v \phi - \int_{\omega} b \nabla t \cdot \nabla \phi \quad \forall \phi \in \mathcal{V}^0.$$

donde $v = (\delta - h) \mathbf{v}_m \cdot \mathbf{n}$. Dados t y v , por el Teorema de Lax-Milgram, este problema tiene solución única salvo constante aditiva [32].

4.1.3. Problema de control

En la práctica, el valor del viento en la frontera ($\mathbf{v}_m$) es desconocido, siendo este necesario para la resolución del problema asintótico. Sin embargo, pueden obtenerse datos de viento puntuales en estaciones $\{\mathbf{P}_i\}_{i=1}^E$ situadas en el interior del dominio. Por esto, se propone reformular el problema ajustando el campo de viento $V(\mathbf{x}, z)$ a estas medidas $\{\mathbf{V}_i\}_{i=1}^E$ como un problema de control donde

1. $v \in L_0^2(\partial\omega)$ es el control
2. La ecuación de estado viene dada por el modelo HDWind
3. La función de coste a minimizar es

$$J(v) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^E \int_{\omega} \rho_{\epsilon,i}(\mathbf{x}) (V(\mathbf{x}_i, z_i) - \mathbf{V}_i)^2 + \frac{\alpha}{2} \int_{\partial\omega} v^2,$$

donde $\rho_{\epsilon,i}$ es una función suave de soporte compacto alrededor de $\mathbf{P}_i$ y el término $\frac{\alpha}{2} \int_{\partial\omega} v^2$ es de regularización.

Es decir, se asumen conocidas E medidas de viento y se busca un campo de viento que, satisfaciendo las ecuaciones de HDWind, se aproxime a estas E medidas. Formalmente, esto equivale a, dadas E medidas experimentales de la velocidad y dirección del viento V_i en los puntos $(\mathbf{x}_i, z)$, encontrar $v \in L_0^2(\partial\omega)$ tal que los valores $V(\mathbf{x}_i, z_i)$ dados por la ecuación (4.9) se aproximen lo suficiente a las medidas V_i .

Así, el problema se transforma en:

$$\begin{aligned} &\text{Encontrar } u \in L_0^2(\partial\omega) \text{ tal que:} \\ &J(u) = \inf_{v \in L_0^2(\partial\omega)} J(v). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Este problema es equivalente a $J'(u) = 0$. Además, se tiene que

$$J'(u) \cdot v = 0 \quad \forall v \in L_0^2(\partial\omega).$$

Resolver este problema de control es equivalente a resolver el sistema de ecuaciones:

Hallar $(p, q) \in \mathcal{V}^0 \times \mathcal{V}^0$ tales que:

$$\begin{aligned} &\int_{\omega} a \nabla p \cdot \nabla \phi + \frac{1}{\alpha} \int_{\partial\omega} = \int_{\omega} b \nabla t \cdot \nabla \phi \quad \forall \phi \in \mathcal{V}^0, \\ &\int_{\omega} a \nabla q \cdot \nabla \psi - \sum_{i=1}^E \int_{\omega} \rho_{\epsilon,i} m^2 \nabla p \cdot \nabla \psi = \sum_{i=1}^E \int_{\omega} \rho_{\epsilon,i} m (n \nabla t - V_i) \nabla \psi \quad \forall \psi \in \mathcal{V}^0, \end{aligned}$$

donde la solución de (4.11) viene dada por $u = -\frac{1}{\alpha}q$. La existencia y unicidad del problema puede encontrarse en [32]. En [16] se aplica un método de bases reducidas para el cálculo de la solución discreta.

4.2. Modelo de Incendios PhyFire

En las siguientes páginas se describe el modelo de propagación de incendios forestales PhyFire [10]. Este es un modelo simplificado en dos dimensiones que incorpora algunos efectos tridimensionales.

La combustión en un incendio forestal es un proceso físico-químico, por lo que se basa en los principios de conservación de la masa y la energía. Además, se caracteriza como un sistema de retroalimentación positiva, permitiendo su descomposición en dos fases:

- *Fase endotérmica o sólida*: el calor es usado para liberar sustancias volátiles.
- *Fase exotérmica o gaseosa*: las sustancias volátiles mezcladas con el oxígeno reaccionan, produciendo más calor.

Partiendo de esto, podría proponerse un modelo bifásico. Para ello, sería necesaria una ecuación de conservación de la energía para cada fase y ecuaciones de conservación de masa para el combustible sólido, el combustible gaseoso y el oxígeno. Sin embargo, esto plantearía el conveniente de evaluar correctamente los términos no lineales mediante modelos elaborados de turbulencia alejados del objetivo del modelo: ser eficiente computacionalmente.

En el modelo actual de PhyFire, la fase gaseosa queda parametrizada a través de la temperatura y la altura de la llama en el término de radiación, el efecto del contenido de humedad del combustible y un factor de corrección en el término convectivo, considerándose así una única fase: la sólida.

Para realizar simulaciones con este modelo es necesario conocer la intensidad y la dirección del viento. Estas pueden considerarse constantes en todo el dominio o bien calcular un campo de viento con el modelo HDWind (§4.1) para incorporar así los vientos locales y el efecto de la orografía y la rugosidad del terreno sobre ellas.

4.2.1. Descripción del modelo

El modelo físico de propagación de incendios PhyFire se rige por las ecuaciones adimensionales

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \beta \mathbf{v} \nabla e + \beta u = r + q \quad \text{en } \mathcal{S} \times (0, t_{\text{máx}}), \quad (4.12)$$

$$e \in G(u) \quad \text{en } \mathcal{S} \times (0, t_{\text{máx}}), \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -g(u)c \quad \text{en } \mathcal{S} \times (0, t_{\text{máx}}), \quad (4.14)$$

siendo $\mathcal{S}$ la superficie donde se produce el fuego definida igual que en el modelo HDWind (§4.1.1). En este caso, las letras mayúsculas representan las magnitudes con dimensión.

El tamaño de la superficie $\mathcal{S}$ y el intervalo $(0, t_{\text{máx}})$ se toman de forma que el fuego no llegue a alcanzar la frontera en el tiempo $t_{\text{máx}}$ de modo que se pueden suponer condiciones Dirichlet homogéneas en la frontera. Para completar el problema se incluyen las condiciones iniciales:

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y) \quad \text{en } \mathcal{S}, \quad (4.15)$$

$$c(x, y, 0) = c_0(x, y) \quad \text{en } \mathcal{S}, \quad (4.16)$$

que representan, respectivamente, el foco del incendio, o eventualmente un perímetro intermedio si se decide reiniciar la simulación desde un instante posterior al inicial, y la distribución inicial del combustible sólido, incluyendo cualquier cortafuegos posible.

Las incógnitas de las ecuaciones adimensionales definidas en $\mathcal{S} \times (0, t_{\text{máx}})$ son: e , u y c . En la Tabla 4.1 se encuentran la relación entre estas variables adimensionales y las cantidades físicas correspondientes.

Variable Física	Símbolo	Unidades	Variables adimensionales
Entalpía	E	Jm^{-2}	$e = E/MC_{\text{cal}}T_{\infty}$
Temperatura combustible sólido	T	K	$u = (T - T_{\infty})/T_{\infty}$
Carga de combustible sólido	M	kgm^{-2}	$c = M/M_0$

Tabla 4.1: Incógnitas adimensionales y su relación con magnitudes físicas

Las incógnitas dependen de la temperatura ambiente T_{∞} , medida lo suficientemente lejos del fuego para asegurar que $T \geq T_{\infty}$, esto es $u \geq 0$; la capacidad calorífica del combustible sólido C_{cal} y la carga máxima de combustible sólido M_0 , ambas dependientes del tipo de combustible. Las variables que dependen del tipo de combustible se encuentran en la Tabla 4.2.

Variable de entrada	Símbolo	Unidades
Capacidad calorífica	C_{cal}	$\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$
Carga máxima de combustible inicial	M_0	kgm^{-2}
Contenido de humedad del combustible	M_v	kg agua/kg combustible
Temperatura máxima de la llama	$T_{f,max}$	K
Temperatura de pirólisis	T_p	K
Vida media de la combustión	$t_{1/2}$	s
Factor independiente de la altura de la llama	F_H	m
F.c. de la altura de la llama por viento	F_v	$\text{m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$
F.c. de la altura de la llama por la pendiente	F_s	—

Tabla 4.2: Parámetros dependientes del tipo de combustible (F.c. = factor de corrección)

Mencionar que el contenido de humedad del combustible, M_v , no depende únicamente del tipo de combustible. Este está influenciado por varios factores meteorológicos, como sequías a largo plazo, lluvias recientes o las condiciones inmediatas de temperatura y humedad relativa. Además, dependiendo de la posición en el paisaje, hay áreas que reciben más radiación, se secan más rápidamente y, por lo tanto, tienen un contenido de humedad del combustible más bajo. El modelo PhyFire puede utilizar datos de contenido de humedad del combustible que varían espacialmente, reemplazando la variable de entrada dependiente del tipo de combustible M_v por un mapa que contiene la distribución espacial de los valores de M_v , utilizando datos de información geoespacial.

Además, el modelo PhyFire depende de tres parámetros mostrados en la Tabla 4.3.

Parámetro	Símbolo	Unidades
Coeficiente de convección natural	H	$\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$
F.c. del término convectivo	β	—
Coeficiente de absorción promedio de la radiación	a	m^{-1}

Tabla 4.3: Parámetros del modelo

A continuación, se describen los términos que aparecen en las ecuaciones (4.12), (4.13) y (4.14):

- $\beta \mathbf{v} \nabla e$: energía transportada por convección del gas pirolizado, donde
 - $\mathbf{v}$: velocidad del viento en la superficie, dato dado o calculado con HDWind.
 - β : factor de corrección, $\beta = \frac{\phi \rho_g C_{cal,g} T_g}{(1-\phi) \rho_s C_{cal,s} T_s} \approx 10^{-3}$, con ϕ fracción de volumen ocupada por la fase gaseosa ($_g$ gas, $_s$ sólido), ρ densidad.³

La razón subyacente a este parámetro es cómo el modelo monofásico de PhyFire puede entenderse como una simplificación del modelo bifásico donde se conserva la

³Para valores típicos de capacidad calorífica para el aire y el combustible (madera), este se puede estimar teniendo un orden de magnitud de 10^{-2} dentro de la llama y 10^{-4} lejos de la llama.

entalpía transportada en la fase gaseosa (β representa la fracción de calor transportado que debe tenerse en cuenta en la ecuación (4.12)).

- αu : energía perdida por convección natural en la dirección vertical, $\alpha = \frac{H[t]}{MC_{cal}}$, escala temporal $[t]$ del proceso de adimensionalización.
- r : radiación térmica no local de las llamas sobre la superficie $\mathcal{S}$, $r = \frac{[t]}{MC_{cal}T_{\infty}}R$. Este término se analiza en profundidad en la Sección 4.2.3.
- q : calor debido a focos secundarios originados a partir de fenómenos aleatorios.
- $G(u)$: efecto del contenido de humedad del combustible, operador multívoco en la entalpía. Este término se analiza en profundidad en la Sección 4.2.2.
- $g(u)$: pérdida de combustible sólido debido a la combustión. Suponiendo que no hay pérdida de combustible sólido si la temperatura está por debajo de la temperatura de pirólisis y permanece constante cuando esta se alcanza, siendo $\gamma = \frac{\ln 2[t]}{t_{\frac{1}{2}}}$, se define

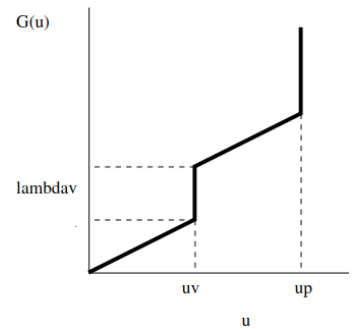
$$g(u) = \begin{cases} 0 & \text{si } u < u_p \\ \gamma & \text{si } u = u_p \end{cases}.$$

Los datos topográficos (función $h(x, y)$), la distribución de combustible sólido (valor inicial de M) y la distribución de tipos de combustible (para determinar espacialmente las variables de entrada dependientes del tipo de combustible) se obtienen a partir de la cartografía generada específicamente para cada caso. Este proceso se ha automatizado mediante el desarrollo de la base de datos cartográfica necesaria y la interfaz SIG en línea y una serie de scripts de GDAL.

4.2.2. Contenido de humedad del combustible

El contenido de humedad del combustible, definido como la masa de agua contenida dentro de la vegetación en relación con la masa seca, desempeña un papel crucial en el comportamiento de los incendios forestales y en la velocidad de propagación del fuego. Este factor es altamente dinámico y muy vulnerable a las variaciones climáticas. PhyFire utiliza un operador maximal monótono multívoco para considerar el efecto del contenido de humedad del combustible definido de la siguiente forma: sean u_v la temperatura de evaporación del agua adimensional y u_p la temperatura de pirólisis del combustible sólido adimensional, se define $G(u)$ como

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



donde $\lambda_v = \frac{M_v \Lambda_v}{C_{cal} T_{\infty}}$ es la cantidad adimensional de calor de evaporación, siendo $\Lambda_v =$

$2,25 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ el calor latente de evaporación del agua.

De esta forma, se asume que la temperatura máxima que alcanza el combustible sólido es la temperatura de pirólisis puesto que la fase gaseosa está parametrizada, luego el único cambio de fase en la temperatura del combustible sólido se corresponde con la de evaporación del agua.

Se han llevado a cabo varios experimentos numéricos para comprobar que el comportamiento de la velocidad de propagación simulada por PhyFire concuerda con lo esperado en la literatura revisada, demostrando así que este operador multívoco es adecuado y consistente. Si se quiere obtener más información sobre la inclusión de este término, consúltase [8].

4.2.3. Radiación no local

En el modelo se considera que los gases producidos por la pirólisis arden sobre la capa de combustible, generando una llama por encima de esa capa. La inclinación de esta llama en relación al terreno estará sujeta tanto a la pendiente del mismo como a la acción del viento. De esta forma, la llama emite radiación que es capaz de alcanzar puntos delante de ella, calentando así el combustible no quemado de alrededor y permitiendo la propagación del fuego. Como se ha mencionado anteriormente, el término r de las ecuaciones ilustra esta idea, representando así la radiación térmica no local. Además, la inclusión de este permite incorporar ciertos efectos tridimensionales manteniendo la simplicidad de un modelo bidimensional. Para conseguir esos efectos 3D, se define el siguiente dominio

$$\tilde{\Omega} = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, h(\mathbf{x}) < z < h(\mathbf{x}) + \delta\},$$

siendo δ el grosor de la capa de aire sobre la superficie $\mathcal{S}$, es decir, este dominio 3D es una capa de aire de grosor fijo δ que se superpone sobre la superficie $\mathcal{S}$.

Se ha definido $r = \frac{[t]}{MC_{cal}T_{\infty}}R$, siendo R la energía incidente en un punto $x = (x, y, h(\mathbf{x}))$ de la superficie $\mathcal{S}$ debida a la energía por unidad de tiempo irradiada por la llama sobre la superficie por unidad de tiempo y por unidad de área, obtenida sumando la contribución de todas las direcciones Ω , i.e., siendo $\tilde{\omega}$ el ángulo sólido y $\mathbf{N}$ el vector normal unitario a la superficie $\mathcal{S}$,

$$R(x) = \int_{\tilde{\omega}=0}^{2\pi} I(x, \Omega) \Omega \mathbf{N} d\tilde{\omega}.$$

Se considera solo la semiesfera sobre la capa de combustible. Cada contribución depende, entre otros factores, de la altura de la llama F (4.2.4) y la temperatura de la llama T_f (4.2.5). I representa la intensidad de radiación total,

$$\frac{dI}{ds} + a(s)I(s) = a(s)I_b(s),$$

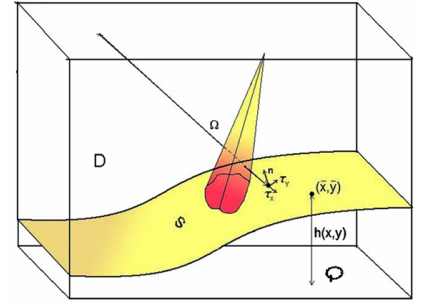


Figura 4.2: Esquema del dominio 3D, la llama y el rayo incidente [31]

siendo $I_b = \frac{\sigma}{\pi} T_f^4$ la intensidad total de radiación de un cuerpo negro, con $\sigma = 5,670373 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann y a el coeficiente de absorción de radiación dentro de la llama. La trayectoria s se encuentra dentro del dominio tridimensional D , alcanzando cualquier punto de la superficie $\mathcal{S}$ y, eventualmente, pasando a través de la llama.

Para la resolución numérica, el término de radiación R se discretiza de la siguiente forma

$$R(x) = \frac{a\sigma T_f^4}{\pi} \int_{\Omega} \chi(\tilde{x}) f(x - \tilde{x}) d\tilde{A},$$

donde χ es la función característica de las llamas que se define a partir de la temperatura de pirólisis, T_p de la siguiente forma:

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } T(x) = T_p \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases}.$$

Si se quiere obtener más información sobre este paso, puede consultarse el artículo [31].

Para la implementación computacional, se ha utilizado el método de elementos finitos con elementos de tipo P1 para la discretización espacial. De esta forma, empleando la base de elementos finitos para representar la función f , el término de radiación puede escribirse para cada nodo de la malla como

$$R(x_i) = \frac{a\sigma T_f^4}{\pi} \sum_j R_{ij} A_j \chi(x_j),$$

donde $R_{ij} = f^j(x_i)$ es la matriz de radiación representando los nodos de la malla de elementos finitos que son alcanzados por la radiación emitida por cada nodo. Esta matriz se calcula únicamente una vez, fuera del bucle de tiempo.

Para reducir el coste computacional, en la práctica el término de radiación solo se calcula en una vecindad del frente del fuego, llamada *Nodos Activos*. Al principio del proceso numérico, se define una malla espacial uniforme y fina para la discretización espacial.

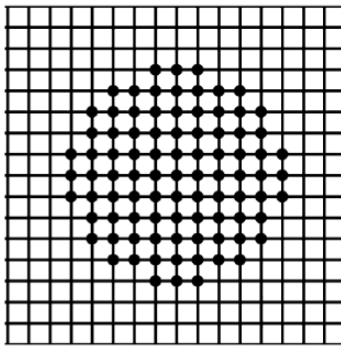


Figura 4.3: Molécula de radiación [31]

Para cada paso de tiempo t en la discretización temporal, se determina un conjunto de *Nodos Activos* formado por aquellos nodos ubicados dentro de un área lo suficientemente grande cerca del frente del fuego (área de combustión). Se resuelven las ecuaciones correspondientes solo en este conjunto de nodos, así como el cálculo del término de radiación.

Se define así la *Molécula de Radiación* como un conjunto circular de nodos formado por el nodo en sí y nodos vecinos que definen el área afectada por la radiación emitida por el nodo en cuestión.

De esta forma, un nodo es considerado *Activo* si la temperatura adimensional en el nodo es positiva y el combustible sólido adimensional es mayor que 0.1, o si el nodo

pertenece a la *Molécula de Radiación* asociada a un nodo que cumple las condiciones anteriores. Véase que la ecuación que define al combustible es exponencial, luego podría decirse que este «nunca llegaría a agotarse». Por esto, se fija $c \leq 0.1$ como condición para que este no aporte a la combustión.

4.2.4. Altura de la llama

Los datos de [6] y el análisis de sensibilidad del modelo realizado en [11] llevaron a definir altura de la llama, F , dependiente del viento, la pendiente y el tipo de combustible,

$$F = (F_H + F_v|v|^{1/2})(1 + F_s s^2), \quad (4.17)$$

donde F_H es un parámetro independiente de la altura de la llama, F_v un factor de corrección por viento, F_s un factor de corrección por pendiente, $|v|$ la velocidad del viento en m/s y s la pendiente en cada punto de la superficie, obteniéndose así la altura de la llama en metros. Los factores F_v y F_s se añaden para ajustar experimentalmente los diferentes comportamientos para cada tipo de combustible mediante un método de mínimos cuadrados.

El primer factor, $(F_H + F_v|v|^{1/2})$, representa la corrección de la altura de la llama debido al viento, donde F_H representa la situación sin viento.

El segundo factor, $(1 + F_s s^2)$, representa la corrección de la altura de la llama según la pendiente de la superficie. Cuando no hay pendiente ni viento, la llama es vertical y su altura es igual a su longitud. Sin embargo, cuando hay una pendiente, se debe considerar el siguiente factor de proporcionalidad:

$$1 + s^2 = \frac{1}{\cos^2(\alpha)} = 1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2,$$

donde α es el ángulo entre el plano horizontal y el plano tangencial a la superficie $\mathcal{S}$ en cada punto y $h = h(x, y)$ es la altura de la superficie, por lo que s es la pendiente en cada punto de la superficie $\mathcal{S}$.

4.2.5. Temperatura de la llama

La temperatura de la llama, T_f , viene dada por

$$h_r(T_f^4 - T_\infty^4) = (t > t_p)QM \iff T_f = (T_\infty^4 + (t > t_p)\frac{Q}{h_r}M)^{\frac{1}{4}},$$

donde t_p representa el tiempo que tarda el combustible en alcanzar la temperatura de pirólisis y h_r es un término proporcional a la constante de Stefan Boltzman.

Con esta ecuación se asume que la temperatura no varía dentro de una llama estabilizada, que las pérdidas de calor dentro de la llama se deben principalmente a la radiación local ($h_r(T_f^4 - T_\infty^4)$) y que la fuente de calor debido a la combustión del gas está representada por QM (Q calor generado o absorbido por unidad de masa de combustible sólido). Se representa el calor generado, i.e., cuando el proceso es exotérmico, mediante el factor $t > t_p$, el cual vale 0 si el proceso es endotérmico y 1 si es exotérmico.

Si se dispone de una estimación de la temperatura máxima de la llama $T_{f,max}$, se puede aproximar el valor de $\frac{Q}{h_r}$, quedando así la expresión utilizada en PhyFire para aproximar la temperatura de la llama en función de un valor máximo $T_{f,max}$:

$$T_f = (T_\infty^4 + (t > t_p)(T_{f,max}^4 - T_\infty^4)M)^{\frac{1}{4}}.$$

4.2.6. Método numérico

En esta sección se encuentra un breve resumen del algoritmo de PhyFire. No obstante, si se desea conocer más información sobre este aspecto, puede consultarse en la bibliografía [10, 9, 31].

Como se mencionó anteriormente, el problema se resuelve en los nodos activos de la malla, i.e., en el entorno de vecindad del frente de fuego. Este factor junto con la adaptación del código a la computación en paralelo reducen significativamente el coste computacional. Estos aspectos son muy importantes en este tipo de modelos, ya que el objetivo es poder predecir la propagación del incendio en un tiempo muy inferior a la evolución en tiempo real.

Para la discretización espacial se utiliza el método de elementos finitos con elementos de tipo P1 para una malla regular (mencionado anteriormente en el término de radiación 4.2.3); para la discretización temporal se utiliza un método predictor-corrector de diferencias finitas, siendo el paso predictor un esquema semi-implícito de Euler y el paso corrector un esquema modificado de Crank-Nicolson.

El algoritmo puede resumirse en los siguientes pasos:

- **Inicialización:** dados u^0, c^0 definidos por las condiciones iniciales, se fija para cada nodo i :

$$e^0[i] = \begin{cases} u_i^0 + \lambda_v & \text{si } u_i^0 > u_v \\ u_i^0 & \text{si } u_i^0 \leq u_v \end{cases}.$$

- **Bucle temporal:** dados los valores de u, e y c en el tiempo n , computar su valor en el tiempo $n + 1$, $(u^n, e^n, c^n) \rightarrow (u^{n+1}, e^{n+1}, c^{n+1})$
 1. Construir el conjunto de nodos activos.
 2. Calcular el término de radiación $r(u^n, c^n)$.
 3. Paso de predicción: se utiliza un método de Euler semi-implícito, $(u^n, e^n, c^n) \rightarrow (\hat{u}^{n+1}, \hat{e}^{n+1}, \hat{c}^{n+1})$.
 4. Actualizar el conjunto de nodos activos.
 5. Actualizar el término de radiación $r(\hat{u}^n, \hat{c}^n)$.
 6. Paso de corrección: se utiliza un método de Crank-Nicolson modificado, $(u^n, e^n, c^n) + (\hat{u}^{n+1}, \hat{e}^{n+1}, \hat{c}^{n+1}) \rightarrow (u^{n+1}, e^{n+1}, c^{n+1})$.

El código para el modelo PhyFire está desarrollado en C++ utilizando la librería para elementos finitos Neptuno++ (L.Ferragut [15]) y la paralelización se realizó utilizando OpenMP.

4.3. Modelo de dispersión atmosférica

Los modelos de dispersión atmosférica cuantifican la relación entre emisiones y concentraciones de partículas y gases, lo que permite estimar la concentración de contaminantes en la atmósfera. En este trabajo, se utiliza una modificación del modelo de dispersión PhyNX [33]. Este modelo es euleriano ⁴ a escala urbana y está diseñado para contemplar contaminantes que no reaccionen significativamente con otros compuestos a esta escala. En este estudio, se propone una modificación de dicho modelo para poder simular el humo de incendios forestales acoplándolo a los modelos PhyFire y HDWind. De esta forma, el foco de emisión deja de ser una fuente puntual concreta y se tiene que el lado derecho de la ecuación es 0.

El modelo se basa en la ecuación de conservación de masa, que describe la convección y la difusión turbulenta, dada por la siguiente ecuación parabólica de convección-difusión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (K \nabla C) = 0 \quad \text{en } \Omega \times (0, t_f), \quad (4.18)$$

donde C representa la cantidad de contaminante, $\mathbf{U}$ el campo de viento y K el tensor de difusión turbulenta. En la ecuación, $\mathbf{U} \cdot \nabla C$ representa la variación por advección y $-\nabla \cdot (K \nabla C)$ la difusión. Se toman las condiciones de contorno apropiadas, siendo $\Omega \in \mathbb{R}^3$ la capa de aire sobre una superficie terrestre dada y t_f el instante de tiempo final. Al igual que en los modelos anteriores, las letras minúsculas denotan variables bidimensionales, mientras que las letras mayúsculas denotan variables tridimensionales.

Para obtener el valor del campo de viento 3D, $\mathbf{U}$, se hace uso del modelo desarrollado en la Sección 4.1.

Para resolver la ecuación (4.18) se utiliza el Método de Elementos Finitos Adaptativos en la dirección horizontal y Diferencias Finitas en la dirección vertical.

4.3.1. Descripción del modelo

Al igual que en los modelos anteriores, se toma la capa de aire sobre una superficie terrestre S , no necesariamente plana, como un dominio tridimensional. Sea ω la proyección de la superficie terrestre tridimensional S , $\mathbf{x} = (x, y) \in \omega$, t tiempo. La capa de aire estudiada es la misma que la utilizada en el modelo PhyFire para la parte tridimensional 4.2.3, $\tilde{\Omega} = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, h(\mathbf{x}) < z < h(\mathbf{x}) + \delta\}$, cuya frontera descompone como $\partial\tilde{\Omega} = S \cup \tilde{A} \cup \tilde{L}$ siendo:

- $S = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, z = h(\mathbf{x})\}$ la superficie terrestre.
- $\tilde{A} = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \omega, z = h(\mathbf{x}) + \delta\}$ la frontera horizontal superior del aire.
- $\tilde{L} = \{(\mathbf{x}, z) : \mathbf{x} \in \partial\omega, h(\mathbf{x}) < z < h(\mathbf{x}) + \delta\}$ la frontera vertical lateral del aire.

es decir, la capa superior del dominio $\tilde{\Omega}$, $\tilde{A}$, no es necesariamente plana.

Nuevamente, las letras minúsculas representan variables bidimensionales, mientras que las letras mayúsculas representan variables tridimensionales. En el campo de viento $\mathbf{U} =$

⁴Se basa en la ecuación de conservación de masa.

(U_1, U_2, U_3) se distinguen las componentes de velocidad horizontales, $\mathbf{V} = (U_1, U_2)$, de la vertical, $W = U_3$. Con esto, la Ecuación (4.18) puede escribirse como

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \mathbf{V} \cdot \nabla_{xy} C - \nabla_{xy} \cdot (K_h \nabla_{xy} C) + W \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{en } \tilde{\Omega} \times (0, t_f), \quad (4.19)$$

donde para cada instante de tiempo t , $K_h = K_{xx} = K_{yy}$ y $K_v = K_{zz}$ son, respectivamente, los coeficientes de difusión en las direcciones horizontal y vertical.

Se asume que solo se tienen pérdidas de contaminante en el límite lateral exterior L , luego se añaden al problema las siguientes condiciones de contorno, donde $[G]^+$ denota G cuando $G > 0$ y 0 caso contrario, $\mathbf{N} = (\nu_{xy}, \nu_z) = (\nu_x, \nu_y, \nu_z)$ vector unitario normal exterior:

$$-K_h \nabla_{xy} C \cdot \nu_{xy} - K_v \frac{\partial C}{\partial z} \nu_z = \begin{cases} [\mathbf{U} \cdot \mathbf{N}]^+ C & \text{en } \tilde{L} \times (0, t_f) \\ 0 & \text{en } \tilde{A} \times (0, t_f) \end{cases}.$$

Se tiene que $\nu_z = 0$ en L , luego se puede simplificar la ecuación anterior por

$$-K_h \nabla_{xy} C \cdot \nu_{xy} = [\mathbf{V} \cdot \nu_{xy}]^+ C \quad \text{en } \tilde{L} \times (0, t_f). \quad (4.20)$$

Modificando el modelo de [33], se propone la siguiente condición de contorno en S , modelizando así la emisión de combustible:

$$C(x, y, t) = F_E M_0 c_c(x, y, t) \quad \text{en } S \times (0, t_f),$$

donde F_E representa el factor de emisión, M_0 la carga máxima de combustible inicial y c_c la cantidad de combustible consumido en el instante de tiempo t ,

$$c_c(x, y, t) = C(x, y, 0) - C(x, y, t).$$

Al inicio de la simulación, el aire está completamente limpio. Así, se añade al problema la condición inicial:

$$C|_{t=0} = 0 \quad \text{en } \tilde{\Omega}.$$

4.3.1.1. Cambio de coordenadas

A continuación, con el objetivo de poder aplicar el método de *splitting*, se realiza un cambio de coordenadas para transformar el dominio tridimensional $\tilde{\Omega}$ en un cuboide. Las nuevas coordenadas son:

$$\tau = t, \quad \xi = x, \quad \eta = y, \quad \zeta = z - h(x, y).$$

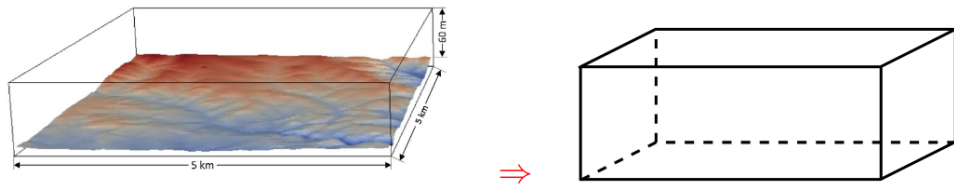


Figura 4.4: Cambio de coordeandas

Siendo $h_x = \frac{\partial h}{\partial x}$, $h_y = \frac{\partial h}{\partial y}$, para cualquier función $\phi = \phi(t, x, y, z)$ se tendría mediante cálculos sencillos

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - h_x \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - h_y \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}.$$

Realizando este cambio, el nuevo término convectivo es:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla_{xy} C + W \frac{\partial C}{\partial z} = \mathbf{V} \cdot \nabla_{\xi\eta} C + (W - U_1 h_x - U_2 h_y) \frac{\partial C}{\partial \zeta}.$$

De la misma forma, el nuevo término difusivo es:

$$\begin{aligned} -\nabla_{xy} \cdot (K_h \nabla_{xy} C) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) &= -\nabla_{\xi\eta} \cdot (K_h \nabla_{\xi\eta} C) - \frac{\partial}{\partial \zeta} \left([K_v + K_h(h_x^2 + h_y^2)] \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} \right). \end{aligned}$$

Juntando estas ecuaciones, tomando $\bar{W} = W - U_1 h_x - U_2 h_y$ y $\bar{K} = K_v + K_h(h_x^2 + h_y^2)$,

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \mathbf{V} \cdot \nabla_{\xi\eta} C + \bar{W} \frac{\partial C}{\partial \zeta} - \nabla_{\xi\eta} \cdot (K_h \nabla_{\xi\eta} C) - \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) = f. \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que en el borde lateral $v_{xy} = v_{\xi\eta}$, la condición de contorno (4.20) con las nuevas variables se escribe como

$$-K_h \left(\frac{\partial C}{\partial \xi} - h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) v_\xi - K_h \left(\frac{\partial C}{\partial \eta} - h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) v_\eta = [\mathbf{V} \cdot v_{\xi\eta}]^+ C \quad \text{en} \quad \tilde{L} \times (0, t_f). \quad (4.21)$$

Puesto que en la frontera horizontal superior A se tiene que $v_{xyz} = \frac{(-h_x, -h_y, 1)}{|h|}$ y $v_{\xi\eta\zeta} = (0, 0, 1)$,

$$K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} - \bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} = 0 \quad \text{en} \quad \tilde{A} \times (0, t_f). \quad (4.22)$$

En la frontera horizontal inferior S se tiene que $v_{xyz} = \frac{(h_x, h_y, -1)}{|h|}$ y $v_{\xi\eta\zeta} = (0, 0, -1)$, luego

$$-K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} - K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} + \bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} = 0 \quad \text{en} \quad S \times (0, t_f). \quad (4.23)$$

Se va a utilizar un método de Elementos Finitos para las variables espaciales. Por esto, a continuación se muestra cómo afecta este cambio de coordenadas a la formulación débil del término difusivo y las derivadas cruzadas:

$$\begin{aligned} & - \int_{\tilde{\Omega}} \left[\nabla_{\xi\eta} \cdot (K_h \nabla_{\xi\eta} C) - \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) \right] G \, d\tilde{\Omega} \\ & + \int_{\tilde{\Omega}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \right] G \, d\tilde{\Omega}, \end{aligned}$$

siendo $\Gamma = \partial\tilde{\Omega}$ y $G \in H^1(\tilde{\Omega})$ una función test. Utilizando la fórmula de Green, se tiene

$$\begin{aligned} & \int_{\tilde{\Omega}} \left[K_h \nabla_{\xi\eta} C \cdot \nabla_{\xi\eta} G + \left(\bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \frac{\partial G}{\partial \zeta} \right) \right] d\tilde{\Omega} \\ & - \int_{\Gamma} \left[K_h \nabla_{\xi\eta} C \cdot v_{\xi\eta} G + \bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} v_{\zeta} G \right] d\Gamma \\ & - \int_{\tilde{\Omega}} \left[K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} \frac{\partial G}{\partial \xi} + K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} \frac{\partial G}{\partial \zeta} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} \frac{\partial G}{\partial \eta} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} \frac{\partial G}{\partial \zeta} \right] d\tilde{\Omega} \\ & + \int_{\Gamma} \left[K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} G v_{\xi} + K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} G v_{\zeta} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} G v_{\eta} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} G v_{\zeta} \right] d\Gamma. \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la ecuaciones (4.21), (4.22) y (4.23):

$$\begin{aligned} & \int_{\tilde{\Omega}} \left[K_h \nabla_{\xi\eta} C \cdot \nabla_{\xi\eta} G + \left(\bar{K} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \frac{\partial G}{\partial \zeta} \right) \right] d\tilde{\Omega} + \int_L [\mathbf{V} \cdot v_{\xi\eta}]^+ C G d\Gamma \\ & - \int_{\tilde{\Omega}} \left[K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \zeta} \frac{\partial G}{\partial \xi} + K_h h_x \frac{\partial C}{\partial \xi} \frac{\partial G}{\partial \zeta} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \zeta} \frac{\partial G}{\partial \eta} + K_h h_y \frac{\partial C}{\partial \eta} \frac{\partial G}{\partial \zeta} \right] d\tilde{\Omega}. \end{aligned}$$

De manera similar, se realiza para el resto de términos.

4.3.2. Método numérico

En esta sección se da un breve resumen del método numérico empleado para la resolución del modelo de contaminación atmosférica. Si se desea obtener información detallada de cada paso puede encontrarse en el artículo [33].

Se propone una combinación de los métodos numéricos splitting, Elementos Finitos Adaptativo, Características y Diferencias Finitas.

1. Se propone un método splitting, donde cada operador se aproxima por separado, permitiendo trabajar por capas.
2. Para cada capa del dominio, se utiliza un método bidimensional de Elementos Finitos Adaptativo combinado con el método de las Características.
3. En la dirección vertical, se utiliza un método de Diferencias Finitas.

Además, el código está paralelizado utilizando OpenMP, permitiendo así el cálculo de los términos horizontales convectivos y difusivos en cada capa de manera simultánea reduciendo el coste computacional.

Capítulo 5

Resultados parciales y finales

En este capítulo se estudian distintas simulaciones obtenidas mediante los modelos PhyFire, HDWind y PhyNX, así como los datos necesarios para llevarlas a cabo.

5.1. Datos de entrada

Para realizar las simulaciones, es necesario conocer una serie de datos geoespaciales y meteorológicos de entrada (*input data*).

5.1.1. Datos geoespaciales

Los información geoespacial necesaria se obtiene de tres tipos de cartografías:

- Un mapa topográfico, el cual contiene la altura h de cada punto de la superficie $\mathcal{S}$ (4.1). Este puede encontrarse en cualquier Modelo Digital de Terreno (MDT). En el caso del territorio español, estos datos pueden obtenerse del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) con una resolución espacial de 25 metros [20]; en el caso de territorio europeo, se obtienen accediendo al MDT de 30 metros a través de WCS [54].
- Un mapa de presencia de vegetación, que determina todos los elementos tanto naturales como artificiales que suponen la ausencia de vegetación. La importancia de este mapa reside en que, como se mencionó en el Capítulo 1, la continuidad del combustible hace más probable la propagación de un incendio. Cabe recordar también que, gracias a los términos de convección y radiación no local del modelo PhyFire, los incendios forestales simulados pueden propagarse en zonas con combustible discontinuo a estos elementos. Esta información se obtiene de bases de datos públicas como el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) [38] de alta resolución o el proyecto colaborativo para crear mapas editables y libres OpenStreetMap (OSM) [56].
- Un mapa con la información relacionada con los tipos de combustibles. En el modelo PhyFire, existen diversas variables de entrada relacionadas con el tipo de combustible (véase la Tabla 4.2). En PhyNX, el factor de emisión, F_E , aproxima la cantidad

de humo emitido en función del combustible quemado dependiendo del tipo de combustible. En HDWind, se utilizan para determinar la rugosidad del terreno. En España, dependiendo de la región y/o año, esta información se obtiene del Mapa Forestal de España MFE25 o el MFE50 del MITECO [49] y los inventarios forestales nacionales IFN3 e IFN4 [61].

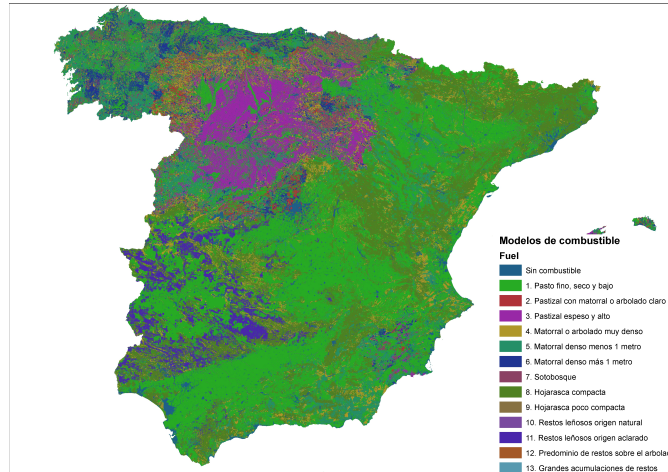


Figura 5.1: Mapa de tipos de combustibles en España (excepto Canarias), elaborado por el grupo de investigación SINUMCC.

Para la mayor parte del territorio europeo, los datos se obtienen del EFFIS [28] con una resolución de 250m.

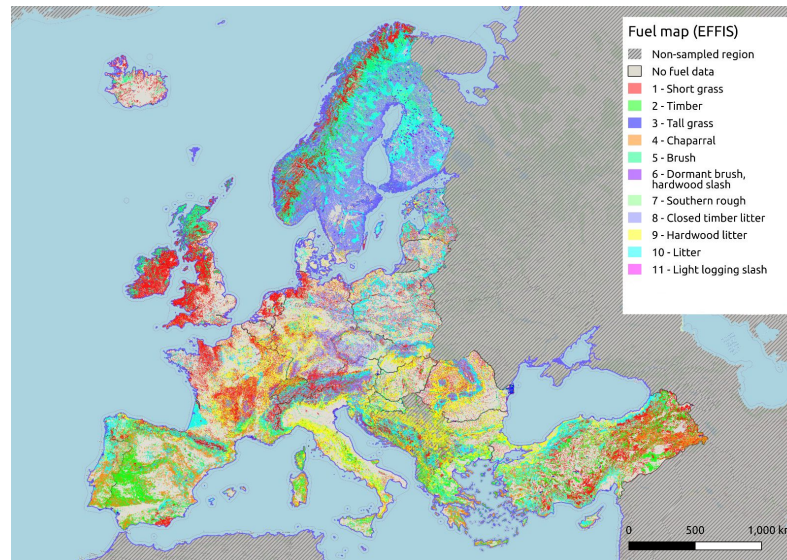


Figura 5.2: Mapa de combustibles en Europa [28].

A veces, los datos disponibles sobre el tipo de combustible y su presencia pueden estar desactualizados, no tener en cuenta el ciclo estacional del combustible forestal

o encontrarse áreas sin información. Además, existe una gran interpretación subjetiva en el trabajo de campo a la hora de recopilar este material. Para reducir la incertidumbre de este tipo de cartografías, pueden utilizarse datos satelitales [7, 30] y algoritmos de aprendizaje automático [44] que permiten generar cartografías *ad hoc* dinámicas.

La clasificación de combustibles usada en estos modelos está basada en los Modelos de Combustibles del Sistema Nacional de Evaluación del Peligro de Incendios de EE.UU. (NFFL, por sus siglas en inglés) [5], un sistema desarrollado para organizar y evaluar los combustibles forestales en el suelo -es decir, no se tienen en cuenta factores como la altura de los árboles- en función de su capacidad para arder y contribuir a la propagación de incendios. El sistema NFFL se adaptó en el territorio español con la información del Instituto de Conservación de la Naturaleza, añadiendo el valor 0 para superficies sin combustible y retirando los tipos 12 y 13 del NFFL. Así, se clasifican en los siguientes 12 tipos:

- **Tipo 0:** no hay combustible.
- **Tipo 1:** pastizales finos y dispersos.
- **Tipo 2:** pastizales con algo de arbustos y maleza.
- **Tipo 3:** pastizales densos y altos.
- **Tipo 4:** matorrales densos con carga de combustible pesada.
- **Tipo 5:** arbustos jóvenes con baja carga de combustible.
- **Tipo 6:** arbustos con carga de combustible moderada.
- **Tipo 7:** arbustos con carga de combustible alta.
- **Tipo 8:** bosques de coníferas con hojarasca ligera.
- **Tipo 9:** bosques de coníferas con hojarasca media.
- **Tipo 10:** bosques de coníferas con hojarasca pesada.
- **Tipo 11:** maderas ligeras.

En la Tabla 5.1 se detallan los valores de los parámetros dependientes del tipo de combustible utilizados en las simulaciones de este trabajo. Los valores de la tabla son genéricos y algunos pueden ser modificados experimentalmente según las necesidades de la simulación. Por ejemplo, al ser una clasificación hecha sobre el combustible en el suelo, la altura de la llama se ajusta habitualmente si el área de estudio contiene grandes árboles.

En el modelo HDWind, el coeficiente de fricción se calcula en función de la rugosidad del terreno mediante la siguiente ecuación:

$$\zeta = \frac{1}{\xi} = a_0 + a_1 z_0 + a_2 z_0^2$$

donde z_0 es la longitud de rugosidad, asignada con un valor distinto a cada tipo de área dado por la escala de rugosidades de Davenport (Tabla 5.2) [73], y a_0, a_1 y a_2 son valores constantes obtenidos mediante un proceso de ajuste. Para más información sobre este parámetro, consúltase [32].

ID	T_f	T_p	F	H_v	H_p	$t_{1/2}$	M_0	M_v	C_{cal}	T_c	F_E	z_0
0	0	500	0	0,0	0,0	1	0,25	0	1800	0	0	0
1	1300	500	0,26	0,6	5,433	150	0,1	0	1800	14,8	0,3	0,008
2	1300	500	1,11	0,471	0,676	150	1	0,333	2000	14,8	0,3	0,08
3	1300	500	0,749	0,637	5,244	150	2	0,333	1800	14,8	0,3	0,01
4	1300	500	3,31	0,334	2,892	300	2	0,333	2300	14,8	0,6	0,1
5	1300	500	3,78	0,508	2,828	450	2,3	0,333	2300	14,8	0,6	0,1
6	1300	500	3,32	0,489	2,688	450	2,2	0,333	2300	14,8	0,6	0,1
7	1300	500	3,93	0,675	3,015	450	2,4	0,5	2300	14,8	0,7	0,1
8	1300	500	10	0	0	450	5	0,333	2300	14,8	1	0,1
9	1300	500	11	0	0	300	2	1	2300	14,8	1	0,1
10	1300	500	30	0	0	300	2	1	2300	14,8	1	0,1
11	1300	500	10	0	0	450	5	0,333	2300	14,8	1	0,1

Tabla 5.1: Tabla de valores de los parámetros dependientes del tipo de combustible. Por columnas, de izquierda a derecha: tipo de combustible, temperatura de la llama, temperatura de pirólisis, altura de la llama, factor de corrección de la altura de la llama por viento, factor de corrección de la altura de la llama por la pendiente, vida media de combustión, carga máxima de combustible inicial, humedad de referencia, capacidad calorífica, calor de combustión, coeficiente de emisión del combustible y longitud de la rugosidad.

5.1.2. Datos meteorológicos

Para realizar las simulaciones, es necesario conocer la siguiente información meteorológica:

- La temperatura ambiente. Generalmente, esta se estima a través de datos meteorológicos históricos, disponibles a través de entidades y organismos como la AEMET [2] o el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León [39], según la zona de estudio.
- La humedad relativa. Este valor multiplica la humedad de referencia del combustible M_v . Al igual que la temperatura ambiente, esta se estima a través de fuentes de datos meteorológicos.
- Para predecir cómo se dispersan los gases y partículas en la atmósfera, en el modelo PhyNX es necesario establecer los coeficientes de difusión (horizontal y vertical) del humo y una clase de estabilidad de Pasquill. Estas clases son una categorización utilizada en meteorología para describir la estabilidad atmosférica y su influencia en la dispersión de contaminantes en la atmósfera, basada en cualidades como la radiación solar, la velocidad del viento y las condiciones de nubosidad. Se clasifican en:
 - **Clase A (muy inestable)**: condiciones de fuerte radiación solar durante el día con vientos ligeros. La turbulencia es alta, lo que favorece una rápida dispersión de contaminantes.

Tipo de superficie	Longitud de rugosidad (m)
Mar, arena suelta y nieve	$\approx 0,0002$
Hormigón, desierto llano, llanura de marea	0,0002 - 0,0005
Campo de nieve llano	0,0001-0,0007
Campo de hielo rugoso	0,001-0,0012
Terreno en barbecho	0,001-0,004
Hierba corta y musgo	0,008-0,03
Hierba larga y brezo	0,02-0,06
Cultivos agrícolas maduros bajos	0,04-0,09
Cultivos agrícolas maduros altos («granos»)	0,12-0,18
Arbustos continuos	0,35-0,45
Bosque de pinos maduros	0,8-1,6
Edificaciones bajas densas («zonas suburbanas»)	0,4-0,7
Ciudad grande construida regularmente	0,7-1,5
Bosque tropical	1,7-2,3

Tabla 5.2: Longitudes de rugosidad en función del tipo de superficie (traducción propia de [73]).

- **Clase B (moderadamente inestable):** radiación solar intensa y vientos moderados. La dispersión de contaminantes sigue siendo alta, pero algo menor que en la clase A.
- **Clase C (ligeramente inestable):** condiciones de radiación solar débil y vientos moderados a fuertes. La dispersión es moderada.
- **Clase D (neutra):** ocurre normalmente durante el día con cielos nublados o durante la noche con vientos moderados a fuertes. La dispersión es menor que en condiciones inestables, pero aún significativa.
- **Clase E (ligeramente estable):** noches claras y con vientos ligeros. La dispersión es limitada debido a la baja turbulencia.
- **Clase F (muy estable):** noches claras y tranquilas, con muy poca turbulencia. La dispersión de contaminantes es muy reducida, lo que puede llevar a una alta concentración de contaminantes cerca de la fuente de emisión.

Para mejorar la eficiencia del sistema de simulación en el preprocesamiento de los datos geoespaciales de entrada y el posprocesamiento de los resultados, el programa de simulación de los modelos emplea funcionalidades de La Biblioteca de Abstracción de Datos Geoespaciales (GDAL / OGR) [23].

5.2. Simulación en la garganta de Samaria

La zona de estudio se encuentra en la parte occidental de la isla de Creta (Grecia), en la Reserva Natural de las Montañas Blancas (Lefká Óri), proclamado Parque Nacional por el Gobierno griego en 1962 y Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1981.

Su nombre se debe a que estas están cubiertas con nieve hasta bien avanzada la primavera y están compuestas principalmente por granito, caliza y dolomita [67]. La garganta de Samaria es una zona de senderismo muy frecuentada, y su elección como zona piloto en el proyecto europeo TREEADS [71] responde a la necesidad de trazar vías de evacuación en situaciones de riesgo por incendios forestales en la zona. Para la realización de estas simulaciones se colaboró con la Universidad Técnica de Creta.

El supuesto incendio toma como datos meteorológicos los recogidos el día 23 de julio de 2018. El fuego comienza a las 12:30h GMT+0 a la orilla del río Vrisi y la simulación termina a las 16:30h GMT+0 con 265.69 ha quemadas. La superficie sobre la que se simula el incendio es un cuadrado de lado 11km. El área de simulación para el modelo PhyFire es un cuadrado de 11 km de lado, y para los modelos HDWind y PhyNX una capa de aire sobre esta superficie de altura 40 metros, obteniéndose el campo de viento y la concentración de humo a alturas de 1, 5, 10, 20 y 40 metros sobre la superficie. La resolución de la malla de elementos finitos empleada en PhyFire es de 7.5m. Para la malla del modelo HDWind se realizan 9 refinamientos sobre la malla de PhyFire. En PhyNX se utiliza una malla adaptativa. Toda la simulación implicó 4409,93 segundos ($\approx 1,22h$) de tiempo de cálculo en una estación de trabajo personal equipada con 4 CPUS Intel Xeon X6560 (con 6 núcleos que trabajan a una frecuencia de 2.67 GHz) y 24 GB RAM.



Figura 5.3: Ruta de senderismo por la garganta de Samaria [18].

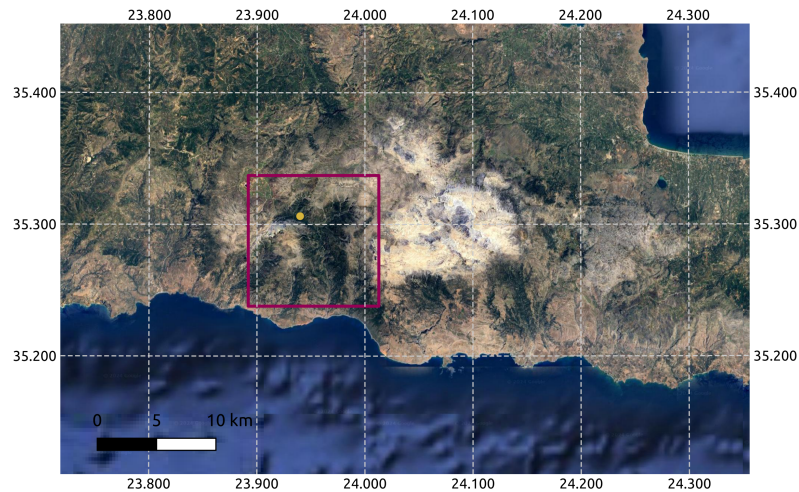


Figura 5.4: Mapa geolocalizado a través del sistema de coordenadas EPSG:4326-WGS 84. La zona a estudiar está delimitada por las líneas magentas. El punto amarillo representa el foco de ignición del incendio a simular.

Se encontraron 10 tipos de combustibles distintos según la clasificación de la Tabla 5.1. El 49.42 % del terreno fue catalogado como zona sin combustible (tipo 0); el 21.96 % como hojarasca de madera dura (tipo 9). El resto, ocupaban menos de un 7 % del área cada uno. Esto se corresponde con la información esperada, en zona de la garganta de Samaria el paisaje típico consiste en gargantas profundas y rocas verticales empinadas e imponentes que forman aberturas estrechas. Además, consta de más de 500 especies de árboles, arbustos y hierbas, con grandes bosques perennes de hoja ancha, pinos, cipreses, arces, humedales, garriga, maquis, friganas y casmófitas [67]. En la imagen superior de la Figura 5.5, puede verse un mapa donde se distinguen las zonas rocosas de las arboladas; en la inferior, están representadas en morado las zonas donde no hay combustible, las cuales fueron obtenidas mediante un proceso de clasificación a partir de observaciones espectrales vía satélite. Comparando estas imágenes, se ve que los espacios catalogados sin combustible se corresponden con ríos y zonas donde no hay vegetación.

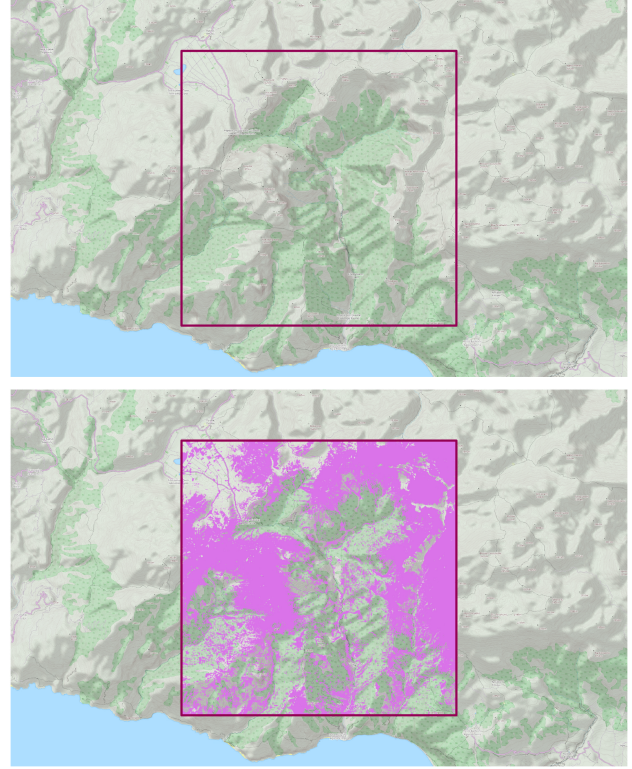


Figura 5.5: Arriba, la vegetación de la zona; abajo, se han resaltado las zonas sin combustible. Esta máscara de presencia de combustible fue proporcionada por la Universidad Técnica de Creta y generada a partir de imágenes de SentinelHub..

Para la estimación de los valores de los datos de entrada la Universidad Tecnológica de Creta, dentro del proyecto europeo TREEADS, proporcionó un archivo de datos históricos meteorológicos y topográficos de la zona. En base a esta información, se fijó la temperatura ambiente en $T_{\infty} = 303 \text{ K}$ ($= 29,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Para las variables del modelo PhyFire, se dieron los siguientes valores: coeficiente de absorción promedio de la radiación $a = 0,085 \text{ m}^{-1}$, factor del término convectivo $\beta = 0,015$ y coeficiente de convección natural $H = 47 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Sobre los parámetros dependientes del tipo de combustible, incluyéndose el coeficiente de emisión del combustible para el modelo PhyNX, están descritos en la Tabla 5.1. Respecto a los datos necesarios para HDWind, se emplearon las medidas meteorológicas reales recogidas por dos estaciones del área, actualizadas cada 30min. En la Tabla 5.3 se encuentra la hora (GMT+0), la velocidad (m/s), dirección (grados¹) y altura (m) del viento, humedad y temperatura (K) en algunos instantes de tiempo medidos en una de las estaciones. Para el modelo PhyNX, se estableció la clase de Pasquill tipo A: condiciones extremadamente inestables. Los coeficientes de difusión se fijaron en 0,1 para la dirección

¹medidos en sentido horario de Norte a Oeste, siendo el viento que viene del Norte 360°, viento que viene del Este 90°, viento que viene del Sur 180° y viento que viene del Oeste 270°.

horizontal y 0,001 para la vertical.

Hora	Velocidad	Dirección	Altura	Humedad	Temperatura
12:30	$\approx 5,8$	315	10	0,28	$\approx 301,8$
13:30	6,25	315	10	0,34	299,95
14:30	$\approx 4,03$	315	10	0,34	300,15
15:30	$\approx 3,58$	315	10	0,28	302,15
16:30	6,25	315	10	0,28	301,95

Tabla 5.3: Datos meteorológicos medidos en la estación Samaria.

La evolución del fuego puede verse en la Figura 5.6. La zona gris representa el área afectada por el incendio o «combustible consumido». Para calcularlo se utiliza un acumulador, inicializado a 0, y para cada instante de tiempo se recorre toda la malla triangular del modelo PhyFire comprobando si cada triángulo cumple que la fracción másica de combustible ha disminuido en 0,1 puntos sobre el estado inicial; si esto se cumple, el triángulo forma parte del «combustible consumido» y se agrega al acumulador. Las zonas naranjas y rojas representan el frente activo. Este se calcula de manera similar al anterior, suponiendo que un triángulo forma parte del frente activo si la temperatura adimensional evaluada en el baricentro es superior a 0,2. En este caso, se han establecido dos categorías: zonas con temperatura entre 0,22 y 0,44 en rosa, y zonas con temperatura superior a 0,44, en rojo.

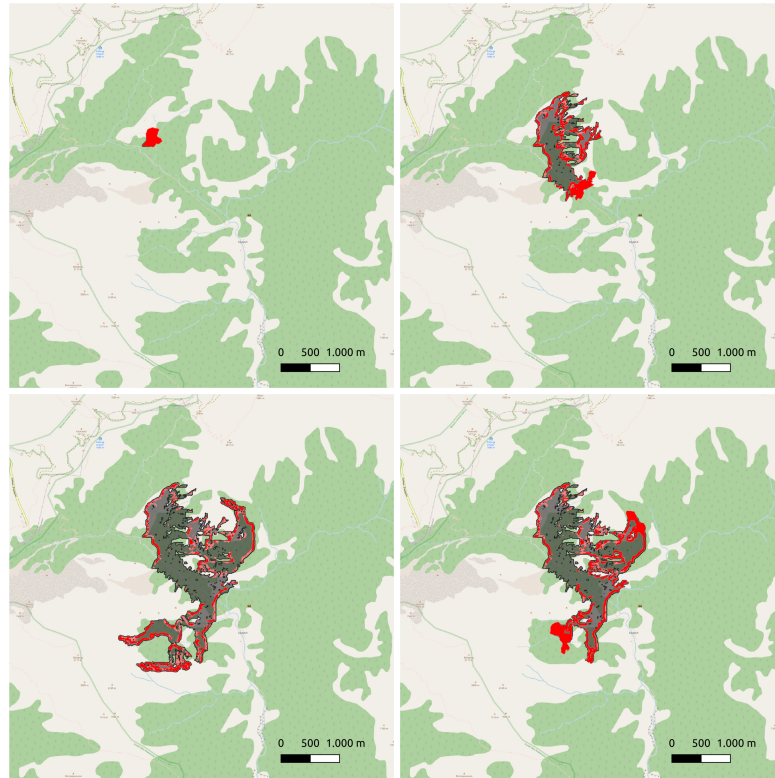


Figura 5.6: Evolución del fuego. Hora de simulación, desde la esquina superior izquierda en sentido horario: 12:45h, 14:00h, 15:15h y 16:30h (GMT+0).

A la velocidad a la que el frente de un incendio se desplaza a través del paisaje se la denomina velocidad de propagación del fuego (ROS, por las siglas en inglés de *rate of spread*). El modelo PhyFire calcula el ROS de forma simplificada realizando el cociente entre la distancia de punto más alejado del frente activo del incendio de fuego y el tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación hasta el instante en el que se calcula. En la Figura 5.7 se encuentran dos gráficas: una donde puede verse la evolución temporal del ROS en metros/minuto (izquierda) y otra mostrando la acumulación de hectáreas afectadas desde el inicio del incendio (derecha). Estos datos parecen indicar que, si las condiciones meteorológicas se mantienen constantes, el fuego tendería a apagarse, puesto que el ROS está disminuyendo y, en los últimos instantes de tiempo, el número de hectáreas que se han visto afectadas es muy bajo debido a la falta de continuidad del combustible. Esto ya podría intuirse observando la Figura 5.6, puesto que la velocidad de propagación del incendio pasa a ser muy baja entre las 15:15h y las 16:30h en comparación con los intervalos de 12:45-14:00h y 14:00-15:15h y las zonas con el frente de fuego más activo son las que bordean las áreas donde no hay combustible.

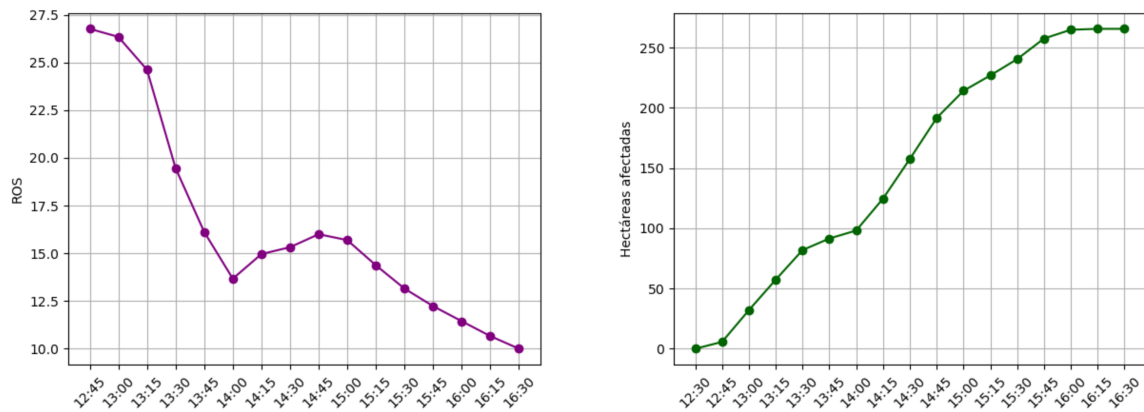


Figura 5.7: Izquierda, evolución del ROS a lo largo del tiempo; derecha, acumulación de hectáreas afectadas en el caso de Grecia.

El humo generado por alturas a las 16:00h puede verse en la Figura 5.8. En estas imágenes se representa, mediante sombreados de distintas intensidades, el nivel de concentración de partículas de humo procedentes de la combustión en el aire. Las unidades proporcionadas de esta concentración gaseosa se dan en miligramos de partículas por metro cúbico de aire (mg/m^3). En la leyenda a la izquierda de cada imagen puede verse que la concentración va disminuyendo a medida que aumenta la capa, sin embargo, el área que cubren las zonas va aumentando. Como la dirección del viento rondaba a lo largo de la simulación los 315° (viento que viene del noroeste), ocurre lo que era de esperar: el humo avanza hacia el sureste.

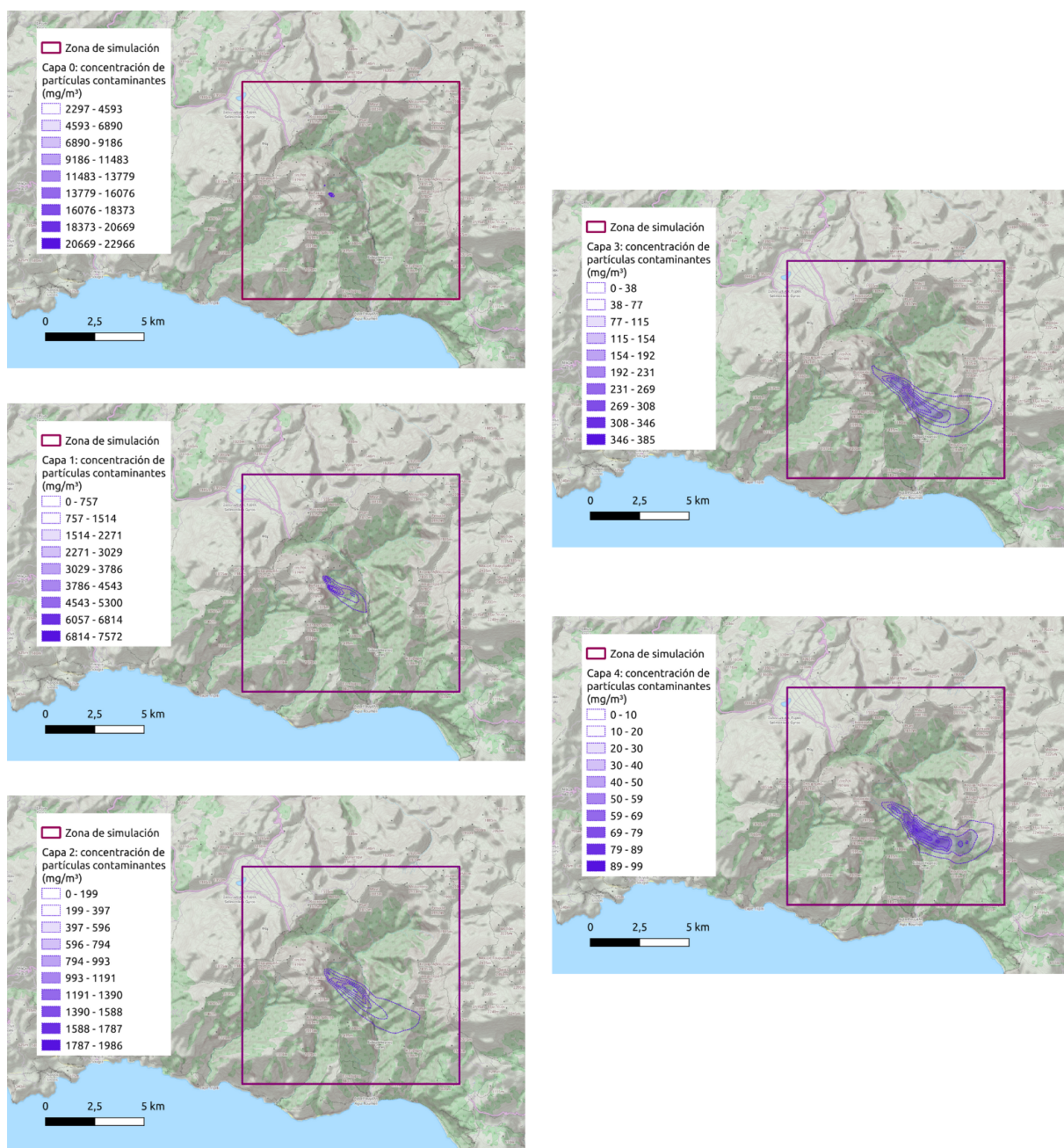


Figura 5.8: Concentración de humo a las 16:00h GMT+0 por alturas, donde la capa 0 está a la altura de 1m, capa 1 a 5m, capa 2 a 10m, capa 3 a 20m y capa 4 a 40m.

5.3. Simulación en la península de Sorrento

La siguiente simulación tiene lugar en la península de Sorrento, la cual separa el golfo de Nápoles del golfo de Salerno. Su nombre se debe a la ciudad principal de la zona, Sorrento. Este estudio se realizó dentro del proyecto europeo TREEADS con el objetivo de asesorar en la ubicación óptima de los pilares de un teleférico de nueva construcción.

La superficie sobre la que se simula el incendio es un rectángulo de lados 5,85 km y

4,35 km. Mencionar que parte del área contenida por este rectángulo se encuentra en el mar y que, en cierto sentido, *carece de interés* a la hora de simular incendios. Sin embargo, la simulación se lleva a cabo en toda el área, donde las zonas del mar se comportan como zonas sin combustible, teniendo estas influencia en el cálculo del viento.



Figura 5.9: Sorrento (Italia) [27].

En la Figura 5.10 puede verse la superficie a estudiar geolocalizada en un mapa. Como en el caso de Grecia, el área de simulación para el modelo PhyFire es este rectángulo de lados 5.85km y 4.35km, y para los modelos HDWInd y PhyNX una capa de aire sobre esta superficie de altura 40 metros, obteniéndose el campo de viento y la concentración de humo a alturas de 1, 5, 10, 20 y 40 metros sobre la superficie. Las mallas empleadas tienen la misma resolución que en la simulación de Grecia, pero son adaptadas al terreno actual. Toda la simulación implicó unos 944,144 segundos ($\approx 0,26h$) de tiempo computacional en el mismo ordenador, Intel Xeon X6560.

Al no tratarse de un caso real y no utilizar datos reales, se fijó como inicio del supuesto incendio el día 1 de enero de 1970 a las 00:00h GMT+0 y una duración de 2 horas. Esto se debe a que en el software utilizado la fecha debe introducirse en el sistema Unix Time Stamp, donde las fechas se definen como la cantidad de segundos transcurridos desde el 1 de enero de 1970 a las 00:00h UTC (sin contar segundos intercalares) [25]. Así, se introdujo como fecha de inicio el tiempo 0.

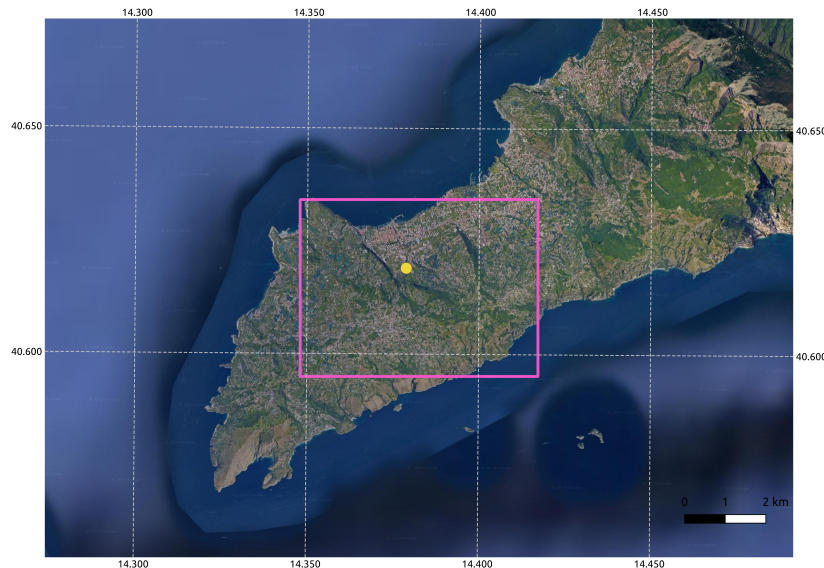


Figura 5.10: Mapa geolocalizado a través del sistema de coordenadas EPSG:4326-WGS 84. La zona a estudiar está delimitada por las líneas rosas. El punto amarillo representa el foco de ignición del incendio a simular.

El mapa de tipos de combustibles fue proporcionado por los responsables del piloto italiano del proyecto europeo TREEADS. Se identificaron 6 tipos de combustibles, todos

ellos representados en la Figura 5.11. El 44,98 % del terreno se catalogó como tipo 9, seguido del 29,08 % de tipo 0, 18,96 % tipo 2, 4,77 % tipo 8, 2,08 % tipo 1 y 0,13 % tipo 6.

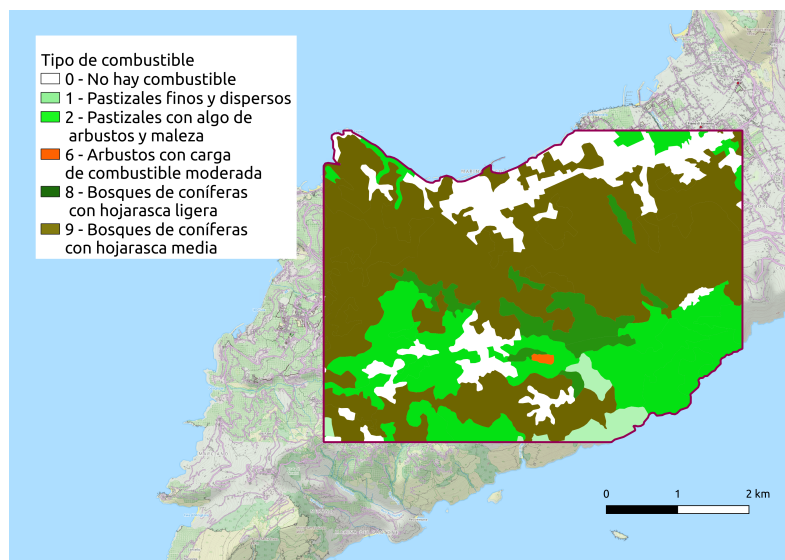


Figura 5.11: Mapa con los tipos de combustibles clasificados por polígonos.

Al igual que en el caso de Grecia, se establecen los valores de $T_{\infty} = 303$ K, $a = 0,085$ m^{-1} , $\beta = 0,015$ y $H = 47$ $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Respecto a los parámetros dependientes del tipo de combustible se establecieron como los de la Tabla 5.1 exceptuando la altura de la llama, la cuál se ajustó experimentalmente a los siguientes valores:

Tipo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F	0	0,2602	1,11	0,7499	3,308	3,778	3,324	3,932	7	9	11	10

Tabla 5.4: Altura de la llama según el tipo de combustible.

Se utilizó un único viento dominante contante con velocidad 3,8 m/s ($\approx 13,68$ km/h), dirección 220° (viento que viene del suroeste), altura 10 m, humedad relativa del 40 % y temperatura 303 K. Esta información la proporcionó el grupo italiano del proyecto europeo como datos representativos de las condiciones meteorológicas más frecuentes en la zona. Además, se estableció la clase de Pasquill tipo A: condiciones extremadamente inestables. Los coeficientes de difusión del humo se fijaron nuevamente en 0,1 para la dirección horizontal y 0,001 para la vertical.

El foco del incendio se situó entre las vías Talagnano y Atigliana de Sorrento. Pese a estar bordeado por estas vías (zonas sin combustible), o lo que es lo mismo, pese a la pérdida de continuidad del combustible, puede verse que el fuego avanza a través de estas. Este hecho se debe a la modelización de la radiación no local en el modelo PhyFire. Como se vio en la §4.2, en las zonas próximas al frente activo se calcula la radiación recibida, permitiendo así la propagación del fuego a estas áreas. Para limitarlas, se utilizaba una molécula de radiación, evitando así un cálculo muy costoso e innecesario demasiado lejos del frente de fuego. En la simulación, se determinó esta molécula de radio 37,5m.

En la Figura 5.12 pueden verse los primeros instantes de tiempo tras en inicio del incendio. Están representadas el área afectada por el incendio o «combustible consumido» en gris oscuro, la zona con temperatura entre 0,22 y 0,44 en rosa y la zona con temperatura superior a 0,44 en rojo, todas ellas calculadas como se explicó en el caso de Grecia. Como se ha comentado antes, el fuego atraviesa las vías. Este proceso es lento, pues una discontinuidad en el combustible ralentiza la propagación pero, si esta no es demasiado ancha, la energía de radiación acumulada permite que el combustible más allá de un cortafuegos acabe quemándose. Así, en la imagen se ve que de las 00:10h a las 00:30h el fuego se ha desplazado hacia el norte y unos escasos metros pasando la vía Atigliana hacia el este. Sin embargo, una vez esto ocurre, el fuego llega a otra zona con continuidad de combustible y avanza rápidamente. Esto es lo que ocurre en en la última imagen de la Figura 5.12. Si se compara la imagen de las 00:10h con la de las 00:40h, se observa que el número de hectáreas afectadas ha crecido poco.

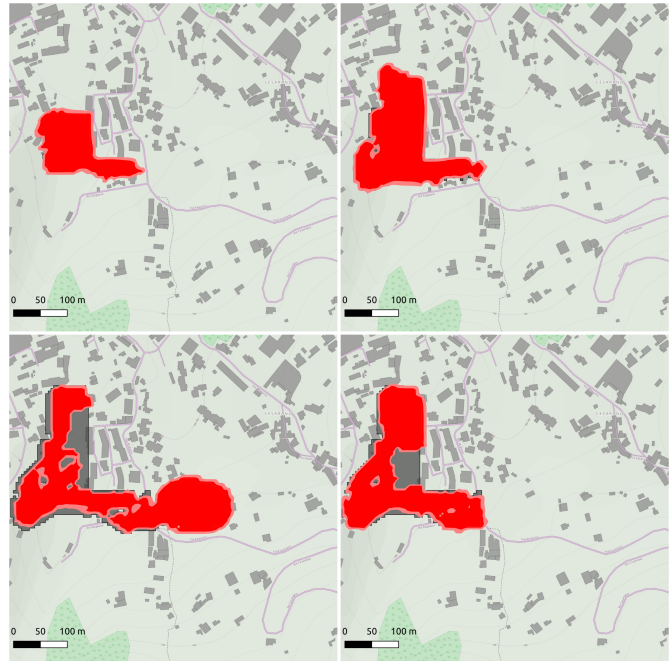


Figura 5.12: Evolución del fuego en los primeros instantes de tiempo. Desde la esquina superior izquierda, en sentido horario: 00:10h, 00:20h, 00:30h y 00:40h.

Desde las 00:40h hasta las 01:10h el fuego no avanza muy rápido debido a la gran cantidad de vías que lo bordean, de manera similar a lo que pasaba al inicio de la simulación. Pasado ese tiempo, el frente de fuego es tan grande e intenso que consigue atravesar las zonas sin combustible de su alrededor rápidamente. En la Figura 5.6 puede verse la evolución del incendio de las 01:10h a las 02:00h, donde puede apreciarse lo descrito anteriormente.

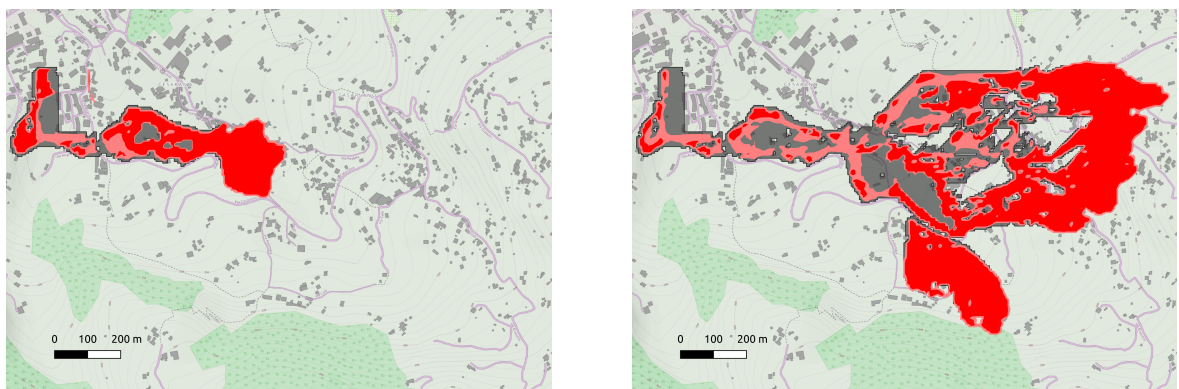


Figura 5.13: Evolución del fuego. A la izquierda, 01:10h; a la derecha, 02:00h.

El estudio del avance del fuego puede realizarse también mediante las gráficas de evolución del ROS y la acumulación de hectáreas afectadas por el incendio. Estas representan mejor la velocidad a la que se producen los cambios. Sin embargo, no proporcionan información sobre el porqué ocurren estos. En la Figura 5.14 pueden verse estas gráficas, coincidiendo su representación con los resultados descritos anteriormente mediante la visualización en mapas de la simulación. Comentar que esta simulación se limitó a 2h por petición de los interesados. Sin embargo, los datos nos indican que, al contrario a como pasaba en el ejemplo de Grecia, se prevé que el incendio siguiera propagándose tras el tiempo simulado.

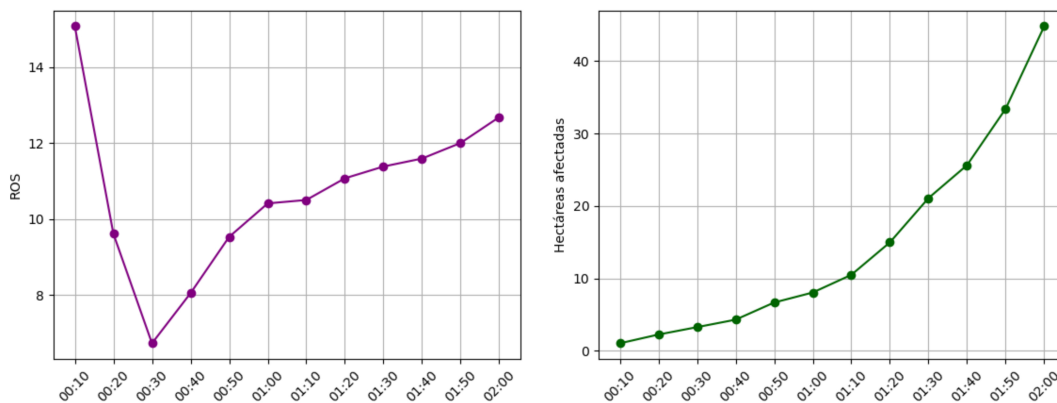


Figura 5.14: Izquierda, evolución del ROS a lo largo del tiempo; derecha, acumulación de hectáreas afectadas en el caso de Italia.

Observando las simulaciones del humo, se ve cómo este avanza hacia el noroeste (Figura 5.15). Este comportamiento es el esperado, puesto que el viento se fijó con dirección 220° . Téngase en cuenta que las dos primeras categorías no están coloreadas y se representa únicamente su perímetro. Por esto, el área estudiada aparece delimitada por una línea discontinua morada, indicando así la baja concentración de humo en esta zona.

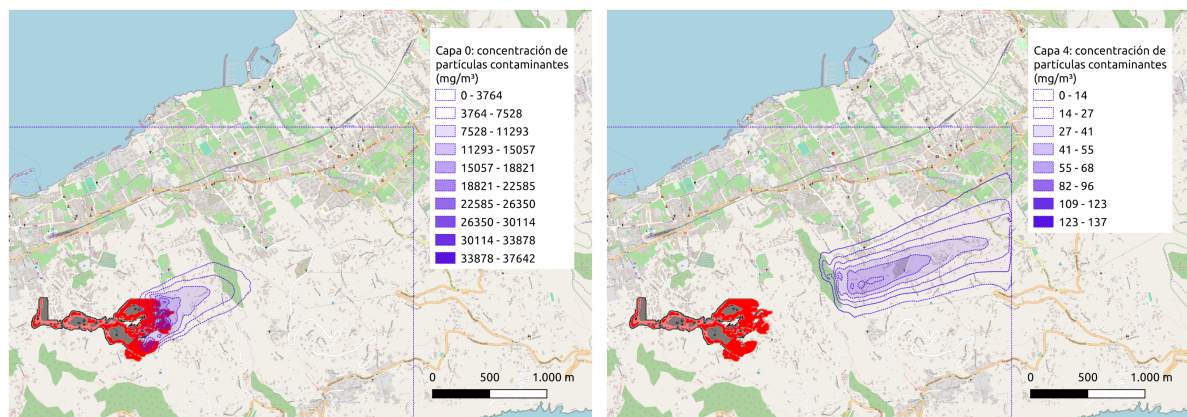


Figura 5.15: Concentración de humo en las capas 0 (1m de altura) y 4 (40m de altura) a las 01:40h de la simulación.

5.4. Simulación en el Valle del Tiétar

En esta sección se estudia una simulación basada en un incendio forestal real que tuvo lugar en el Valle del Tiétar (Ávila). El objetivo es comparar los datos obtenidos con los que se conocen del incendio real. Para ello, las responsables de la zona piloto española en

el proyecto europeo TREEADS proporcionaron una serie de datos geospaciales y meteorológicos, así como los referentes al incendio real.

El 24 de julio de 2022 tuvo lugar un incendio forestal en el Valle del Tiétar (Ávila), cerca de los pueblos San Juan de la Nava y El Barraco. Este se inició cerca de una carretera y comenzó a arder en dirección noreste, aproximándose a El Barraco. Pasadas



Figura 5.16: Incendio del Valle del Tiétar [26].

las 18:00h (hora local), las autoridades competentes declararon el nivel 2 de peligrosidad (riesgo moderado) por su gran proximidad a los pueblos y el riesgo existente para la población y los bienes distintos a los de naturaleza forestal. La noche del incendio se dieron condiciones meteorológicas favorables para la estabilización del fuego, es decir, sin llegar a estar controlado, el fuego evolucionaba favorablemente al no presentar frentes activos que hiciesen avanzar el fuego libremente. Esto hizo que se lograra detener el avance y la propagación del fuego, declarando el incendio como controlado el 27 de julio a las 18:45h y como extinguido el 30 de julio a las 17:00h. En total, fueron 492,37 las hectáreas que se vieron afectadas, un número muy cerca de las 500 ha establecidas para declararse gran incendio.

Para la simulación de este incendio se ha delimitado un área rectangular de lados 5,5 km y 3,06 km. Una ortofoto de este área se encuentra en la Figura 5.18. En las esquinas superiores pueden verse los pueblos de San Juan de las Navas (izquierda) y El Barraco (derecha). El foco de ignición está situado en la esquina inferior izquierda y, como se quiere simular el caso real, se espera que el fuego avance hacia la esquina superior derecha.

Al igual que en los modelos an-



Figura 5.17: Mapa geolocalizado a través del sistema de coordenadas EPSG:4326-WGS 84. El punto amarillo representa el foco de ignición del incendio a simular.

teriores, el dominio utilizado en PhyFire es el rectángulo (Figura 5.18), y para los modelos HDWind y PhyNX una capa de aire sobre esta superficie de altura 40 metros, obteniéndose el campo de viento y la concentración de humo a alturas de 1, 5, 10, 20 y 40 metros sobre la superficie. Las mallas empleadas son iguales que las anteriores pero adaptadas a la superficie actual. En este caso, la simulación implicó 3066,64 segundos ($\approx 0,85$ h) de tiempo computacional en el mismo ordenador Intel Xeon X6560.



Figura 5.18: Ortofoto del área de simulación. El punto amarillo representa el foco de ignición.

El comienzo del incendio ficticio se fijó el 24 de julio de 2022 a las 15:50h (hora local), coincidiendo con la fecha de detección del incendio real. Es importante que las fechas sean semejantes, pues los datos meteorológicos y geoespaciales que se utilizan para la simulación deben ser lo más aproximados posible a los que había durante incendio real. Se estableció como fecha final de la simulación el 24 de julio de 2022 a las 21:50h (hora local), momento aproximado a partir del cual el incendio real comenzó a estabilizarse según los registros. Además, el foco de ignición se estableció en el punto ($40^{\circ}27'22.2''\text{N}$, $4^{\circ}41'33.1''\text{W}$) al lado de la carretera AV-P-417 y el arroyo del Salobral, donde surgió el original.

Siguiendo el archivo de datos meteorológicos y topográficos de la zona proporcionado, se determinaron los siguientes parámetros. En la zona de la simulación se identificaron 6 tipos diferentes de combustible, siendo un 40,47 % tipo 0 (sin combustible, Figura 5.19), un 20,53 % tipo 1 (pastizales finos y dispersos) y un 15.16 % tipo 5 (arbustos jóvenes con baja carga de

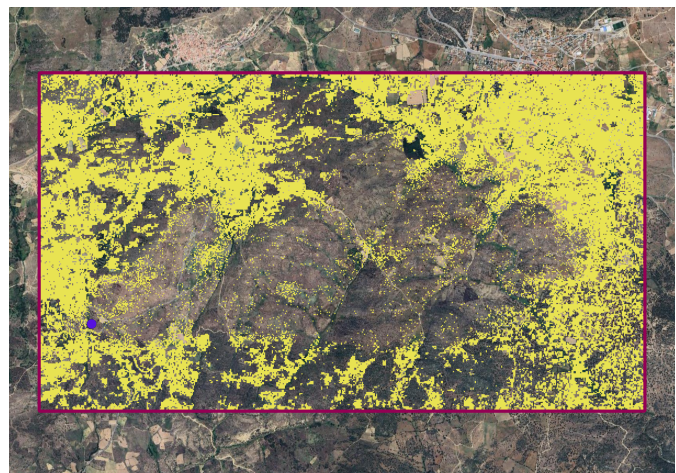


Figura 5.19: Mapa con las zonas donde no hay combustible marcadas en amarillo; foco de ignición en azul.

combustible), entre otros que cubren menor porcentaje del territorio. Los parámetros se fijaron en: $T_{\infty} = 303 \text{ K}$, $a = 0,085 \text{ m}^{-1}$, $\beta = 0,015$ y $H = 47 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Los parámetros dependientes del tipo de combustible se fijaron como los de la Tabla 5.1. Los datos meteorológicos se determinaron utilizando las medidas reales recogidas por la estación meteorológica de Nava de Arévalo (referencia AV01) del servicio de agricultura Inforiego de la Junta de Castilla y León. Esta está situada a unos 24 km noreste del foco de ignición del incendio. Con esta información, se estableció un viento dominante en el centro del dominio con características de la Tabla 5.5. Además, se estableció la clase de Pasquill tipo A, condiciones extremadamente inestables, y los coeficientes de difusión se fijaron en 0,1 para la dirección horizontal y 0,001 para la vertical.

Hora (GMT+2)	Velocidad (m/s)	Dirección (°)	Altura (m)	Humedad	Temperatura (K)
15:50	3,2	230	10	0,16	305
16:45	2,7	270	10	0,16	305
18:50	3,4	245	10	0,16	305

Tabla 5.5: Datos meteorológicos del viento dominante.

En la gráfica de la Figura 5.20 puede verse el número de hectáreas afectadas a lo largo del tiempo, llegando a ser 407,34 ha al final de la simulación. En el incendio real este número fue de 492,37 ha. Teniendo en cuenta que el real duró más tiempo y que a partir de la

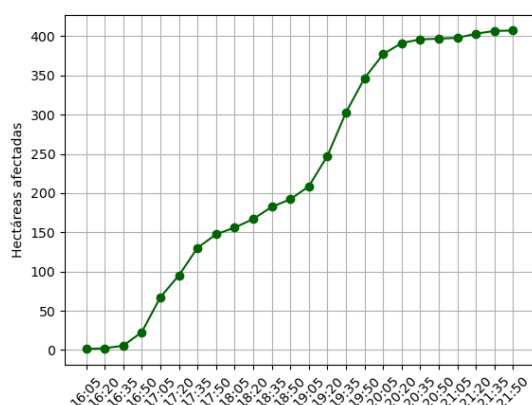


Figura 5.20: Hectáreas afectadas a lo largo de la simulación en el caso de España.

noche del 24 de julio no se tuvo un gran crecimiento del incendio, puede decirse que los resultados obtenidos son buenos en este sentido. Ahora, ¿será buena la simulación en cuanto a la forma del área afectada?

Solo se tiene información de la forma final del área que se vio afectada por el incendio real. Por esto, primero va a estudiarse la evolución espaciotemporal del incendio simulado para, finalmente, comparar el resultado final obtenido con el real.

En los primeros instantes de tiempo, ocurre algo similar al caso de Italia respecto a la evolución del fuego. Al estar el foco de ignición al lado de una carretera, comienzan siendo pocas las hectáreas quemadas hasta que el fuego atraviesa la carretera y llega a zonas con continuidad de combustible. En la Figura 5.21 está representado el avance del fuego de las 16:35h a las 16:50h. Al igual que en los ejemplos anteriores, se representa en gris el área afectada por el incendio y la temperatura adimensional en rosa para valores de 0,22 a 0,44 y en rojo para valores superiores. Desde que se inicia el incendio simulado a las 15:50h hasta las 16:35h es poco el avance del fuego. Pasadas las 16:35h el fuego comienza a aumentar con más intensidad.

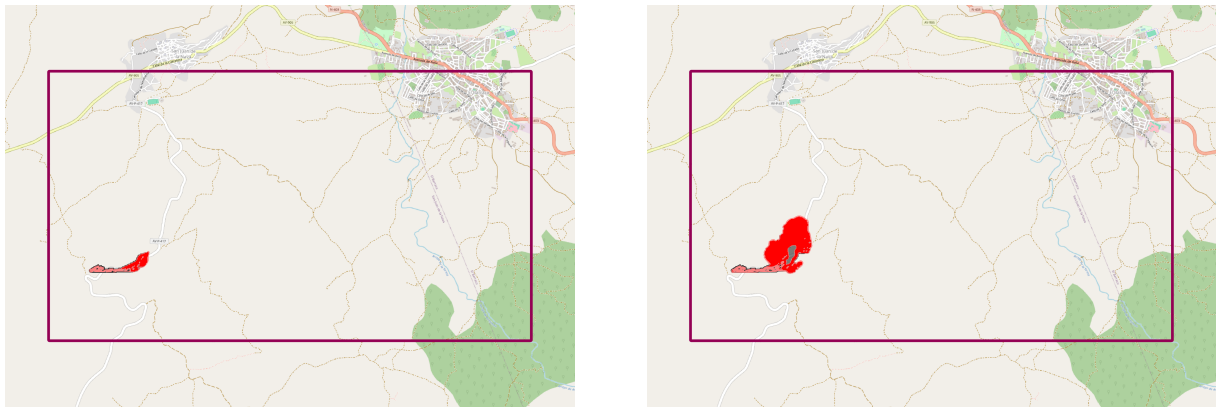


Figura 5.21: Evolución del fuego. Hora de simulación : 16:35h (derecha), 16:50h (izquierda).

Como ya se ha comentado en diversas ocasiones, la continuidad de combustible es uno de los factores determinantes para que se produzca un incendio forestal. En las siguientes imágenes puede verse el avance del fuego a las 17:35h, 18:35h, 19:50h y 21:50h, hora final de la simulación, con las zonas sin combustible marcadas en amarillo. Se aprecia cómo la forma del fuego está determinada por la presencia o no de combustible. Para ver este comportamiento con mayor detalle, obsérvese el centro del frente de fuego derecho a las 17:35h, donde se encuentra una zona con combustible muy disperso. A las 18:35h, el fuego avanzó bordeándolas, dejando así una parte del terreno sin arder dentro del incendio. Debido al efecto de la radiación del fuego de alrededor, donde se eleva la temperatura de modo que el fuego es capaz de quemar el combustible disperso de la zona, a las 19:50h gran parte de esta zona se vio afectada por las llamas.

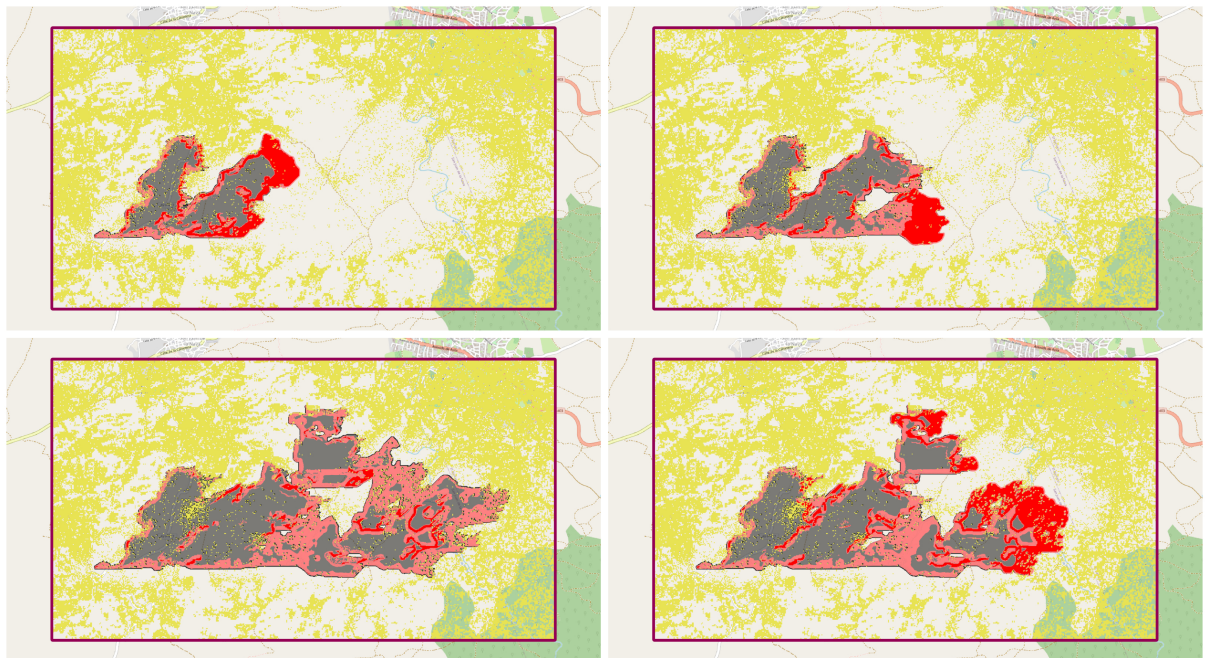


Figura 5.22: Evolución del fuego. Hora de simulación, desde la esquina superior izquierda en sentido horario: 17:35h, 18:35h, 19:50h y 21:50h.

Observando la evolución general en las Figuras 5.21 y 5.22, se ve cómo el fuego avanza hacia El Barraco, al igual que pasaba en el incendio real. El nivel 2 de peligrosidad se declaró a las 18:00h por la proximidad del fuego a la población, coincidiendo con la simulación, donde a partir de las 17:35h se ve que el crecimiento del incendio comienza a dirigirse en esa dirección.

La comparación en cuanto a forma del área quemada real y la obtenida con la simulación puede verse en la Figura 5.23. El resultado obtenido es muy bueno, ambos incendios siguen un patrón similar. Además, puesto que la simulación termina a las 21:50h, es posible que las zonas afectadas únicamente por el incendio real correspondan con la evolución del fuego en las siguientes horas, cuando el incendio comenzó a estabilizarse, aunque no se disponen de datos oficiales que indiquen el curso exacto del caso real. Se debe tener en cuenta que en la simulación no se incluyen ráfagas en distintas direcciones, las cuales podrían suponer la propagación del fuego *hacia atrás*.

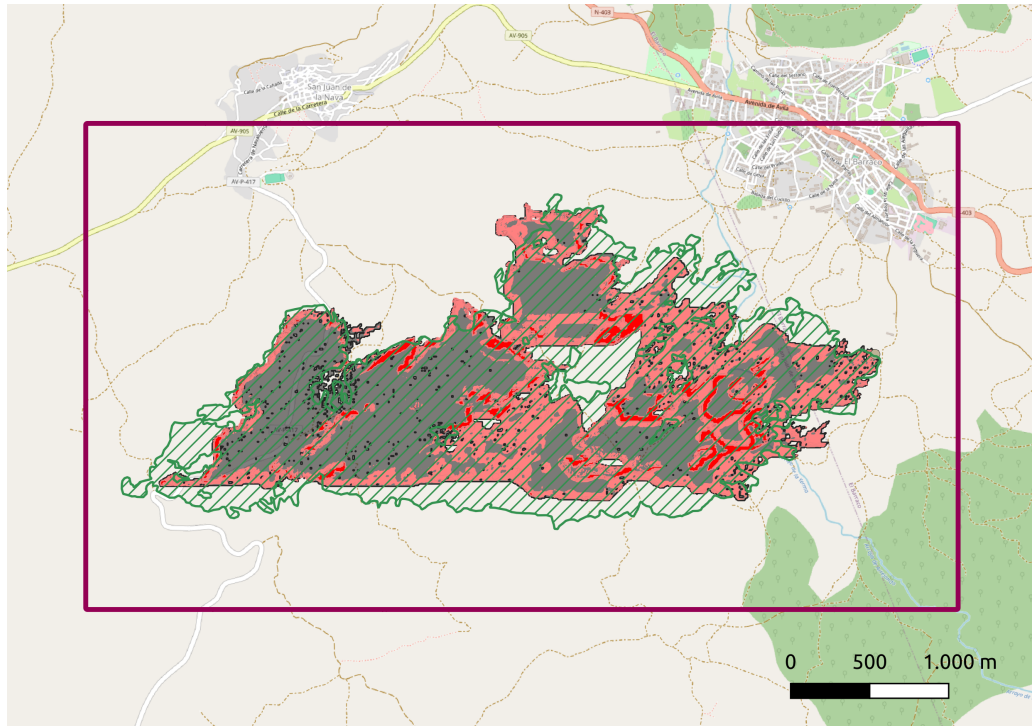


Figura 5.23: Simulación del incendio comparada con el área afectada por el incendio real (verde rayado).

Sobre el humo generado no se tiene información oficial, por lo que van a analizarse únicamente los resultados de la simulación. En la Figura 5.24 se encuentra representada la concentración de humo en la capa 2, a 10 metros por encima de la zona de simulación, en los instantes de tiempo 16:20h, 18:20h, 19:50h y 21:50h. La simulación parece indicar que, pese a la idea de que el humo fuese a ir en dirección a El Barraco al igual que el fuego, esto no es del todo cierto. Aproximadamente, entre las 17:05h y las 19:35h el humo se dirige hacia el este. Este comportamiento es similar en todas las capas de la simulación.

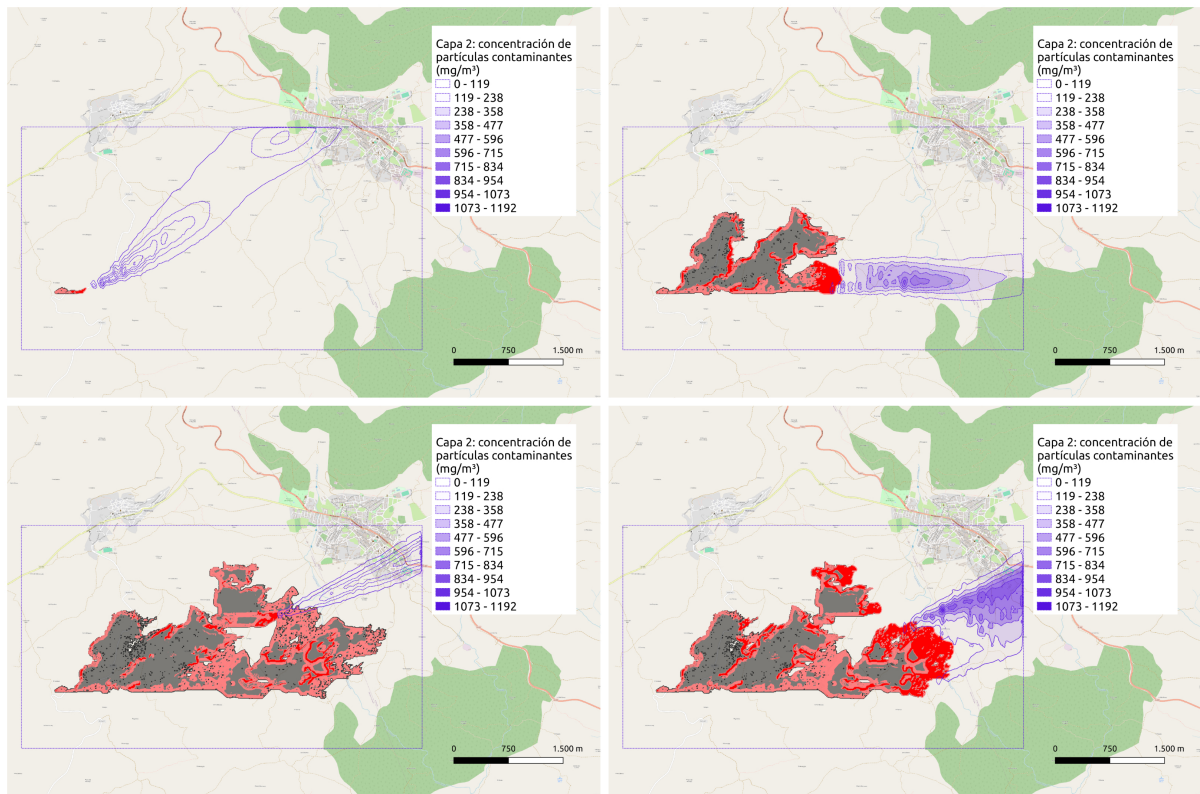


Figura 5.24: Concentración de humo en la capa 2 en los instantes de tiempo, desde la esquina superior izquierda en sentido horario: 16:20h, 18:20h, 19:50h y 21:50h.

Dado que esta simulación es sobre un caso real, surge la duda: ¿habría sido útil emplear esta herramienta para frenar los daños producidos? El tiempo computacional total fue de 477,9 segundos para la simulación del fuego (sin el humo), aproximadamente 8 minutos. Teniendo en cuenta que la información geoespacial está recopilada y disponible para todo el territorio español, a grandes rasgos solo sería necesario conocer la información de una estación meteorológica cercana al fuego (como la de Nava de Arévalo) y datos de predicción. Se debe tener en cuenta que la predicción lleva un factor de incertidumbre, el cuál sería atribuido a la simulación. Añadiendo también el tiempo de detección del incendio, podría suponerse que en 45 minutos desde que comenzó el fuego se tendrían los resultados totales. Destacar que los datos de la simulación se van calculando y escribiendo por tiempo y que no sería necesario esperar hasta el final de la simulación para comenzar a actuar bajo la supuesta evolución del fuego. De esta forma, sobre las 16:35h se conocería esta información. En este momento 5,4 ha se habían visto afectadas, aproximadamente un 1,3 % del total de hectáreas afectadas por la simulación (Figura 5.21 derecha). Estos datos nos indican que hubiese sido de gran ayuda disponer de estas herramientas en tiempo real para intentar frenar la deforestación del terreno y garantizar la seguridad de los equipos de extinción y la población, entre otros.

Capítulo 6

Discusión, conclusiones y líneas futuras de trabajo

En cuanto al desarrollo de esta investigación, he tenido que recurrir a diversos conocimientos adquiridos durante el Máster en Modelización Matemática. En primer lugar, haber cursado la asignatura de *Métodos Numéricos avanzados en EDP* ha sido fundamental ya que, además de proporcionarme los conocimientos necesarios para la formulación de los modelos en el Capítulo 3, me inspiró a solicitar este trabajo. Además, asignaturas como *Teoría de la Modelización y Simulación Matemática* y *Enseñanza-Aprendizaje de la Modelización Matemática* me ayudaron a establecer relaciones entre el *mundo real* y el modelo matemático, comprendiendo así las ventajas y limitaciones de la modelización. Asimismo, para el Capítulo 5 ha sido indispensable haber cursado la asignatura de *Modelos Matemáticos en Medio Ambiente*, donde aprendí a realizar simulaciones con el modelo PhyFire haciendo uso del software QGIS para visualizar los resultados.

Gracias a las competencias brindadas por las asignaturas, he podido ir un paso más allá y ampliar mis conocimientos sobre la modelización y simulación de incendios forestales, valorando la importancia de estos modelos y su gran ayuda ante la problemática actual. Destacar también la motivación que me ha aportado este trabajo al poder sentir de una manera directa cómo las matemáticas y la informática pueden hacer del mundo un lugar menos hostil.

Sobre los resultados del trabajo, se han podido realizar las simulaciones propuestas en los objetivos con una valoración general positiva. Los casos de la garganta de Samaria y la península de Sorrento me han ayudado a visualizar el funcionamiento de los modelos, comprendiendo mejor la relación entre las condiciones meteorológicas y geoespaciales, como la continuidad de combustible y la dirección y velocidad del viento, y el avance del fuego. Finalmente, el caso de San Juan de la Nava y El Barraco ha culminado esta investigación, pudiendo comparar en gran medida los resultados proporcionados por los modelos con los obtenidos en el incendio real obteniendo unos resultados muy acertados.

Entre las posibles mejoras y trabajos futuros, me gustaría estudiar el avance espacio-temporal del humo en un área más grande para poder alertar a las poblaciones afectadas de la contaminación y, en caso de ser necesario, disponer de un tiempo mayor para la evacuación de estas zonas. Esto requeriría de un mayor coste computacional, sugiriendo el reto al que siempre se enfrentan este tipo de modelos: una mayor optimización. Además, quiero señalar la importancia de la recopilación de datos de campo, pues otra de las gran-

des limitaciones de la modelización es no disponer de la información necesaria para las simulaciones o que esta tenga un elevado nivel de incertidumbre.

Señalar que, tras consultar diversas fuentes y tener una visión general de la situación, considero que invertir en medios de extinción no es suficiente para frenar esta problemática. Es necesario dar a conocer la situación y establecer medidas preventivas, por ejemplo, fomentando la emigración de las ciudades al campo (último aviso) o diseñando planes de actuación ante posibles incendios, donde se incluyen los casos simulados de la garganta de Samaria y la península de Sorrento, llevados a cabo para conocer las zonas más seguras y establecer vías de escape.

Por otra parte, quiero destacar nuevamente mi agradecimiento a Mabel, Jose y Manel por confiar en mí, ayudarme siempre y darme la gran oportunidad de trabajar con los modelos acoplados y realizar simulaciones con la información recopilada para el proyecto europeo TREEADS. Mencionar que la investigación que hemos llevado a cabo en este trabajo está aún sin publicar, pero espera estarlo en un futuro cercano.

Por último, si cualquier persona está interesada en el contenido de este trabajo y desea comunicarse conmigo, puede encontrarme en el email: laururiru[arroba]duck[punto]com.

Bibliografía

- [1] Fire Research and Management Exchange System. Wildland-urban interface fire dynamics simulator (wfds). <https://www.frames.gov/catalog/14628>. Visto en junio de 2024.
- [2] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Datos y estadísticas. https://www.aemet.es/es/lineas_de_interes/datos_y_estadistica. Visto en junio de 2024.
- [3] D. Albright and B. N. Meisner. Classification of fire simulation systems. 1999.
- [4] N. Andela, D. C. Morton, L. Giglio, R. Paugam, Y. Chen, S. Hantson, G. R. van der Werf, and J. T. Randerson. The global fire atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth System Science Data*, 11(2):529–552, 2019.
- [5] H. E. Anderson. *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. General Technical Report*, volume 122. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range, 1981.
- [6] S. Arellano, J. Vega, A. Arellano, J. Álvarez, D. Vega, and E. Pérez. *Foto-Guía de Combustibles Forestales de Galicia*. Andavira Editora, S.L., Santiago de Compostela, Spain, 2016.
- [7] L. A. Arroyo, C. Pascual, and J. A. Manzanera. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 256(6):1239–1252, 2008.
- [8] M. Asensio, J. Cascón, P. Laiz, and D. Prieto-Herráez. Validating the effect of fuel moisture content by a multivalued operator in a simplified physical fire spread model. *Environmental Modelling & Software*, 164:105710, 2023.
- [9] M. Asensio, L. Ferragut, D. Álvarez, P. Laiz, J. Cascón, D. Prieto, and G. Pagnini. Phyfire: an online gis-integrated wildfire spread simulation tool based on a semi-physical model. In *Applied Mathematics for Environmental Problems*, pages 1–20. Springer, 2021.
- [10] M. I. Asensio, J. M. Cascón, D. Prieto-Herráez, and L. Ferragut. An historical review of the simplified physical fire spread model phyfire: Model and numerical methods. *Applied Sciences*, 13(4):2035, 2023.

- [11] M. Asensio-Sevilla, M. Santos-Martín, D. Álvarez León, and L. Ferragut-Canals. Global sensitivity analysis of fuel-type-dependent input variables of a simplified physical fire spread model. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*, 172(C):33–44, 2020.
- [12] A. Bakhshaii and E. A. Johnson. A review of a new generation of wildfire–atmosphere modeling. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(6):565–574, 2019.
- [13] T. Beer. The australian national bushfire model project. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(12):49–56, 1990.
- [14] E. Bonilla, L. J. Mickley, G. Raheja, S. D. Eastham, J. Buonocore, A. Alencar, L. Verchot, D. Westervelt, and M. C. Castro. Health impacts of smoke exposure in south america: increased risk for populations in the amazonian indigenous territories. *Environmental Research: Health*, 1(2):021007, 2023.
- [15] J. Cascón, L. Ferragut, M. Asensio, D. Prieto, and D. Álvarez. Neptuno++: An adaptive finite element toolbox for numerical simulation of environmental problems. *XVIII Spanish-French School Jacques-Louis Lions about Numerical Simulation in Physics and Engineering, Las Palmas de Gran Canaria*, 2018.
- [16] J. Cascón, L. Ferragut, E. Hernández, et al. A reduced basis for a local high definition wind model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 311:438–456, 2016.
- [17] J. Castenson. Climate risk is real and calculable, but numbers don’t protect homes. <https://www.forbes.com/sites/jennifercastenson/2024/02/16/climate-risk-is-real-and-calculable-but-numbers-dont-protect-homes/>. Visto en mayo de 2024.
- [18] Civitatis. Imagen: Senderismo por la garganta de samaria. <https://www.civitatis.com/es/canea/senderismo-garganta-samaria/>. Visto en junio de 2024.
- [19] T. L. Clark, M. A. Jenkins, J. Coen, and D. Packham. A coupled atmosphere fire model: Convective feedback on fire-line dynamics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35(6):875–901, 1996.
- [20] CNIG. Centro de descargas del centro nacional de información geográfica. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>. Visto en junio de 2024.
- [21] J. R. Coleman and A. L. Sullivan. A real-time computer application for the prediction of fire spread across the australian landscape. *Simulation*, 67(4):230–240, 1996.
- [22] R. Connolly, M. E. Marlier, D. A. Garcia-Gonzales, J. Wilkins, J. Su, C. Bekker, J. Jung, E. Bonilla, R. T. Burnett, Y. Zhu, and M. Jerrett. Mortality attributable to pm 2.5 from wildland fires in california from 2008 to 2018. *Science Advances*, 10(23):eadl1252, 2024.
- [23] Contribuidores de GDAL/OGR. Geospatial data abstraction: Software library; open source geospatial foundation. <https://gdal.org/>. Visto en junio de 2024.

- [24] Copernicus. Europe’s summer wildfire emissions highest in 15 years. <https://atmosphere.copernicus.eu/europes-summer-wildfire-emissions-highest-15-years>. Visto en mayo de 2024.
- [25] Dan’s Tools. Unix time stamp. <https://www.unixtimestamp.com/>. Visto en junio de 2024.
- [26] D. de Ávila. Todo apunta a un fuego provocado. <https://www.diariodeavila.es/noticia/ze88f5b26-b748-fab0-d66badf2f5c3809a/202207/todo-apunta-a-un-fuego-provocado>. Visto en junio de 2024.
- [27] M. Escrivá. Sorrento, más allá del limoncello. <https://www.traveler.es/viajes-urbanos/articulos/que-hacer-en-sorrento-italia/11340>. Visto en junio de 2024.
- [28] European Forest Fire Information System (EFFIS). Fuel maps. <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/about-effis/technical-background/fuels>. Visto en junio de 2024.
- [29] European Forest Fire Information System (EFFIS). Statistics portal. <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/apps/effis.statistics/estimates>. Visto en mayo de 2024.
- [30] M. J. Falkowski, P. Gessler, P. Morgan, A. Smith, and A. T. Hudak. Evaluating aster satellite imagery and gradient modeling for mapping and characterizing wildland fire fuels. 2004.
- [31] L. Ferragut, M. Asensio, J. Cascón, and D. Herráez. A wildland fire physical model well suited to data assimilation. *Pure and Applied Geophysics*, 172:121–139, 01 2014.
- [32] L. Ferragut, M. Asensio, and J. Simon. High definition local adjustment model of 3d wind fields performing only 2d computations. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 27(4):510–523, 2011.
- [33] L. Ferragut, M. I. Asensio, J. M. Cascón, D. Prieto, Ramírez, and Joaquín. An efficient algorithm for solving a multi-layer convection–diffusion problem applied to air pollution problems. *Advances in Engineering Software*, 65:191–199, 2013.
- [34] L. Ferragut, R. Montenegro, G. Montero, E. Rodríguez, M. Asensio, and J. M. Escobar. Comparison between 2.5-d and 3-d realistic models for wind field adjustment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(10-11):548–558, 2010.
- [35] M. A. Finney. *FARSITE, Fire Area Simulator–model development and evaluation*. Number 4. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1998.
- [36] W. L. Fons. Analysis of fire spread in light forest fuels ¹. *Journal of Agricultural Research*, 72(3):93, 1946.

- [37] F. M. Fujioka, A. M. Gill, D. X. Viegas, and B. M. Wotton. Chapter 21 fire danger and fire behavior modeling systems in australia, europe, and north america. In A. Bytnerowicz, M. J. Arbaugh, A. R. Riebau, and C. Andersen, editors, *Wildland Fires and Air Pollution*, volume 8 of *Developments in Environmental Science*, pages 471–497. Elsevier, 2008.
- [38] Instituto Geográfico Nacional De España (IGN). Sistema de información sobre ocupación del suelo de españa (siose). <https://www.siose.es/web/guest/siose-alta-resolucion>. Visto en junio de 2024.
- [39] Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. Datos meteorológicos. <https://www.itacyl.es/agro-y-geo-tecnologia/agrometeorologia-y-suelos/datos-meteorologicos>. Visto en junio de 2024.
- [40] P. Jain, S. C. Coogan, S. G. Subramanian, M. Crowley, S. Taylor, and M. D. Flannigan. A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, 28(4):478–505, 2020.
- [41] F. H. Johnston, S. B. Henderson, Y. Chen, J. T. Randerson, M. Marlier, R. S. DeFries, P. Kinney, D. M. Bowman, and M. Brauer. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental health perspectives*, 120(5):695–701, 2012.
- [42] I. Knight and J. Coleman. A fire perimeter expansion algorithm-based on huygens wavelet propagation. *International Journal of Wildland Fire*, 3(2):73–84, 1993.
- [43] A. K. Kochanski, J. D. Beezley, J. Mandel, and C. B. Clements. Air pollution forecasting by coupled atmosphere-fire model wrf and sfire with wrf-chem, 2013.
- [44] M. López-De-Castro, D. Prieto-Herráez, M. I. Asensio-Sevilla, and G. Pagnini. High resolution fuel type mapping through satellite imagery and neural networks for wild-fire simulations: A case study in spain. *Environmental Sciences Proceedings*, 17(1):28, 2022.
- [45] J. Mandel, J. D. Beezley, and A. K. Kochanski. Coupled atmosphere-wildland fire modeling with wrf-fire version 3.3. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4(1):497–545, 2011.
- [46] A. G. McArthur. Weather and grassland fire behaviour. 1966.
- [47] Ministerio del Interior. El gobierno adelanta la campaña estatal contra incendios forestales por segundo año consecutivo. <https://www.interior.gob.es/opencms/es/detalle/articulo/El-Gobierno-adelanta-la-campana-estatal-contra-incendios-forestales-por-segundo-ano-consecutivo/>. Visto en mayo de 2024.
- [48] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Avance informativo de incendios forestales del 1 de enero al 31 de diciembre de 2023.

- <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/Avance%20informativo%2031%20de%20diciembre%202023.pdf>. Visto en junio de 2024.
- [49] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Mapa forestal de España (mfe) de máxima actualidad. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe.html>. Visto en junio de 2024.
- [50] V. Molchanov. Conditions for the spread of crown fires in pine forests. 1957.
- [51] NASA. Fire information for resource management system. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs;@-369.5,5.7,2.3z>. Visto en junio de 2024.
- [52] OECD. *Taming Wildfires in the Context of Climate Change*. 2023.
- [53] ONU. El aumento de los incendios descontrolados hace que la adopción de estrategias integradas para los bosques, el clima y la sostenibilidad sea más urgente que nunca. <https://www.un.org/es/cr/%C3%B3nica-onu/el-aumento-de-los-incendios-descontrolados-hace-que-la-adopci%C3%B3n-de-estrategias>. Visto en mayo de 2024.
- [54] Open Geospatial Consortium. Web coverage service (wcs). <https://www.ogc.org/standard/wcs/>. Visto en junio de 2024.
- [55] Open Wildland Fire Modeling Community. Wrf-fire. <https://wiki.openwfm.org/wiki/WRF-Fire>. Visto en junio de 2024.
- [56] OpenStreetMap (OSM). <https://www.openstreetmap.org/#map=17/37.05468/-3.33064&layers=P>. Visto en junio de 2024.
- [57] J. M. Pablos Marín. Métodos para la estimación de la producción de energía eólica. Master's thesis, Universidad de Salamanca, 2022.
- [58] E. Pastor, L. Zárate, E. Planas, and J. Arnaldos. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2):139–153, 2003.
- [59] J. G. Pausas and S. Fernández-Muñoz. Fire regime changes in the western mediterranean basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic change*, 110(1):215–226, 2012.
- [60] J. G. Pausas and J. E. Keeley. Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(7):387–395, 2021.
- [61] D. Prieto, M. I. Asensio, L. Ferragut, J. M. Cascón, and A. Morillo. A gis-based fire spread simulator integrating a simplified physical wildland fire model and a wind field model. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(11):2142–2163, 2017.

- [62] G. D. Richards. A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildland fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 5(2):63–72, 1995.
- [63] R. C. Rothermel. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*, volume 115. Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US ..., 1972.
- [64] L. Sherriff. Climate change is fuelling the us insurance problem. <https://www.bbc.com/future/article/20240311-why-climate-change-is-making-the-us-uninsurable>. Visto en mayo de 2024.
- [65] L. G. Silva, K. E. Doyle, D. Duffy, P. Humphries, A. Horta, and L. J. Baumgartner. Mortality events resulting from australia’s catastrophic fires threaten aquatic biota. *Global Change Biology*, 26(10):5345–5350, 2020.
- [66] S. Solomon, K. Stone, P. Yu, D. Murphy, D. Kinnison, A. Ravishankara, and P. Wang. Chlorine activation and enhanced ozone depletion induced by wildfire aerosol. *Nature*, 615(7951):259–264, 2023.
- [67] I. Spanos, P. Platis, I. Meliadis, and A. Tsiontis. A review on the ecology and management of the samaria gorge, a greek biosphere reserve. *Journal of Geography and Regional Planning*, 1(2):19, 2008.
- [68] A. L. Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4):369–386, 2009.
- [69] A. L. Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4):387–403, 2009.
- [70] Systems for Environmental Management (SEM). Modeling fire growth (technical documentation) - farsite. https://fire.org/downloads/farsite/WebHelp/technicalreferences/tech_modeling_fire_growth.htm. Visto en junio de 2024.
- [71] TREEADS. ID: 101036926 . A holistic fire management ecosystem for prevention, detection and restoration of environmental disasters. <https://cordis.europa.eu/project/id/101036926>. Visto en junio de 2024.
- [72] C. Vega-Garcia, B. Lee, P. Woodard, and S. Titus. Applying neural network technology to human-caused wildfire occurrence prediction. 1996.
- [73] J. Wieringa. Updating the davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41(1):357–368, 1992.
- [74] Z. Wu, B. Wang, M. Li, Y. Tian, Y. Quan, and J. Liu. Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence. *Ecological Indicators*, 136:108653, 2022.
- [75] Ángel Lanchas. El triángulo del fuego. <https://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>. Visto en Junio de 2024.