

Desarrollo del Motor de Cálculo de un Simulador de Incendios Forestales

Por: Lic. Ariel Torazza

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Junio , 2014

©IG - CONAE/UNC

© FaMAF - UNC

DIRECTOR

Dr Marcelo Scavuzzo

Instituto Mario Gulich. CONAE/UNC. Falda del Cañete, Córdoba, Argentina.

CO-DIRECTOR

Dr Elvio Pilotta

Facultad de Matemática, Astronomía y Física. UNC. Ciudad Universitaria, Córdoba,
Argentina.

Agradecimientos

A mis directores Marcelo Scavuzzo y Elvio Pilotta, por la inmensa confianza y apoyo que me han depositado todo este tiempo.

A la gente de Parque Nacional Quebrada del Condorito y a Germán Jaacks, por brindarse en plena predisposición a la colaboración.

A la gente del IMAA-CNR en Italia, por su colaboración.

Al apoyo de mi familia, a pesar de la distancia.

A mis hermanos del club, por seguirme hasta Córdoba luchando por una idea.

A mis compañeros de la maestría, por todo lo que nos tocó vivir y compartir aquí y en Italia.

A los amigos que hice en IG-CONAE, siempre dispuestos a darme una mano lo que dice mucho de un equipo de trabajo.

A Laura Zalazar, por el inmenso aguante y compañía en los momentos duros.

Dedicado a mi hijo Luciano.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FUNDAMENTOS	1
1.1.1. <i>La Combustión en un Incendio de Vegetación</i>	1
1.1.2. <i>Fases de la Combustión con Llama</i>	2
1.2. BALANCES FÍSICOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR	4
1.2.1. <i>Balances de Materia, Energía y Cantidad de Movimiento</i>	4
1.2.2. <i>Fundamentos de Transferencia de Calor</i>	8
1.3. MODELOS MATEMÁTICOS Y SISTEMAS DE CÁLCULO.....	12
1.3.1. <i>Modelos de Propagación de Incendios de Superficie</i>	15
1.3.2. <i>Sistemas de Cálculo de Incendios Forestales</i>	31
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	36
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
1.6. ESTRUCTURA DE LA TESIS	37
2. UTILIZACIÓN DEL SIMULADOR FARSITE	39
2.1. INTRODUCCIÓN	39
2.1.1 <i>Computación Científica</i>	39
2.1.2 <i>Simulación</i>	41
2.2. SIMULADOR FARSITE	45
2.2.1. <i>Introducción al software FARSITE</i>	45
2.2.2. <i>Simulación en un Escenario de Italia</i>	52
2.2.3. <i>Resultados</i>	61
2.2.4. <i>Mejoras en la Simulación</i>	62
2.2.5. <i>Propuesta para Barreras Cortafuego</i>	67
3. MOTOR DE CÁLCULO CON AUTÓMATA CELULAR	69
3.1. INTRODUCCIÓN	69
3.1.1. <i>Historia</i>	69
3.1.2. <i>Introducción de los AC</i>	72
3.1.3. <i>Autómatas Celulares Unidimensionales</i>	73
3.1.4. <i>Autómatas Celulares Bidimensionales</i>	74
3.1.5. <i>Aplicaciones de los Autómatas Celulares</i>	77
3.2. SIMULADOR DE INCENDIOS DE VEGETACIÓN Y METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROPAGADOR EMPÍRICO	85
3.2.1. <i>Ventajas de los AC en Simuladores de Incendios Vegetales</i>	85
3.2.2. <i>Reglas del AC usado en Estela 1.00</i>	86
3.2.3. <i>La Grilla</i>	86
3.2.4. <i>Cambio de Estados del AC de Estela 1.00</i>	87
3.2.5. <i>La Condición Inicial del AC</i>	89
3.2.6. <i>Vecindad de Moore Modificada Estocásticamente</i>	90
3.2.7. <i>Propuesta de Modelo Propagador</i>	91
3.2.8. <i>Cálculo de la Velocidad del Frente de Fuego sin Atenuaciones en la Dirección de Máxima Propagación</i>	97
3.2.9. <i>Implementación</i>	100
3.2.10. <i>Estela 1.00</i>	100

3.2.11. Resultados	104
4. MOTOR DE CÁLCULO CON PROPAGADOR ELÍPTICO	113
4.1. INTRODUCCIÓN	113
4.1.1. Morfología del Incendio	114
4.1.2. Características Físicas de un Frente de Incendio	115
4.1.3. Características Geométricas del Frente de Incendio.....	117
4.1.4. Principios de la Modelización de la Progresión de un Incendio.....	122
4.2. PROPAGADOR ELÍPTICO	129
4.2.1. Implementación del Modelo Semiempírico de Rothermel (1972)	130
4.2.2. Modelos de Combustibles	130
4.2.3. Generación de las Elipses	132
4.2.4. Generación de los Polígonos	138
4.2.5 Método Propuesto para el Cálculo de Áreas	141
4.2.6. Problemas Numéricos.....	143
4.2.7. Obtención de la Pendiente y la Orientación del Terreno.....	147
4.2.8. Implementación	149
4.2.9. Elípticos 1.00	151
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	153
4.3.1. Construcción de las Elipses.....	154
4.3.2 Construcción de los Polígonos de Fuego.....	156
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	163
5.1. CONCLUSIONES.....	163
5.1.1. Utilización de FARSITE en el Sur de Italia.....	163
5.1.2. Modelos Matemáticos y Sistemas de Cálculo.....	163
5.1.3. Simulación con Autómatas Celulares	164
5.1.4. Simulación con Propagadores Elípticos Ondulares.....	165
5.1.5. Comparaciones Autómata Celular vs Elíptico Ondular	165
5.2. PROPUESTAS A FUTURO.....	166
5.2.1. Utilización de FARSITE en el Sur de Italia.....	166
5.2.2. Modelos Matemáticos y Sistemas de Cálculo.....	166
5.2.3. Simulación con Autómatas Celulares	167
5.2.4. Simulación con Propagadores Elípticos Ondulares.....	167
5.2.5. Construcción de un Simulador de Fuego para el Territorio Argentino	168
BIBLIOGRAFÍA.....	171
Trabajos.....	171
Sitios	176
ANEXO.....	177
Anexo 1	177
Anexo 2	178
Anexo 3	180
Anexo 4	182
Anexo 5	184
Anexo 6	186
Anexo 7	190
Anexo 8.....	191
Anexo 9.....	194
Anexo 10	195

RESUMEN

El trabajo comienza en el sur de Italia cuando se realizan las primeras experiencias con el simulador de incendios de vegetación *FARSITE*. Un simulador empleado en varios lugares del mundo por la adaptabilidad de su motor de cálculo que se basa en principios semi empíricos, o dicho de otra manera, semi físicos propuesto por *Rothermel (1972)* y la utilización de propagadores elípticos que agilizan el cálculo en el modelo de propagación del perímetro de fuego sobre un mapa del territorio. En el instituto *IMA* del *CNR* de *Potenza Italia* se realizaron pruebas de simulación bajo distintos escenarios que sirvieron de práctica en el tema de las simulaciones y pusieron en evidencia los requerimientos para conseguirlos. En vista a estos requerimientos se propuso estudiar los modelos propagadores del efecto de fuego con el fin de desarrollar un algoritmo, que consiste, en un *motor de cálculo* de un simulador para emplearlo en un software en el *IG-CONAE*. En este trabajo se abarcan dos temáticas en el concepto de propagadores del efecto del fuego lo que lleva al desarrollo de dos motores de cálculo. Cada uno de estos desarrollos involucra conceptos constructivos distintos. Uno de ellos acude a los modelos matemáticos de *autómatas celulares* y el otro a *propagadores elípticos ondulares* basados en el principio físico de Huygens de la generación de ondas. Se tratan las ventajas y desventajas de ambos métodos haciendo distintas sugerencias en cada caso para su utilización en el territorio nacional, se muestran algunos ejemplos de su utilización y se establecen propuestas para su implementación en trabajos futuros.

ABSTRACT

This work begins in southern Italy when the first experiments are performed using the vegetation fires simulator *FARSITE*. This simulator has been used in several places around the world due to the adaptability of its numerical algorithm, which is based on the semi-empirical (or semi-physical) principles proposed by *Rothermel (1972)* and it uses elliptical propagators to model the fire perimeter propagation on a map of the territory. Simulation tests under different scenarios were carried out in the *IMA-CNR* Institute of *Potenza (Italy)*, which allowed us to clearly understand the forest fire simulation models as well as all the necessary requirements for the simulator. In view of these requirements it is proposed to study the fire propagation models in order to develop a software to be used at *IG-CONAE*. In this work were considered two different methods for fire propagation models, and so, were developed the corresponding implementations. Each development involves different constructive ideas. The first one is based on mathematical models of cellular automata and the other one to elliptical-wave propagators based on the physical principle of Huygens wave generation. The advantages and drawbacks of both methods were discussed, with different suggestions in each case for its use. Finally, some examples of their use are shown, and proposals for their implementation in future work are presented.

CAPÍTULO 1

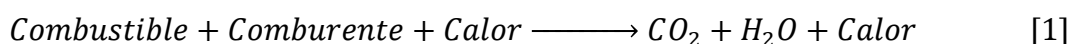
1. INTRODUCCIÓN

Además de las consideraciones prácticas, los incendios forestales (o mejor llamados incendios de vegetación) siguen presentando problemas académicos interesantes y desafiantes (Pyne *et al.*, 1996). Aunque la combustión obedece a los principios generales de la física y la química, el estudio de los incendios de vegetación no es una ciencia exacta. Han habido importantes avances en la ciencia de los incendios de vegetación. El fenómeno de incendio en el entorno de la vegetación, sin embargo, no ha sido y puede que nunca se explique al nivel de los primeros principios. Todavía hay mucho por aprender y hay otros tipos de combustión que se entienden mejor. Cuando el combustible gaseoso se mide en un quemador, por ejemplo, no hay ninguna dificultad en la descripción de las propiedades termoquímicas del mismo ya que está bajo el control del experimentador. Cuando el fuego quema a través de combustibles de vegetación, el proceso se ve afectado por una multitud de factores que incluyen turbulencia y falta de uniformidad. La variabilidad incluso existe en un experimento de laboratorio bien controlado. En la escala de la quema de una rama, hay complejidades, debido a la disposición molecular y componentes químicos en la madera y la corteza. La combustión es un tema complejo que involucra la química, la física y la mecánica de fluidos.

1.1. FUNDAMENTOS

1.1.1. La Combustión en un Incendio de Vegetación

El resultado de una reacción es la formación de nuevas sustancias (productos). Si la reacción de combustión es completa los productos que se obtienen son, principalmente, dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) como se ve en la reacción de combustión de Ecuación [1]



Toda la vegetación es combustible y, además, está permanentemente en contacto con el aire (que es el comburente). De este modo, sólo es necesario el aporte de una determinada cantidad de calor para que se inicie la combustión. Otra característica de la reacción de combustión es que puede producirse con la presencia o no de llama.

1.1.1.1. Combustión con Llama

Las llamas son una mezcla de gases en combustión y partículas incandescentes (ceniza). Parte del calor liberado durante la reacción de combustión se emite en

forma de radiación de longitud de onda en la franja del visible, dando la luz y coloración que se observa en las llamas.

La combustión con llama no se produce directamente en la materia sólida, sino que requiere un proceso previo de descomposición de ésta en compuestos gaseosos, que son los que realmente reaccionan con el oxígeno.

Las llamas típicas de los incendios de vegetación son turbulentas y reciben el nombre de llamas de difusión, ya que los gases combustibles se producen en la zona en que éstos se mezclan.

Aunque los gases combustibles que provienen de la descomposición de la madera pueden aparecer a partir de los 200°C, no quemarán, por mucho que estén mezclados con el aire, si la temperatura de la mezcla no se sitúa entre 425 y 480°C (Pyne *et al.*, 1996). Si alcanza estas temperaturas se inicia la combustión. La temperatura de la llama generada en la combustión de un incendio de vegetación se sitúa entre los 700 y 980°C. En grandes incendios se han llegado a registrar temperaturas de la llama de hasta 1.650°C, aunque no es lo más habitual. Las temperaturas máximas que pueden alcanzar las llamas en combustibles de vegetación (medidas en laboratorios en condiciones ideales) se sitúa alrededor de los 2.000°C. En cualquier caso, la temperatura de la llama suele ser suficiente para continuar manteniendo la combustión mientras se vayan generando gases.

1.1.1.2. Combustión sin llama, Lenta

Se trata de una combustión que no produce llama, y se desarrolla lentamente y a baja temperatura. Sólo los materiales porosos (facilitan la entrada de aire) que forman carbono sólido cuando se calientan pueden producir este tipo de combustión. Entre ellos se encuentran los materiales de origen vegetal, incluidos los combustibles forestales. Un ejemplo típico de combustión lenta es el que se produce en un cigarrillo.

1.1.1.3. Combustión sin llama, Incandescente

La combustión incandescente está asociada a la oxidación superficial del carbón. La única diferencia respecto a la combustión lenta del apartado anterior es que aquí no hay descomposición térmica del combustible. En este tipo de combustión los volátiles han desaparecido antes que se produzca la combustión. Normalmente, después de la combustión con llama queda un residuo rico en carbono y sin volátiles que continuará quemando lentamente aunque la llama haya desaparecido. Un ejemplo de este tipo de combustión es el que tiene lugar con el carbono vegetal utilizado en los asados.

1.1.2. Fases de la Combustión con Llama

La fase de combustión corresponde al estado estacionario en el que se produce la reacción de combustión de forma continua, consumiéndose combustible y

INTRODUCCIÓN

comburente. La fase de extinción marca el final del proceso de combustión. La extinción se produce por la limitación de alguno de los componentes indispensables para producir la reacción de combustión, normalmente del combustible o del comburente.

De las tres fases, la primera (ignición) suele ser la más compleja, sobre todo en función del estado del combustible. Cuando el combustible está en fase gaseosa, el proceso de ignición implica la adición de una cantidad de energía suficiente para activar la reacción de combustión. Es lo que se conoce como energía mínima de ignición (MIE), que depende de la mezcla gaseosa, de la concentración, la presión y la temperatura. Esta energía suele estar alrededor de los 0.25mJ, muy pequeña si se compara con la energía de las fuentes de ignición (por ejemplo, la chispa de un enchufe tiene 25mJ, 100 veces superior a la MIE).

Cuando el combustible es un líquido, la reacción de combustión se produce entre gases, antes de iniciar la reacción es necesario evaporar parcialmente el combustible. De este modo, aparte de la energía mínima de ignición se requiere un aporte adicional de energía. Una vez iniciada la reacción de combustión, el calor liberado por ésta suele ser suficiente para continuar evaporando el combustible.

Cuando el combustible es un sólido, igual que en el caso de los líquidos, antes que se pueda producir la combustión tiene que evaporarse el agua del sólido (ver Figura 1.1). Como a menudo los combustibles sólidos absorben humedad del ambiente, durante el proceso de ignición, el primer calor aportado se invierte en la evaporación del agua (deshidratación) que se produce alrededor de los 100°C (también puede producirse la evaporación de compuestos volátiles con presiones de vapor superiores a la del agua). Una vez evaporada el agua, la temperatura del sólido continúa aumentando a medida que se aporta más calor. Esto permite evaporar los compuestos más volátiles del sólido y a la vez descomponer las moléculas grandes en moléculas más pequeñas y más fácilmente evaporables (proceso que recibe el nombre de pirólisis). Una vez formada la mezcla adecuada de combustible gaseoso y aire, podrá inflamarse esta mezcla y así iniciarse la reacción de combustión en caso que continúe el aporte de calor. Si el calor liberado por esta reacción es suficiente para mantener la evaporación del combustible, la combustión se mantendrá. En caso contrario se producirá la extinción. Aunque se ha descrito el proceso en etapas separadas que parece que se produzcan de manera sucesiva, en la realidad, una vez iniciada la combustión en la superficie del sólido, se tendrán que ir deshidratando las capas más internas, pirolizándose e inflamándose sucesivamente a medida que se penetra en el combustible.

Algunos autores (Pyne *et al.*, 1996) dividen el proceso de combustión en cuatro fases en vez de tres: pre ignición, ignición, combustión y extinción. La fase de pre ignición corresponde al proceso de vaporización del combustible (deshidratación y pirólisis) y la ignición hace referencia únicamente al proceso de inflamación o activación de la reacción de combustión. Las dos posteriores no varían. Sin embargo en combustibles gaseosos no existe la fase de pre ignición. Parece pues que la primera división describe de una manera más genérica el proceso, siendo válida para cualquier tipo de combustible.



Figura 1.1. Proceso de combustión de un combustible sólido.

1.2. BALANCES FÍSICOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR

1.2.1. Balances de Materia, Energía y Cantidad de Movimiento

Las leyes fundamentales de la Termodinámica —leyes de la conservación o balance— se aplican siempre a sistemas de volúmenes de control. La ley de conservación o balance es un concepto fundamental tanto en el análisis de la transferencia de calor y materia como en el análisis de la mecánica de fluidos. La ley de conservación o primera ley de la Termodinámica dice que la materia y la energía, tanto calorífica como mecánica, no se crean ni se destruyen, sino que se transforman (Figura 1.2).

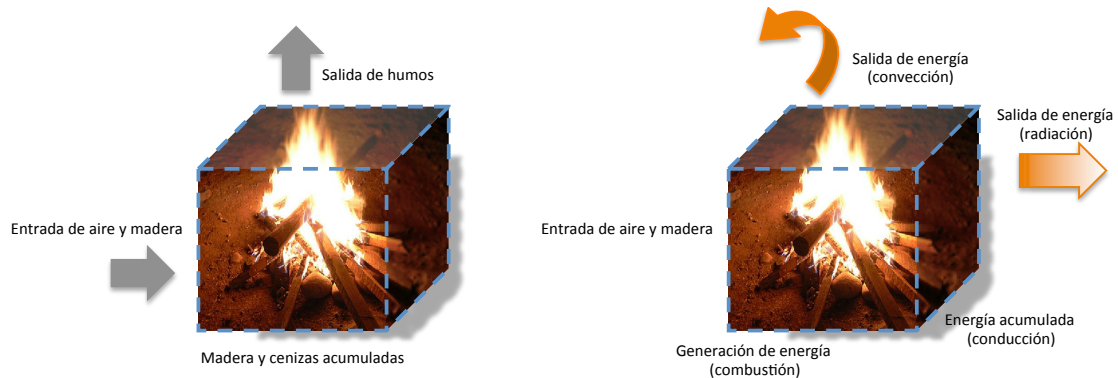


Figura 1.2. Balances de materia y energía. En términos de balance de materia, aquí se puede distinguir que $Entrada + Generación = Salida + Acumulación$ (izq.); en términos de balance de energía (der.).

Se entiende por energía de convección (energía transmitida por el mecanismo de convección) la energía absorbida por un fluido en un punto caliente del sistema y transportada, por el movimiento de éste, a otro punto más frío cediendo dicha energía. Se entiende por energía radiante (energía transmitida por el mecanismo de radiación) la energía que se propaga en forma de ondas electromagnéticas. Se entiende por energía de conducción (energía transmitida por el mecanismo de conducción) la energía que se transmite desde las moléculas del medio, más próximas al fuego, hacia las moléculas adyacentes con menos energía. Por otro lado, un balance de cantidad de movimiento no es más que un balance de fuerzas sobre un fluido en movimiento.

INTRODUCCIÓN

Ecuación generalizada del balance diferencial

La ecuación más completa, en la que se tiene en cuenta todos los aportes (materia, energía o cantidad de movimiento), adopta la misma forma. Por tanto, si se aplica la asignación de variables que se muestra en la Tabla 1.1, la ecuación del balance diferencial puede generalizarse del modo siguiente (ver Ecuación 1.1):

Tabla 1.1
Generalización del balance diferencial.

Balance	Concentración de propiedad	Flujo de propiedad	Generación de propiedad
Materia	ρ_A	J_A	$\dot{\rho}_A$
Energía	$\rho C_p T$	q	\dot{Q}
Cantidad de movimiento	ρu	τ	\dot{M}
General	φ	ψ	φ_A

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = [\nabla \cdot (\varphi \mathbf{u})] + \nabla \cdot \Psi + \varphi_G \quad [1.1]$$

$$\text{ACUMULACIÓN} = \text{ENTRADAS-SALIDAS (CONVECCIÓN)} + \text{ENTRADAS-SALIDAS (OTROS FLUJOS: MOLECULAR, RADIACIÓN, ETC.)} + \text{GENERACIÓN}$$

Los parámetros M y τ correspondientes, respectivamente, a la generación y transporte molecular (rozamiento) de la cantidad de movimiento, tienen las siguientes expresiones matemáticas:

$$M = -\nabla \cdot P + \rho \cdot g \quad [1.2]$$

$$\tau_{yx} = -\nu \cdot \frac{\partial(\rho \cdot u_x)}{\partial y} \quad [1.3]$$

donde

τ_{yx} Tensión en la dirección y , provocada por el movimiento del fluido en la dirección x (N/m²).

ν Viscosidad cinemática del fluido (m²/s).

La ecuación que define τ recibe el nombre de primera ley de Newton, y permite determinar las fuerzas de rozamiento en un fluido en movimiento.

Para poder integrar un balance diferencial de cualquiera de las propiedades anteriores (materia, energía y cantidad de movimiento), y así obtener tanto información concreta del sistema donde se realiza el balance con información de tipo más general —por ejemplo, un modelo que permita determinar la distribución de las temperaturas en un medio—, es preciso conocer las condiciones iniciales y de contorno específicas del sistema a estudiar.

Ecuación generalizada del balance integral

Cuando el balance de una propiedad se realiza sobre un volumen de control finito, V , es decir, de medidas conocidas (x, y, z) —como, por ejemplo, el volumen de la hoguera (Figura 1.2)—, la Ecuación 1.1 adopta la siguiente forma:

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial t} dV = \oint_S (\varphi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) + \oint_S (\Psi \cdot d\mathbf{S}) + \int_V \varphi_G dV \quad [1.4]$$

La Ecuación 1.4 es la integración de la ecuación del balance diferencial para cualquier situación (Ecuación 1.1), donde:

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial t} dV \quad \text{Acumulación.}$$

$$\oint_S (\varphi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) \quad \text{Entradas – salidas (convección).}$$

$$\oint_S (\Psi \cdot d\mathbf{S}) \quad \text{Entradas – salidas (otros flujos: molecular, radiación, etc...).}$$

$$\int_V \varphi_G dV \quad \text{Generación.}$$

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad de materia total se puede determinar a partir de la Ecuación 1.4; teniendo en cuenta que $\varphi = \rho$, todos los flujos (convectivo o moleculares) se engloban en el flujo neto total y no hay término de generación ($\varphi_G = 0$). Así, la ecuación anterior resulta:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \oint_S (\rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) \quad [1.5]$$

expresión que puede escribirse como:

$$V \frac{d\rho}{dt} = \rho_1 \bar{u}_1 S_1 - \rho_2 \bar{u}_2 S_2 \quad [1.6]$$

donde,

S_1, S_2 Superficies finitas de entrada y salida del volumen de control (m^2).

\bar{u}_1, \bar{u}_2 Velocidades medianas globales de las entradas y salidas del volumen de control (m/s).

Ecuación de continuidad de un componente A

De la misma manera que con la ecuación de continuidad se halla la ecuación de continuidad de un componente A donde aparece un término relacionado a las

INTRODUCCIÓN

reacciones químicas. Cuando se produce una reacción química en el proceso a estudiar, el término R_A corresponde al flujo debido a la generación (o desaparición) de A.

$$V \frac{d\rho_A}{dt} = \rho_{A1} \bar{u}_1 S_1 - \rho_{A2} \bar{u}_2 S_2 + R_A V \quad [1.7]$$

Ecuación de energía calorífica

Aquí reescribimos la Ecuación 1.4 de la siguiente manera:

$$\int_V \frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} dV = \oint_S ((\rho C_P T) \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}) + \oint_S (q dS) + \int_V \dot{Q} dV \quad [1.8]$$

donde:

$\int_V \frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} dV$	Acumulación.
$\oint_S ((\rho C_P T) \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S})$	Entradas – salidas (convección).
$\oint_S (q dS)$	Entradas – salidas (otros flujos: conducción, radiación).
$\int_V \dot{Q} dV$	Generación.

Empleando el mismo razonamiento que en las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$\bar{\rho} \bar{C}_P V \frac{dT}{dt} = \rho_1 \bar{C}_P T_1 \bar{u}_1 S_1 - \rho_2 \bar{C}_P T_2 \bar{u}_2 S_2 + \bar{q}_1 S_1 - \bar{q}_2 S_2 + Q_G V \quad [1.9]$$

donde,

- $\bar{\rho}$ Valor medio de la concentración de materia entre la entrada y la salida del volumen de control (kg/m^3).
- \bar{C}_P Valor medio del calor específico entre la entrada y la salida del volumen de control ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).
- \bar{q} Entrada y salida de energía por otros flujos (conducción, radiación) (W/m^2).
- Q_G Calor de generación (W/m^3).

Ecuación de cantidad de movimiento

La ecuación de movimiento se plantea casi siempre en un estado estacionario, por tanto, casi nunca aparece el término acumulación, y menos en la ecuación integrada. Siguiendo el mismo razonamiento empleado en las ecuaciones anteriores, en un volumen de control finito, dicha ecuación adopta la siguiente expresión:

$$P_1 - P_2 + \rho g (z_1 - z_2) + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\bar{u}_1^2}{\alpha_1} - \frac{\bar{u}_2^2}{\alpha_2} \right) + F_f = 0 \quad [1.10]$$

donde,

- P Presión del fluido (N/m²).
- ρ Densidad del fluido; este parámetro puede ser constante, o bien un valor medio entre la entrada y la salida del volumen de control (kg/m³).
- α Factor de corrección de la energía cinética, generalmente puede considerarse igual a 1.
- F_f Pérdida de carga por rozamiento (N/m²).

Si se considera $\alpha = 1$, y que el rozamiento es despreciable ($F_f = 0$), la Ecuación 1.10 se convierte en la *ecuación de Bernoulli*

$$P_1 - P_2 + \rho g (z_1 - z_2) + \frac{1}{2} \rho (\bar{u}_1^2 - \bar{u}_2^2) = 0 \quad [1.11]$$

Estas ecuaciones del balance integral de cantidad de movimiento son válidas siempre que el flujo atraviese en su recorrido la misma superficie, es decir, $S_1 = S_2$, y que la densidad del flujo en dicho recorrido sea igual o varíe poco. En el caso de que $S_1 \neq S_2$ que la densidad de flujo tenga una variación importante y se considere negligible el rozamiento, el balance de cantidad de movimiento se debe plantear de la siguiente forma:

$$P_1 S_1 - P_2 S_2 + \rho_1 g z_1 S_1 - \rho_2 g z_2 S_2 + \rho_1 \bar{u}_1^2 S_1 - \rho_2 \bar{u}_2^2 S_2 \quad [1.12]$$

1.2.2. Fundamentos de Transferencia de Calor

La transferencia de calor es característica de cualquier incendio. El tipo y la cantidad de calor transportados influyen en la velocidad de propagación del incendio, y la combustión no puede mantenerse sin un aporte continuo de calor.

La transferencia de calor se efectúa mediante tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación. Estos tres mecanismos se producen simultáneamente durante el incendio, pero la importancia de cada uno de ellos

INTRODUCCIÓN

varía en función de la intensidad y magnitud del incendio, y de la configuración del sistema que lo rodea.

Conducción

La conducción consiste en la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia o medio, debido a la interacción entre ellas.

Cuando un combustible arde, la conducción —al contrario de la convección y la radiación, que prácticamente transportan la energía desde la superficie del combustible— puede considerarse como un mecanismo de transporte de calor hacia el interior de los componentes del combustible. Así, cuando un bosque se quema, se puede considerar el propio bosque como un medio conductor, propagándose una parte del calor por conducción hacia otras partes del combustible más frías (troncos y ramas).

En los incendios forestales, el aporte de calor al medio combustible (bosque) mediante el mecanismo de conducción puede considerarse prácticamente nulo. No obstante, la veracidad de esta afirmación depende de la carga de combustible, por dos razones: la primera es que, al tener la madera una elevada capacidad calorífica, cuanta más masa tenga más calor transmitido se necesitará para iniciar su proceso de combustión, y la segunda es que la madera es un mal conductor del calor, por tanto, la transmisión por conducción es lenta, especialmente cuando su grosor es considerable. Por ambos motivos, cuando un bosque formado por grandes masas de troncos y hojas se quema, el proceso de conducción de calor es mucho más lento que cualquiera de los otros dos mecanismos: convección y radiación. Sin embargo, cuando en el bosque hay material combustible de baja carga, como pequeñas ramas y residuos húmedos de la descomposición de hojas y madera, la transmisión de calor al medio por conducción es mucho más rápida y, por tanto, mucho más importante, por lo que no se puede obviar.

Por otra parte, la conducción es la causa de que, una vez pasado el frente de incendio, sigan quemando los troncos, ramas y otros materiales combustibles que han iniciado el proceso de combustión, ya que el calor va penetrando en su interior gracias al mecanismo de conducción; por tanto, es responsable de los fuegos residuales que pueden llegar a reactivar el incendio. Además, la conducción en fase gaseosa es la causante de la transferencia de calor por convección entre los gases de combustión y el combustible sólido, ya que éste es el mecanismo que, a priori, produce los cambios en el interior de la fase gaseosa, por difusión térmica combinada con el movimiento provocado por los cambios de temperatura dentro del gas.

Convección

Gran parte del calor generado en los incendios se transmite por convección. Esta forma de transferencia de calor se compone de dos mecanismos: el de difusión,

debido al movimiento molecular aleatorio (conducción), y el que transfiere energía mediante el movimiento global o macroscópico del fluido. El movimiento macroscópico del fluido se asocia al hecho de que, en cualquier instante, grandes cantidades de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Este movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas mantienen su movimiento aleatorio en el agregado, la transferencia total de calor estará formada por la superposición de dos transportes de energía: por difusión y por el movimiento global del fluido.

El mecanismo de convección adquiere gran importancia cuando se transfiere energía entre un fluido en movimiento y una superficie sólida limítrofe, que tiene distintas temperaturas. La transferencia de calor por convección se clasifica en función del tipo de flujo. Se denomina convección forzada cuando el flujo de fluido es debido a medios externos; por ejemplo, en un incendio, sería la convección provocada por la velocidad del viento. Se dice que la convección es libre o natural cuando el flujo del fluido es inducido por fuerzas de empuje, que aparecen por las diferencias de densidad originadas por las variaciones de temperatura en el fluido; en un incendio, este movimiento sería provocado por la diferencia de temperaturas entre los humos más calientes procedentes del incendio y el aire ambiente, o bien, entre el aire más cercano a las llamas y, por tanto, más caliente, y el aire más alejado, que está más frío. De lo anterior se deduce que, en un incendio, la convección casi siempre será una combinación de ambas, forzada y natural, aunque en algunas situaciones extremas puede predominar una sobre otra, por ejemplo, con poco viento, la convección predominante será la natural, mientras que en una situación de mucho viento la convección predominante será la forzada.

La importancia del mecanismo de convección en un incendio de vegetación se debe precisamente al modo en que actúa este proceso sobre las superficies de contacto. El aire, calentado por contacto con la superficie del frente de llama y los humos de la combustión, conforma una masa de fluido caliente que sale de la superficie del incendio a una cierta velocidad, que dependerá del viento en la zona y la intensidad del incendio, hacia otras partes del bosque donde estará en contacto con otras superficies, como hojas y troncos, que se calentarán, pudiendo alcanzar incluso su temperatura de inflamación. El movimiento ascendente de grandes masas de fluido caliente, provenientes de un gran incendio forestal, es la causa de que se produzca lo que se conoce como llamarada explosiva.

Radiación

En un incendio, la radiación es el mecanismo que transmite, junto con la convección, la mayor parte de la energía calorífica. Al igual que la convección, el mecanismo de radiación calienta el combustible tiempo antes de que el fuego llegue; algunos autores (Rothermel y Anderson, 1966; Van Wagner, 1968) consideran que este mecanismo es el responsable máximo del precalentamiento de los combustibles, durante el avance del frente de llama en un incendio de vegetación.

INTRODUCCIÓN

Se define como radiación térmica la energía emitida por la materia que se encuentra a temperatura finita. La radiación puede provenir tanto de sólidos como de líquidos y gases. De hecho, las llamas de un incendio son una mezcla de gases (CO_2 , CO , H_2O) y cenizas incandescentes. La causa de la radiación puede atribuirse a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constituyentes de la materia, sin que importe la forma de la misma. La energía radiante es transportada por ondas electromagnéticas (alternativamente por fotones), cuya longitud de onda se sitúa en el intervalo que va desde la radiación ultravioleta hasta las microondas, pasando por todo el espectro visible y los infrarrojos. Por tanto, mientras que la conducción y convección necesitan un medio para transmitirse, la radiación no lo requiere. Es más, la transferencia de energía por radiación más eficaz es la que se produce en el vacío. Además, la energía radiante se transmite siempre en línea recta.

El poder emisor, E_b , de un cuerpo radiante o emisor perfecto, es decir, de un cuerpo negro, se determina mediante la ley de *Stefan-Boltzmann*:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad [1.13]$$

donde,

$$\begin{array}{ll} \sigma & \text{Constante de Stefan-Boltzmann } (5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}). \\ T_s & \text{Temperatura de la superficie radiante (K)}. \end{array}$$

Como puede verse, según esta ley, el calor transmitido por radiación es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura, mientras que el calor transmitido por conducción o convección es sólo directamente proporcional a la temperatura.

En realidad, las superficies emisoras no se comportan como un cuerpo negro y emiten siempre con un poder emisor menor, asociándose este poder emisor con el que emitiría un cuerpo gris a la misma temperatura que el emisor perfecto o cuerpo negro:

$$E_b = \sigma \varepsilon T_s^4 \quad [1.14]$$

donde, ε es la emisividad comprendida en el intervalo (0, 1). Este parámetro es una propiedad característica de la superficie emisora, y proporciona una medida de la eficacia con que una superficie emite energía radiante en relación con un cuerpo negro. La emisividad de las superficies sólidas tiene valores de 0.8 ± 0.2 , mientras que la de las llamas depende del grosor de éstas. En una llama, mezcla de gases y partículas incandescentes, como ya se ha mencionado, la emisividad combinada de dichos productos es difícil de determinar, ya que es función de las concentraciones de sus componentes y del recorrido que efectúan dentro del fuego. La emisividad de una llama se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\kappa S_f} \quad [1.15]$$

donde,

κ	Coefficiente de extinción (m^{-1}).
S_f	Grosor de la llama (m).

El coeficiente de extinción es una propiedad característica de cada llama, y representa la cantidad de energía que se absorbe y se dispersa cuando la radiación atraviesa un medio determinado. A menudo no se tiene en cuenta los efectos de dispersión y, en ese caso, el coeficiente de extinción recibe el nombre de coeficiente de absorción; en llamas turbulentas, este coeficiente se sitúa entre 0.1 y 1 m^{-1} . Este parámetro explica el hecho de que los grandes incendios, cuya gran producción de humo absorbe mucha radiación, emitan menos flujo de energía radiante hacia el entorno que los incendios pequeños con llamas más limpias.

Cuando la radiación emitida por un cuerpo incide sobre una superficie del medio, dicho medio puede absorber todo o parte del calor transmitido por radiación, aumentando su energía térmica. Un medio que absorbe esta energía y refleja parte de ella se denomina *opaco*, mientras que un medio que transmite parte de la energía se denomina *semitransparente*. Un medio opaco, como un grupo de árboles o una pared, actuará como pantalla ante el flujo emitido por radiación y, por tanto, las superficies o medios que se encuentren detrás, en la dirección del flujo de calor, recibirán menos o ninguna energía radiante. Un medio semitransparente, por ejemplo un cristal, en función de sus características, transmitirá parte o gran parte de la energía radiante hacia las superficies o medios situados detrás en la dirección del flujo de energía, e incluso, como es sabido, hay cristales capaces de concentrar los rayos de energía radiante sobre un punto determinado.

1.3. MODELOS MATEMÁTICOS Y SISTEMAS DE CÁLCULO¹

La matemática es el lenguaje básico de la física y de sus aplicaciones en todas las disciplinas de ingeniería. En este sentido, son ejemplo de ello las ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos y transferencia de calor, enunciadas a principios del siglo XX. En el estudio de la dinámica de los incendios es clave la modelización matemática, ya que contribuye a entender mejor la realidad física, ayuda a descubrir estructuras organizadas y nuevos comportamientos en los sistemas, y permite el desarrollo de herramientas de cálculo como soporte en la toma de decisiones en materia de prevención y extinción.

La modelización matemática de los incendios forestales

Los modelos matemáticos de incendios forestales (ver Figura 1.3) son, genéricamente, un conjunto más o menos amplio de ecuaciones —planteadas a partir de balances teóricos o de observaciones experimentales, o por ambos medios—, cuya solución proporciona la evolución temporal y/o espacial de una o diversas variables, como, por ejemplo, la velocidad de propagación, la intensidad lineal del

¹ Ver textos tomados de Arnaldos *et al.*, 2003.

² Percolación. Se refiere al paso lento de fluidos a través de los materiales porosos, ejemplos de este proceso es

INTRODUCCIÓN

frente o el consumo de combustible, a fin de determinar el comportamiento físico de un sistema determinado. De acuerdo con esta definición, se propone una clasificación genérica que engloba y permite ubicar cualquier tipología de modelo matemático que se refiera a incendios forestales:

Pasos secuenciales de la modelización matemática

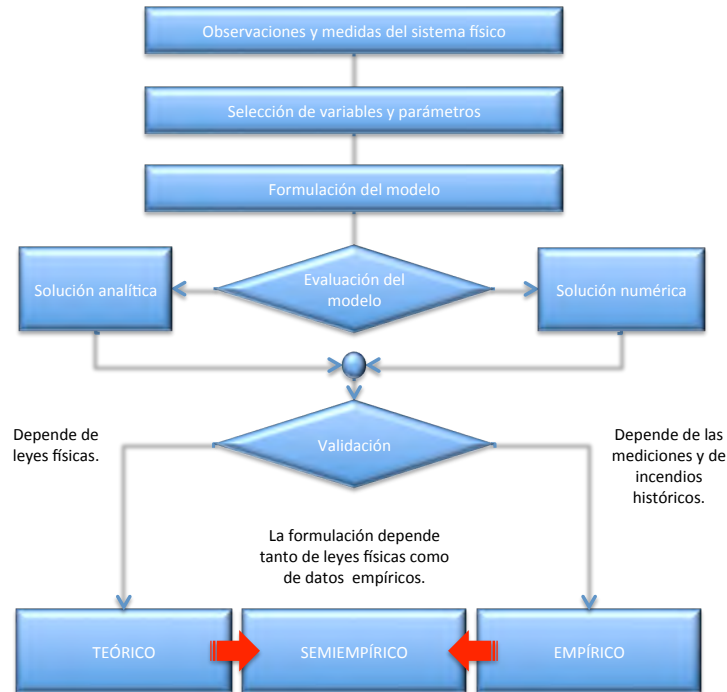


Figura 1.3. Pasos secuenciales de la modelización matemática.

Según la naturaleza de las ecuaciones:

- *Modelos teóricos.* Generados a partir de las leyes que gobiernan la mecánica de fluidos y la transferencia de calor.
- *Modelos empíricos.* Generados a partir de ecuaciones extraídas de la experimentación o del estudio de incendios históricos.
- *Modelos semiempíricos.* Generados a partir de leyes físicas y completados con datos experimentales.

Según las variables de estudio:

- *Modelos de geometría de las llamas.* Se formulan ecuaciones para determinar la altura, anchura, longitud, ángulo de inclinación y tiempo de residencia.
- *Modelos de propagación de incendios.* Proporcionan los mecanismos para la obtención de las principales variables que determinan el avance del frente

de incendio. La mayoría de los modelos más completos tratan las más importantes, como la velocidad de propagación, el calor desprendido en el frente y el consumo de combustible.

- *Modelos de predicción meteorológica de inicio y comportamiento de los incendios forestales.* A partir de datos meteorológicos y paisajísticos, evalúan la posibilidad de ocurrencia de incendio y su peligrosidad en un territorio determinado. La mayoría presentan los resultados en forma de índices cualitativos, siendo los más significativos los de riesgo de ignición, de propagación y de intensidad de incendio.

Según el sistema físico modelizado:

- *Modelos de incendios de suelo.* El sistema físico está conformado por el estrato inferior de la vegetación, es decir, por la materia orgánica situada entre la superficie y la capa mineral del suelo.
- *Modelos de incendios de superficie.* El sistema físico está conformado por el combustible superficial disponible, situado inmediatamente encima de la superficie del suelo y delimitado superiormente por las copas de los árboles.
- *Modelos de incendios de copas.* El sistema físico está conformado por los estratos superficial y aéreo de la vegetación. Asociados a esta tipología de modelos, se han desarrollado procedimientos matemáticos para el estudio de la formación de focos secundarios, dada la importancia de este fenómeno en el desarrollo de grandes incendios. Sin embargo, pueden ser considerados como una categoría diferenciada.

Herramienta de soporte para la toma de decisiones

La difusión de la modelización matemática de incendios y el desarrollo de sistemas informáticos y nuevas tecnologías ha propiciado la aparición de diversas herramientas de cálculo, con el objetivo de proporcionar información valiosa que sirva de ayuda para la planificación de los trabajos en materia de prevención y extinción.

A pesar de que su empleo no está aún normalizado, la conjunción de los diversos modelos y la implementación de herramientas informáticas que facilitan el cálculo proporcionan un buen mecanismo para la planificación y la gestión forestal. En la Figura 1.4 se representa esquemáticamente la interacción de estos elementos.

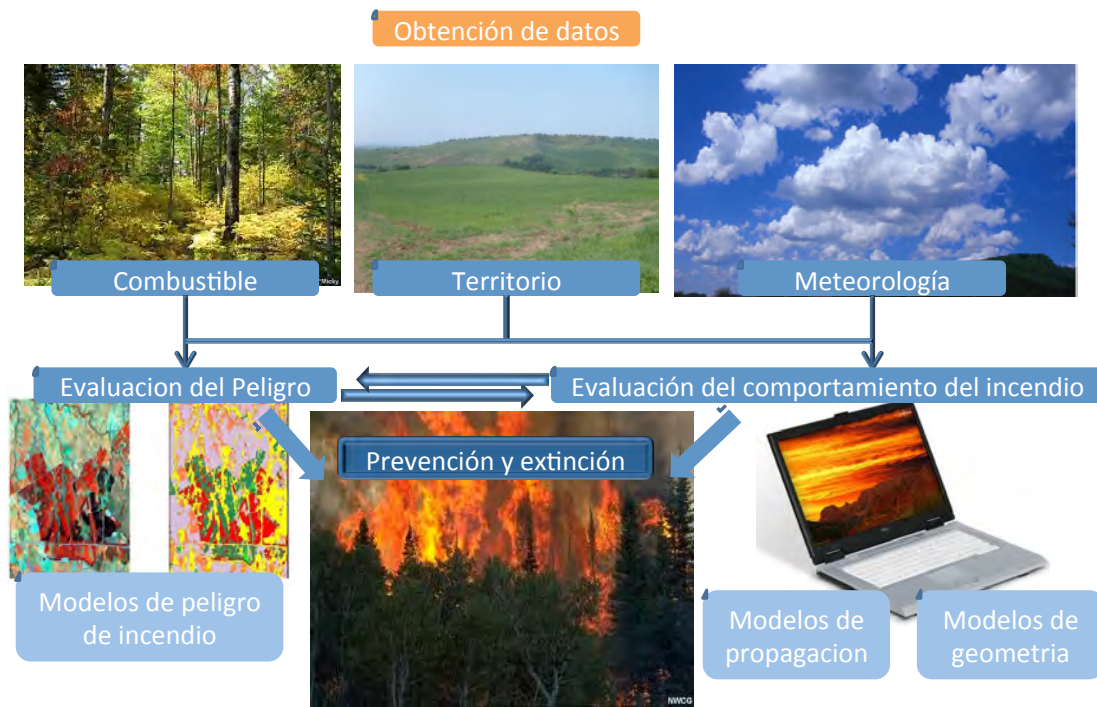


Figura 1.4. Representación gráfica de la interacción entre los diferentes modelos y herramientas.

1.3.1. Modelos de Propagación de Incendios de Superficie

La modelización de los incendios de superficie ha sido una de las grandes tareas que se han llevado a cabo en los centros de investigación de incendios forestales de todo el mundo en las últimas cinco décadas. De toda la actividad desarrollada durante esos años, han surgido modelos constituidos por una serie de ecuaciones que relacionan parámetros medioambientales con variables que determinan el comportamiento de un incendio. A partir de las características físicas de un combustible, del terreno y de las condiciones meteorológicas, se obtienen expresiones para la velocidad de propagación del incendio, el calor desprendido en el frente, la cantidad de combustible consumido, etc. La importancia de este tipo de modelos reside en el hecho de que los complejos sistemas actuales de predicción de incendios se han basado en ellos. En este sentido, han sido numerosas las aproximaciones teóricas, empíricas y semiempíricas que se han desarrollado y desafortunadamente pocas las que se han implantado finalmente de forma operativa, consiguiendo resultados con cierto grado de éxito (Tabla 1.2).

Tabla 1.2.

Clasificación de los modelos de propagación de incendios de superficie (1946-1999). (Arnaldos et al., 2003).

Autor y fecha	Tipología	Operatividad	Extrapolación	Procedencia
Fons (1946)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
Emmons (1964)	Teórica	Baja	Muy baja	Estados Unidos
Hottel et al.(1966)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
McArthur (1966)	Empírica	Alta	Baja	Australia
Van Wagner (1967)	Teórica	Nula	-	Canadá
Thomas (1967)	Teórica	Nula	-	Reino Unido
Anderson (1969)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
Frandsen (1971)	Semiempírico	Nula	-	Estados Unidos
Rothermel (1972)	Semiempírico	Alta	Alta	Estados Unidos
Pagni y Peterson (1973)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
Telisin (1974)	Teórica	Nula	-	Rusia
Steward (1974)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
Konev y Sukhinin (1977)	Teórica	Nula	-	Rusia
Cekirge (1978)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
Trabaud (1979)	Semiempírico	Nula	-	Francia
Fuji et al. (1980)	Teórica	Alta	-	Japón
Noble et al. (1980)	Empírica	Nula	Baja	Australia
Grishin et al. (1983)	Teórica	Alta	-	Estados Unidos
Hwang y Xie (1984)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
Albini (1985, 1986)	Teórica	Nula	-	Estados Unidos
De Mestre et al. (1989)	Teórica	Nula	-	Australia
Weber (1989)	Teórica	Nula	-	Australia
For.Cn.Fire Dn.Grp.(1992)	Empírica	Alta	Mediana	Canadá
Hargrove et al. (1995)	Empírica	Alta	Baja	Estados Unidos
Grishin (1997)	Teórica	En desarrollo	-	Rusia
Dupuy (1997)	Teórica	En desarrollo	-	Francia
Linn (1997)	Teórica	En desarrollo	-	México
Santoni (1998)	Teórica	En desarrollo	-	Francia
Viegas et al. (1998)	Empírica	En desarrollo	-	Portugal
Cheney et al. (1998)	Empírica	En desarrollo	-	Australia
Larini et al. (1998)	Teórica	En desarrollo	-	Francia
Margerit y Guillaume (1999)	Teórica	En desarrollo	-	Francia
	Teórica	En desarrollo	-	Francia

No obstante, y a pesar de que no pueda ser considerada como una línea de investigación definitivamente resuelta, con soluciones concluyentes, es uno de los campos que ha aportado, por encima de todo, más nociones relativas a la dinámica básica de un incendio forestal. Los efectos de la pendiente topográfica y del viento en los mecanismos de transmisión de calor durante la propagación y las características relevantes de la vegetación en cuanto al comportamiento del incendio son, entre otros, algunos conocimientos que la modelización de incendios de superficie y su posterior validación han proporcionado a los técnicos en prevención y extinción para una mejor comprensión del fenómeno.

Revisión histórica

La modelización de incendios de superficie se ha hecho, históricamente, de manera teórica (Figura 1.5). Así, se idealizó el combustible, el frente de incendio y la llama, dando lugar a un sistema simplificado en el que se puedan aplicar las ecuaciones de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía, diferenciando los tres mecanismos, para describir cuantitativamente las variables que definen la propagación de un incendio. El primer modelo, desarrollado por Fons (Fons, 1946), surgió en Estados Unidos y consistía en un ejemplo simplificado, en el que, mediante la aplicación de la ecuación de conservación de la

INTRODUCCIÓN

energía a un volumen uniformemente discreto en partículas sólidas e inmerso en un frente ideal de incendio, se obtenía la velocidad de propagación expresada en función del crecimiento, supuestamente logarítmico, de la temperatura del lecho de combustible. Fue válido mediante experimentos de laboratorio con una distribución uniforme de agujas de pino, obteniéndose resultados relativamente satisfactorios, a pesar de los errores implícitos en la formulación del modelo (Fons obvió la cuarta potencia en la expresión de la transmisión del calor por radiación ver Ecuación 1.15). Aún así, fue el precursor del desarrollo de una línea de investigación de punta en modelización, eminentemente teórica.

La modelización teórica consta de tres fases diferenciadas

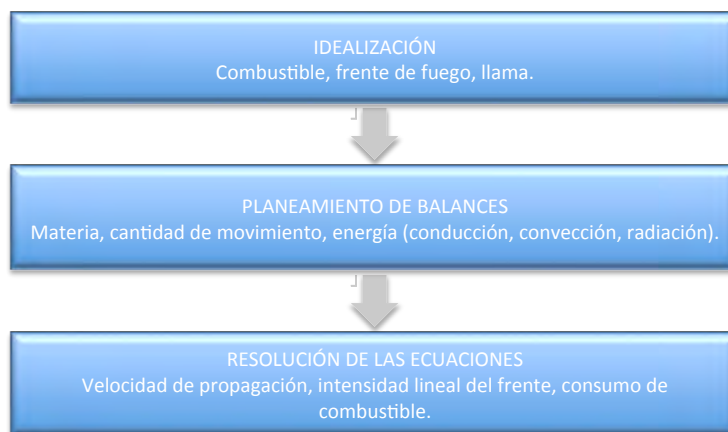


Figura 1.5. Fases de la modelización teórica.

Primeras aproximaciones teóricas

Entre los años 1960 y 1990, surgieron una serie de modelos basados en razonamientos similares en cuanto a la descripción del sistema físico, pero divergentes en la aplicación de los principios teóricos al plantear los balances. En su mayoría, estos modelos se constituyeron sobre la hipótesis de la propagación unidimensional y estacionaria del frente del incendio —representado por una llama inclinada, isoterma, plana y rectangular, y para una interfaz de combustión—, que avanza sobre un lecho de combustible, en condiciones ambientales constantes y caracterizado de forma homogénea por la humedad, la compacidad y por la relación superficie-volumen de sus partículas distribuidas de manera continua en todas sus dimensiones (Figura 1.6).

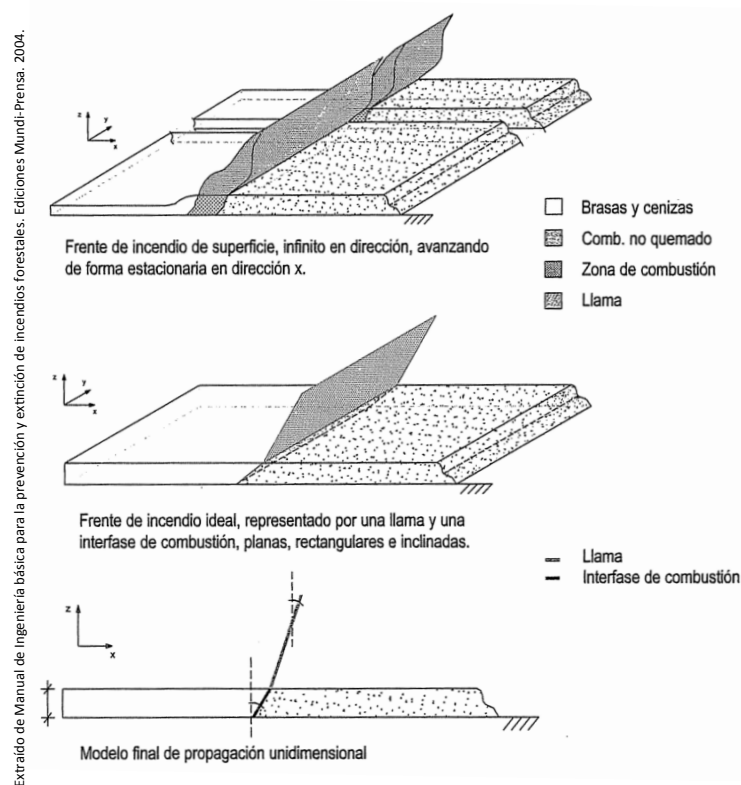


Figura 1.6. Proceso de modelización del sistema físico en incendios de superficie. (Arnaldo et al., 2003).

No obstante, algunos modelos diferían de este planteamiento inicial. En este sentido, son relevantes las aportaciones de Hwang y Xie (1984) y Albini (1985-1986) en cuanto a la discretización y la bidimensionalidad del combustible, respectivamente; el modelo de Thomas (1967), en el que se considera un gradiente de temperatura en el interior de las partículas, y las sugerencias de propagación no estacionaria de Cekirge (1978), Fuji *et al.*, (1980) y Weber (1989), quienes intentaron encontrar una solución dinámica al modo de avance del frente de incendio.

La formulación de las ecuaciones estableció el rasgo diferencial entre los diversos modelos, al diferir éstos en la consideración o preponderancia de unos u otros mecanismos de transferencia de calor, así como en la determinación de las condiciones de contorno y en la fijación de los volúmenes de control. Casi la totalidad de los autores tomaron la radiación como el proceso dominante en la aportación de calor al combustible no quemado. Sin embargo, dicho término recibió tratamientos diversos en función de la fuente de emisión observada, superficial o volumétrica, así como de la consideración de llama o zona de combustión, y de la caracterización de las partículas, como cuerpo negro o gris, según el caso. En este sentido, el trabajo de Albini (1985) es un ejemplo ilustrativo. Por el contrario, en general, los modelos trataron la contribución del término convectivo de manera confusa —exceptuando los trabajos de Pagni y Peterson (1973) y de Albini (1986)—, debido a la exclusión en los balances de los términos de aporte de calor relacionados con la presencia de gases calientes en el interior

INTRODUCCIÓN

del combustible, considerados únicamente de forma cualitativa como fuente de oxígeno para la combustión.

El resultado total, a pesar de las divergencias entre ellos, fue un conjunto de ecuaciones diferenciales, con las condiciones de contorno como límites de la temperatura del combustible, la pendiente topográfica o el viento, y con la velocidad de propagación como solución analítica o numérica, según la dificultad de la evaluación. No estuvieron exentos, sin embargo, de componentes empíricos, imprescindibles para completar el modelo. Valores referidos a la temperatura de la llama y a su altura fueron inevitablemente extraídos de la experimentación. A pesar del rigor pretendido en el desarrollo de la mayoría de estos ejemplos, ninguno de ellos fue concluyente y, en consecuencia, tampoco implementado de forma operativa por técnicos en prevención y extinción. Por este motivo y debido a la dificultad, todavía vigente en la actualidad, de interpretar correctamente los aportes parciales de cada mecanismo de transferencia de calor en la propagación del fuego, surgieron líneas de investigación paralelas en modelización semiempírica y empírica, en las que, sin intención de aportar nuevos conocimientos a la termodinámica de los incendios, se buscaban métodos más sencillos y aproximados, pero realmente prácticos para el ejercicio cotidiano de las labores forestales.

▫ Los modelos teóricos divergen principalmente en el tratamiento de los siguientes puntos referidos a la formulación:

- Importancia de unos u otros mecanismos de calor.
- Determinación de las condiciones de contorno.
- Fijación de los volúmenes de control.

El éxito de la modelización semiempírica y empírica

Continuando el trabajo, iniciado por Frandsen (1971), de modelización semiempírica de incendios de superficie aplicando balances globales de energía, Rothermel (1972) creó el modelo matemático de mayor difusión y operatividad hasta hoy. Según dicho autor, la introducción del modelo “permitiría el uso de técnicas sistemáticas de análisis para la resolución de problemas en la gestión del territorio”, relativos a la prevención, principalmente. El éxito conseguido en la mayoría de oficinas norteamericanas de gestión forestal donde fue implementado desembocó en una euforia generalizada, posiblemente excesiva, por parte de técnicos de todo el mundo. Los intentos de aplicación en Europa no tardaron en llegar, pero los resultados no fueron satisfactorios. El estudio de Rothermel fue desarrollado siguiendo tendencias semiempíricas, subordinado por tanto a las condiciones de la experimentación a partir de la cual fue validado. La extrapolación del modelo a la vegetación mediterránea proporcionó solamente resultados parciales, sin alcanzar a satisfacer las expectativas creadas por dicho trabajo.

En cuanto a la modelización empírica, que fue desarrollándose en la misma dirección, tuvo su precedente en McArthur (1966) en Australia. Este autor confeccionó hojas de cálculo para determinar los principales parámetros de los

incendios de superficie, desarrollados a partir de relaciones estadísticas extraídas de quemas experimentales. Posteriormente, Noble *et al.* (1980) los perfeccionaron a fin de ajustar las predicciones, consiguiendo grados de fiabilidad muy altos. Con todo, la extrapolación de este modelo a otros territorios, con vegetación diferente de la australiana, continúa tratándose con mucha prudencia.

En Canadá se optó también por la modelización matemática empírica. Tras la observación de más de 500 fuegos experimentales y con extensa documentación de incendios reales, el *Forestry Canada Fire Danger Group* (1992) diseñó la versión final de un modelo de predicción del comportamiento de incendios de superficie, desarrollada durante la década de 1980. La aplicación del modelo por parte de las agencias forestales canadienses dio resultados satisfactorios, por lo que se convirtió en herramienta indispensable en la gestión del bosque.

Tabla 1.3.

Modelos semiempíricos y empíricos más relevantes, integrados con éxito en herramientas de predicción operativa.

Autor	País	Fecha
McArthur	Australia	1965
Rothermel	Estados Unidos	1972
Fire Danger Group	Canadá	1992

1.3.1.1. El modelo semiempírico de Rothermel (1972)

Rothermel completó en 1972 un planteamiento teórico desarrollado por Frandsen para explicar, mediante el principio de conservación de la energía, la propagación de un incendio forestal. Propuso una metodología que, por medio de un conjunto de relaciones empíricas entre datos relativos al combustible y factores medioambientales anteriores al incendio, proporciona soluciones analíticas para las variables que determinan el comportamiento de un frente de incendio, siendo la más relevante la velocidad de propagación.

Se basa, de forma parecida a la modelización teórica, en la hipótesis de propagación unidimensional y estacionaria de un frente rectilíneo e infinito, a través de un lecho de partículas de combustible de características homogéneas. A partir de este planteamiento, Rothermel (1972) encontró una solución analítica a la velocidad de avance del frente, interpretada como la relación entre el flujo de calor recibido por unidad de superficie de combustible, denominado flujo de propagación por dicho autor, y la densidad de energía necesaria para incrementar su temperatura hasta la ignición (Ecuación 1.16).

$$V = \frac{I_p}{E_{ig}} \quad [1.16]$$

- V Velocidad de propagación del frente del incendio de superficie (m/s).
- I_p Flujo de propagación ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).
- E_{ig} Densidad de energía para la ignición de una unidad de volumen de combustible (kJ/m^3).

INTRODUCCIÓN

Desglosando el numerador y el denominador de la Ecuación 1.16 en términos derivados de relaciones empíricas, se obtiene un valor cuantitativo para la velocidad de propagación. Son necesarios los parámetros recogidos en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4.
Datos necesarios para la utilización del modelo de Rothermel

Propiedades de las partículas de combustible	Símbolo	Unidades
Contenido mineral total	S_T	Adimensional
Contenido mineral efectivo ¹	S_E	Adimensional
Calor de combustión	ΔH_C	Btu/lb
Densidad de partícula seca	ρ_p	lb/ft ³
Características del lecho de combustible	Símbolo	Unidades
Carga de combustible seco	w_0	lb/ft ²
Relación superficie-volumen	σ	ft ² /ft ³
Profundidad del lecho de combustible	δ	ft
Densidad aparente del lecho de combustible	ρ_b	lb/ft ³
Relación de empaquetamiento	β	Adimensional
Relación de empaquetamiento óptima	β_{op}	Adimensional
Parámetros medioambientales	Símbolo	Unidades
Velocidad del viento sobre el lecho de combustible	u_w	ft/min
Inclinación del terreno	ϕ	Grados
Humedad de extinción	H_x	Adimensional
Humedad del combustible	H_f	Adimensional

¹ Este parámetro corresponde al contenido mineral total libre de sílice (Philpot, 1968).

Flujo de propagación (I_p)

Contempla el calor recibido por unidad de superficie de combustible y por unidad de tiempo, transferida desde la zona de combustión y desde la llama, indistintamente, por la conducción, radiación y convección. Incorpora los efectos del viento y de la pendiente, mediante coeficientes no dimensionales cuya expresión se detalla en la tabla 1.5.

$$I_p = I_{P0} (1 + \Phi_W + \Phi_S) \quad [1.17]$$

- I_{P0} Flujo mínimo de propagación ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).
 Φ_W Coeficiente corrector de efecto del viento (-)
 Φ_S Coeficiente corrector de efecto de la pendiente (-)

Rothermel considera I_{P0} como una fracción de la potencia global emitida por la llama y la zona de combustión. Se obtiene mediante el flujo total de calor emitido por unidad de área del frente, denominado intensidad de reacción por dicho autor, multiplicado por un coeficiente no dimensional, ξ , que puede variar entre 0 y 1.

$$I_{P0} = \xi I_R \quad [1.18]$$

- ξ Factor de propagación (-).
 I_R Intensidad de reacción ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

I_R se determina por medio del producto de la velocidad de combustión —aminorada por la presencia de minerales y humedad—, la energía desprendida en la reacción y la carga neta inicial de material combustible, descontada la presencia de material no inflamable.

$$I_R = \Gamma \eta_S \eta_M w_n \Delta H_c \quad [1.19]$$

- Γ Parámetro de consumo de combustible (s^{-1}).
 η_S Coeficiente corrector por efecto del contenido mineral (-).
 η_M Coeficiente corrector por efecto de la humedad (-).
 w_n Carga neta de combustible ($kg \cdot m^{-2}$).
 ΔH_c Calor de combustión ($kJ \cdot kg^{-1}$).

Densidad de energía para la ignición (E_{ig})

El denominador de la expresión inicial (Ecuación 1.16) evalúa el calor por unidad de volumen necesario para llevar la carga de combustible presente en ella hasta su temperatura de ignición. Se compone de tres factores: la densidad del lecho de combustible, el calor de ignición y un índice de efectividad en la ignición, ε (Tabla 1.5), que representa la fracción de la masa de la partícula que se volatiliza por pirólisis.

$$E_{ig} = \rho_b \varepsilon Q_{ig} \quad [1.20]$$

- ρ_b Densidad del lecho de combustible (kg/m^3).
 ε Índice de efectividad en la ignición (-).
 Q_{ig} Calor de ignición (kJ/kg).

Tabla 1.5.

Expresiones empíricas del modelo de Rothermel, extraídas por experimentación en laboratorio

Intensidad de reacción (Btu/ft ² -min)	
$I_R = \Gamma' \cdot w_n \cdot \Delta H_c \cdot \eta_M \cdot \eta_S$	[1.21]
Calor de ignición (Btu/lb)	
$Q_{ig} = 250 + 1116H_f$	[1.22]
Índice de efectividad en la ignición (-)	
$\varepsilon = e^{\frac{-138}{\sigma}}$	[1.23]
Coeficiente corrector de efecto de la pendiente (-)	
$\Phi_s = 5,275\beta^{-0,3} \tan^2 \phi$	[1.24]
Coeficiente corrector de efecto del viento (-)	
$\Phi_w = C \cdot u_w^B \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$ $C = 7,47e^{-0,133\sigma^{0,55}}$ $B = 0,02526\sigma^{0,54}$ $E = 0,715e^{-3,59 \times 10^{-4} \sigma}$	[1.25]

INTRODUCCIÓN

Factor de propagación (-)	
$\xi = \frac{e^{(0,792+0,681\sigma^{0,5})(\beta+0,1)}}{192 + 0,2595\sigma}$	[1.26]
Parámetro de consumo de combustible (min⁻¹)	
$\Gamma' = \Gamma'_{max} \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A e^{A \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{op}} \right)}$ $\Gamma'_{max} = \frac{\sigma^{1,5}}{495 + 0,0594e^{1,5}}$ $A = 133\sigma^{-0,7913}$	[1.27]
Coefficiente corrector por efecto del contenido mineral (-)	
$\eta_S = 0,174S_e^{-0,19}$	[1.28]
Coefficiente corrector por efecto de la humedad (-)	
$\eta_M = 1 - 2,59 \frac{H_f}{H_x} + 5,11 \left(\frac{H_f}{H_x} \right)^2 - 3,52 \left(\frac{H_f}{H_x} \right)^3$	[1.29]
Carga neta de combustible (lb/ft²)	
$w_n = w_0(1 - S_T)$	[1.30]

Operatividad y limitaciones del modelo

El éxito que obtuvo en Estados Unidos fue debido a la facilidad con que se integraban en él los modelos americanos de combustible. Mediante pequeñas modificaciones en las ecuaciones descritas, se determina la velocidad de propagación en vegetación heterogénea y con diferentes cargas de material vivo o muerto (correspondiente a 10, 100 y 1000h de tiempo de retardo). La introducción de parámetros que ponderan unas u otras características de los distintos tipos de combustible, permite calcular valores medios para las propiedades de las partículas y los parámetros que determinan su disposición. A pesar de que se consigue caracterizar uniformemente una distribución no homogénea de materiales de distintos tamaños, el modelo considera despreciable la carga de elementos gruesos (de diámetros superiores a 7,6 cm en combustibles muertos y a 0,6 cm en combustibles vivos) en la propagación del fuego. De esta manera, el uso de este modelo queda restringido únicamente a los incendios de superficie. La implementación del desarrollo de Rothermel en la vegetación mediterránea presenta mayores dificultades, debido a la falta de una caracterización propia del territorio. La extrapolación forzosa de los modelos estadounidenses de combustible incrementa el margen de error en los resultados, implícito ya por causa de algunos planteamientos imprecisos en el desarrollo semiempírico. En este sentido, la consideración del efecto del viento está resuelta de forma poco rigurosa. Cuando el modelo se prueba en terreno llano y con combustible

homogéneo, aparecen, paradójicamente, situaciones en las que el frente de incendio se propaga más rápidamente que la velocidad del viento. Rothermel corrige este error incorporando un límite superior para el coeficiente corrector del efecto del viento, Φ_w . Posteriormente, en una revisión del modelo llevada a cabo por Albini (1976), se introduce explícitamente en la formulación un coeficiente de disminución de la velocidad del viento. Para terminar con el problema. Se trata, sin duda, de decisiones pragmáticas pero insatisfactorias desde el punto de vista científico (Weber, 1991), tanto por el procedimiento empleado como por los resultados obtenidos, sobrestimados a pesar de las correcciones.

A pesar de las limitaciones mencionadas y de las inherentes a la modelización semiempírica, Rothermel desarrolló un modelo completo (en el que no son necesarios datos posteriores al incendio) con soluciones analíticas. La conjunción de ambas características, junto con un rango de resultados bastante precisos, son elementos esenciales para una operatividad sencilla y eficaz, razón que explica la buena aceptación que el modelo ha tenido en Estados Unidos, si bien, en la Europa mediterránea, ha sido más controvertido.

En este trabajo se emplea el modelo de Rothermel (1972) como parte del motor de cálculo del propagador elíptico ondular Elípticos 1.00. En Anexo 8 se encuentra una tabla realizada mediante las ecuaciones y parámetros descritos aquí donde se obtiene como resultado la velocidad del frente de fuegos en pastizales para distintas condiciones de vientos y pendientes. La tabla fue realizada en una planilla Excel y en el Cap. 3 de autómatas hay representaciones gráficas de la misma. Es importante tener en cuenta que la tabla fue realizada con modelos de combustibles estadounidenses.

1.3.1.2. El modelo empírico de McArthur (1966)

En el este de Australia, McArthur (1966) inició una línea de modelización empírica, mediante el desarrollo de un modelo para la predicción de un único parámetro, la velocidad de avance del frente, con expresiones experimentales obtenidas a partir de fuegos controlados en zonas de pasto y vegetación de sotobosque con restos leñosos, efectuados durante el invierno en la región de New South Wales. A fin de obtener una formulación sencilla y funcional adoptó ciertas simplificaciones, aunque éstas fueran en detrimento de una mayor extrapolación. Así, consideró la propagación de un frente de fuego sobre un lecho de combustible fino y continuo, en terreno llano o suavemente ondulado. La ecuación empírica derivada de este estudio (Noble, 1980) es la que sigue:

$$V = 0.0722 e^{(-23.6+5.01 \ln C+0.0281 T-0.226\sqrt{HR}+1.201\sqrt{u_{w10}})} e^{0.069 \phi} \quad [1.31]$$

Recientemente, en Australia, se ha cuestionado la validez de este modelo de predicción de la velocidad de propagación en superficie, por su escasa fiabilidad. Cheney *et al.* (1998) proponen, en lugar de la ecuación anterior, la siguiente:

INTRODUCCIÓN

$$V = (0.165 + 0.534 u_{w2}) e^{\left(\frac{-0.859 - 2.036 u_{w2}}{S_f}\right)} e^{-0.108 H_f} \quad [1.32]$$

Los parámetros incluidos en las anteriores expresiones se describen en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6.
Datos necesarios para el empleo del modelo de McArthur.

Propiedades del combustible	Símbolo	Unidades
Grado de envejecimiento del pastizal	C	%
Parámetros medioambientales	Símbolo	Unidades
Velocidad del viento a 10m de altura	u_{w10}	m/ s
Velocidad del viento a 2m de altura	u_{w2}	m/ s
Inclinación del terreno	ϕ	Grados
Temperatura del aire	T	°C
Humedad relativa	HR	%
Humedad del combustible muerto	H_s	%
Anchura del frente de incendio	H_f	m

Operatividad y limitaciones del modelo

La fiabilidad del modelo de McArthur para la predicción de la velocidad de propagación en quemas prescritas y otros incendios efectuados en condiciones muy similares a los de los fuegos de validación, es muy elevada. No obstante, su empleo en condiciones meteorológicas de alto riesgo y en territorios que difieran considerablemente de los utilizados en las pruebas, proporciona valores de avance del frente menores que los observados. Una mejora propuesta por Cheney (1998) ajusta más los resultados en detrimento de la operatividad del modelo. El hecho de que se necesite un dato (la anchura del frente del incendio) que depende en gran medida del comportamiento del incendio, limita mucho su empleo.

Actualmente, el *Heathland Fire Behaviour Group* (Universidad de New South Wales en cooperación con la administración australiana) está llevando a cabo estudios para arreglar los defectos de estos modelos en la predicción de incendios de mayor intensidad (Cathpole *et al.*, 1999), resuelto de forma deficiente por McArthur, y en colaboración con Portugal y España (Heathland Fire Behaviour Group, 1999), por ser países que poseen una vegetación similar a la de los territorios utilizados en el estudio del modelo. Además de los modelos mencionados, en distintas zonas de Australia se han desarrollado diversas expresiones para el cálculo de la velocidad de propagación en superficie, aplicables sólo a territorios muy específicos.

En Anexo 7 se encuentra una tabla realizada mediante las ecuaciones y parámetros descritos aquí donde se obtiene como resultado la velocidad del frente de fuegos en pastizales para distintas condiciones de vientos y pendientes según los modelos de combustibles australianos. La tabla fue realizada en una planilla Excel y en el Cap. 3 de autómatas hay representaciones gráficas de la misma.

1.3.1.3. El modelo empírico del Forestry Canada Fire Danger Group (1992)

Desde 1980 y hasta principios de los años noventa, los principales centros de investigación del Servicio Forestal Canadiense desarrollaron una metodología empírica completa para el cálculo de los principales parámetros que determinan el comportamiento de un frente de incendio, basándose en datos de incendios reales y experimentales (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992, y Hirsh, 1996). La parte correspondiente a la caracterización de los incendios de superficie se compone básicamente de un conjunto de expresiones para predicción de la velocidad de propagación y del flujo de calor por metro lineal de frente. En la Tabla 1.7 figuran los datos necesarios para la resolución de las expresiones empíricas relativas al combustible y a la meteorología.

Tabla 1.7.
Datos necesarios para la utilización del modelo de Forestry Canada Fire Danger Group.

Propiedades del combustible	Símbolo	Unidades
Grado de envejecimiento del pastizal	C	%
Porcentaje de madera noble	PH	%
Índice de disponibilidad de combustible	BUI	No dimensional
Índice de humedad de los combustibles finos ¹	FFMC	No dimensional
Porcentaje de <i>Abies balsamea</i> muerto	PDF	%
Porcentaje de coníferas	PC	%
Parámetros medioambientales	Símbolo	Unidades
Velocidad del viento	u_w	m/ s
Inclinación del terreno	\emptyset	Grados
Contenido hídrico de las primeras capas de suelo ¹	DMC	°C
Contenido hídrico de las capas profundas de suelo ¹	DC	No dimensional

¹ Estos valores se obtienen a partir del modelo de riesgo FWI.

Velocidad de propagación

El proceso expuesto en el modelo para el cálculo de la velocidad consta de tres bases diferenciadas, en las que se tiene en cuenta los efectos del viento, de la pendiente y la disponibilidad de combustible para la propagación. La expresión general para la primera fase tiene como única variable el índice de riesgo de propagación, ISI, que determina la peligrosidad del avance de un frente de fuego, a partir de la velocidad del viento y la humedad expresada en términos de FFMC (Tabla 1.8). Tres coeficientes empíricos *a*, *b*, *c* (Tabla 1.9), diferenciados para cada modelo de combustible canadiense

$$V = \frac{1}{60} a [e^{-b ISI}]^c \tag{1.33}$$

- V* Velocidad de propagación (m/s).
- ISI* Índice de riesgo para la propagación (-).
- a, b, c* Coeficientes empíricos (-).

Para los modelos de combustible O-1a y O-1b, correspondientes a pastizales, la expresión (Ecuación 1.33) se amplía para incluir el efecto del grado de

INTRODUCCIÓN

envejecimiento, C, siempre que éste se encuentre entre el 50 y el 100%. En este caso:

$$V = \frac{1}{60} a [e^{-b ISI}]^c (0.02 C - 1) \quad [1.34]$$

Tabla 1.8.

Índice de riesgo para la propagación, ISI. Del de Forestry Canada Fire Danger Group. Extraído de Arnaldos et al., 2003.

U _w m/s	FFMC														
	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
0	2	2,5	3	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15
0,28	2	2,5	3	3	4	5	5	6	7	8	9	10	11	14	16
0,56	2,5	2,5	3	4	4	5	5	6	7	8	10	11	13	14	16
0,83	2,5	3	3	4	4	5	6	7	8	9	10	12	13	15	17
1,11	2,5	3	3	4	5	5	6	7	8	9	11	12	14	16	18
1,39	2,5	3	4	4	5	6	6	7	8	10	11	13	15	17	18
1,67	3	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	17	20
1,94	3	3	4	5	5	6	7	8	9	11	12	14	16	18	21
2,22	3	4	4	5	6	6	7	9	10	11	13	15	17	19	22
2,50	3	4	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	23
2,78	3	4	5	5	6	7	8	9	11	12	14	16	19	21	24
3,06	4	4	5	6	6	7	9	10	11	13	15	17	20	23	26
3,33	4	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	21	24	27
3,61	4	5	5	6	7	8	10	11	13	15	17	19	22	25	28
3,89	4	5	6	7	8	9	10	12	13	15	18	20	23	26	30
4,17	4	5	6	7	8	9	11	12	14	16	18	21	24	28	31
4,44	5	5	6	7	8	10	11	13	15	17	19	22	25	29	33
4,72	5	6	7	8	9	10	12	13	15	18	20	23	27	31	35
5	5	6	7	8	9	11	12	14	16	19	21	25	28	32	37
5,28	5	6	7	8	10	11	13	15	17	20	23	26	30	34	38
5,56	6	7	8	9	10	12	14	16	18	21	24	27	31	36	40
5,83	6	7	8	9	11	12	14	16	19	22	25	29	33	37	43
6,11	6	7	8	10	11	13	15	17	20	23	26	30	34	39	45
6,39	7	8	9	10	12	14	16	18	21	24	28	32	36	41	47
6,67	7	8	9	11	12	14	17	19	22	25	29	33	38	43	50
6,94	7	9	10	11	13	15	17	20	23	27	31	35	40	46	52
7,22	8	9	10	12	14	16	18	21	24	28	32	37	42	48	55
7,50	8	9	11	13	14	17	19	22	26	29	34	39	44	51	58
7,78	8	10	11	13	15	18	20	23	27	31	35	41	47	53	61
8,06	9	10	12	14	16	18	21	25	28	33	37	43	49	56	64
8,33	10	11	13	15	17	19	22	26	30	34	39	45	51	59	67
8,61	10	12	13	15	18	20	24	27	31	36	41	47	54	62	70
8,89	11	12	14	16	19	22	25	29	33	38	43	50	57	65	74
9,17	11	13	15	17	20	23	26	30	35	40	46	52	60	68	78
9,44	12	13	15	18	21	24	27	32	36	42	48	55	63	72	82
9,72	12	14	16	19	22	25	29	33	38	44	51	58	66	76	86
10	13	15	17	20	23	26	30	35	40	46	53	61	70	80	91
10,28	14	16	18	21	24	28	32	37	42	49	56	64	73	84	95
10,56	14	16	19	22	25	29	34	39	45	51	59	67	77	88	100
10,83	15	17	20	23	27	31	35	41	47	54	62	71	81	92	105
11,11	16	18	21	24	28	32	37	43	49	57	65	74	85	97	111
11,39	17	19	22	25	29	34	39	45	52	60	68	78	90	102	117
11,67	17	20	23	27	31	36	41	47	54	63	72	82	94	108	123
11,94	18	21	24	28	32	37	43	50	57	66	76	87	99	113	129
12,22	19	22	26	30	34	39	45	52	60	69	79	91	104	119	136
12,50	20	23	27	31	36	41	48	55	63	73	84	96	110	125	143
12,78	21	25	28	33	38	44	50	58	67	77	88	101	115	132	150
13,06	23	26	30	34	40	46	53	61	70	81	92	106	121	138	158
13,33	24	27	31	36	42	48	56	64	74	85	97	111	127	146	166
13,61	25	29	33	38	44	51	58	67	78	89	102	117	134	153	175
13,89	26	30	35	40	46	53	61	71	82	94	108	123	141	161	184

Tabla 1.9.

Coefficientes a, b y c. Del de Forestry Canada Fire Danger Group. Extraído de Arnaldos et al., 2003.

Modelos de combustible	Coeficientes		
	a	b	c
C-1	90	0,0649	4,5
C-2	110	0,0282	1,5
C-3	110	0,0444	3
C-4	110	0,0293	1,5
C-5	30	0,0697	4
C-6	30	0,08	3
C-7	45	0,0305	2
D-1	30	0,0232	1,6
S-1	75	0,0297	1,3
S-2	40	0,0438	1,7
S-3	55	0,0829	3,2
O-1a	190	0,031	1,4
O-1b	250	0,035	1,7
M-3	170exp(-35/PDF)	0,082exp(-36/PDF)	1,698-0,00303PDF*
M-4	140exp(-35,5/PDF)	0,0404	3,02exp(-0,00714PDF*)

Las expresiones de la velocidad de propagación para los modelos M-1 y M-2 difieren totalmente de las anteriores, y son una ponderación, respecto de la carga de material grueso, de las velocidades de propagación en los modelos C-2 y D-1.

$$V_{M1} = 0.01 PC V_{C2} + 0.01 PH V_{D1} \quad [1.35]$$

$$V_{M2} = 0.01 PC V_{C2} + 0.02 PH V_{D1} \quad [1.36]$$

Donde V_{M1} , V_{M2} , V_{C2} y V_{D1} corresponden a las velocidades de propagación para cada tipología de combustible, de acuerdo con lo que expresan los subíndices.

La segunda fase propuesta en el modelo consiste en la inclusión del efecto de la pendiente en el cálculo de la velocidad del frente. Así, la nueva velocidad de propagación se calcula despreciando el efecto del viento y contabilizando únicamente el avance del frente por efecto de la inclinación del terreno.

$$V_{SF} = V_{UW=0} e^{\left(3.533 \tan \theta^{\frac{1}{2}}\right)} \quad [1.37]$$

V_{SF} Velocidad de propagación por efecto de la pendiente (m/s).

$V_{UW=0}$ Velocidad de propagación calculada sin viento mediante las expresiones (8.22-2.25) (m/s).

Mediante las funciones inversas correspondientes a las ecuaciones (1.33-1.36) (Tabla 1.10) se obtiene el índice de riesgo para la propagación, ISI_{SF} , que corresponde a la V_{SF} calculada en la expresión precedente. A continuación se lee en la Tabla 1.8 la velocidad del viento equivalente al efecto de la pendiente y se suma

INTRODUCCIÓN

de forma vectorial a la velocidad meteorológica del viento. De esta forma se contempla la posibilidad que la dirección preferencial del viento no sea paralela a la pendiente del terreno. Con el módulo del vector obtenido y nuevamente con las expresiones (1.33-1.36), se obtiene la velocidad de propagación del frente del incendio considerando el viento y la pendiente, $V_{U,SF}$.

En la última fase para el cálculo completo del avance del frente, se incorpora el efecto de la disponibilidad de combustible para la propagación. Obviamente, en condiciones extremas de riesgo de incendio, aumenta la carga de material vegetal grueso que facilita el avance del incendio, no contemplada en el modelo. En este sentido, la velocidad de propagación obtenida con el viento y con la pendiente se modifica con la incorporación de un factor multiplicador para cada modelo de combustible, k (Tabla 1.11), que contempla este último efecto.

$$V_F = k V_{U,SF} \quad [1.38]$$

- V_F Velocidad de propagación final (m/s).
 $V_{U,SF}$ Velocidad de propagación por efecto del viento y la pendiente (m/s).
 k Factor multiplicador (-).

Tabla 1.10.
Funciones inversas para el cálculo de ISI_{SF}

Función inversa de [1.31]	
$ISI_{SF} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{60 V_{SF}}{a} \right)^{\frac{1}{c}}$	[1.39]
Función inversa de [1.32]	
$ISI_{SF} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{60 V_{SF}}{a (0.02 C - 1)} \right)^{\frac{1}{c}}$	[1.40]
Función inversa simplificada de [1.33-1.34]	
$ISI_{SF} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{100 - 60 V_{SF}}{a pc} \right)^{\frac{1}{c}}$	[1.41]

Cada fase del modelo canadiense corresponde a la contabilización de un efecto que influye en el comportamiento del incendio. En resumen, el procedimiento a seguir para averiguar la velocidad de propagación de un incendio, con viento, pendiente y sin despreciar el efecto de la disponibilidad de combustible, es el de Figura 1.7.

Desarrollo del Motor de Cálculo de un Simulador de Incendios Forestales

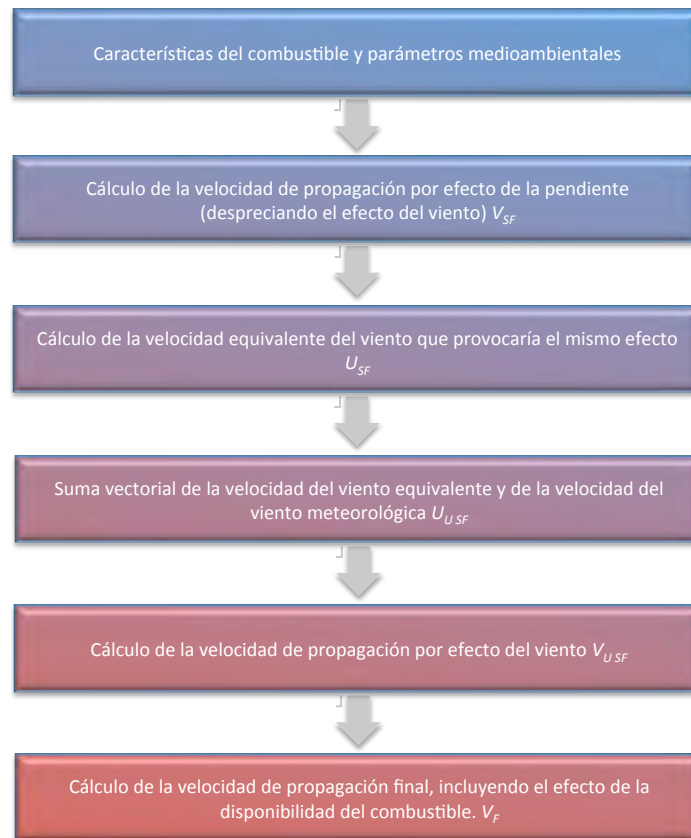


Figura 1.7. Fases del modelo canadiense.

Tabla 1.11.
Factores k para cada modelo de combustible. . Extraído de Arnaldos et al., 2003.

Combustible	k	Combustible	k
C-1	1,076	M-1	1,25
C-2	1,321	M-2	1,25
C-3	1,261	M-3	1,25
C-4	1,184	M-4	1,25
C-5	1,22	S-1	1,46
C-6	1,197	S-2	1,256
C-7	1,134	S-3	1,59
D-1	1,179	O-1	1

Operatividad y limitaciones

El modelo para la predicción del comportamiento de los incendios de superficie por el *Forestry Canada Fire Danger Group* tuvo gran aceptación entre las agencias forestales canadienses. Con su empleo se ha conseguido un alto grado de fiabilidad, a pesar de la simplicidad de las correlaciones matemáticas utilizadas.

INTRODUCCIÓN

La descripción únicamente cualitativa de los combustibles facilita la operatividad del modelo por parte de los técnicos forestales, aunque esto va en detrimento de su empleo en trabajos de investigación sobre la influencia de las características físicas y geométricas de la vegetación en la propagación del incendio. Por otra parte, la falta de caracterización cuantitativa dificulta la obtención de previsiones más exactas del material consumido, enormemente influenciado por la compactación del lecho de combustible, el tamaño de las partículas que lo conforman y la velocidad de propagación del frente de incendio, parámetros que no se consideraron en el cálculo.

En Anexo 9 se encuentra una tabla realizada mediante las ecuaciones y parámetros descritos aquí donde se obtiene como resultado la velocidad del frente de fuegos en pastizales para distintas condiciones de vientos y pendientes según los modelos de combustibles canadienses. La tabla fue realizada en una planilla Excel y en el Cap. 3 de autómatas hay representaciones gráficas de la misma.

1.3.2. Sistemas de Cálculo de Incendios Forestales

El objetivo de la modelización de incendios, aparte de ampliar el conocimiento de la dinámica de los incendios forestales, es la creación de procedimientos que puedan implementarse en herramientas de cálculo, utilizables en el trabajo cotidiano de los técnicos en prevención y extinción. La evolución de estas herramientas ha ido, pues, estrechamente ligada al desarrollo de metodologías para la predicción del comportamiento de los distintos tipos de incendios, así como de la investigación en el campo de la informática y las nuevas tecnologías. De esta forma, las mejoras cualitativas en modelización y los avances en el diseño de software informático han propiciado sistemas de cálculo de incendios cada vez más potentes y versátiles para la gestión del territorio.

Revisión histórica

La aparición de sistemas efectivos de cálculo de incendios en las diferentes agencias de prevención y extinción ha sido prácticamente inmediata al desarrollo de un buen modelo matemático. Se tiene constancia de que la primera herramienta de ese tipo utilizada por técnicos forestales (McArthur Grassland and Forest Meters) surgió, a mediados de los años 1960, de la modelización matemática australiana encabezada por McArthur (1966-1967). Se trata de una regla de cálculo manual compuesta por cuatro circunferencias concéntricas, en las que están representadas las variables consideradas en el procedimiento matemático. Girándolas adecuadamente en función de los valores reales de los mencionados parámetros, se obtiene una estimación de la velocidad de un incendio en vegetación de pastizal o bosque, según el caso. La simplicidad de uso y la fiabilidad de sus predicciones hicieron que dicha herramienta fuera recibida con gran aceptación, y que todavía sigan usándola habitualmente versiones mejoradas de este aparato (Fig. 1.12).

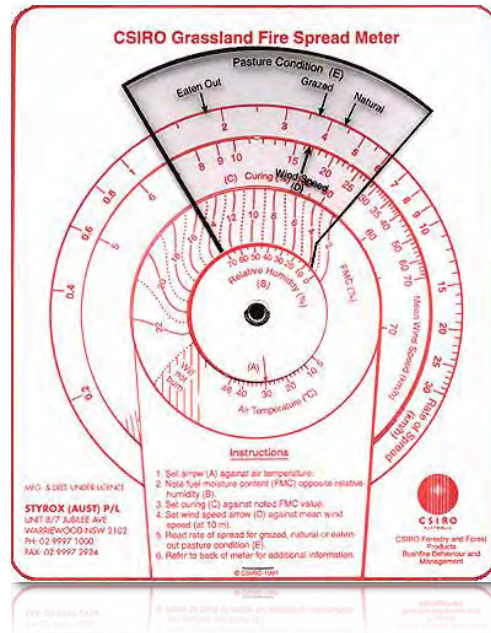


Figura 1.12. Regla de cálculo empleada en Australia.

Implementación informática de los modelos matemáticos

La introducción gradual de las computadoras como herramienta de trabajo, durante la década de 1980, fomentó la aparición de software para el cálculo de incendios integrado por diversos modelos matemáticos. El precursor de esta tendencia fue el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos que, en 1984, desarrolló la primera versión del programa *Behave (Fire Behaviour and Fuel Modeling System)*, basado en los estudios de Rothermel (1972). Mediante la entrada de los datos correspondientes al combustible y a las condiciones medioambientales, proporciona valores de la velocidad de propagación y de la intensidad de un incendio de superficie. En posteriores actualizaciones se ha mejorado el programa, tanto en lo relativo a su versatilidad (ampliándolo a incendios de superficie, de copas y a la formación de focos secundarios) como en la presentación de la interfase visual con el usuario.

Este sistema sentó un precedente muy importante entre las demás agencias forestales del resto del mundo. Así, en la década de 1990 se crearon nuevas herramientas de similar formato que incorporaban modelos matemáticos de procedencia diversa (Tabla 1.12). En Canadá, los procedimientos para la predicción del comportamiento de los incendios de superficie y de copas fueron implementados en el sistema FBP (Fire Behaviour Prediction System). El grupo de investigación de incendios forestales australiano del CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Organisation) hizo lo propio con los trabajos de McArthur, integrándolos en el sistema de cálculo CSIRO Fire Calculator; mientras, en Estados Unidos, surgían nuevas técnicas basadas en el sistema *Behave*, como el software *Nexus*, por ejemplo, con la intención de corregir sus deficiencias.

Tabla 1.12.

Programas informáticos para el cálculo de la predicción del comportamiento de los incendios. (Arnaldos et al., 2003).

Nombre	Referencia	Modelos matemáticos principales	Procedencia
Behave (Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System)	Burgan y Rothermel (1984)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977) MIC Rothermel (1991) MFS Albin (1979)	Estados Unidos
FBP (Fire Behavior Prediction System)	For. Can. Fire Dan. Group (1992)	MIS For. Can. Fire Dan. Group (1992) MIC For. Can. Fire Dan. Group (1992)	Canadá
Burn (Simulation of Forest Fire Propagation)	Veach (1994)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977) MIC Rothermel (1991) MFS Albin (1979)	Estados Unidos
FireLab (Problem Solving Environment)	Guarnieri et al. (1998)	Larini et al. (1972) Dupuy (1997)	Unión Europea
Nexus (Fire Behaviour and Hazard Assessment System)	Scott (1999)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977) MIC Rothermel (1991)	Estados Unidos
Csiro Fire Calculator (Fire Danger and Fire Spread Calculator)	CSIRO Bushfire Beh. Manag. Grp (1999)	MIS McArthur (1966) MIC McArthur (1967) MFS McArthur (1967)	Australia

- MIS: Modelo de propagación de incendio de superficie.
- MIIC: Modelo de iniciación de incendio de copas.
- MIC: Modelo de propagación de incendio de copas.
- MFS: Modelo de focos secundarios.

Integración de los sistemas de información geográfica en la simulación de incendios

Los sistemas de información geográfica (SIG), al igual que en otras disciplinas, han aportado un salto cualitativo de especial relevancia en la prevención y extinción de incendios forestales. La representación digital de los espacios naturales ha inducido, junto con otros factores, el desarrollo de complejos sistemas para la predicción del comportamiento de los incendios; de este modo, los técnicos han podido dar un nuevo enfoque a su trabajo, complementando los aportes de los programas informáticos.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son programas informáticos que permiten elaborar cartografía digital con información específica georeferenciada. En el caso de los incendios de vegetación, resultan especialmente interesantes los mapas territoriales en los que se cuantifican la elevación, pendiente y orientación, así como los mapas indicativos de la disposición del combustible que tengan una base asociada de datos numéricos referidos a las características de la vegetación.

Esta nueva visión es posible gracias a los nuevos softwares que incorporan, además de los modelos matemáticos para la predicción de las características del incendio, técnicas de simulación numéricas que permiten representar el avance del frente sobre el territorio mediante capas digitales SIG en dos o tres dimensiones. Las técnicas más utilizadas en la construcción de simuladores de incendios son tres: la percolación², el autómata celular y la propagación elíptica ondulatoria

² Percolación. Se refiere al paso lento de fluidos a través de los materiales porosos, ejemplos de este proceso es la filtración y la lixiviación.

(Albrigt y Meisner, 1999). En este trabajo se desarrollaron las dos últimas técnicas. Estas técnicas, difieren entre sí en la manera de representar el territorio y en el criterio para simular el crecimiento del incendio sobre aquel.

- *Técnica de simulación de la percolación.* El territorio se representa mediante una retícula de divisiones cuadradas, triangulares o hexagonales, según el caso, en las que se incorporan los valores correspondientes a las características medioambientales. El fuego se propaga de una celda a las contiguas siguiendo la probabilidad específica de ignición y propagación asociada a cada celda (McCarthy, 1997). Esta probabilidad se ajusta a partir de un modelo matemático empírico elaborado con datos históricos sobre comportamiento de incendios.
- *Técnica de simulación de autómatas celulares.* El frente avanza también sobre un territorio reticulado, atendiendo a un conjunto de reglas que determinan el estado de las celdas (propagadoras o inhibidoras del incendio). Dichas reglas se basan en modelos matemáticos semiempíricos o teóricos sobre comportamiento de incendios. (Se explica en detalle en capítulo 3.)
- *Técnica de propagación elíptica ondulatoria.* Sigue el principio de Huygens de propagación de las ondas. (Se explica en detalle en el apartado 4.2).

El empleo de una u otra técnica responde, en parte, a la tipología del modelo matemático que se quiera simular, y a criterios técnicos relativos a la precisión, velocidad de cálculo y complejidad de la programación (French, 1992). En la Tabla 1.13. se especifican algunas características.

Tabla 1.13.

Características principales de las técnicas de simulación. Los datos comparativos son estimados pues existen muchas técnicas para acelerar cálculos en el caso, por ejemplo, de los autómatas celulares. (Arnaldos et al., 2003)

Características / Técnicas	Propagación celular	Propagación elíptica ondulatoria
Representación del territorio	Discreta (Celdas)	Continua
Criterio de propagación	Reglas lógicas y probabilidades	Funciones matemáticas
Velocidad de cálculo	Menor	Mayor
Complejidad de programación	Menor	Mayor
Precisión	Menor	Mayor

A lo largo del tiempo se han desarrollado distintos tipos de simuladores muchos de ellos basados en los modelos matemáticos usados en el sistema *Behave* (ver Tabla 1.14). A pesar del gran número y la diversidad de los simuladores desarrollados, su utilización como herramienta básica en el trabajo cotidiano de los técnicos forestales no está aún normalizada en la mayoría de sus países de procedencia, aunque el *Farsite* haya experimentado últimamente una gran difusión mundial, debido a su posibilidad de adaptación a distintos tipos de vegetación, especialmente a la mediterránea. Por este motivo fue motivo de estudio en el capítulo siguiente (*Cap. 2, utilización del FARSITE*).

INTRODUCCIÓN

Tabla 1.14.

Simuladores de incendios forestales, representativos del período 1991-2000. (Arnaldos et al., 2003).

Nombre / Procedencia	Referencia ¹	Componentes principales ²	
Dynafire Estados Unidos	Kalabokidis <i>et al.</i> (1991)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977) MFS Albini (1979)	MIC Rothermel (1991) <i>Autómata celular</i>
Cardin España	Martínez Millán <i>et al.</i> (1991)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977) MFS Albini (1979)	MIC Rothermel (1991) <i>Autómata celular</i>
Firemap Estados Unidos	Ball i Guertin (1992)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977) MFS Albini (1979)	MIC Rothermel (1991) <i>Autómata celular</i>
Wildfire Canadá	Wallace (1993)	MIS For. Can. Fire Dan. Group (1992)	MIC For. Can. Fire Dan. Group (1992) <i>Propagación elíptica ondular</i>
Farsite Estados Unidos	Finney (1993)	MIS Rothermel (1972) MIC Finney (1993)	MFS Albini (1979) <i>Propagación elíptica ondular</i>
Embyr Estados Unidos	Hargrove <i>et al.</i> (1995)	Hargrove <i>et al.</i> (1995)	<i>Percolación</i>
Sparks Suiza	Schöning (1996)	MIS Rothermel (1972)	<i>Autómata celular</i>
Simulador Interactivo de Incendios Forestales España	Álvarez (1996)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977)	MFS Albini (1979) MIC Rothermel (1991) <i>Autómata celular</i>
Geofogo Portugal	Vasconcelos <i>et al.</i> (1998)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977)	MFS Albini (1979) MIC Rothermel (1991) <i>Autómata celular</i>
Firestation Portugal	Lopes <i>et al.</i> (1998)	MIS Rothermel (1972)	<i>Autómata celular</i>
SiroFire Australia	CSIRO Bushfire Beh. Manag. Grp (1998)	MIS McArthur (1966) MIC McArthur (1967)	MFS McArthur (1967) <i>Propagación elíptica ondular</i>
Pyrocart Nueva Zelanda	Perry (1999)	MIS Rothermel (1972) MIIC Van Wagner (1977)	MFS For. Can. Fire Dan. Group (1992) <i>Propagación elíptica ondular</i>
Canadian Fire Growth Model Canadá	Canadian wildland fire growth model project team (1999)	MIS For. Can. Fire Dan. Group (1992)	MIC For. Can. Fire Dan. Group (1992) <i>Propagación elíptica ondular</i>
Integrated Inflammation Software System ³ Unión Europea	Viegas (2000)	Viegas <i>et al.</i> (1998) Marguerit y Guillaume (1999)	Técnica de simulación a determinar
...

1 Correspondiente a la primer versión.

2 Correspondiente a la versión más completa.

3 En desarrollo.

MIS: Modelo de propagación de incendio de superficie.

MIIC: Modelo de iniciación de incendio de copas.

MIC: Modelo de propagación de incendio de copas.

MFS: Modelo de focos secundarios.

Simuladores nacionales

En lo que respecta a este último período, se ha desarrollado en el 2010 un simulador de incendios de vegetación con la intención de ser utilizado en la región de Córdoba y similares (Chaves, 2010). La propuesta en presente es el desarrollo de dos motores de cálculo utilizando autómatas celulares y propagadores elípticos (ver Tabla 1.15).

Tabla 1.15.
Simuladores de incendios de vegetación nacionales de este último período y en relación a CONAE.

Nombre / Procedencia	Referencia	Componentes principales	
SIF_PANO V2.0.1 ¹ Argentina	Chaves N., Nicoloff P. (2010)	MIS Rothermel (1972)	<i>Propagación elíptica ondular</i>
Motor de cálculo con AC propuesto ² Argentina	Cap. 3 (2014)	MIS (ver Cap. 3) MFS (ver Cap. 3)	<i>Autómata celular</i>
Motor de cálculo con PE propuesto ² Argentina	Cap. 4 (2014)	MIS Rothermel (1972)	<i>Propagación elíptica ondular</i>

AC: Autómata Celular.

PE: Propagador Elíptico ondular.

1 Trabajo de tesis.

2 Propuesta de motores de cálculo.

MIS: Modelo de propagación de incendio de superficie.

MFS: Modelo de focos secundarios.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Construir dos motores de cálculo para implementarlos a futuro en un programa integral de simulación de incendios de vegetación.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la manera en la que se dan los procesos fisicoquímicos en la combustión de los incendios de vegetación.
- Investigar los modelos matemáticos empleados y los sistemas de cálculo existentes.
- Realizar experiencias con algún simulador de incendios de vegetación reconocido en algún escenario real, comprender la interacción de sus partes, la importancia de los modelos de combustibles y factores medioambientales más influyentes.
- Desarrollar las bases de los modelos matemáticos de autómatas celulares.
- Desarrollar las bases del modelo de propagador elíptico ondular.

1.6. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Capítulo 1. En este primer capítulo se ven los fundamentos fisicoquímicos y matemáticos involucrados en un incendio de vegetación. Este es un tema que da pie, principalmente, a los modelos más teóricos para la predicción. Ecuaciones semiempíricas como la de Rothermel para la predicción del frente de las llamas se valen de estos principios.

Capítulo 2. Este capítulo está constituido por experiencias realizando trabajos en el sur de Italia con el simulador de incendios de vegetación FARSITE. El trabajo se desarrolló en el IMA-CNR zona industrial de Tito Scalo, Potenza (Italia), bajo la dirección de los Profesores Rosa Lasaponara (Italia), Antonio Lanorte (Italia) y Mario Lanfri (Argentina).

Capítulo 3. Comienza con una introducción histórica suficientemente detallada explicando los fundamentos del modelo matemático de los autómatas celulares y su aplicación. Luego se realiza una propuesta dando una ecuación que reproduce en proporciones similares el comportamiento del frente de fuego respecto a los tres modelos de velocidad de frente de fuego más populares. Finalmente se construye un sistema propagador del efecto del fuego con un autómata celular modificado en vecindad y con técnicas de spoting.

Capítulo 4. Presenta una introducción a la morfología, características físicas y geométricas de un frente y da los principios de la modelización de la progresión de un incendio. Luego comienza de cero con la construcción de un propagador elíptico ondular y se muestra cómo realizar los cálculos de sus partes, generación de elipses, polígonos, áreas, etc. Se realiza el cálculo de orientación y pendiente del terreno y se estudia y soluciona uno de los problemas numéricos encontrado en el modelo.

Capítulo 5. Se presentan todas las conclusiones de los capítulos y se hace una comparación entre los dos tipos de propagadores de fuegos, AC (autómata celular) y PE (propagadores elípticos). Se realizan propuestas para trabajos futuros haciendo especial énfasis en la optimización de los autómatas celulares ante técnicas de procesamiento paralelo y las consideraciones a seguir para concretar un simulador de incendios de vegetación para uso nacional.

CAPÍTULO 2

TRABAJOS DESARROLLADOS EN ITALIA
UTILIZACIÓN DEL FARSITE

2. UTILIZACIÓN DEL SIMULADOR FARSITE

2.1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la maestría AEARTE que se dicta en el *Instituto de Alto Estudios Espaciales Mario Gulich* (CONAE-FAMAF), en enero de 2012, se realizó un viaje a la ciudad Potenza, capital de la región Basilicata al sur de Italia gracias al convenio entre las agencias espaciales italiana y argentina (ASI-CONAE). Esto concluyó en una estadía de aproximadamente medio año donde se realizaron trabajos de simulación de incendios de vegetación aprendiendo el uso de nuevas herramientas. Los trabajos se realizaron en el *Consiglio Nazionale delle Ricerche* (CNR) ubicado en zona industrial de Tito, teniendo como tutores a la Ing. Eléctrica *Rosa Lasaponara* (tutora) y al Ing. Forestal *Antonio Lanorte* (tutor asignado). Aquí fue de principal importancia el uso del FARSITE como herramienta de cálculo para el uso de simulaciones en los alrededores del pueblo *Latrónico*, situado en la misma región Basilicata. En este trabajo se suministró información por parte de los investigadores del CNR sobre las condiciones medioambientales y la condición de los combustibles de la zona para hacer factible prácticas de simulación con la herramienta de incendios. Con los resultados obtenidos se redactó un informe, a pedido del *Instituto Gulich* (IG), del cual se extrajo aquí gran parte de su contenido. A continuación se presenta una introducción que incluye definiciones de Computación científica y simulaciones (Rodríguez y Darío, 2007) y luego se expone gran parte del informe hecho para el IG.

2.1.1 Computación Científica

Muchos de los descubrimientos realizados por los científicos e ingenieros no hubieran sido posibles sin las computadoras, éstas han revolucionado la manera en que los científicos realizan su trabajo y se podría decir que las computadoras son el laboratorio de la ciencia moderna (Rodríguez y Darío, 2007).

Tradicionalmente, la ciencia fue hecha en un laboratorio como combinación de la teoría y de la experimentación física (con cálculos a mano), pero las computadoras han hecho posible una nueva manera de hacer ciencia y de gran alcance con simulación numérica. La simulación numérica es el proceso de modelar matemáticamente un fenómeno físico, y después hacerlo funcionar en un experimento con el modelo matemático. La Computación Científica desempeña un papel importante en esta nueva manera de hacer ciencia, de crear, de evaluar, y de

refinar los modelos matemáticos usados para simular los fenómenos físicos. (Bianchini, 2004).

La Computación Científica no debe ser confundida con la Informática (Computer Science). La primera se enfoca en problemas científicos o de ingeniería, y junto con la matemática y la informática obtiene un entendimiento perfeccionado de los problemas. Por otra parte, la informática centra su interés en el computador mismo (estudio matemático del cómputo, computadores y el procesamiento de la información). Aunque las áreas son bastante distintas, muchos de los temas típicamente considerados pertenecientes al dominio de “computer science” son de mucho valor en la Computación Científica. (Mostaccio, 2007).

Entonces, a partir de estos antecedentes Tapia y Lanius (Tapia y Lanius, 2003) definen la “Computación Científica” como: La ciencia de cómputo es un campo interdisciplinario en la intersección de tres dominios: de las matemáticas, de la informática, y de las ciencias biológicas y físicas (Figura 2.1). Los científicos de esta área utilizan las herramientas de la informática y de las matemáticas para estudiar problemas de la ciencia, la sociología, la física, ingeniería, etc. La mayor parte de los problemas en los cuales los científicos trabajan implican grandes cantidades de datos y una gran cantidad de variables. Con los avances en informática y métodos numéricos, los matemáticos y los científicos pueden trabajar juntos, modelar y solucionar los problemas que eran imposibles tratar hace por lo menos diez años atrás. En esta clase de ciencia se hace más que usar una computadora para encontrar soluciones a problemas de modelos matemáticos desarrollados por científicos de otras áreas. También desarrollan nuevas herramientas matemáticas, teorías y nuevos métodos numéricos que mejoran la exactitud y la velocidad de métodos existentes. El problema de la simulación de incendios de vegetación encaja perfectamente en esta forma de hacer ciencia.

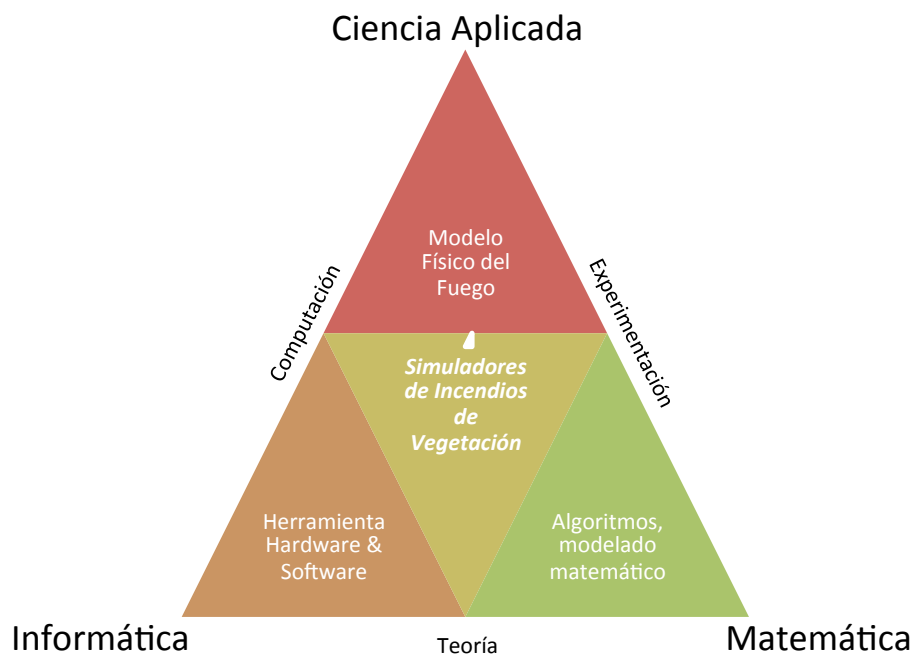


Figura 2.1. *Computación Científica. El problema de la simulación de incendios de vegetación encaja perfectamente en esta forma de hacer ciencia.*

2.1.2 Simulación

La simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, los cuales son necesarios para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo. (Naylor *et al.*, 1982).

El fundamento racional para usar la simulación en cualquier disciplina, no sólo en la predicción de incendios de vegetación, es la necesidad del hombre de adquirir algún tipo de conocimiento con respecto a la predicción del futuro. Esto es tan antiguo como la historia de la humanidad; antes de siglo XVII, esa indagación estaba casi limitada a métodos puramente deductivos de los filósofos como Platón, Aristóteles, Euclides y otros, denominada por algunos críticos como Hans Reichenbach “filosofía especulativa” que pretendió dar un conocimiento de los principios más generales que gobiernan al universo. Se debe considerar que estos sólo eran simples intentos de dar una aproximación a lo que hoy conocemos como explicación científica a través de simples analogías con las experiencias de la vida cotidiana. (Rosenblueth y Winer, 1963).

De todos modos hay que dejar bien claro que ninguna parte sustancial del universo es tan simple como para comprenderse y controlarse sin abstracción. La abstracción consiste en reemplazar la parte del universo bajo consideración, por un modelo de estructura similar pero más simple. Entonces, podemos definir el modelo científico como una abstracción de algún sistema real. Y estos deben ser simples y realistas.

Desafortunadamente los modelos realistas raras veces son simples y los modelos simples raras veces son realistas. Es de conocimiento cuan difícil es realizar un modelo que represente de manera realista un suceso físico y de las dificultades y limitaciones del modelo matemático, pero esto, aún debe ser codificado en un lenguaje de programación y dicha traducción, del modelo matemático al computador, deja aún en mayor evidencia los resultados dados en la simulación por computadora.

2.1.2.1. Tipos de Simulación

Los tipos de simulación que se pueden efectuar se clasifican de la siguiente forma (Law y Kelton, 1991):

- *Simulación Discreta*: modelación de un sistema por medio de una representación en la cual el estado de las variables cambian en instantes de tiempos separados. En términos matemáticos el sistema sólo puede cambiar en instantes de tiempos contables.
- *Simulación Continua*: modelación de un sistema por medio de una representación en la cual las variables de estado cambian continuamente en el tiempo. Típicamente, los modelos de simulación continua involucran

ecuaciones diferenciales que determinan las relaciones de las tasas de cambios de las variables de estado en el tiempo.

- *Simulación Combinada Discreta-Continua:* modelación de un sistema por medio de una representación en la cual unas variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo y otras cambian en instantes de tiempos separados.
- *Simulación Determinística y/o Estocástica:* una simulación determinística es aquella que utiliza únicamente datos de entrada determinísticos, no utiliza ningún dato de entrada azaroso. En cambio, un modelo de simulación estocástico incorpora algunos datos de entrada azarosos al utilizar distribuciones de probabilidad.
- *Simulación Estática y Dinámica:* la simulación estática es aquella en la cual el tiempo no juega un papel importante, en contraste con la dinámica en la que si es muy importante.
- *Simulación con Orientación hacia los Eventos:* modelaje con un enfoque hacia los eventos, en el cual la lógica del modelo gira alrededor de los eventos que ocurren instante a instante, registrando el estado de todos los eventos, entidades, atributos y variables del modelo en todo momento.
- *Simulación con Orientación hacia Procesos:* modelaje con un enfoque de procesos, en el cual la lógica del modelo gira alrededor de los procesos que deben seguir las entidades. En cierta forma, es un modelaje basado en un esquema de flujograma de procesos, en el que se hace un seguimiento a la entidad a través de la secuencia de procesos que debe seguir.

A partir de estas clasificaciones, se concluye que la mayoría de los simuladores de incendios de vegetación realizan el tipo de Simulación Determinística y/o Estocástica partiendo de la base causa-consecuencia. Por lo tanto, una serie de condiciones geográficas, climáticas y ambientales, traducidas como variables de entrada determinan el comportamiento del fuego dentro del modelo y el gran problema es que dichas variables son exógenas al modelo con una gran dificultad para medirlas, además de modificarse dinámicamente durante el transcurso del incendio.

2.1.2.2. Simuladores de Propagación de Incendios de Vegetación

Los sistemas de simulación de incendios operan a distintas escalas de tamaños para construir el mapa de propagación y se dividen en procesos locales y globales. Los simuladores cuando trabajan a escala global consideran al incendio como un todo o bien una unidad geométrica para representar la línea de fuego en el espacio y tiempo. Asimismo, cuando operan a escala local utilizan puntos o celdas para construir la línea de fuego. La forma de calcular la propagación a nivel local puede ser de manera distinta como muestra la Figura 2.2. En el modelo de propagación elíptico, para cada punto se construye una elipse calculando de esta manera la

excentricidad de la misma, para determinar el sentido de la propagación para el siguiente punto. En el modelo de propagación por celdas, se puede ver como cada celda determina en qué momento la celda vecina es alcanzada por el fuego. Una vez procesado todo el modelo local el sistema integra todos los procesos para construir el nuevo frente de fuego (Ver figura 2.2).

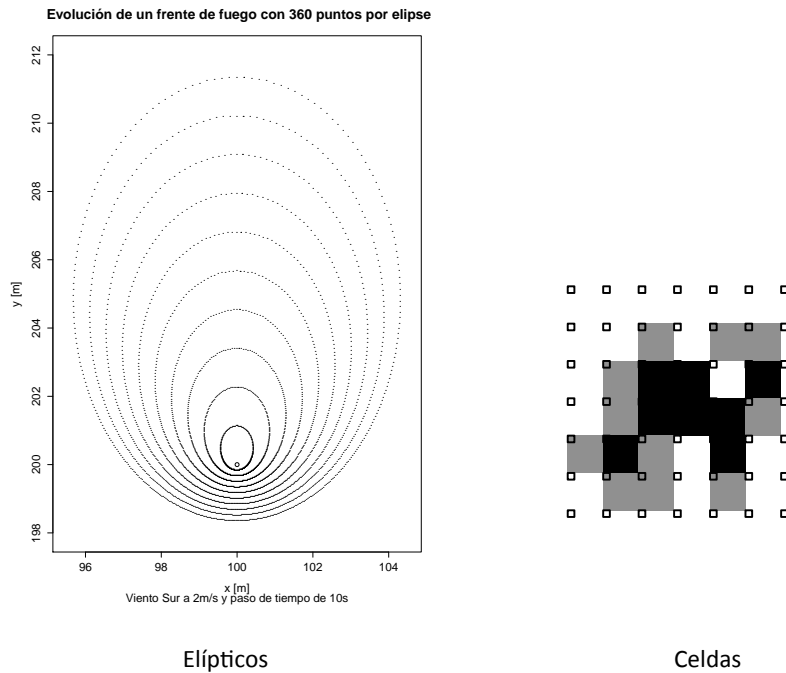


Figura 2.2. Modelos de Propagación que se emplean en el campo de la computación.

Los simuladores de incendios deben considerar tres tipos de parámetros de entradas:

- Los *Iniciales*, donde se especifican las coordenadas de dónde se inició el incendio o bien cuál es la situación actual del mismo.
- Los *Estáticos*, son aquellos que no varían en el tiempo y generalmente están almacenados en bases de datos como los concernientes a la topografía del terreno y la vegetación.
- Los *Dinámicos*, que varían en el transcurso del tiempo y son más difíciles de medir.

Por lo tanto, todos estos tipos de parámetros deben ser procesados en los modelos de propagación dentro del simulador, para luego dar una salida indicando un nuevo mapa de la línea de fuego. La Figura 2.3 muestra cuál sería la estructura básica de un simulador de incendios forestales, donde los tres tipos de parámetros comentados se reflejan en la columna denominada Tipo. Las tres columnas restantes (Entrada, Modelos de Propagación y Salida) reflejan la forma en que el simulador trabaja y se describen a continuación:

- *Parámetros de entrada:* aquí se ingresa toda la información que concierne al ambiente físico y ambiental, en el cual se desarrolla el incendio, el lugar donde se inició el fuego (línea de fuego inicial), el tipo de vegetación, la topografía del terreno, las condiciones climatológicas, etc.
- *Modelos de Propagación:* El simulador procesa la información aplicando los parámetros a cada entidad local para luego integrarlos en un modelo global de propagación.
- *Salida:* El simulador construye el nuevo frente de fuego para el instante de tiempo $t + \Delta t$.

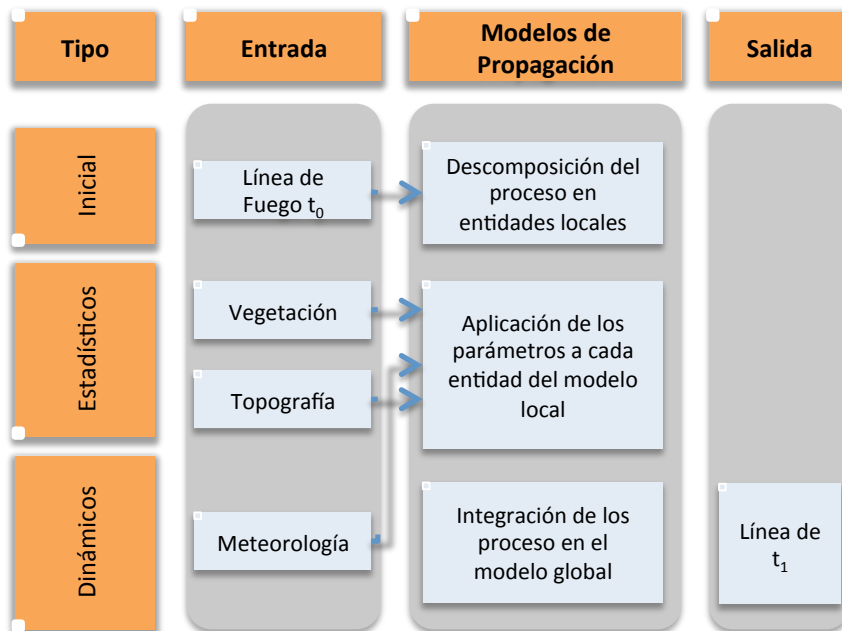


Figura 2.3. Estructura básica de un simulador de fuego.

Algunos de los simuladores de fuego más destacados y de mayor uso en la actualidad, están basados en modelos de propagación de Rothermel (Rothermel, 1983), que es un modelo matemático semi-empírico. El citado modelo está basado en correlaciones empíricas, obtenidas a partir de datos experimentales, y aunque los resultados de este tipo de modelos son fiables, tienen un rango limitado dentro de las condiciones específicas en que fueron efectuados los experimentos.

2.2. SIMULADOR FARSITE

2.2.1. Introducción al software FARSITE

FARSITE (Finney, 1998) es un software de acceso gratuito (FARSITE), que junto a su adaptabilidad, son éstos motivos de su popularidad. La versión con la que se trabajó es la 4.1.055 del 27 de mayo, 2008. Los pasos previos a una simulación están representados en el diagrama de flujo de Figura 2.4. Los pasos mínimos para conseguir una simulación pueden resumirse en dar un paisaje para construir un proyecto con las condiciones del clima y el tiempo. Para comenzar se puede utilizar como datos de entrada los archivos que trae el mismo software.

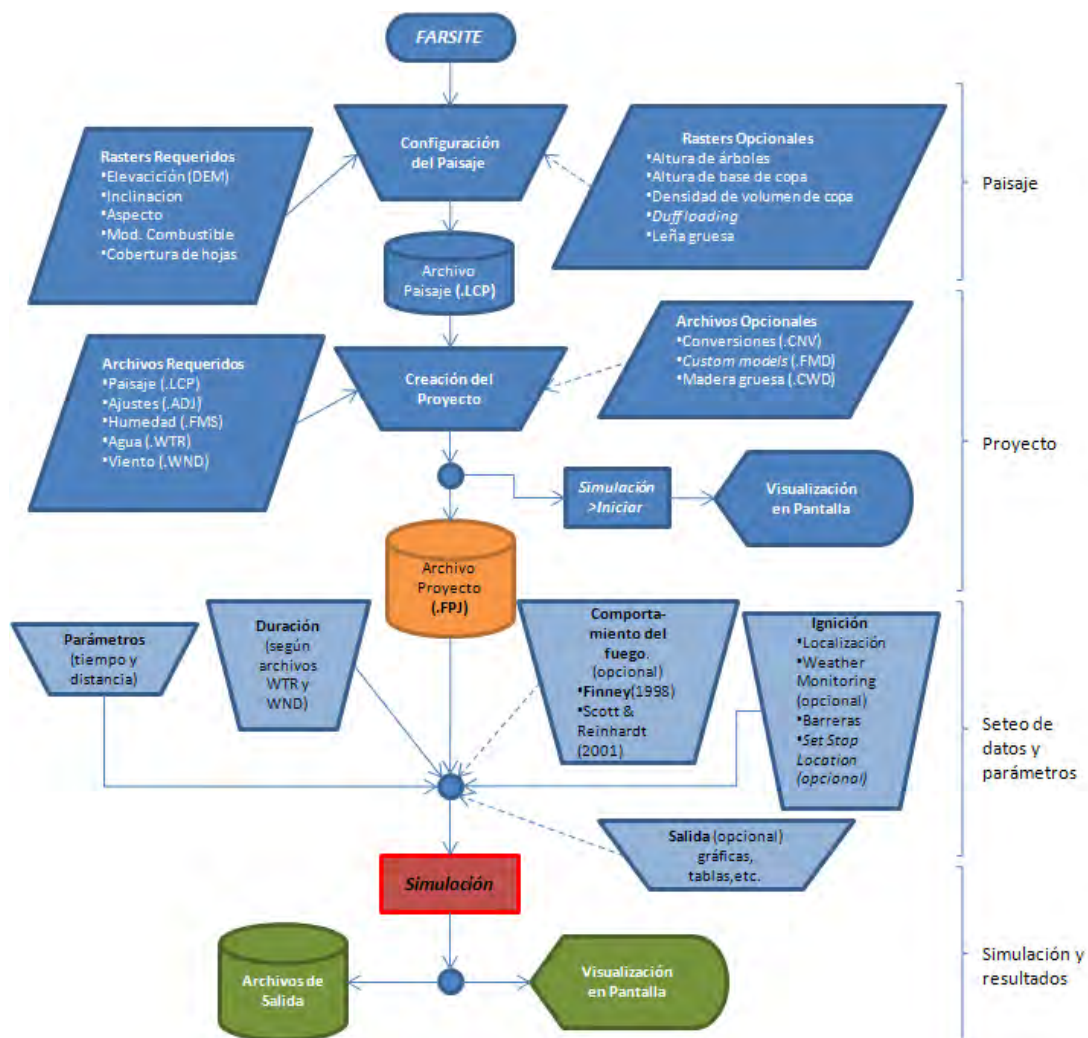


Figura 2.4. Diagrama de las etapas previas a una simulación en FARSITE.

2.2.1.1. Paisaje

Los aspectos del paisaje se guardan en un archivo de extensión (.LCP). Lo conseguimos haciendo [**Input>Landscape Utilities>Generate Landscape File (.LCP)**] y en la ventana que se despliega seleccionamos los archivos que FARSITE trae en su paquete.

- ash-elev.asc (elevación del terreno, es el DEM³)
- ash-slope.asc (pendiente, se construye mediante el DEM)
- ash-aspect.asc (orientación de las pendientes, también sale del DEM)
- ash-fuel.asc (es el mapa de combustibles)
- ash-canopy.asc (cobertura de hojas)

En la carpeta [**FARSITE 4/Ashley**] se puede acceder a estos archivos. Los tres primeros son información obligatoria de mapas para que la simulación sea factible. Si no se dispone de los mapas de combustible (fuel) y cobertura de hojas (canopy), pueden configurarse como datos constantes en todo el mapa. Es importante grabar esta información haciendo [**Save File (.LCP)**] y luego [**OK**]. Si nos falta alguna de estas entradas no será posible grabar el archivo LPC.

2.2.1.2. Proyecto

El paso siguiente es crear el archivo de proyecto (.FPJ). Accedemos a [**Input>Project Input**] y debemos ingresar mínimamente la siguiente información

- Landscape File (.LCP)
- Aadjustments (.ADJ)
- Moistures (.FMS)
- Weather Files (.WTR)
- Wind Files (.WND)

Landscape File

El archivo de extensión LCP (**Landscape File**) ya figura seleccionado porque es el paisaje que configuramos con anterioridad.

Adjustments

Los factores de ajustes (**Adjustments**) para la velocidad se generan automáticamente pulsando el botón [**New.FMS File**] en la ventana **Spread Rate Adjustment Factors**. Esto genera un factor unitario para cada modelo (Anderson,

³ Del inglés *Digital Elevation Model*, que en español es *modelo de elevación digital*. Consisten en una representación digital del terreno, es decir que es un modelo digital de la superficie representada.

1982). Un factor uno de ajuste corresponde a no cambiar la velocidad de propagación del frente de fuego (ROS) dada por la ecuación de Rothermel (1972) ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1.
Ajustes de los modelos en FARSIE.

Model#	Adj
01	1.000
02	1.000
03	1.000
.	.
.	.
.	.
256	1.000

En el caso de la Tabla 1.1 los factores son iguales a la unidad pero también pueden ser distintos a uno, por ejemplo:

- 1.000: mantiene la velocidad de propagación original.
- 2.000: el doble
- 0.500: la mitad
- 0.250: la cuarta parte

Con los ajustes, cada modelo, queda multiplicado por un factor distinto.

Moistures

La humedad inicial del combustible (**Moistures**) puede ser generada automáticamente con valores por defecto. Al pulsar [**New.FMS File**] en la ventana **Initial Fuel Moistures** se genera una lista para cada modelo de combustible (puede ser modificada) y tiene el aspecto de Tabla 2.2.

Tabla 2.2.
Humedad inicial del combustible.

Modelo#	1hr	10hr	100hr	LH (hierba viva)	LW (leña viva)
01	5	8	12	100	100
02	5	8	12	100	100
03	5	8	12	100	100
.
.
.
265	5	8	12	100	100

Los modelos de combustible (**Modelo#**) del 1-13 están relacionados a los modelos de fuego estándares (Anderson 1982) y los valores entre 90-219 están reservados para el conjunto expandido de modelos de combustible estándar (Scott y Burgan, 2005). Los números de modelos de combustibles de 14 a 89 son para los modelos personalizados en FARSITE.

Weather Files

El archivo **Weather** (.WTR) contiene observaciones periódicas de la temperatura, humedad y precipitaciones. Esta información se ingresa como en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3.
Datos almacenados en el archivo (.WTR).

Mes	Día	Precipitación	Hora en que la temperatura es mínima y máxima		Temperatura mínima y máxima		Humedad [0-99]%		Elevación donde se tomo el dato	Duración de la precipitación
			AM	PM	TLo	THi	HHi	HLo		
07	22	00	0500	1500	40	80	60	20	0000	.
07	23	00	0500	1500	40	80	60	20	0000	1830 2000
.
.
.

La información de la Tabla 2.3 se genera automáticamente con **[New .WTR File]** o puede ser ingresada con los datos específicos en el cuadro de texto. Utilizando el botón **[Duplicate Last Day]** es posible duplicar la línea anterior, esto facilita el ingreso de datos al archivo (.WTR) en el cuadro de texto.

Wind Files

Como última entrada (imprescindible) tenemos la dirección e intensidad de los vientos. Este dato dinámico es uno de los que requiere mayor frecuencia de muestreo. Es uno de los factores de gran importancia como la inclinación del terreno y los mapas de combustibles. Las entradas se realizan mediante un archivo de extensión (.WIND) en la forma como en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4.
Dirección e intensidad de los vientos y cobertura de nubes en función del tiempo. En el caso de la tabla las mediciones se realizan cada 4 horas. La simulación es muy sensible a este dato, si la frecuencia de muestreo aumenta durante cada día es posible mejorar los resultados.

Mes	Día	Hora	Velocidad en km/h	Dirección en grados	Cobertura de Nubes [0-100]%
MO	DY	HR	SPD	DIR	CL
07	22	0000	13	225	00
07	22	0400	12	225	00
07	22	0800	13	225	01
07	22	1200	13	225	01
07	22	1600	15	225	03
07	22	2000	15	225	05
07	23	0000	16	226	06
07	23	0400	15	225	06
07	23	0800	17	226	07
07	23	1200	17	226	08
07	23	1600	18	227	10
07	23	2000	17	226	05
.
.
.

Aquí también es posible generar los datos con valores predefinidos pulsando el botón **[New .WTR File]**. En esta misma ventana (Wind Stream Editor) existe una sección denominada **[Speed]** donde es posible generar un valor (positivo o

negativo) y ese mismo, utilizarlo para sumar a la velocidad. De la misma manera ocurre con la sección denominada **[Direction]** donde es posible definir un ángulo y sumar ese ángulo a todas las líneas del archivo. Para ambos casos anteriores existe un botón denominado **[Set]** que permite volver a los valores estándares predeterminados.

Burning Period

En los períodos nocturnos el contenido de humedad aumenta en el combustible. FARSITE no es capaz de detectar el cese de fuego en estas condiciones. Aquí se permite desactivar la simulación en períodos de baja actividad de la propagación del fuego Tabla 2.5.

*Tabla 2.5.
Periodos en que la simulación se mantiene activa.*

<i>Mes</i>	<i>Día</i>	<i>Hora de comienzo</i>	<i>Hora de finalización</i>
MO	DY	StartHr	EndHr
07	22	0000	2400
07	23	0800	2400
07	24	0800	2400
07	25	0800	2400

2.2.1.3. Parámetros

Una vez terminado y grabado el archivo de proyecto debemos definir la resolución temporal y espacial de la simulación. Lo hacemos entrando a **[Model>Parameters]**. Si no realizamos este paso no será posible realizar la simulación.

Paso de tiempo (Time Set)

Este parámetro (también llamado paso de tiempo actual) determina los intervalos de tiempo de cada paso en el avance de la simulación. Es importante tener en cuenta que para fuegos rápidos es preferible utilizar pasos de tiempo cortos para minimizar el error del cálculo numérico 2.6.

*Tabla 2.6.
Determinación del intervalo de tiempo en función al tipo de fuego.*

Tipo de fuego	Combustibles	Paso del tiempo (Time Set)
Superficie	madera	~30 a 120+ minutos
Superficie	maleza, pasto seco	~10 a 20 minutos
Superficie extrema o torching/crowning (antorchas máximas)	todos	~5 a 10 minutos

Pasos de tiempo visible (Visible Time Steps)

El *paso de tiempo visible* es siempre un múltiplo del *paso de tiempo actual* y es el intervalo de tiempo que se usa para visualizar en pantalla a los frentes de fuego. Si utilizamos para visualizar la misma resolución temporal que en el paso de tiempo actual, puede ocurrir que los frentes se junten mucho en la pantalla y no se pueda diferenciar las líneas perimetrales del frente de fuego en los distintos tiempos. Esto último sucede cuando los fuegos son lentos o el paso de tiempo actual empleado es pequeño.

Resolución Perimetral (Perimeter Resolution)

La resolución perimetral es la resolución del frente de fuego. Aquí se define el número máximo de puntos a utilizar en el perímetro de fuego. La resolución que se elige, pone en compromiso el tiempo de simulación y la calidad de los resultados. Si el raster que se utiliza es de baja resolución espacial, de nada sirve trabajar con una resolución perimetral por debajo del tamaño del pixel. Esto último, sólo incrementa el tiempo de simulación en forma innecesaria. Caso contrario, si distanciamos demasiado los puntos que forman los polígonos en los frentes de fuego, se producirá un error en la cantidad de área quemada (Figura 2.6).

2.2.1.7. Start/Restart

Para comenzar con la simulación ejecutamos [**S**imulate>**S**tart/Restart] o bien, el botón con las banderillas que figura en la barra de herramientas. Y comienza la simulación dibujándose en pantalla los polígonos de fuego (Figura 2.7). Existe la posibilidad de hacer interrupciones usando [**S**imulate>**R**esume/Suspend]

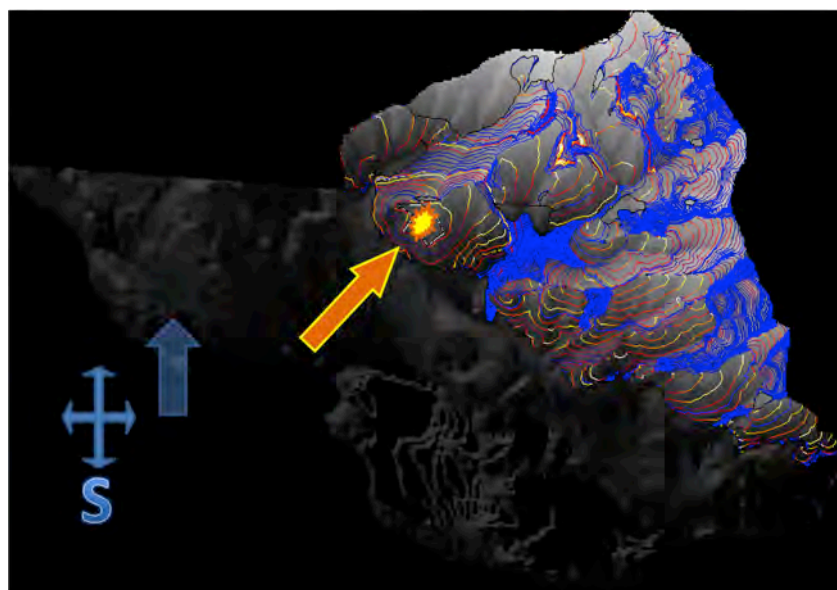


Figura 2.7. Imagen de elevación con los frentes de fuego en distintos momentos de la simulación. Representación 2D del mapa modelo que viene incorporado en el software FARSITE. Se realizó un simulacro de fuego forestal durante 15 días con un viento sur de 5km/h. La flecha naranja indica el punto de ignición, que corresponde al primer polígono que rodea la estrella amarilla. La flecha azul da la dirección del viento. En el mapa también se visualiza la velocidad de propagación del fuego, ROS (Rate Of Spread). De menor a mayor la ROS esta dada por los frentes de fuego de color: azul, rojo y amarillo respectivamente.

2.2.1.8. Gráficos y Tablas

Se generan como datos de salida gráficos y tablas. En los gráficos tenemos áreas quemadas en función del tiempo (Figura 2.8), perímetros de fuego en función del tiempo (Figura 2.9) y velocidad de propagación del frente de fuego en función de la energía por unidad de área (Figura 2.10).

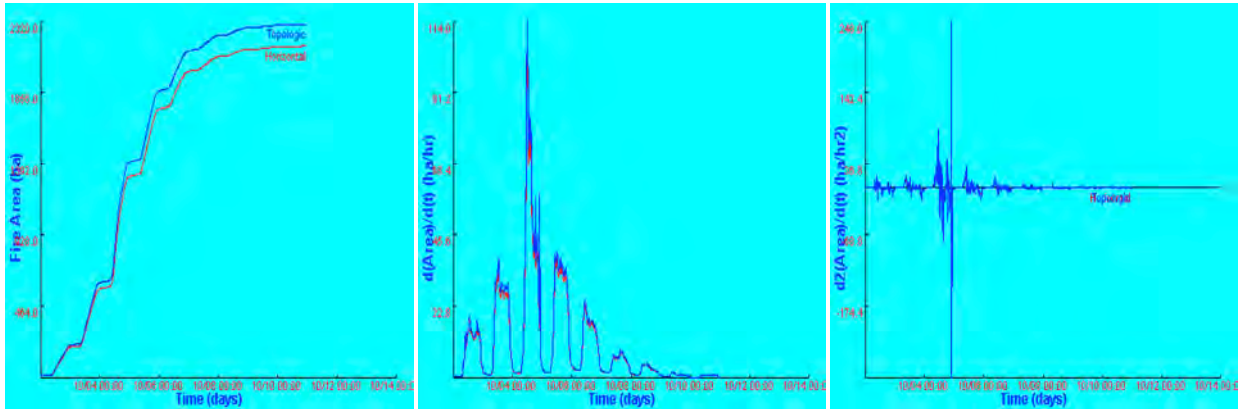


Figura 2.8. Áreas quemadas en función del tiempo, primera derivada del área en función del tiempo y segunda derivada del área en función del tiempo.

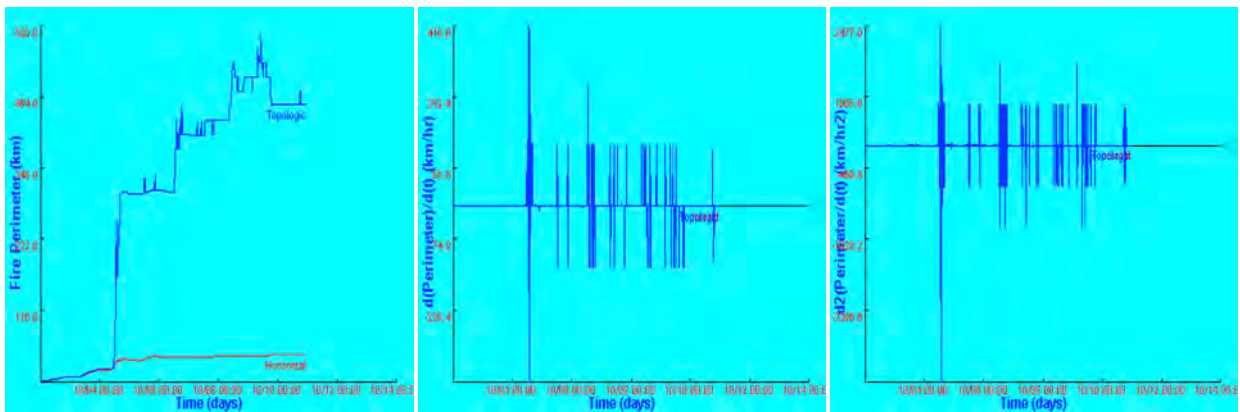


Figura 2.9. Perímetros en función del tiempo, primer derivada del perímetro en función del tiempo y segunda derivada del perímetro en función del tiempo.

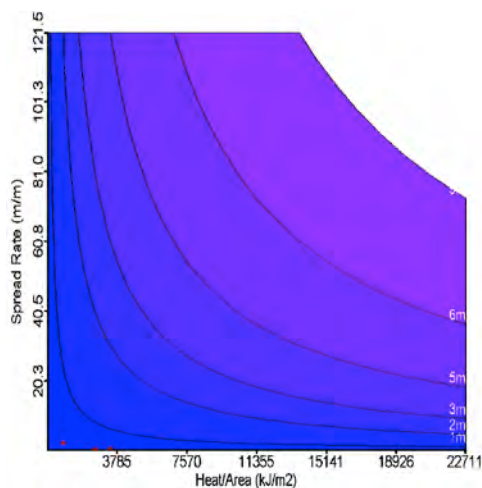


Figura 2.10. ROS. Velocidad de propagación del frente [m/min] en función de la energía por unidad de área [kJ/m²]. Cada curva descendente que encierra áreas en distintos colores representa un determinado largo de la llama. FARSITE situará en esta gráfica puntos aislados que determinan la ROS alcanzada en distintas etapas de la simulación. En esta gráfica, los puntos son apenas visibles cerca del origen de coordenadas. La velocidad de propagación del frente de fuego (ROS) y la energía por unidad de área son dos de las variables más importantes en la simulación de los incendios.

2.2.2. Simulación en un Escenario de Italia

En primera instancia se realizaron, a modo de herramientas para el simulador, escenarios de paisajes ficticios con condiciones homogéneas de combustible, vientos, cobertura de hojas, pendiente y orientación del terreno. Con este fin y como una etapa de entrenamiento, se construyeron “*rasters controlados*”⁴ que sirvieron como escenarios de prueba.

2.2.2.1. Pruebas con Vientos

Para hacer pruebas con la variable viento, se realizaron *rasters homogéneos*. Esto permite visualizar con sencillez los cambios sin confundir con los generados por otras variables, como lo son la elevación, la pendiente, el combustible, etc. El paisaje estuvo compuesto por cinco matrices de 100×100, cuyos elementos, en cada caso, son los de Tabla 2.7. En la Tabla 2.8 se puede ver la configuración del proyecto.

Tabla 2.7.
Configuración con valores constantes de los 5 rasters.

Configuración del Paisaje	
Elevación	2m
Aspecto	0.00000000°
Inclinación	0.00000000°
Combustible	2
Cobertura de hojas	2
Latitud	0°

Tabla 2.8.
El proyecto fue configurado de tal manera que los cambios del viento sean evidentes. Prestar atención porque esta tabla llama a la anterior (2.7) y a las siguientes tablas (2.9 – 2.11).

Configuración del Proyecto	
Paisaje homogéneo	(ver Tabla 2.7)
Ajustes	1 (sin cambios de ROS para todos los modelos)
Humedad del Combustible	(ver Tabla 2.9)
Condiciones meteorológicas	
Agua	(5 días, ver Tabla 2.10)
Viento	SO-30km/h-Sin Nubes (ver Tabla 2.11)

⁴ Matrices con valores constantes para simular homogeneidad y predecir con facilidad el comportamiento del simulador.

Tabla 2.9.

Humedad del combustible en 1,10 y 100 horas. Pusimos los mismos valores para todos los modelos, aunque en la simulación sólo se utiliza el modelo de combustible 2. LH y LW son respectivamente hierba y leña vivas.

Humedad del combustible				
1hr	10hr	100hr	LH	LW
5	8	12	100	100

Tabla 2.10.

Se consideraron días sin lluvia y a todos los días se pusieron las mismas condiciones de la tabla.

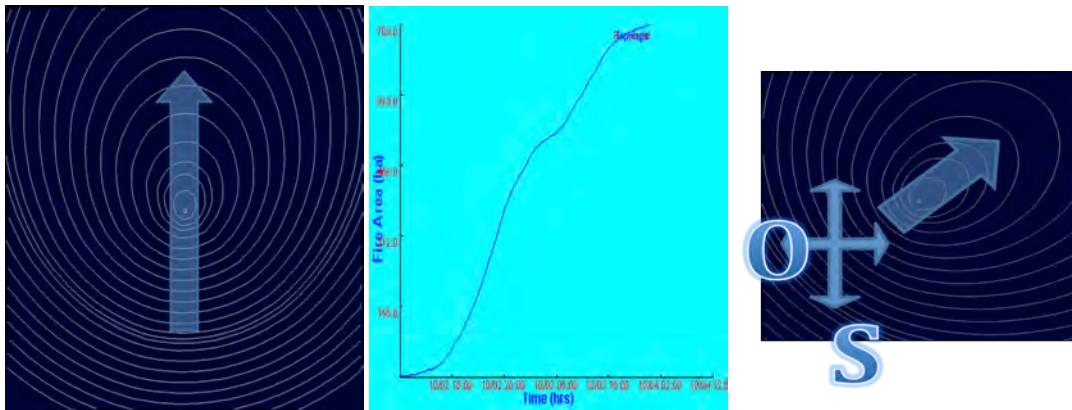
Condiciones meteorológicas del Agua								
RN	AM	PM	TLo	THi	Hhi	Hlo	ELV	(rt1 rt2)
00	0500	1500	40	80	60	20	000	-

Tabla 2.11.

La velocidad del viento es constante y con la misma dirección SO en el transcurso de todo el día. Todos los días siguen el mismo esquema de vientos constantes y sin nubes.

Condiciones meteorológicas			
Viento y Nubes			
[h], [km/h], [grados] y [%].			
HR	SPD	DIR	CL
0000	30	225	00
0400	30	225	00
0800	30	225	00
1200	30	225	00
1600	30	225	00
2000	30	225	00

La ignición se efectuó en el centro del mapa y como resultado se obtuvo la Figura 2.11. En ella se puede observar los frentes de fuego en distintos intervalos de tiempo. Gracias a las condiciones homogéneas de paisaje y meteorológicas se pone en evidencia las formas elípticas de la propagación de incendio (Finney, 1998), la dirección y la velocidad del viento (en forma cualitativa) y la periodicidad del cambio de humedad del combustible a medida que transcurre cada día.



Datos generados en Febrero del 2012 con FARSITE versión 4.1.055.

Figura 2.11. *Izquierda*, frentes de fuego en más de un día con intensidades de 30km/h y dirección Sur (180°). La dirección del viento se mide a partir de la posición Norte y en sentido horario. **Centro**, el agrupamiento de los frentes de fuego es debido al cambio de humedad en cada día. **Derecha**, dirección SO (Sur Oeste) correspondiente a 225°.

2.2.2.2. Pruebas con distintos Modelos

Se hicieron pruebas con distintos modelos de combustibles para conocer sus comportamientos. La ignición fue un frente de fuego a lo largo de la imagen de norte a sur. Las condiciones fueron las de paisaje llano, sin viento y con combustible homogéneo en toda la región. Se realizaron 13 simulaciones, una por cada modelo de combustible de Anderson. En Anexo 6 se colocaron los resultados. Con esos resultados fue posible ver la respuesta de cada modelo de combustible para las pruebas que se harían luego.

2.2.2.3. Configuración del Paisaje

Para la confección del paisaje se utilizó una porción del sur de la región de la *Basilicata, Italia*; la Tabla 2.12 da información al respecto. En este lugar, el 22 de julio de 2007 ocurre un incendio que termina quemando aproximadamente 200ha. En ese mismo año se obtuvo una imagen satelital de la zona después del incendio. Ver Figura 2.12 (mapa de combustibles); Figura 2.13 (elevación, pendiente, aspecto y cobertura de hojas) y Figura 2.15 debajo (Imagen Aster⁵ en infrarrojo de campo quemado).

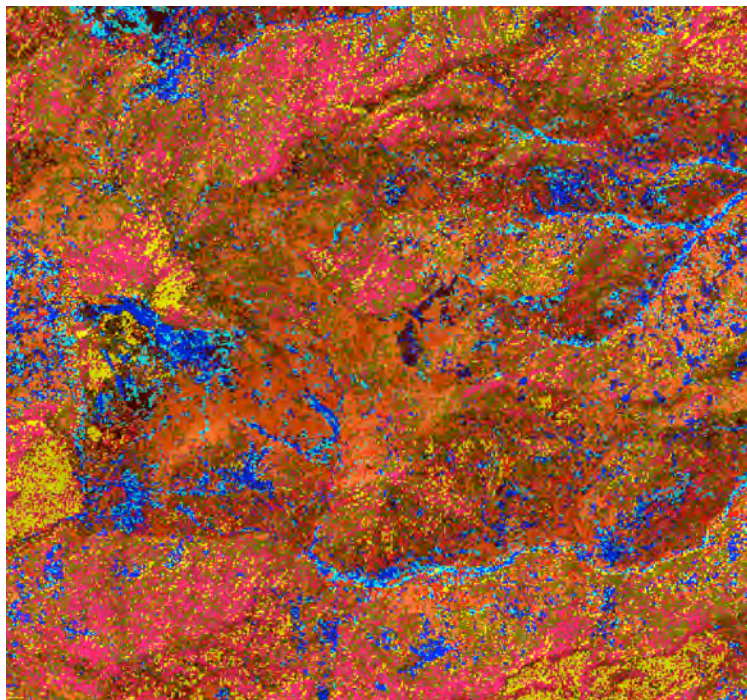
⁵ ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI.

Tabla 2.12.

Datos del Recorte

Número de columnas	550
Número de filas	512
Esquina x	581079.375 UTM
Esquina y	4433353.125 UTM
Tamaño del pixel	28.5m

Lat. 40.107° (FARSITE sólo acepta 40°)

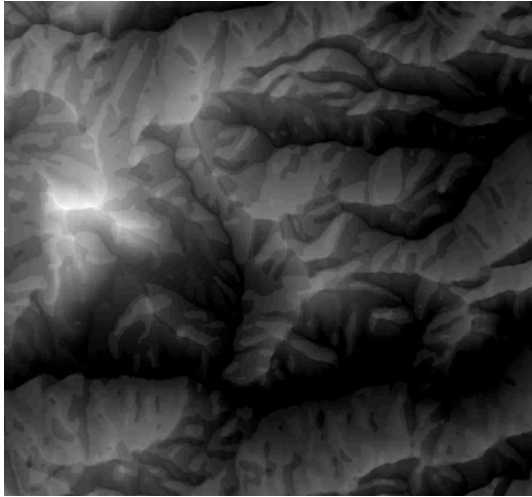


Modelo	Color
No Dato	Negro
1	Azul
2	Amarillo
3	Rojo
4	Celeste
5	Naranja
6	Rosa fuerte
7	Marron Claro
8	Marron Oscuro

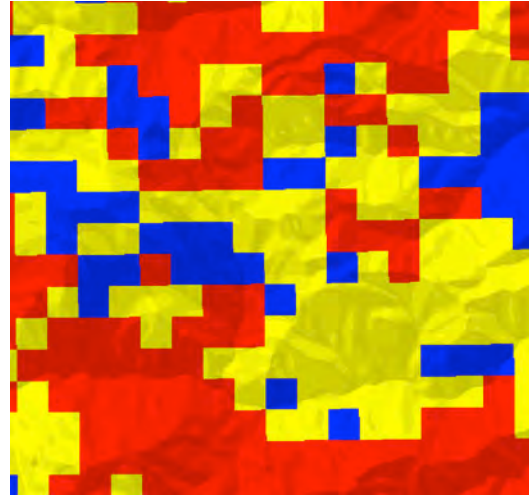
Datos suministrados en IMMA-CNR Febrero del 2012.

Figura 2.12. Mapa de combustible con un total de 8 modelos de combustibles en la zona (Img. Landsat res. 28.5m).

El *mapa de combustible* (Figura 2.12) que se utiliza para la confección del paisaje es una primer aproximación a la vegetación que pudo haber en ese momento de julio del 2007. Aquí comienzan a sumarse los errores de predicción en la simulación a causa de esta falta de precisión.



i. Elevación.



ii. Cobertura de hojas.



iii. Pendiente.



iv. Aspecto.

Figura 2.13. (i)**Elevación** del terreno (DEM). (Res.72m llevada a 28.5m). Las imágenes (iii) y (iv) de **Pendiente** y **Aspecto** respectivamente se construyen a partir de la elevación. (ii) **Cobertura de hojas** en el terreno en tres colores. (Res. 1km llevada a 28.5m). (Todas las imágenes fueron llevadas a la resolución espacial del mapa de combustible, 28.5m).

2.2.2.4. Configuración del Proyecto

En la configuración del proyecto es posible que mucho de los factores considerados como condiciones iniciales hayan sido distintos en el momento del incendio de julio del 2007. Esta es una etapa de prueba y los valores que serán utilizados aquí, son una aproximación a los datos reales en el momento del incendio. Se sabe que los vientos que soplan en la región son generalmente SO (225°) y probablemente en el momento del incendio soplaban con intensidad *moderada-intensa* (ver Tabla 2.13). Por este motivo se consideraron vientos que soplaban constantes en todo ese período con una intensidad de 25km/h.

Tabla 2.13.

Los valores utilizados oscilan entre vientos moderados o moderados-fuertes.

Intensidad Cualitativa de Vientos	
Velocidad [km/h]	Intensidad
<10	débil
10-30	moderado
>30	intenso

En los ajustes de modelos de combustibles no se hicieron cambios del ROS (Tabla 2.14), esto es, se mantuvieron constantes las velocidades de propagación del frente de fuego para cada combustible⁶. Por tanto en la simulación se utilizan los modelos como los define Finney (Finney, 1998). Naturalmente, no serán exactamente los mismos modelos de combustibles de la región de la Basilicata en Italia, lo que agrega más errores a la simulación.

Tabla 2.14.

Datos de entrada para la configuración del proyecto. Prestar atención porque esta tabla llama a Tablas 2.9; 2.10 y la próxima 2.15.

Configuración del Proyecto	
Paisaje	<i>(ver Configuración del Paisaje)</i>
Ajustes	1.000 (sin cambios de ROS para todos los modelos)
Humedad del Combustible	<i>(ver Tabla 2.9 de la primer simulación. Iguales condiciones)</i>
Condiciones meteorológicas	
Agua	(3 días, <i>ver Tabla 2.10</i>)
Viento	SO-25km/h-Sin Nubes (<i>ver Tabla 2.15</i>)

En las condiciones meteorológicas de agua y viento (Tabla 2.10 y 2.15) está definido también el tiempo en el cual se producirán los cambios una vez ejecutada la simulación.

⁶ Para cada uno de los modelos se coloca factor uno en el archivo de ajustes y con esto se respeta la ROS predeterminada para cada uno de los modelos definidos en FARSITE.

Tabla 2.15.

La velocidad del viento es constante y con la misma dirección SO en el transcurso de todo el día. Todos los días siguen el mismo esquema de vientos constantes y sin nubes.

Condiciones meteorológicas Viento y Nubes en un día. [h], [km/h], [grados] y [%].			
HR	SPD	DIR	CL
0000	25	225	00
0400	25	225	00
0800	25	225	00
1200	25	225	00
1600	25	225	00
2000	25	225	00

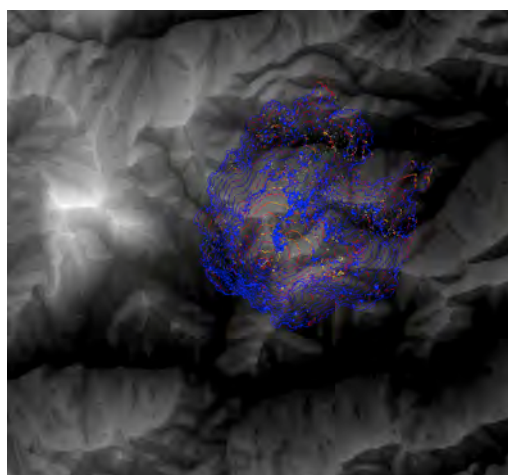
2.2.2.5. Simulación

Con estas configuraciones en el Proyecto se realizó la simulación del incendio dando como punto de ignición a las coordenadas de Tabla 2.17.

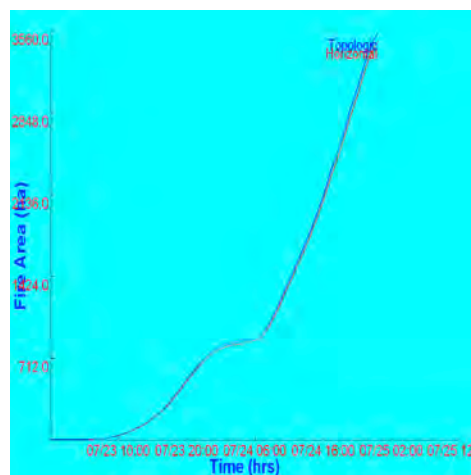
Tabla 2.16.

La ignición es un pequeño
polígono alrededor del punto
588896,7014E
4440148,4129N
(UTM)

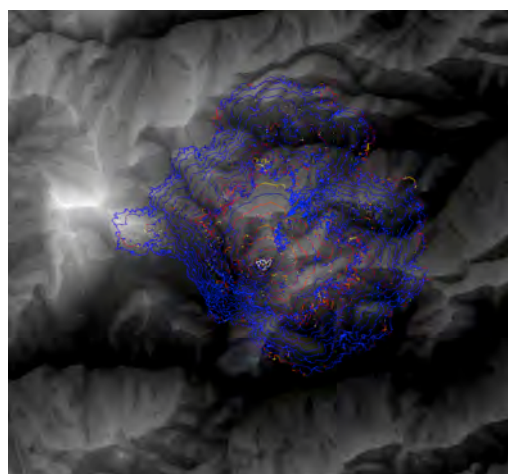
Sin tener en cuenta la intervención humana, los resultados pueden observarse en Figuras (2.14 i-ii). Comparando estos resultados con los de la banda 3 de una imagen *Aster* (Figura 2.15 abajo) obtenida un tiempo después del incendio, aquí se notan radicales diferencias. En primer lugar, quizás por un mapa de combustible inapropiado, el fuego no avanza suficientemente en la superficie de la ladera. Una manera de mejorar la calidad del combustible es modificar el archivo de ajuste (.ADJ). Sin más criterios que el sentido común, probamos ajustar duplicando el ROS para todos los combustibles. El resultado se muestra en Figuras (2.14 iii-iv). Este resultado es más adecuado a la realidad y ahora podemos comparar entre “lo quemado” (Figura 2.15 abajo) y “lo simulado” (Figura 2.14 iii). Como se ve en la simulación el fuego invade más superficie de la que esperábamos. Haciendo observaciones de la zona con mayor resolución espacial, pudimos observar la existencia de caminos y ríos, (Figura 2.15 arriba) que con mucha probabilidad jugaron el papel de *barreras cortafuegos* y dio acceso al cuerpo de bomberos para realizar *ataques* y combatirlo.



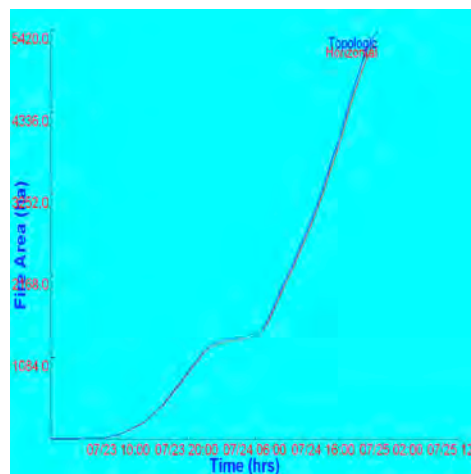
i. Elevación y fuego. Sin ajustes.



ii. Area quemada en función del tiempo de (i).



iii. Elevación y fuego. Duplicando la ROS.



iv. Area quemada en función del tiempo de (iii).

Figura 2.14. Diferencias en áreas quemadas al simular sin ajustes (i, ii) y con ajustes (iii, iv).

2.2.2.6. Barreras cortafuegos

En vista de posibles barreras cortafuegos en la región, al igual que con los vientos, hicimos algunas pruebas con los *mapas homogéneos* para observar como FARSITE se comportaba ante la presencia de estas barreras. Para ello, una vez terminado el proyecto y puestos en el paisaje los puntos de ignición, se accede a **[Attack>Ground Resources]**⁷. Pulsamos en **[New Crew]** y automáticamente se genera una lista en el cuadro de textos, a continuación y sin la necesidad de hacer modificación alguna, pulsamos el botón **[OK]**. Luego accedemos a **[Simulate>Modify Map>Add Barrier(s)]** e inmediatamente el cursor sobre el

⁷ Para simular una represión de fuego primero se debe probar una descripción de cuales son los recursos del terreno para combatir el fuego.

paisaje se convierte en una topadora, en este momento marcamos las barreras con el botón izquierdo del mouse. Con el botón derecho fijamos toda la zona de barrera y procedemos normalmente con los demás pasos para realizar una simulación (ver al principio del informe *Parámetros en Introducción al software FARSITE*). Los resultados de esta simulación de existencia de barreras en el terreno pueden verse en Figura 2.16.

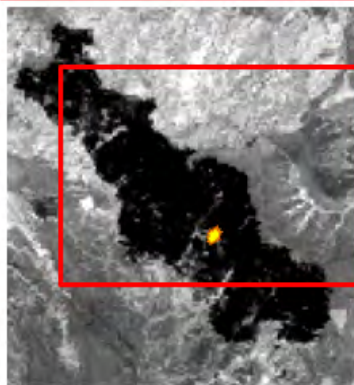
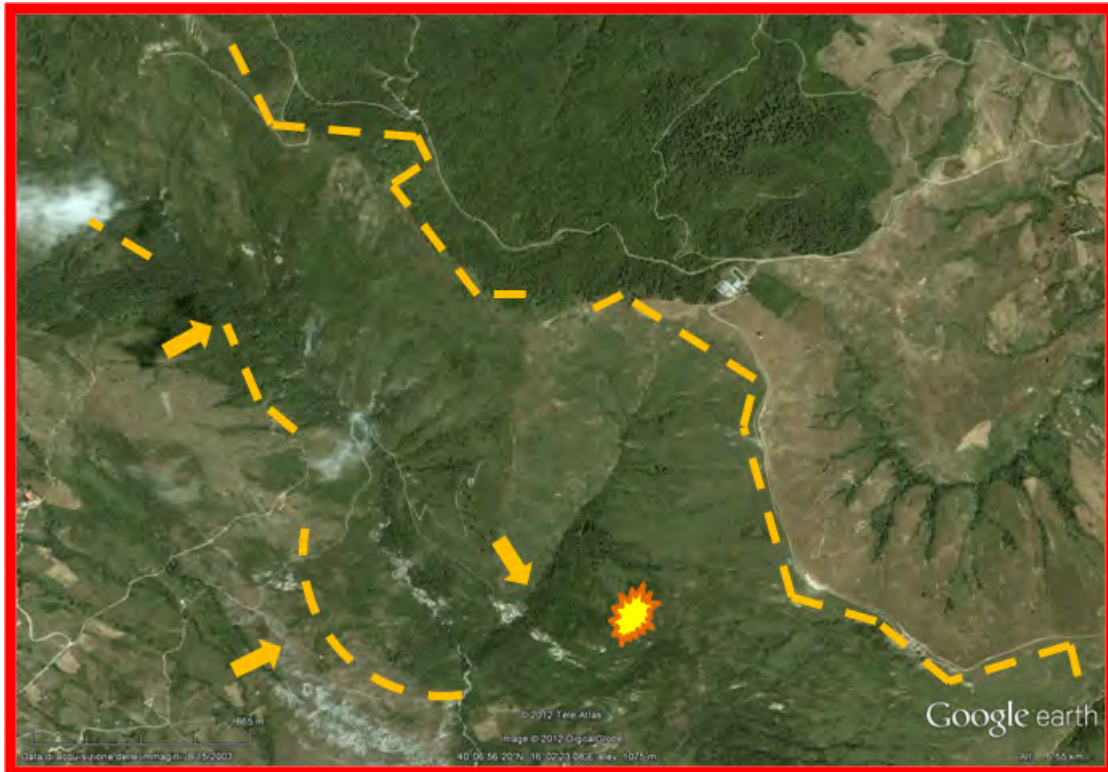


Figura 2.15. Arriba, imagen obtenida de Google earth. La estrella indica el punto de ignición que se corresponde a la del mapa Aster (abajo). Con líneas cortadas se indica con aproximación la zona hasta donde avanzó el fuego. Esta zona se corresponde al delineado de caminos, ríos o el ataque del hombre para poder extinguirlo. Abajo, imagen Aster banda 3 (0.8070 μm) de la zona afectada.

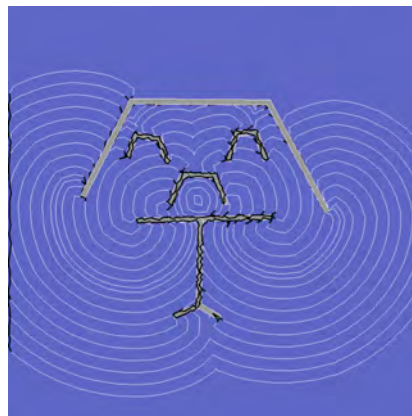


Figura 2.16. Izq. Polígono de ignición en el centro de la imagen y barreras de fuego dispuestas en los alrededores. El proyecto se corresponde a un paisaje homogéneo. Der. Configuración de los perímetros de fuego en cada paso-visible del simulador.

2.2.3. Resultados

Retomamos el proyecto con ajustes y realizamos simulaciones colocando barreras en el simulador. Las barreras fueron colocadas con alguna aproximación a las reales (dadas por ríos y caminos). El fin de esta etapa fue ver que era capaz de hacer el simulador más que intentar reproducir la realidad. Por ese motivo no se pretendió precisión en el cálculo de zonas quemadas. Como se puede ver en Figura 2.17 las barreras son determinantes en el aspecto perimetral de áreas quemadas.

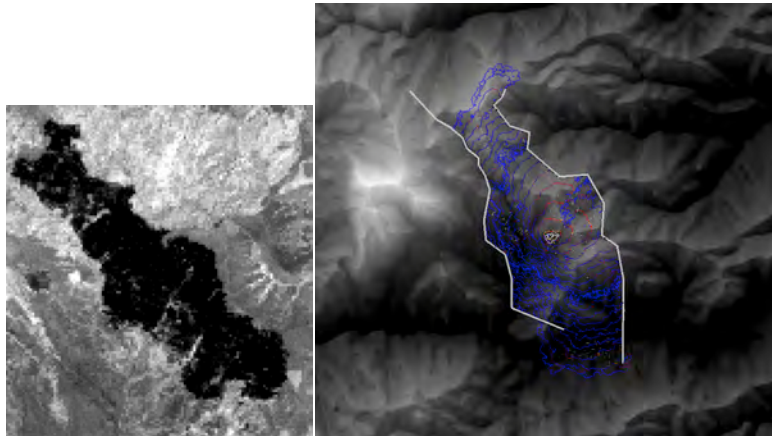


Figura 2.17. *Izq*, imagen Aster banda 3 ($0.8070 \mu\text{m}$) usada como referencia. El incendio del 22 de julio del 2007 cubrió un total de 200ha. *Der*, simulación realizada utilizando barreras para apreciar la variación de área quemada (los valores no son exactos, las barreras son representativas).

En Figura 2.18 se pueden ver otros resultados, en primer lugar hay curvas de la dependencia del perímetro de fuego con el tiempo e información de la ROS en función de la energía por unidad de área y el largo de las llamas activas en distintas etapas de la simulación. De acuerdo a los datos obtenidos podemos decir que

- La velocidad máxima de propagación del fuego (ROS) registrada en la simulación de este incendio es de $\sim 9\text{m}/\text{min}$, (aproximadamente medio kilómetro por hora).
- La energía máxima por unidad de área registrada $\sim 22710\text{KJ}/\text{m}^2$.
- Las llamas en la simulación alcanzaron una longitud de $\sim 3\text{m}$.

Otro resultado interesante es el número total de puntos de fuegos en cada instante de tiempo de la simulación. En Tabla de Anexo 1 se puede ver nuevos puntos de fuegos en distintos momentos. En el período final se llegan a detectar 85 puntos de fuegos en total.

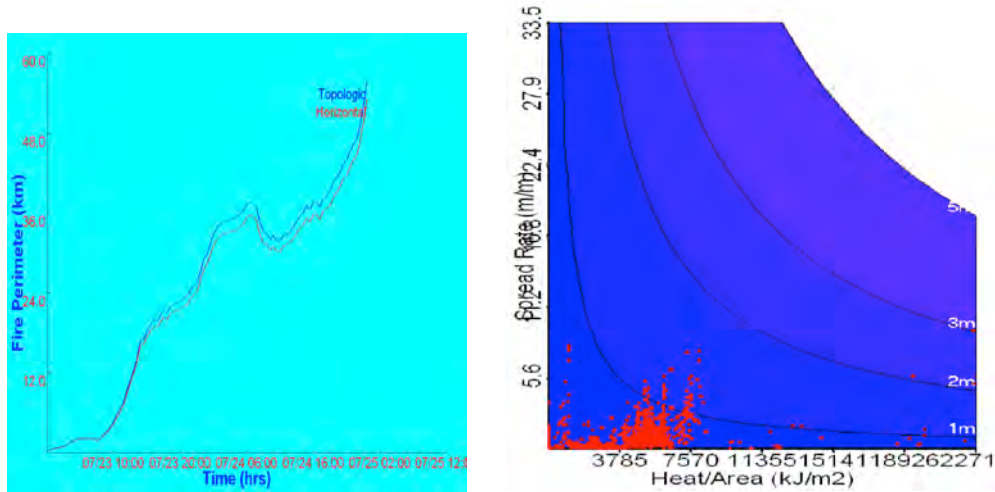


Figura 2.18. Gráficas que se obtienen como salida de FARSITE: Perímetro de fuego en función del tiempo (izq.); velocidad de propagación del frente de fuego en función de la energía por unidad de área (der.).

2.2.4. Mejoras en la Simulación

En la segunda etapa del trabajo se adquirió un mapa de elevación de terreno (*DEM*) con mayor resolución espacial, lo que permitió mejorar el raster de inclinación del terreno (*Slope*) y el de orientación de las pendientes (*Aspect*). También se consiguió un mapa de combustible mejorado con 8 modelos de combustibles y otro raster con cobertura de hojas también mas adecuado.⁸

Lamentablemente no disponemos de información climatológica precisa del período en el cual el incendio estuvo activo, pero se puede estimar dentro de cierto rango de patrones, como hicimos al principio del trabajo, por datos históricos de la región. También desconocemos la acción del hombre en el período de fuegos activos y el total de barreras de fuego que pudieron condicionar su comportamiento en distintas partes del paisaje.⁹

2.2.4.1. Configuración del Paisaje con Datos Mejorados

Se utilizó una porción del sur de la región de la *Basilicata, Italia* para los dos escenarios (Figura 2.19 y en los puntos de ignición 2.22). La información general de los cinco rasters se visualiza en Tabla 2.18. Estos son el *mapa de combustible* (Figura 2.20 y Tabla 2.17), la *elevación* del terreno, la *inclinación* del terreno, la *orientación* de las pendientes y la *cobertura de hojas* (Datos anteriores ver Figura 2.13).

⁸ Las pendientes, los vientos y el mapa de combustible afectan considerablemente el comportamiento del fuego.

⁹ Todas aquellas barreras menores por debajo de la resolución espacial del mapa de combustible como picadas angostas, pequeños arroyos, etc.

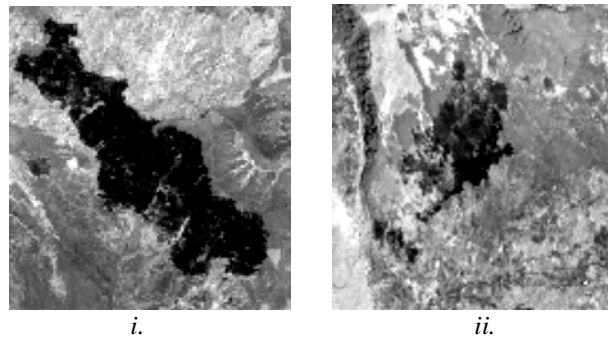


Figura 2.19. Áreas quemadas detectadas satelitalmente en cercanía a Latrónico. (i) Escenario I, img. Aster; y (ii) Escenario II, img. Aster.

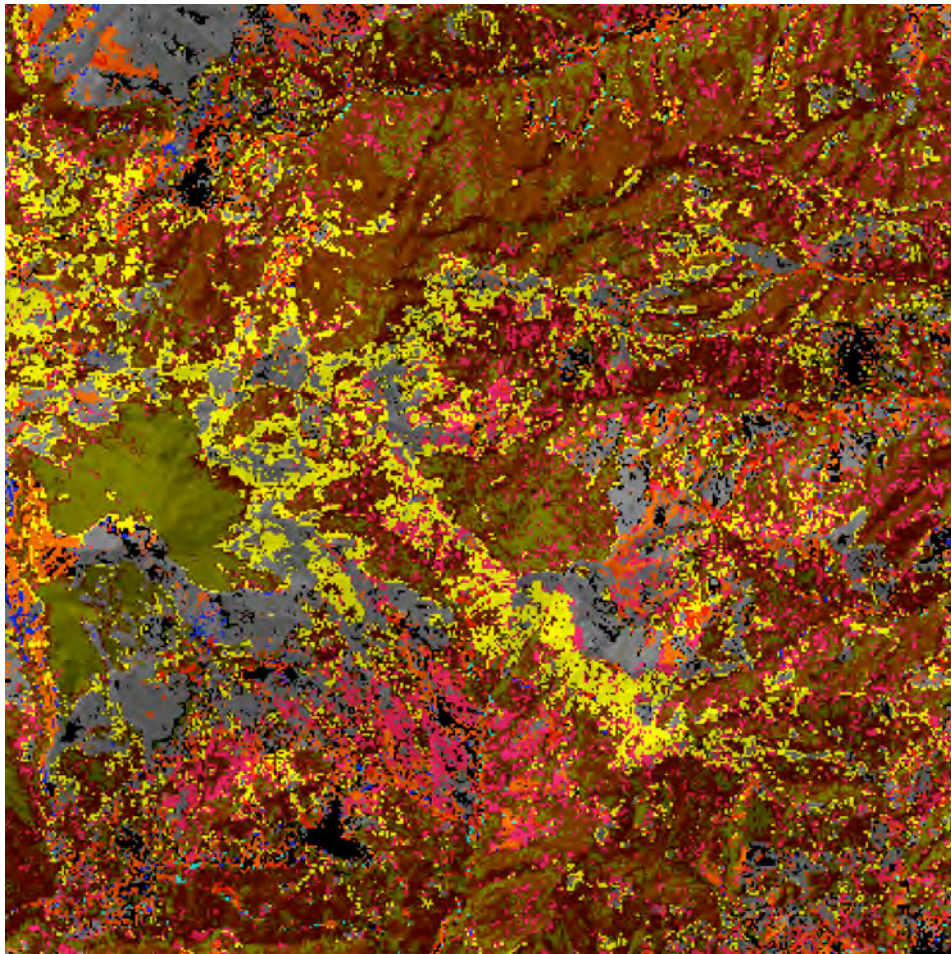


Figura 2.20. Mapa de combustibles de mejor calidad empleado en la segunda simulación del incendio vecino a Latrónico.

Tabla 2.17.

Número de datos, relacionados a los 13 modelos de Anderson y el color que le corresponde en el mapa anterior.

Modelo	Color
No Dato	Negro
1	Gris Claro
2	Azul
3	Amarillo
4	Rojo
5	Celeste
6	Naranja
7	Rosa Fuerte
8	Marrón Claro
9	Marrón.

Tabla 2.18.

Datos del Recorte

Número de columnas	400
Número de filas	400
Esquina x	582057.715 UTM
Esquina y	4436554.393 UTM
Tamaño pixel	30.0m

Lat. 40.107° (FARSITE sólo acepta 40°)

En esta oportunidad se mejoró la información de los rasters de entrada como se muestra en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19.

Mejoras en los rasters

<i>Mapa de Combustibles</i>	Mejor clasificacado en 30.0m
<i>Elevación</i>	es de 20.0 llevado a 30.0m (antes de 72 a 28.5m)
<i>Inclinación</i>	(es consecuente de la elevación)
<i>Orientación</i>	(es consecuente de la elevación)
<i>Cobertura de hojas</i>	no cambia (1.0km a 30.0m)

2.2.4.2. Creación de los Proyectos

Las condiciones iniciales no son del todo conocidas, como se mencionó anteriormente. La estimación de factores de tanta importancia como dirección e intensidad del viento cuando sucedieron ambos incendios fueron “*estimadas*” en estas simulaciones. Esto fue así con las condiciones meteorológicas en general, no sólo vientos sino también, precipitaciones o cobertura nubosa que pudo haber en esos días de tales eventos. Desconociéndose también, cualquier diferencia climatológica entre uno y otro incendio mencionados aquí como *Escenario I* (trabajo del primer informe que se presentó al IG y vuelto a calcular en esta etapa) y *Escenario II* (*nuevo foco de incendio en las proximidades al primero*). En todas las simulaciones la dirección del viento que se utilizó es SO (Sur Oeste) correspondiente a 225° y velocidades débiles o moderadas (ver en Tabla 2.13 las velocidades cualitativas de vientos considerados). El momento exacto de la ignición también se desconoce y aunque no parezca tan relevante en principio, el instante de la ignición también produce cambios significativos en el avance del frente de fuego. En todas las simulaciones realizadas en FARSITE se utilizó el *Cambio de Humedad Periódico*. Esta última, es una función de la humedad respecto al tiempo, que presenta variaciones periódicas a lo largo del día y hace que el comportamiento de un frente de fuego sea distinto si la ignición se da, por ejemplo, a la mañana o al mediodía.

En los *ajustes* de modelos de combustibles no se hicieron cambios del ROS (Tabla 2.20), es decir, se mantuvieron constantes las velocidades de propagación del frente de fuego para cada combustible¹⁰.

Tabla 2.20.
Datos de entrada para la configuración del proyecto.

Configuración del Proyecto	
Paisaje	(ver Configuración del Paisaje)
Ajustes	1.00 (sin cambios de ROS para todos los modelos)
Humedad del Combustible	No se contaba con estos datos de la Basilicata y se usó (ver Tabla 21)

No se contaba con la humedad de los combustibles en la región de la Basilicata, por tanto el Tutor sugirió trabajar con los valores de Tabla 2.21. Los *factores meteorológicos* fueron tratados por separado en cada escenario (I y II) y los resultados pueden visualizarse en Anexo 2-5.

¹⁰ Para cada uno de los modelos se coloca factor uno en el archivo de ajustes y con esto se respeta la ROS predeterminada para cada uno de los modelos definidos en FARSITE.

Tabla 2.21. Humedad del combustible en 1,10 y 100 horas. LH y LW son respectivamente hierba y leña vivas. Los 9 modelos utilizados pertenecen a los 13 modelos de combustibles de Anderson (Anderson, 1982).

Humedad del combustible					
Mod	1hr	10hr	100hr	LH	LW
1	3	4	6	50	50
2	3	4	6	50	50
3	3	4	6	50	50
4	3	4	6	50	50
5	3	4	6	75	100
6	3	4	6	50	100
7	3	4	6	50	75
8	3	4	6	75	100
9	3	4	2	50	75

Los puntos de ignición fueron realizados como pequeños polígonos alrededor de los puntos (Tabla 2.22).

Tabla 2.22.

Puntos de ignición para cada uno de los dos escenarios en las proximidades de Latrónico (Basilicata, Italia).

Escenario I	Escenario II
588896,7014E	583701,0000E
4440148,4129N	4438948,0000N
(UTM)	(UTM)

2.2.4.3. Resultados

Los resultados de las áreas quemadas se pueden ver en los Anexo 2-5 y están ordenados según lo indica la Tabla 2.23.

Tabla 2.23.

Datos de entrada para la configuración del proyecto. Cada escenario I y II corresponde a regiones distintas. Para cada una de las dos regiones se hicieron 2 juegos de simulaciones con duraciones diferentes.

		Días	Intensidad de Vientos en Km/h		
Escenarios	I	2	1 Anexo 2.i	10 Anexo 2.ii	20 Anexo 2.iii
		3	1 Anexo 3.i	10 Anexo 3.ii	20 Anexo 3.iii
	II	1	0 Anexo 4.i	10 Anexo 4.ii	20 Anexo 4.iii
		2	0 Anexo 5.i	10 Anexo 5.ii	20 Anexo 5.iii

Se probó con 3 velocidades distintas de vientos por cada período de duración. En cada celda de Intensidad de Vientos y con letra más pequeña se indica en Tabla 2.23 la figura de área quemada que corresponde a los Anexos 2-5.

2.2.5. Propuesta para Barreras Cortafuego

Un combustible diferente cambia las condiciones del fuego. Si este combustible arde con mayor dificultad se podrá identificar una zona más segura para atacarlo o más eficiente para la colocación de barreras cortafuego. La figura 2.21 es el caso trivial en el cual un mal combustible nos asegura una disminución de la velocidad del frente de fuego y de su intensidad. Sin embargo, cuando combinamos todas las variables como inclinación del terreno o direcciones frecuentes de los vientos, el cambio de humedad en función a la orientación de la pendiente, etc. es mucho más difícil identificar estas zonas de baja velocidad e intensidad del frente de fuego. Una propuesta es simular varias veces incendios sobre las regiones de estudio con las condiciones más frecuentes de la zona y luego promediar los sectores donde la densidad de líneas que representan los frentes de fuego es mayor. Con esto construiremos un mapa único que contenga sectores de bajas intensidades y velocidades del frente de fuego para la colocación de barreras.

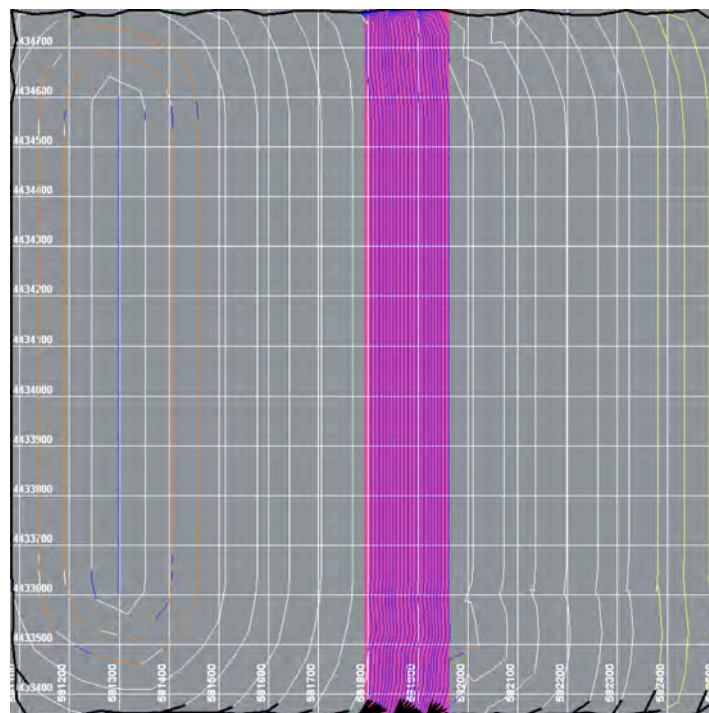


Figura 2.21. Atenuación de la combustibilidad mediante la colocación de otro modelo de combustible. Según los modelos de Anderson tenemos FM1 en ambos lados representados por la zona gris y FM8 en la faja central.

En la Figura 2.21 los rasters que conforman el paisaje son matrices de 50x50 elementos. Aquí visualizamos la configuración diseñada de dos combustibles en un paisaje hipotético. La zona gris clara pertenece a un FM1 (combustible del tipo 1 según Anderson) y la faja central está representada por un combustible del tipo FM8 (de menor combustibilidad que el primero). En esta última zona se aprecia el apiñamiento de las líneas que representan los frentes de fuego en distintos momentos del incendio. A la izquierda se aprecia la línea de ignición que produce el incendio.

Las conclusiones y otras propuestas de trabajo a futuro relacionadas con la utilización del FARSITE son expuestas en los apartados 5.1.1. y 5.2.1.

CAPÍTULO 3

SIMULADOR DE INCENDIOS DE VEGETACIÓN CON AUTOMATA CELULAR

3. MOTOR DE CÁLCULO CON AUTÓMATA CELULAR

3.1. INTRODUCCIÓN

3.1.1. Historia

El modelo matemático de autómatas celulares (AC) se trata de sistemas dinámicos discretos provenientes de la Teoría de la Computación (ver *WEB_AC*). Los autómatas celulares aparecen por primera vez a finales de los años 40, más concretamente a partir de 1947, de la mano de *Von Neumann* (Figura 3.2) y *Stanislaw Ulam* (Figura 3.1), dos expertos en física computacional con una fuerte relación de amistad tras las colaboraciones que realizaron durante el desarrollo del *proyecto Manhattan*. El origen de la idea proviene del desarrollo de unos estudios que Von Neumann realizó sobre sistemas con componentes no confiables (es decir, computación que tolerase fallos) poco después de terminar el proyecto EDVAC1. Von Neumann comenzó estudiando el desarrollo de autómatas auto-reproductivos basándose en ecuaciones diferenciales parciales, pero desechó este método porque no fue capaz de encontrar reglas explícitas y claras para poder llevar a la práctica estos autómatas. Sin embargo, *Arthur W. Burks* confirma que Stanislaw Ulam sugirió a John Von Neumann el uso de componentes celulares para desarrollar sus autómatas auto-reproductivos, lo cual llevó a una solución del problema de Von Neumann. El estudio no fue concluido, debido a la prematura muerte del científico en 1957.

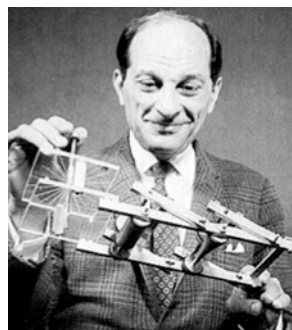


Figura 3.1. *Stanislaw Marcin Ulam* (13 de abril de 1909-13 de mayo de 1984) fue un matemático polaco-estadounidense que participó del *proyecto Manhattan* y propuso el diseño *Tell-Ulam* de las armas termonucleares. También propuso la idea de propulsión nuclear de pulso y desarrolló un número de herramientas matemáticas en la teoría de números, teoría de conjuntos, teoría ergódica y topología algebraica. Sobre todo es conocido por ser coautor (con *Nicholas Metropolis*) del *Método Montecarlo*. También es conocido por el *espiral de Ulam*.

Aunque la idea fue concebida, como decimos, a partir del año 1947, no sería hasta el año 1966 cuando se publicará en *"Theory of Self-reproducing Automata"*, libro de Von Neumann a título póstumo, completado y estructurado por el citado Arthur W. Burks. La intención de Von Neumann era principalmente desarrollar una máquina que pudiera construir a partir de sí misma otras máquinas y soportar comportamiento complejo. Finalmente, implementó la teoría de autómatas celulares en un vector de dos dimensiones en un dominio de enteros ($\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$).



Figura 3.2. John von Neumann (28 de diciembre de 1903, Budapest, Imperio austro-húngaro 8 de febrero de 1957, Washington, D.C. Estados Unidos) fue un matemático húngaro-estadounidense que realizó contribuciones fundamentales en física cuántica, análisis funcional, teoría de conjuntos, ciencias de la computación, economía, análisis numérico, cibernética, hidrodinámica, estadística y muchos otros campos. Está considerado como uno de los más importantes matemáticos de la historia moderna.

Poco después, en 1967 (Konrad, 1967), Konrad Zuse (Figura 3.3) (ver su autobiografía en *Konrad, 1993*) enunció su tesis, que se basa en la idea de que “El universo es un autómata celular”. En general, esta tesis enuncia que el Universo es un dispositivo computacional que se puede considerar como una gran máquina de computación, es decir, un autómata celular. Sería Edward Fredkin quien popularizase y extendiese esta idea años más tarde basándose en el trabajo de Zuse, de ahí que a esta teoría se le llame “tesis de Zuse-Fredkin”.



Figura 3.3. Konrad Zuse. (22 de junio de 1910 - 18 de diciembre de 1995) fue un ingeniero alemán y un pionero de la computación. Su logro más destacado fue terminar la supuesta primera computadora controlada por programas que funcionaban, la Z3 en 1941. También diseñó un lenguaje de programación de alto nivel, el Plankalkül, supuestamente en 1945, aunque fue una contribución teórica, pues el lenguaje no se implementó en su vida y no tuvo ninguna influencia directa en los primeros lenguajes desarrollados. También fundó la primera compañía de ordenadores en 1946 y construyó la Z4, que se convirtió en 1950 en la primera computadora en ser comercializada.

Los trabajos de Von Neumann y Ulam, y de Zuse y Fredkin, precedieron a la divulgación realizada por Martin Gardner. Éste fue un conocido periodista dedicado a la divulgación científica y concretamente, matemática. Además de sus libros, desde 1956 y 1986 publicó una columna mensual en la revista *Scientific American* titulada *Mathematical Games*. En esta columna, Gardner publicó en octubre de 1970 un artículo (Gardner, 1970) sobre el Juego de la vida (Life), diseñado por *John Conway* (Figura 3.4), un matemático británico. Este juego es un autómata celular, que formalmente es equivalente a una máquina universal de Turing, o lo que es lo mismo, “todo lo que se puede computar algorítmicamente se puede computar en el juego de la vida”. Durante los años 70 y principios de los años 80, el juego de la vida tuvo un gran seguimiento de los aficionados de la época, llegando a crearse múltiples variantes del Juego de la vida.



Figura 3.4. John Horton Conway (nacido en Liverpool Reino unido, el 26 de diciembre de 1937). Prolífico matemático activo en la teoría de conjuntos (teoría de conjuntos finitos), teoría de nudos, teoría de números, teoría de juegos y teoría de códigos. Se formó en la Universidad de Cambridge. Entre los matemáticos aficionados, quizás es más conocido por su teoría de juegos combinatorios, en particular por ser el creador en 1970 del **juego de la vida**.

Más recientemente, la figura de *Stephen Wolfram* es indispensable en el campo de los autómatas celulares. Este físico y matemático londinense, considerado desde pequeño como niño prodigio y experto en física de partículas, estudio entre 1983 y 1986 en el Instituto de estudios avanzados de Princeton donde se dedicó al estudio y simulación de autómatas celulares. Entre 1992 y 2002, Stephen Wolfram trabajó en su libro “*A new kind of Science*” (Wolfram, 2002), donde hace un estudio extenso de los autómatas celulares y su aplicación en campos de simulación y estudio de la realidad, es decir, introduce la idea de que se puede modelar y entender cualquier fenómeno natural. Wolfram, que además es el creador del famoso software matemático “*Mathematica*”, clasificó el comportamiento de los autómatas celulares en clases y motivó varios avances en el campo de los autómatas celulares.

Resumen evolutivo de la investigación de los autómatas celulares

Anteriormente hemos descrito los avances más importantes referentes a los autómatas celulares. A continuación, se enumeran los estudios científicos, computacionales y matemáticos relacionados con los autómatas celulares.

- 1947 – 1957: John Von Neumann, con la colaboración de Stanislaw Ulam.
- 1966: Arthur W. Burks, terminación y publicación del libro *Theory of Self-reproducing Automata*, a nombre de Von Neumann.
- 1967: Konrad Zuse enuncia su tesis planteando que el Universo es un gran automata celular, siendo Edward Fredkin quien años más tarde popularizase el planteamiento.
- 1967: Ulam y Robert Schrandt investigaron automatas celulares de dos estados, incluso estudiaron automatas celulares en tres dimensiones.
- 1967 en adelante: Edgar Frank Codd plantea una variación del automata de Von Neumann variando el número de estados posibles para cada celula.
- 1960 – 1969: Gustav A. Hedlund realiza un estudio matematico teorico sobre los automatas, que culmina con la publicación de *Endomorphisms and automorphisms of the shift dynamical system*, *Mathematical Systems Theory* en 1969.
- 1970: John Conway crea el Juego de la Vida, el automata celular más representativo. Publicado por Martin Gardner en la revista *Scientifist American*.
- 1980 - 1990: Stephen Wolfram, investigación en profundidad de los autómatas celulares y su clasificación.
- 1980 - 2000: Carter Bays, estudio de formaciones tridimensionales a partir de autómatas celulares.

3.1.2. Introducción de los AC

A partir de los estudios de Von Neumann, un autómatas celular es un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos. Es decir, es un modelo matemático para sistemas que soportan cambios; además, estos cambios se suceden cada tiempos constantes, razón por la cual, se usa una escala de enteros.

Para poder definir un autómatas celular, debemos comenzar por decir que matemáticamente no existe una definición formal aceptada. Sin embargo, comúnmente se define mediante la descripción de una serie de elementos que componen el autómatas celular.

Definimos, por tanto, una cuadrícula de dimensión n , también llamada *grilla*. Una grilla es uno de los nombres que se dan a los retículos, que son conjuntos de elementos parcialmente ordenados en los cuales todo subconjunto finito no vacío tiene supremo e ínfimo. Cada una de las celdas (o elemento de la grilla) es una célula. En teoría, esta grilla se extiende como un retículo infinito de enteros, sin embargo, esto es imposible a la hora de implementarlo y aplicarlo a casos prácticos.

Cada una de estas celdas tomará un valor de un conjunto finito de estados k . Sin embargo, el estado de una célula no es lo único que afecta a su evolución, sino que el desarrollo de cada una depende de sí misma y de su entorno. Dependiendo del autómatas y de sus condiciones, existirán un conjunto de estados y le afectaran de un modo u otro. Este concepto de vecindad, fue definido por Von Neumann.

En definitiva, el funcionamiento del autómata celular se basa en el uso de una función de transición, que se aplica a todas y cada una de las células de la cuadrícula en cada paso de la evolución del sistema dinámico. Esta función toma los valores de cada cuadrícula y las de su vecindad y elabora a partir de estos argumentos el valor nuevo para la cuadrícula en cuestión.

Precisiones

Como hemos visto antes, los autómatas celulares son en teoría cuadrícula compuestas de infinitos números enteros, lo cual es un problema a la hora de realizar aplicaciones prácticas de los autómatas celulares. Por eso, para dar cabida a los supuestos prácticos, debemos modificar la concepción teórica para dar lugar a las cuadrículas finitas. Esto nos obliga a concebir las condiciones de frontera: las funciones de transición realizan modificaciones en una célula basándose en el estado de dicha célula y en las de su vecindad, pero si dicha célula se encuentra en el borde, su vecindad queda reducida. ¿Qué hacer en estos casos? Se plantean varias opciones de actuación que la función de transición podrá considerar: podemos considerar una frontera abierta, en la que se considera la existencia de células fuera de la cuadrícula con valores fijos (todas las células externas tienen el mismo estado); una segunda opción es usar una frontera reflectora, que usa los valores del borde de la matriz para las células exteriores; la tercera opción consiste en usar una frontera periódica, que se trata de considerar el sistema como una cuadrícula enrollada, haciendo que el conjunto de celdas sea continuo; y por último, existen la posibilidad de que el sistema no tenga frontera, haciendo que la cuadrícula crezca en función de las necesidades del autómata.

3.1.3. Autómatas Celulares Unidimensionales

En una escala lógica, el autómata celular unidimensional es el primer paso para entender la dinámica de los autómatas celulares. Consiste en una sola fila de células a los que se aplica un principio de vecindad básico de dos vecinos por célula y a los que igualmente se pueden aplicar las diversas condiciones de frontera que hemos nombrado anteriormente.

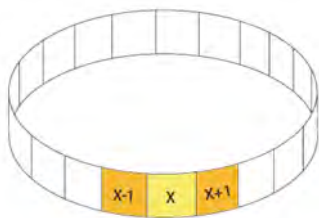


Figura 3.5. Autómata celular unidimensional con un radio de vecindad $r=1$ y una condición de frontera periódica.

Como ejemplo, podemos tomar un autómata celular unidimensional con un radio de vecindad $r=1$, dos estados (0 y 1) y una condición de frontera de tipo periódico, como el que se muestra en la imagen (Figura 3.5). Usaremos para este caso un tamaño de diez células y unas funciones de transición basadas en lo siguiente:

- Si ambos vecinos de la célula tienen el mismo estado, el estado de la célula a la que se aplica la función cambiará.
- Si ambos vecinos de la célula tienen distinto estado, el estado de la célula a la que se aplica se mantendrá igual.

Planteamos por tanto unos valores iniciales: *0001010011* (Figura 3.6).

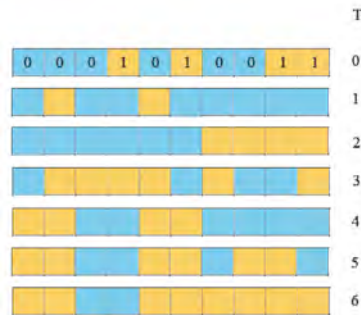


Figura 3.6. Primeras seis transiciones de un autómata celular unidimensional de 10 células.

Stephen Wolfram (Wolfram, 1986) clasificó el comportamiento de los autómatas celulares unidimensionales. Según Wolfram, todo autómata celular pertenece a una de las siguientes clases:

- Clase I. La evolución lleva a una configuración estable y homogénea, es decir, todas las células terminan por llegar al mismo valor.
- Clase II. La evolución lleva a un conjunto de estructuras simples que son estables o periódicas.
- Clase III. La evolución lleva a un patrón caótico.
- Clase IV. La evolución lleva a estructuras aisladas que muestran un comportamiento complejo (es decir, ni completamente caótico, ni completamente ordenado, sino en la línea entre uno y otro, este suele ser el tipo de comportamiento más interesante que un sistema dinámico puede presentar).

3.1.4. Autómatas Celulares Bidimensionales

Es el más común de los autómatas celulares a nivel de simulación y estudio. Consiste en la cuadrícula compuesta por células ($\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$), implantada por Von Neumann por consejo y Stanislaw Ulam. Este tipo de autómata celular, por ser el más estudiado, ha sido cambiado en múltiples ocasiones.

Ya hemos hablado del principio de vecindad de Von Neumann, que implicaba cuatro vecinos para cada célula, pero este no es el único. En 1970 se dio a conocer el juego de la vida (Figura 3.11) de John Conway (*WEB_Life*), que se basa en un principio de vecindad diferente. Este principio se conoce con el nombre de vecindad de Moore, y aplica ocho vecinos a cada célula, es decir, los cuatro que consideraba Von Neumann más las cuatro células de las diagonales respectivas.

Además, se basaba en una condición de frontera de tipo periódico y dos estados posibles. Este juego de la vida consideraba tres reglas fundamentales para su funcionamiento:

- *Nacimiento*: se reemplaza una célula muerta por una viva si dicha célula tiene exactamente 3 vecinos vivos.
- *Muerte*: se reemplaza una célula viva por una muerta si dicha célula no tiene más de 1 vecino vivo (muerte por aislamiento) o si tiene más de 3 vecinos vivos (muerte por sobrepoblación).
- *Supervivencia*: una célula viva permanecerá en ese estado si tiene 2 o 3 vecinos vivos.



Figura 3.7. Patrones fijos o estáticos.

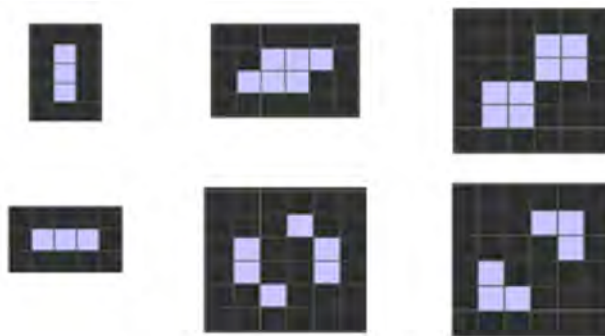


Figura 3.8. Patrones recurrentes mas usuales.



Figura 3.9. Patrones de movilidad o planeadores.

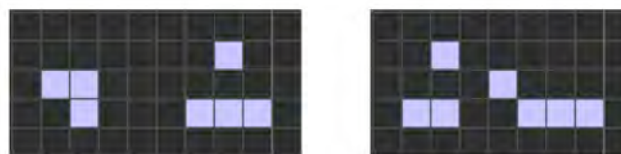


Figura 3.10. Patrones Matusalén: Diehard y Acorn.

Producto del amplio estudio que han realizado múltiples expertos y estudiantes, se han descubierto y catalogado una serie de patrones característicos. Se diferencian entonces cuatro tipos de patrones: estáticos (Figura 3.7), patrones que

no varían; recurrentes (Figura 3.8), patrones que varían de una posición a otra indefinidamente; patrones con movilidad, que se reproducen y se mueven por toda la cuadrícula (Figura 3.9); matusalenes, que son patrones que tardan muchos pasos en estabilizarse (Figura 3.10).

Especial atención merecen estos últimos, los matusalenes. Son una serie interesante de patrones que evolucionan durante varias generaciones antes de estabilizarse. Diehard es uno de estos patrones, que se estabiliza tras 130 turnos, desapareciendo, mientras que Acorn llega a 5206 transiciones antes de estabilizarse en múltiples formaciones recurrentes y fijas, incluidos algunos planeadores.

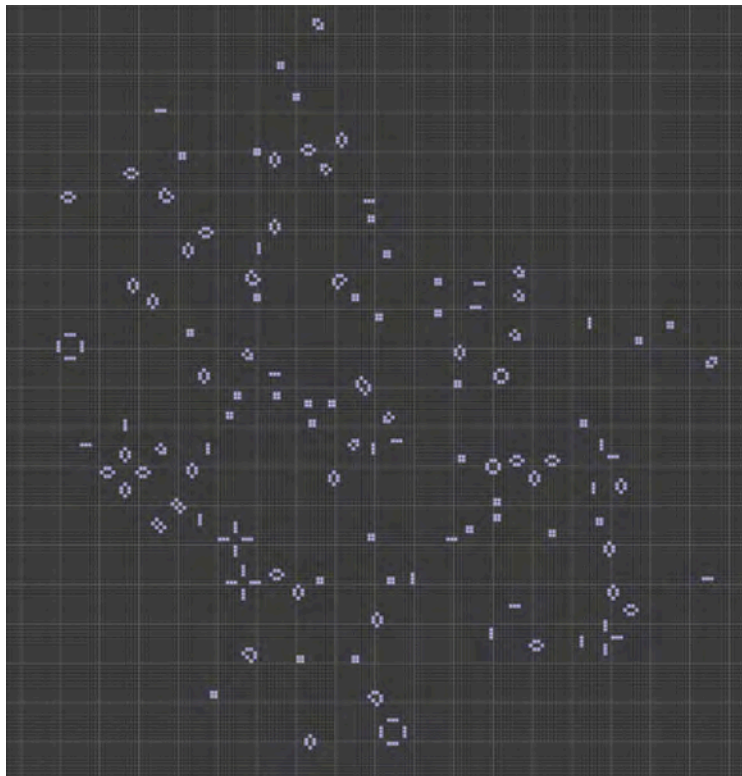


Figura 3.11. Vista de la grilla del juego de la vida (Life).

En cuanto a los planeadores o patrones de movilidad, una de las aportaciones originales de Conway fue el descubrimiento de la estructura de cinco células vivas llamada Glider, que resulta encajar en el papel de planeador realizando un viaje en diagonal por la cuadrícula. Las transiciones se ven representadas en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Transiciones comunes de un Glider.

3.1.5. Aplicaciones de los Autómatas Celulares

3.1.5.1. Simulador Golly 2.5

Relacionado a los autómatas celulares se pueden mencionar muchos programas específicos de simulación. *Golly 2.5* (Figura 3.13) es uno de ellos y se ha utilizado para ejemplificar parte de esta tesis. Es un programa gratuito y disponible para descarga (ver *WEB_Golly2.5*). Este software está desarrollado para funcionar en *Windows, Linux y OS X de Mac*.

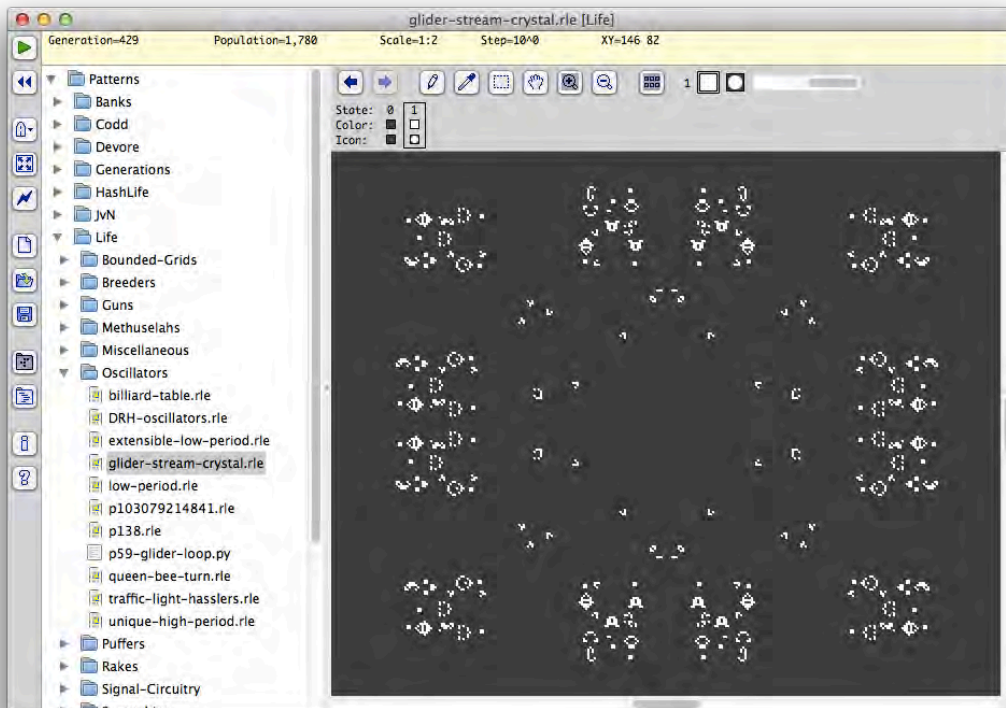


Figura 3.13. Vista de una ventana de Golly 2.5.

Golly es una aplicación multiplataforma (open source) libre para explorar el juego de Conway (o juego de la vida, *life*) y otros autómatas celulares. Los autores

principales son Andrew Trevorrow y Tom Rokicki , con contribuciones de código de Tim Hutton , Dave Greene , Jason Summers, Maks Verver y Robert Munafo.

Características Claves de Golly

- Admite universos delimitados y no delimitados, con células de hasta 256 estados.
- Soporta múltiples algoritmos, incluyendo el algoritmo *hashlife*¹¹ súper rápida de Bill Gosper.
- Se incluyen muchos tipos diferentes de AC: AC de John von Neumann de 29 estados, reglas 1D de Wolfram, WireWorld, Generaciones, bucles de Langton , gusanos de Paterson, etc.
- Los algoritmos *RuleTable* y *RuleTree* permiten conectar las nuevas reglas.
- Adaptación mientras se genera o recolección de basura.
- Lee RLE, macrocelda, Life 1.05/1.06, dblife y archivos MCell.
- También puede leer los formatos gráficos comunes: *BMP, PNG, GIF, TIFF*.
- Puede extraer patrones, reglas y scripts de archivos zip.
- Puede descargar los patrones, reglas y scripts de archivos en línea.
- Incluye una colección de patrón de estado-of-the-art.
- Se pueden pegar los patrones en el portapapeles.
- Sin límite de deshacer/rehacer.
- Atajos de teclado configurables.
- Opción de ajuste automático mantiene patrones de tamaño a la ventana.
- Opción de pantalla completa (menú/estado/herramienta/barras de desplazamiento).
- Soporta múltiples capas, que clonados.
- Ayuda basada en HTML con integración del Léxico de Life.
- Secuencias de comandos a través de *Perl* o *Python*.
- Se ejecuta en *Windows (2000+)*, *Mac OS X (10.4+)* y *Linux (con GTK + 2.x)*.

3.1.5.2. Distintos Campos de Aplicación de los AC

Los autómatas celulares pueden ser usados para modelar numerosos sistemas físicos que se caractericen por un gran número de componentes homogéneos y que interactúen localmente entre sí. De hecho, cualquier sistema real al que se le puedan analogar los conceptos de “vecindad”, “estados de los componentes” y “función de transición” es candidato para ser modelado por un AC.

Las características de los autómatas celulares harán que dichos modelos sean discretos en tiempo, espacio o ambos (dependiendo de la variante de la definición de AC que se use). Algunos ejemplos de áreas en donde se utilizan los autómatas celulares son:

¹¹ Hashlife es un algoritmo de largo plazo para computadoras destinado a una determinada configuración a partir de diversas formas de vida. Hashlife esta diseñando para explotar grandes cantidades de redundancias temporales y espaciales en la mayoría de las reglas de vida en autómatas celulares.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Hashlife>

MOTOR DE CÁLCULO CON AUTÓMATA CELULAR

- Modelado del flujo de tráfico y de peatones.
- Modelado de fluidos (gases o líquidos).
- Modelado de la evolución de células o virus como el VIH.
- Modelado de procesos de *percolación*.

Aplicación en medicina

Desarrollo de un Modelo Probabilístico de la Actividad Eléctrica cardíaca basado en un Autómata Celular.

La utilización de modelos matemáticos de activación y propagación del impulso ha mejorado la comprensión de diversos mecanismos electro-fisiológicos involucrados en la génesis de las arritmias. Las simulaciones más realistas se basan en los modelos de reacción-difusión e implican una carga computacional muy elevada. El objetivo del estudio (Atienza y otros, 2005) fue desarrollar un modelo de activación eléctrica cardíaca por computadora que permita simular fenómenos electrofisiológicos complejos y que no requiera la carga computacional necesaria en otros modelos habitualmente empleados. En ese trabajo han modelado (Figura 3.14) el tejido cardíaco como un autómata celular, cada uno de cuyos elementos adoptó estados discretos en función de su estado previo y del de las células vecinas siguiendo unas reglas sencillas. La activación se contempló como un proceso probabilístico y se ajustó mediante el fenómeno de restitución, mientras la repolarización se modeló como un proceso determinista. Finalmente, las corrientes celulares se calcularon utilizando un potencial de acción prototipo, lo que permitió simular los electrogramas virtuales monopolares y bipolares en cualquier punto del espacio.

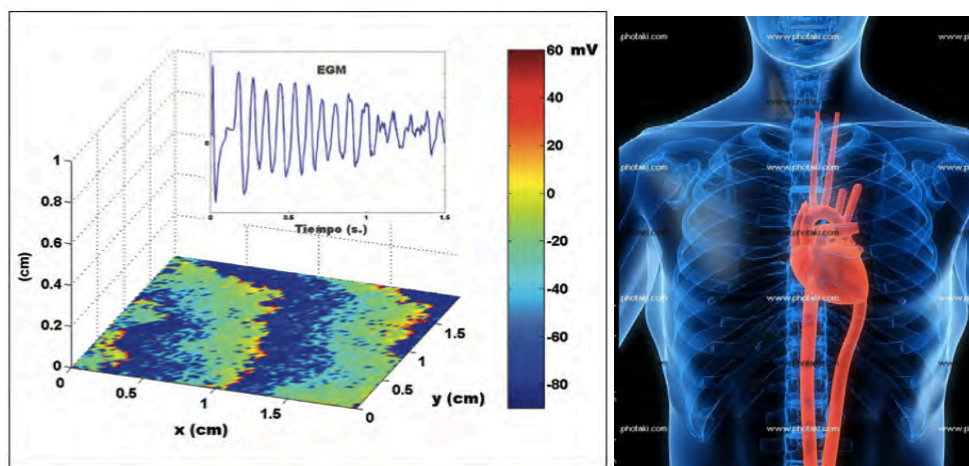


Figura 3.14. Izq. Conducción fibrilatoria al estimular el extremo izquierdo de la lámina de tejido con alta frecuencia (50Hz). El recuadro superior muestra el electrograma obtenido al situar el electrodo sobre la superficie del tejido. El rectángulo de la derecha representa el mapa de voltaje (extraído de Atienza y otros, 2005).
Der. Ilustración del sistema cardíaco.

En conclusión, en este trabajo, aunque el modelo de autómata celular probabilístico desarrollado es sencillo y no requiere cargas computacionales elevadas, es

capaz de simular de forma realista fenómenos complejos de gran interés en electrofisiología.

Aplicación en geología

Simulación del deslizamiento de tierra de 1992 en Tessina (Italia) por un modelo de autómatas celulares y futuros escenarios de riesgo.

Los autómatas celulares son una poderosa herramienta para la modelización de sistemas naturales y artificiales, que se pueden describir considerando las interacciones locales de sus partes constituyentes. Algunos tipos de corrimientos, como son las corrientes de rocalla o lodo, satisfacen estos requisitos. El corrimiento de tierras de Tessina (Italia) (Figura 3.15) de 1992 tiene unas características (corrientes lentas de lodos) que lo hacen apropiado para la modelización por medio de los Autómatas Celulares, excepto en la fase inicial del desprendimiento, que está provocada por un movimiento de rotación que no tiene efecto en la trayectoria de la corriente de lodo. Este artículo (Avolio *et al.*, 2002) presenta el método de autómata celular para la modelización de corrientes lentas de lodo y rocalla, los resultados de la simulación del corrimiento de tierras de Tessina de 1992 y el pronóstico de futuros riesgos teniendo en cuenta los volúmenes de masas que se podrían movilizar en el futuro. Estos se obtuvieron adaptando el modelo de autómata celular conocido como SCIDDICA, que ha sido validado para corrimientos de tierra muy rápidos. Se aplicó SCIDDICA modificando el modelo general con respecto a las peculiaridades del corrimiento de tierras de Tessina. Las simulaciones obtenidas con este modelo inicial fueron satisfactorias para predecir la superficie cubierta por el lodo. La calibración del modelo, que se obtuvo de la simulación del suceso de 1992, se utilizó para pronosticar la expansión de la corriente durante una posible reactivación en el futuro. Para este fin se estudiaron dos simulaciones sobre el desplome de aproximadamente un millón de metros cúbicos de material. En una de ellas, se introdujo la presencia de un muro de contención construido en 1992 para la protección de la pequeña aldea de Tarcogna. Los resultados obtenidos (Figura 3.16) identificaron las condiciones de alto riesgo que afectaban a los pueblos de Funes y Lamosano y demostraron que este método de Autómata Celular puede tener una amplia gama de aplicaciones para diferentes tipos de corrientes de lodos y rocalla.



Figura 3.15. El Valle Tessina en el borde Bellunese de los Alpes italianos, se ha visto afectada por problemas de inestabilidad por lo menos desde 1960. El deslizamiento de tierra se extiende por 2,5 kilómetros a través de la ladera sur del monte Teverone y el mayor deslizamiento de tierra se activó después de intensas lluvias en octubre de 1960; fallos posteriores se produjeron en 1963 y 1992. Se han instalado una serie de sistemas de instrumentación y de advertencia.

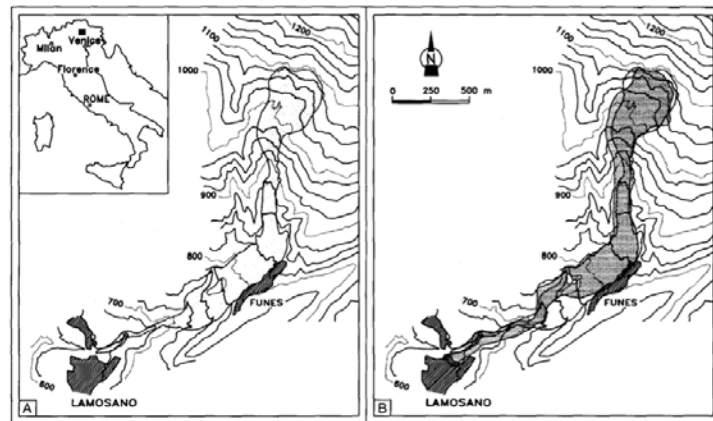


Figura 3.16. (A) Distribución aérea del deslizamiento de material durante el evento de 1992 y (B) comparación entre el evento real y el de uno simulado.

Aplicación en las dinámicas de los usos del suelo

Agentes, escenarios y AC; modelización espacial para la toma de decisiones en Doñana (España) y su entorno.

La modelización de los usos del suelo basada en AC (Hewitt, 2012) permite en este trabajo extender las tendencias observadas en las dinámicas de los usos del suelo hasta un horizonte de 25-30 años, generando así escenarios futuros, simulaciones de posibles configuraciones futuras de los usos del suelo. El principal aporte de este trabajo consiste en los mapas de usos del suelo generados a partir de los escenarios futuros para Doñana con el modelo AC.

Doñana ha sufrido, sin embargo, una grave degradación y pérdidas importantes de grandes extensiones de su marisma, dunas y hábitat litoral desde 1950. Esto ha

sido el resultado de la ampliación de infraestructuras turísticas, el aumento de la agricultura intensiva, y el establecimiento de áreas de repoblación forestal con especies no-nativas de maduración rápida como el eucalipto.

El software empleado en la elaboración del modelo se denomina Metronamica® y ha sido desarrollado por el Research Institute for Knowledge Systems (RIKS), de Maastricht.

Los resultados del trabajo se observan en Figura 3.17.

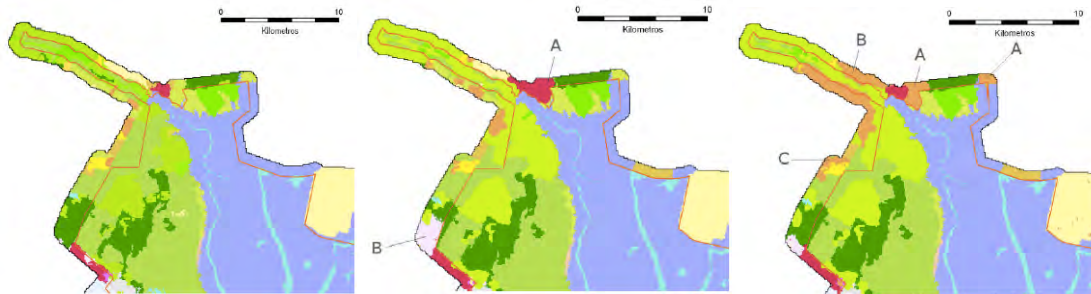


Figura 3.17. En esta ilustración se observan la imagen actual del año 2006 y dos posibles situaciones a futuro en el año 2030 en función a la toma de decisiones del 2006 con el software Metronamica. **(i)** Norte del área del estudio mostrando la zona límite del parque nacional en 2006. Nótese como el área sin protección destaca como una franja de cultivos intensivos (marrón pardo y amarillo). Límite de parque nacional en naranja. **(ii)** Escenario 1, ampliación de núcleos urbanos e infraestructuras turísticas 2030. A: ocupación de pastizal por suelo urbano en los alrededores de El Rocío; B: ampliación masiva de instalaciones deportivas asociadas con el turismo. Límite de parque nacional en naranja. **(iii)** Escenario 2, expansión masiva de frutales 2030. A: ocupación de pastizal por nuevas hectáreas de frutales; B: ampliación masiva de instalaciones deportivas asociadas con el turismo. Límite de parque nacional en naranja.

Aplicación en salud y teledetección

Dinámica poblacional de roedores (del trabajo de tesis de Verónica Andrea Musso).

La Fiebre Hemorrágica Argentina es una enfermedad viral transmitida por roedores que afecta la región de la pampa húmeda argentina. Se trata de una patología grave, con manifestaciones neurológicas y hemorrágicas. El agente etiológico es el virus Junín (JUNV), denominado de esta forma por ser en esa localidad Bonaerense donde se produjo el primer brote. Es miembro de la familia Arenaviridae, cuya supervivencia depende del animal portador. Este tipo de virus se limita geográficamente a las regiones donde viven las especies animales que los hospedan (Porcasi y otros, 2005).

Los vectores que transmiten el virus Junín son los ratones maiceros o lauchas del maíz, científicamente denominados *Calomys Musculus* (Figura 3.18). Habita mayormente campos de cultivo y sus borduras. También se encuentra en terraplenes de ferrocarril y puede invadir zonas urbanas, cerca de cursos de agua y en banquetas donde haya vegetación abundante (Roedores Alihuen).



Figura 3.18. *Calomys musculus* (Laucha del maíz), vector de FHA.

El AC de este trabajo en cada transición de tiempo calcula el “movimiento” (ver resultados en Figura 3.19) de roedores en una determinada área; permitiendo estimar la distribución espacial de *Calomys musculus* en un paisaje rural real. Utiliza reglas obtenidas del conocimiento ecológico de la especie y argumentos estadísticos (Provensal *et al.*).

El modelo espacial estima la distribución de roedores *Calomys musculus* sobre una determinada región geográfica. Efectuando un análisis de las características ecológicas de dicha área y de los hábitat predilectos de la especie portadora del virus de la FHA, es posible identificar los puntos con mayor densidad poblacional de ratones, y por ende, posibles focos de infección. Este modelo espacial es un AC que forma parte de los proyectos institucionales para la generación de nuevas herramientas de vigilancia epidemiológica, donde han participado el Instituto Gulich - Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Instituto Nacional de Enfermedades Virales Humanas “Dr. Julio Maiztegui”, ANLIS “Dr. Carlos G. Malbrán”, Universidad Nacional de Córdoba y Universidad Nacional de Río Cuarto. El desarrollo del mismo ha sido hecho por Polop J., Provensal C., Simone I., Lamfri M. y Scavuzzo C.M.



Figura 3.19. Escenarios antes y después de la ejecución del modelo. Tomado del trabajo de tesis de Verónica Andrea Musso titulado “Desarrollo de Software para la Simulación Espacio - Temporal de la Dinámica Poblacional de Roedores Transmisores de la Fiebre Hemorrágica Argentina”.

En este trabajo se obtiene de las imágenes satelitales el *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) que representa la distribución de la vegetación, *Bordes* que brinda información sobre las relaciones espaciales entre los elementos

de la misma dando cuenta de los límites entre los distintos tipos de hábitat (de esta manera es posible distinguir caminos, líneas ferroviarias, márgenes de cultivos, etc.), *Humedad* que pone de manifiesto contenido de agua del suelo, la vegetación, cuerpos de agua, cursos de agua, sectores de flora con sombra, etc. y *Bufer de agua* que da la distancia al agua. Luego el *Modelo Espacial* (mediante el uso de un AC) estima la distribución de los roedores sobre una determinada región geográfica.

El AC empleado se trata de un autómata celular que en cada transición de tiempo calcula el “movimiento” de roedores en una determinada área; permitiendo estimar la distribución espacial de *Calomys musculinus* (el roedor) en un paisaje rural real. Utiliza reglas obtenidas del conocimiento ecológico de la especie y argumentos estadísticos.

Los componentes de este AC son:

- *Grilla*: se trata de una matriz bidimensional, cuyas dimensiones son iguales a las de la imagen satelital de la zona en la que se desea investigar la dispersión de roedores. Cada una de sus celdas representa una área geográfica 900m^2 , es decir un píxel de la escena satelital. Esta grilla es llamada zona.
- *Conjunto de estados* Σ : los estados de las células guardan la densidad poblacional de ratones de un punto de la imagen. Se trata de valores de números flotantes positivos entre cero y cien.
- *Configuración inicial* C_0 : inicialmente se distribuyen aleatoriamente valores de densidades entre cero y cuarenta y dos.
- *Relación de vecindad* V : corresponde a la de *Von Neumann*, es decir los vecinos inmediatos arriba, abajo y a los costados de cada celda.
- *Función de transición*: la evolución del sistema está sujeta a cálculos probabilísticos sobre celdas vecinas, teniendo en cuenta las bondades ecológicas de las mismas y cuan ocupadas están.

Cada transición afecta todas las células de la grilla, efectuando los siguientes pasos sobre cada una:

Sea c_1 una célula perteneciente a zona.

1. Se elige de manera aleatoria entre uno de los vecinos de c_1 . Llamaremos al mismo c_2 .
2. Se calcula cuan ocupada está c_1 y cuan libre está c_2 . Para llevar a cabo esta operación se deben conocer las densidades de ambas células, es decir sus estados en la grilla zona, como también sus capacidades de carga, o sea la mayor densidad posible según las características ecológicas de los puntos representados por las celdas.
3. Según los valores obtenidos en el paso anterior, se elabora una probabilidad de movimiento, es decir un índice que señala que tan factible es el intercambio poblacional de c_1 a c_2 .

4. Si el índice anterior supera cierto límite fijo, c_1 disminuirá su densidad poblacional en cierta cantidad que pasará a aumentar la densidad en c_2 . En caso contrario sus estados no son afectados.

3.2. SIMULADOR DE INCENDIOS DE VEGETACIÓN Y METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROPAGADOR EMPÍRICO

Los resultados de la simulación de *incendios de vegetación* son de gran utilidad para la planificación y mantenimiento de grandes áreas vegetales, ya sean naturales o creadas por el hombre, puesto que permiten conocer de antemano dónde deben existir zonas de contención, además de contribuir a la toma de decisiones en caso de un incendio real.

En el caso de presentarse un incendio es muy importante tener el sistema listo para ingresar datos inherentes al incendio, tales como: el foco del mismo y las condiciones meteorológicas actuales. Con el fin de obtener resultados fiables, se deben realizar varias simulaciones cuyos valores deben ser conocidos en el menor tiempo posible. A partir de los resultados, se podrá realizar el trabajo de combatir el fuego determinando, por ejemplo, posiciones y direcciones óptimas para la construcción de barreras. Se minimiza de esta manera el área afectada por el fuego.

En esta construcción de un AC asociamos a cada celda un riesgo de ser quemada que dependerá de las amenazas y las vulnerabilidades existentes (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1.
Las amenazas y las vulnerabilidades como componentes del factor riesgo en Estela 1.00.

RIESGO	
AMENAZA	VULNERABILIDAD
<ul style="list-style-type: none"> • Fuego en celdas vecinas. • Condiciones del clima. • Elevación digital del terreno (DEM). 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustibles. • Barreras (ríos, caminos, etc.).

3.2.1. Ventajas de los AC en Simuladores de Incendios Vegetales

En general, las áreas de vegetación ocupan grandes extensiones de terreno y por ende la cantidad de especies vegetales es elevada, pudiendo resultar demasiado grande como para realizar la simulación en una máquina secuencial, por tanto es conviene mostrar que el uso de una máquina o arquitectura paralela contribuye a optimizar el tiempo de respuesta para la realización de la simulación.

Una de las ventajas más importante de los AC es que admiten procesamiento en paralelo lo cual brinda un altísimo potencial de cómputo en el momento de reproducir la realidad con distintos modelos de combustibles.

3.2.2. Reglas del AC usado en Estela 1.00

Se trata de un autómata celular que en cada transición de tiempo calcula el “avance del frente de fuego y su posterior extinción” para incendios de vegetación en una determinada área. Permite estimar la distribución espacial de áreas quemadas y áreas en proceso de quema en un paisaje rural real, obteniendo del incendio datos de características geométricas físicas de los incendios de vegetación. Utiliza reglas obtenidas del conocimiento en el manejo de fuegos, leyes fisicoquímicas y argumentos estadísticos. Puede calificarse como un AC de tipo estocástico, con memoria, control de fronteras y con reglas definidas como

- *Espacio 2D*: Grilla coincidente con el raster de la imagen satelital.
- *Estados del AC*: 0 (no quemado), 1 (quemándose) y 2 (quemado).
- *Condición inicial*: punto/s o zona/s de ignición.
- *Relación de vecindad*: Moore modificada estocásticamente.
- *Función de transición*: la evolución del sistema está sujeta a cambios probabilísticos sobre células vecinas, teniendo en cuenta combustible, vientos, DEM, etc. y propagación de partículas encendidas.

Se podría decir también que contiene implícitamente un mapa de riesgo dinámico, en el sentido que debe evaluar la posibilidad de quemar cada celda en función al turno de la misma.

3.2.3. La Grilla

Estela 1.00 utiliza un AC de tipo bidimensional con celdas cuadradas e iguales y está en total coincidencia con la resolución espacial del raster que incorpora la capa de los modelos de combustibles. El total de capas de información (información SIG) que se estudian en un determinado momento t (o turno del autómata) están dadas por:

1. *Grilla del AC.*
2. *Raster de modelos de combustibles.*
3. *Matriz de intensidad de vientos.*
4. *Matriz de dirección de vientos.*
5. *Matriz con orientación de las pendientes.*
6. *Matriz con el valor de las pendientes.*
7. *Matriz de duración del fuego (memoria de la celda).*

La primera, como se mencionó anteriormente, se trata de una matriz que contiene los estados del AC.

La segunda matriz contiene las clasificaciones de modelos de combustibles que fueron encontrados mediante trabajos de investigación en el territorio. Esto involucra gran pericia en el campo y un minucioso trabajo computacional utilizando técnicas de clasificación de los combustibles (Zalazar, 2014) para encontrar, de esta manera, el valor que corresponde a las constantes para el modelo de propagación del fuego que se usa.

La tercera y cuarta matriz contienen información del vector viento. El viento es una magnitud vectorial en un espacio tridimensional, pero el modelo de incendios de vegetación implementado no considera corrientes ascendentes del aire, por lo tanto el viento, puede ser tomado como una magnitud vectorial bidimensional. Hay que tener en cuenta que para los efectos de la simulación, el viento que se debe introducir en estas matrices, es viento laminar que se mide o calcula a 6m sobre la superficie del terreno. Esto último es un dato importante para no cometer el error de introducir algún viento de fuentes meteorológicas a mayores alturas, la intensidad de los vientos a medida que nos arrimamos a la superficie del terreno disminuye y existen modelos físicos de fluidos para explicar este comportamiento. En conclusión, para el viento, debemos guardar dos datos por cada celda del AC, la intensidad y la dirección del viento. A cada dato le corresponde una matriz, por lo tanto, el viento, queda representado por dos matrices, una matriz contiene la intensidad y la otra la dirección. En Estela 1.00 éstas matrices son dinámicas, lo que significa que admitirán cambios a lo largo de la ejecución de la simulación. Eso permite la posibilidad a futuro de generar actualizaciones de los cambios del viento en tiempo de ejecución, sin depender, solamente, de la configuración de vientos dada como condición inicial. Por lo tanto aquí son posibles futuras modificaciones para crear mayor dinamismo con esta variable tan importante por su elevada tasa de cambios en los incendios de vegetación.

Los accidentes del terreno se pueden representar, al igual que los vientos en el simulador, con una magnitud vectorial bidimensional. Cada componente de este vector cumple un importante papel en la simulación. Para los efectos de una simulación de avance de fuegos la matriz de inclinación del terreno no nos dice todo si no sabemos cuando el fuego sube o cuando baja, esa información nos da la orientación de las pendientes. Conocer la orientación de las pendientes es de crucial importancia porque estamos hablando del avance del fuego por cola o por el frente y las velocidades son las más antagónicas en la propagación. Al descuidar este detalle se produce una sobreestimación del área quemada. Si solamente consideramos la pendiente en el simulador sólo construiríamos, por ejemplo, un mapa de riesgo y no estaríamos simulando la realidad del avance de un fuego como se esperaríamos en la naturaleza.

La séptima capa es una matriz de memoria de las células. En Estela 1.00 el AC activa un contador por cada célula de modo que cada una de ellas tengan la capacidad de "recordar" cuanto tiempo han estado encendidas, tiempo después del cual, deberían cambiar su estado a "quemado". El tiempo de quema, o *tiempo de residencia* de la llama, es algo que en los datos de entrada de este simulador se ingresa junto a los modelos de combustibles, es decir, cada modelo de combustible tiene un tiempo de quema que lo caracteriza.

3.2.4. Cambio de Estados del AC de Estela 1.00

El AC de Estela 1.00 recorre la grilla en búsqueda de celdas con riesgo de incendio en estado *no quemado* pudiendo encontrarse en su camino celdas en

estado *quemado* o *quemándose*. Cuando accede a una celda con riesgo de quema es donde despliega mayor parte del procesamiento en su código.

Situación 1. El AC se posiciona sobre una celda en estado “no quemada”.

La generación de focos en Estela 1.00 se produce de la siguiente manera. En primer lugar el AC se posiciona sobre una celda en estado de *no quemado*. En función a la vecindad de Moore modificada evalúa la posibilidad de que se queme esta celda cuando alguna de la vecindad está encendida. Activa un contador para esta celda que representa la *memoria* de esa célula y que contiene la cantidad de tiempo que esa célula se mantendrá en el estado *quemándose*. Si el contador de la célula (su memoria) acusa un valor que excede el umbral establecido para ese combustible se cambia el estado de la célula de *quemándose* a *quemado* y el AC pasa a la próxima célula. Para quemar una celda se acude al azar y a esto denominaremos *lanzar el dado*. De esta manera se generan números aleatorios de distribución uniforme, de punto flotante (reales) y con una cota comprendida en el intervalo $[0,1]$. Por otro lado, se analiza el riesgo que tiene la célula en quemarse mediante sus variables de *amenazas* y *vulnerabilidades*. Un *riesgo* alto determina una barrera baja para que sea posible la ignición, es decir, una probabilidad alta de que se queme y los números generados al *lanzar el dado* tienen mayor posibilidad de estar por encima de esta barrera. Entonces, cuando el riesgo es alto, significa una posibilidad alta en que esa celda cambie de estado *no quemado* a otro *quemándose*. A continuación, si la celda analizada anteriormente cambió de estado *no quemado* a *quemándose*, existe también la generación de posibles focos secundarios. La generación de estos focos secundarios responden a las condiciones medioambientales y del combustible proyectándose más allá de la vecindad de Moore modificada (efecto logrado con técnicas de spotting que se explica más adelante). La distancia en la que se podrán generar estos nuevos focos depende directamente de dos condiciones medioambientales, el viento y la pendiente. La propuesta fue generar cinco puntos donde el más alejado encuentra su posición mediante un vector posición al que se denomina *vector elongación* (\mathbf{e}), (ver apartado 3.2.7.1.). Con esto, todos estos puntos matemáticos nuevos quedan igualmente distanciados sobre una recta que pasa por la celda encendida, hasta la última de las cinco nuevas celdas calculadas. Otra cosa importante en la generación de los cinco nuevos focos es la vulnerabilidad de los mismos. Cuando la distancia de la celda encendida es mayor, menor será la posibilidad de encender una celda a la distancia. Ésto se consigue definiendo una función que tiende a disminuir la vulnerabilidad con la distancia. A cada una de las cinco celdas del spotting se les disminuye la vulnerabilidad una cantidad en relación a la distancia que se aleja de la celda encendida, es decir, la expresión introducida para disminuir la vulnerabilidad será función del valor del módulo del vector elongación \mathbf{e} . Luego se *lanza el dado* y se determina si estas celdas cambiarán, o no, al estado *quemándose* (ver Figura 3.20).

Situación 2. La celda está en estado “quemado” o “quemándose”.

Si el AC se posa sobre una celda con estado *quemado* simplemente la ignora y salta a la siguiente sin cambiar su estado. En el caso de una celda con estado

quemándose el AC actualiza el contador y verifica que no se exceda el umbral de tiempo de quema definido en la tabla para ese modelo de combustible de la celda.

Entra en rutina de ignición...

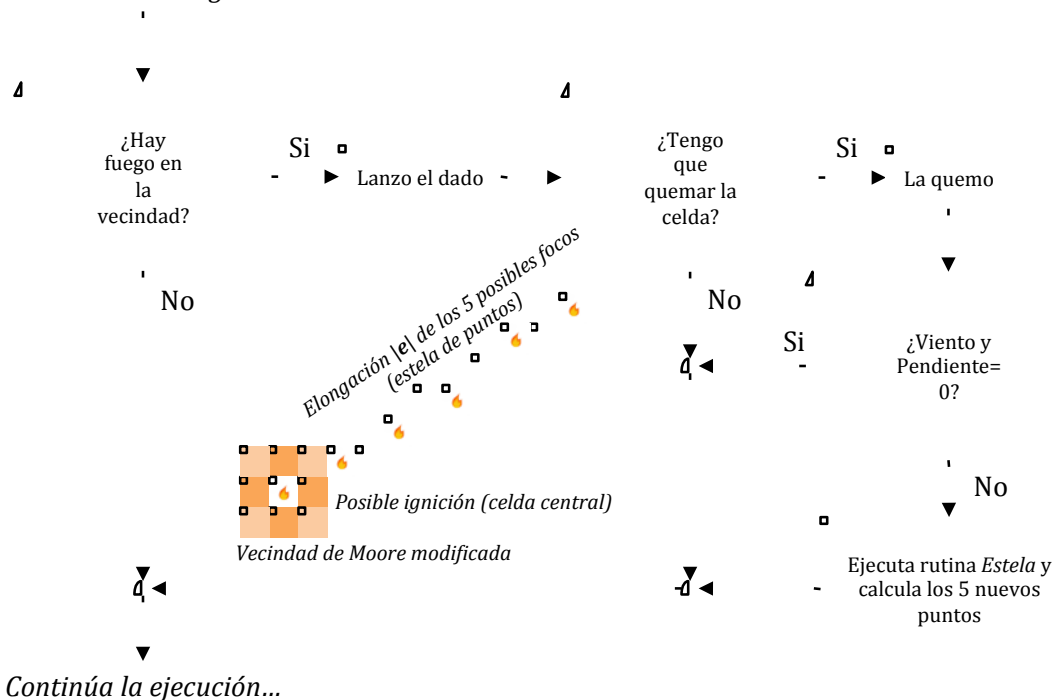


Figura 3.20. Diagrama de flujos que muestran bajo que circunstancias se genera la ejecución de la rutina estela del programa Estela 1.00.

En el diagrama de flujos de Figura 3.20 se puede visualizar el mecanismo de activación de la rutina que genera las estelas de fuego más allá de la vecindad de una celda. Este diagrama de flujos muestra, bajo que circunstancias, se genera la ejecución de la rutina que calcula los 5 nuevos puntos mediante un mecanismo de pavezas y la misma, es la que da el nombre al programa *Estela 1.00*. En el interior del diagrama se muestra la vecindad de Moore modificada alrededor de la celda que presenta riesgo de ignición. El largo de la estela de 5 celdas encendidas está condicionado por el valor del módulo del vector elongación e .

3.2.5. La Condición Inicial del AC

La condición inicial en Estela 1.00 está dada por una configuración previa de la grilla del autómata. El autómata tiene la posibilidad de tomar como configuración inicial un escenario que se encuentre en plena propagación del fuego con una grilla de estados *no quemado*, *quemándose* y *quemado*. Algo que también es posible en el AC es generar nuevos focos de incendios en cualquier lugar combustible (muy útil para las técnicas de ataque) y en cualquier momento de la simulación (siempre y cuando los focos estén convenientemente lejos de las fronteras de la grilla para que no se detenga inmediatamente la simulación). Aunque la ignición en función

del tiempo no fue implementada, es posible hacerlo por la naturaleza de su funcionamiento, por simple interrupción del programa y mediante introducción de nuevos focos en la grilla para comenzar una nueva simulación con los frentes viejos y los nuevos focos.

3.2.6. Vecindad de Moore Modificada Estocásticamente

Aparte del estudio del frente del incendio el conocimiento de la evolución del incendio en su totalidad es una ayuda para el personal responsable de las tareas de extinción y contribuye a la toma de decisiones adecuadas en relación con los métodos de ataque, la estimación de los recursos humanos y materiales y las medidas de seguridad (tanto del personal que interviene en la extinción como de la población afectada).

Estas razones justifican los numerosos intentos de modelizar la medida, forma y progresión de un incendio forestal. Los esfuerzos en esta dirección se iniciaron en la década de los treinta, con trabajos como los de Hornby (1936), Curry y Fons (1938). Desde entonces, se ha seguido en esta línea y son muchas las publicaciones que abordan el tema: Peet (1967), Van Wagner (1969), Frandsen y Andrews (1979), Green *et al.* (1983), Anderson (1983), Ball y Guertin (1992), Catchpole (1982, 1992, 1993), Richards (1993), Wallace (1993), Clarke y Olsen (1996) son un buen ejemplo de ello.

En Estela 1.00 se intenta conseguir el crecimiento del fuego de manera que el inicio de la ignición propague un crecimiento circular, como un caso en particular, en la situación de ausencia de vientos y pendientes bajo un sólo tipo de modelo de combustible homogéneo en todo el terreno. Para conseguir este cometido, de crecimientos circulares, nos encontramos con una limitación intrínseca en la manera de concebir el crecimiento del fuego sobre la grilla de un AC. Ocurre que cuando el combustible es muy bueno, es decir la bondad para la quema de la célula es muy alta, el crecimiento del perímetro de fuego no toma la forma circular como se esperaría. En el caso que construyamos el AC con el criterio de vecindad de Moore crecerá un cuadrado y en el caso de la vecindad de Neumann se formará una cruz y crecerá un rombo como frente de fuego al transcurrir el tiempo. Este es un problema propio del AC y depende del tipo de grilla que se utiliza. Para nuestro caso la grilla que mejor se adapta al *pixel* (acrónimo del inglés picture element, elemento de imagen) que representa la matriz de datos de la imagen satelital está constituida por elementos cuadrados y estos son los resultados a menos que hagamos una modificación de la vecindad (ver Figura 3.22). Una modificación posible para salvar este problema es considerar un radio que involucre varias células de forma que forzaríamos el crecimiento de una silueta de perímetro aproximadamente circular desde el momento que consideramos la ignición. Esta es una posibilidad, pero lo hacemos a cambio de una pérdida de precisión espacial muy grande si tenemos en cuenta que una celda puede significar un área de $100m^2$, $900m^2$ o $1km^2$ sobre el terreno. Entonces, lo que se hizo en el AC de Estela 1.00 es darle una probabilidad de existencia a las cuatro esquinas de una vecindad de Moore. Se colocó un umbral sólo después del cual será posible considerar la vecindad de Moore, en tanto, si al *lanzar el dado* el valor que se obtiene no supera el umbral, sólo se considerará la vecindad de Neumann. Este truco sirvió para

mejorar significativamente el crecimiento circular del fuego en condiciones de alta combustibilidad. En cierta forma el comportamiento de la vecindad en Estela 1.00 varía entre una configuración de vecindad de Neumann y una de Moore en todo el proceso de la simulación.

En la Figura 3.21 se puede visualizar un esquema de la grilla del AC representando un paisaje con combustibles en la cual su esquina inferior izquierda arde en llamas. La bondad en ser quemada la celda que contiene un signo de interrogación dependerá del tipo de vecindad que se considere. Ambas vecindades pueden ser elegidas dentro de la región gris que contiene al signo de interrogación. Como se muestra en la imagen si consideramos una vecindad de Moore entonces existe la probabilidad de que aparezca fuego en la ubicación del signo de interrogación (con el efecto propagador de esa esquina). Sin embargo, si tomamos la vecindad de Neumann, nunca se propagará un fuego de esquina (no existe probabilidad de quema). A la derecha (misma Figura 3.21) se observan los dos tipos de vecindades que se ejigen aleatoriamente.

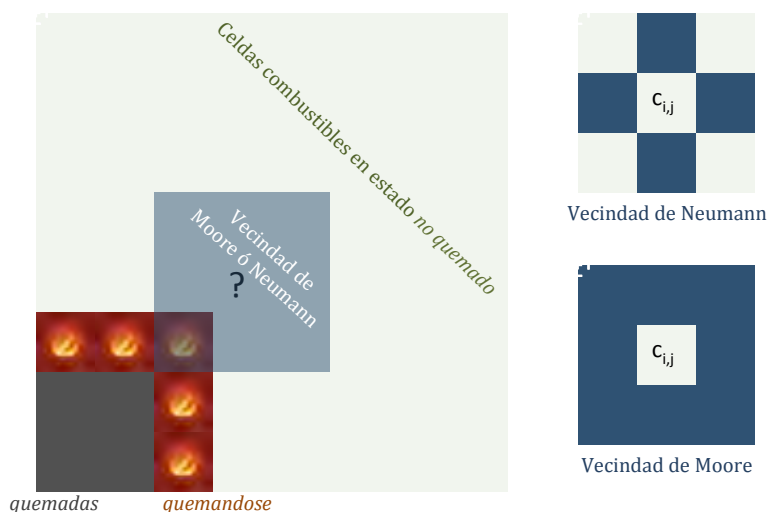


Figura 3.21. A la izquierda esquema de la grilla representando un paisaje con combustibles en la cual su esquina inferior izquierda arde en llamas. A la derecha las vecindades de Neumann y de Moore.

3.2.7. Propuesta de Modelo Propagador

Debido al tiempo de cómputo que significa procesar cada punto de la matriz que conforma la grilla del AC se buscó un modelo de propagación de fuego que implique el uso de fórmulas simples para generar el efecto de propagación de un frente de fuego sobre pastizales. Haciendo una revisión de trabajos de modelados que marcaron historia en el combate de fuegos de vegetación (Rothermel, 1972), (McArthur, 1966) y (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992) se pudo observar el comportamiento de las curvas de la velocidad del frente de fuego en función de variables altamente influyentes como el viento y la pendiente utilizando los modelos matemáticos más populares (estadounidense, canadiense y el

australiano) en la ingeniería para la prevención y extinción de incendios de vegetación. Ver las tablas para obtener la Figura 3.22 en Anexo 7–10.

A continuación se observa en las siguientes gráficas la velocidad del frente de fuegos en función del viento (caso sin pendiente) y la velocidad del frente de fuegos en función de la pendiente (caso sin vientos) para los tres modelos más populares como herramientas de predicción, el modelo empírico australiano (*McArthur*), el modelo semiempírico estadounidense (*Rothermel*) y el canadiense (*Fire Danger Group*). Las simulaciones se realizaron con modelos de combustibles de pastizales y en último lugar se colocaron las gráficas del modelo empleado en Estela 1.00 (Figura 3.22).



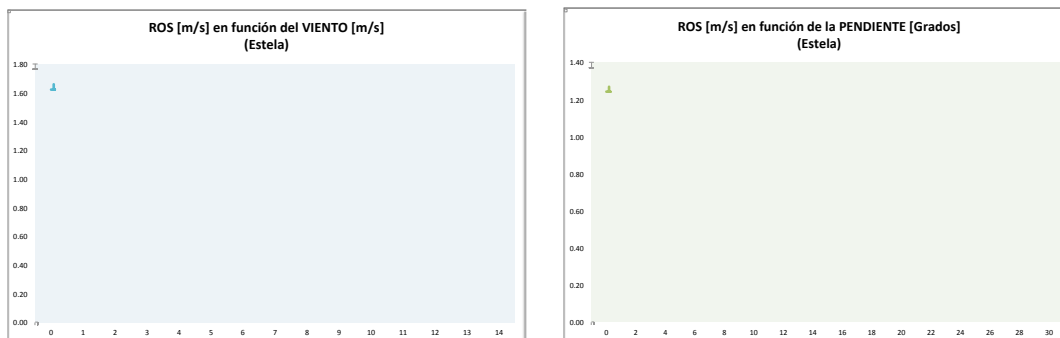


Figura 3.22. Velocidad del frente de fuego sobre pastizales (columna 1: en función del viento; columna 2: en función de la pendiente) para los modelos de propagación de McArthur, Rothermel, Fire Danger Group (Canadiense) y la función propuesta para Estela 1.00.

Los tres primeros modelos de predicción presentan respuestas distintas porque, evidentemente, cada cual responde a sus propios modelos de combustibles de pastizales. En último lugar, Estela 1.00 utiliza un modelo que no ha sido calibrado en campo por lo tanto se lo ajustó para darle similitud con los otros modelos. Para que esto último sea posible se ajustaron los parámetros que caracterizan el combustible en Estela 1.00 (ver tabla de Estela 1.00 en Anexo 10). Como resultado de este estudio se encuentra tanto para la dependencia de la velocidad del frente de fuego con el viento como con la pendiente que es posible modelar (ver resultados de Tabla Anexo 10 y Figura 3.22 en última fila) con una expresión exponencial simple de la forma

$$C_1 \cdot x^{C_2} \quad [3.1]$$

en una primera aproximación donde x es la variable de velocidad del viento o la pendiente y los coeficientes C_1 y C_2 a den ser determinados en función a los modelos de combustibles que se definan en una región y otras variables medioambientales como lo es la humedad.

Por otro lado se tuvo en cuenta en el modelo una característica propia de los grandes incendios donde se producen pequeños proyectiles lanzados al aire y arrastrados por las corrientes al resto de la vegetación causantes de *focos secundarios* por delante del frente de fuego. Estos proyectiles son denominados *pavesas*. La aparición de focos secundarios es un fenómeno que se asocia a los grandes incendios de vegetación, muy temido y difícil de prever con exactitud. Representa una amenaza para las zonas urbanas próximas al incendio, afecta a las brigadas de extinción, dificultando sus movimientos o atrapándolos a veces entre las llamas, y reduce la eficacia de los trabajos efectuados en materia de prevención, complicando incluso el control de quemas prescritas. A pesar de la complejidad y aleatoriedad inherentes a los focos secundarios, la predicción de los condicionantes que favorecen su formación y la determinación de su lugar geométrico (dirección y distancia) más probable son una buena ayuda en la tarea de minimizar sus efectos. Debido a los esfuerzos de distintos investigadores se han conseguido distintos modelos matemáticos de este fenómeno.

La idea en este simulador fue agregar la técnica de lanzamiento de *pavesas* (*spotting*) (Albini, 1983) al motor propagador de fuego para conseguir mayor eficacia en el proceso de propagación de las llamas en situaciones de vientos intensos y con terrenos de muchas piedras. Adoptar esta técnica al motor de cálculo permite “sobrepasar” aparentes barreras impuestas por limitaciones en la clasificación de los modelos de combustibles. En condiciones de muchas piedras los parches de combustibles vegetales, algunas veces, están conectados por caminos de vegetación no identificables por el clasificador al estar muy por debajo de la resolución espacial utilizada en el proceso de clasificación de las imágenes satelitales. Por ejemplo, la mínima unidad de información digital, el pixel, del mapa en ciertas regiones del *Parque Nacional Quebrada del Condorito*, contiene un efecto promediado de mayoritariamente piedras por lo que es clasificado este pixel como un elemento no combustible en una zona geográfica que puede contener un potencial camino propagador del efecto de fuego sobre vegetación. Una situación de este tipo es ilustrada a continuación con el siguiente esquema de Figura 3.23.

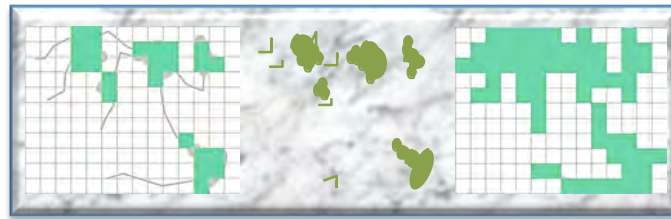


Figura 3.23. (Centro) esquema hipotético de una distribución de pastizales entre las rocas donde cada uno de los parches están conectados a través de delgados caminos de pastizales. (Izquierda) situación en la que la clasificación subestima la cantidad de combustible y se generan islas combustibles difíciles de alcanzar por la propagación del efecto del fuego que genera el simulador. (Derecha) es un escenario donde el simulador puede llegar a quemar todo el combustible pero la sobreestimación de combustibles genera errores en la determinación de áreas quemadas.

Un problema que existe en el Parque Nacional Quebrada del Condorito es la existencia de gran cantidad de piedras (material no combustible) entre la vegetación, a tal punto, que el aspecto de la vegetación en la imagen satelital presenta un marcado aspecto de discontinuidad entre islas de combustible. Este es un problema que se pudo observar con el simulador *FARSITE* donde, después de realizar los trabajos de obtención de mapas de combustibles obtenidos por *Laura Zalazar* con imágenes satelitales (Zalazar, 2014), resultaba casi imposible generar una propagación del efecto del fuego en terreno pedregoso del parque lo cual llevó a complicar los criterios en la clasificación en estas circunstancias para que el simulador *FARSITE* pueda generar algún tipo de propagación de las llamas. Este problema se debió principalmente al modo de funcionamiento del *FARSITE* el cual produce la propagación del efecto del fuego mediante propagadores elípticos y lo limita la discontinuidad en los combustibles dada por el problema de resolución espacial y por ser indetectable el combustibles entre las piedras (ver Figura 3.24).



Figura 3.24. Escenario noroeste del incendio ocurrido en Parque Nacional Quebrada del Condorito. Imagen de zona quemada (en negro). En la imagen puede observarse como el fuego, que venía desde el sur, se dirigió hacia el norte guiándose por las orillas de un camino como hilo conductor a su posterior despliegue en el norte. Imagen satelital (Image © 2014 DigitalGlobe, Google earth) 25 de agosto de 2009 (después del incendio). Aquí también se notan zonas quemadas aparentemente aisladas difíciles de simular si uno no hace consideraciones en el mapa de combustible o en el simulador.

En el caso de un propagador hecho con AC basado solamente en la vecindad inmediata también existen estas complicaciones a menos que se realicen algunos cambios en la regla del autómata y que los parches de modelos de combustibles puedan ser quemados bajo ciertas condiciones con algún método. Para lidiar con esto se dotó al AC la posibilidad de evadir obstáculos cuando los vientos y las pendientes aumentan. En vista a las técnicas de spotting se imitó su comportamiento proponiendo una distancia en dirección a la dirección del viento y otra distancia en función a la pendiente las cuales tienen la posibilidad de variar su elongación en función a la intensidad de ambas variables. La mejor propuesta a tal caso es realizar una suma vectorial donde un vector aumenta su módulo con el viento y el otro con la pendiente. La suma de estos dos vectores da un vector resultante el cual es considerado como “elongación” del efecto del fuego ante las variables viento y pendiente el cual propaga el efecto del fuego con un peso estadístico que variará su efecto desde una mayor bondad a una menor bondad de que se enciendan las células mas alejadas. El resultado final es conseguir un frente de avance de fuego que pasará, en el caso de una fuente puntual, de ser un círculo a la forma elíptica o de huevo como describe la biografía (Anderson, 1983; Catchpole *et al.*, 1992; Hirsch, 1996) y además con la posibilidad de sobrepasar obstáculos no combustibles, propio de las técnicas de spotting. Si bien existen dos tipos de modelizaciones para el spotting la *teórica* y la *empírica*, este simulador podría considerarse que contiene un spotting empírico porque la descripción de su proceso de spotting va implícito al modelo de combustible que se elige haciendo el ajuste de los parámetros iniciales para su funcionamiento. A continuación se hace una breve descripción de ambas técnicas de spotting.

Modelización Teórica del Spotting

La *modelización teórica del spotting* consiste en el estudio de la trayectoria de las partículas, desde el frente de incendio hasta que aterrizan a cierta distancia. Este

movimiento consta de dos fases, la primera ascendente en el interior de la columna de convección y otra que desciende entre el penacho y el campo de vientos. Entonces, con este planteamiento, se formulan sub modelos para la obtención de los parámetros incluidos en la ecuación final. Los principales bloques utilizados en este proceso son la modelización de la velocidad del penacho, la velocidad del viento y la combustión de las partículas. Cada uno recibe un tratamiento diferente, según los autores.

Modelización Empírica del Spotting

Siguiendo la tendencia emprendida en la modelización de incendios de superficie y de copas, (McArthur, 1967) obtuvo también una expresión empírica para la determinación de la distancia máxima a la que pueden surgir focos secundarios en incendios ocurridos en la vegetación australiana. A excepción de éste y del modelo desarrollado por Muraszew y Fedele (1976), donde se estudia estadísticamente la producción de partículas incandescentes en el frente de fuego que son arrastradas por la columna, en relación con su magnitud, no hay constancia de ninguna otra aportación hasta hoy. Actualmente en el instituto de investigación CEMAGREF de Aix-en Provence (Francia) se lleva a cabo un estudio empírico de la ocurrencia de spotting en los países mediterráneos (Colin, 2000), basado en incendios históricos ocurridos entre 1994 y 1999. Paralelamente se analiza, mediante experimentos de laboratorio, las características físicas de la materia vegetal que propician la aparición de focos secundarios, y está previsto un estudio teórico del fenómeno en fechas posteriores.

3.2.7.1. Cálculo de la Elongación

El vector elongación es una magnitud adimensional que al multiplicarla por la resolución espacial del pixel asociada a la celda se transforma en una distancia física y cuando se redondea a su valor entero más próximo representa número de celdas en la grilla.

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_U + \mathbf{e}_T \quad [3.2]$$

donde

- \mathbf{e} : Vector posición de la elongación del frente de fuego en función a los vientos y el terreno.
- \mathbf{e}_U : Elongación en función del viento.
- \mathbf{e}_T : Elongación en función a la inclinación de las pendientes.

El vector elongación en función del viento (\mathbf{e}_U) se construye haciendo

$$\mathbf{e}_U = e_U \cos \theta_U \hat{i} + \text{sen} \theta_U e_U \hat{j} \quad [3.3]$$

$$e_U = A \cdot U^B \quad [3.4]$$

con

- θ_U : Orientación del viento $[0^\circ, 360^\circ)$, donde la orientación de 0° se corresponde a la orientación del norte geográfico.
 U : Intensidad del viento $[m/s]$.
 A, B : Son parámetros a determinar en función a los combustibles. A tiene como dimensión la inversa de la velocidad $[s/m]$.

Y el vector elongación en función del terreno (e_T) se construye haciendo

$$e_T = e_T \cos \theta_T \hat{i} + \text{sen} \theta_T e_T \hat{j} \quad [3.5]$$

$$e_T = C \cdot T^D \quad [3.6]$$

con

- θ_T : Orientación de la pendiente $[0^\circ, 360^\circ)$, donde la orientación de 0° se corresponde a la orientación del norte geográfico.
 T : Inclinación de la pendiente $[0^\circ, T_{max}]$, donde T_{max} define el umbral de máxima pendiente, después de la cual, no se esperaría vegetación.
 C, D : Son parámetros a determinar en función a los combustibles.

Los parámetros A, B, C, D deben ser calculados en condiciones controladas para cada modelo de combustible definidos en la región considerando la humedad, la pendiente y el viento que actúa sobre los mismos.

3.2.8. Cálculo de la Velocidad del Frente de Fuego sin Atenuaciones en la Dirección de Máxima Propagación

En el caso que no se utilicen atenuaciones del frente de fuego, algo que se explica luego, podemos calcular la velocidad de máxima propagación del frente de fuego en la dirección de mayor variación sumando a la velocidad de propagación (sin vientos ni pendientes) una velocidad extra debida al aporte de los vientos y las pendientes haciendo

$$V = V_0 + \Delta V_{vp} \quad [3.7]$$

donde

- V : es la velocidad del frente de fuego en su dirección de máxima variación.
 V_0 : es una cantidad tabulada para un determinado modelo de combustible y es sacado de tabla.
 ΔV_{vp} : es el incremento de velocidad del frente debido a la contribución del viento y la pendiente.

V dependerá de del módulo e del vector elongación e descrito anteriormente

$$e = |e| \quad [3.8]$$

V_0 es una velocidad tabulada para un determinado modelo de combustible, ella es constante a lo largo de toda una celda de combustible del AC, por tanto, se puede calcular el tiempo t que tardará en quemarse la célula en su totalidad haciendo

$$t = \frac{e_r}{V_0} \quad [3.9]$$

En ese tiempo t el fuego puede recorrer la distancia e_r que vendría a ser el largo de la celda, y en definitiva y para este caso, la resolución espacial del pixel dada en metros. Por otro lado t es el tiempo real que modela el AC en cada turno.

Con el tiempo t y con el factor adimensional de elongación e , que toma valores mayores o iguales a cero para definir un factor que incrementa celdas, podemos definir las velocidades de la siguiente manera

$$V_0 = \frac{e_r}{t} \quad [3.10]$$

$$\Delta V_{vp} = \frac{e_r \cdot e}{t} \quad [3.11]$$

de lo cual resulta inmediata la construcción

$$V = V_0 + \Delta V_{vp} \quad [3.12]$$

$$V = \frac{e_r + e_r \cdot e}{t} \quad [3.13]$$

$$V = \frac{e_r + e_r \cdot e}{\frac{e_r}{V_0}} \quad [3.14]$$

y finalmente

$$V = V_0 \cdot (1 + e) \quad [3.15]$$

utilizada en la tabla de cálculo de velocidad de los frentes de fuegos de pastizales para Estela 1.00 (ver Anexo 10).

3.2.8.1. Adaptación de los modelos de combustibles de Anderson

Se tomó como guía los 13 modelos de combustibles estadounidenses (Anderson, 1982) que utiliza Rothermel (1972) para el cálculo de la ROS. Para ello se hizo una adaptación de los parámetros para que el comportamiento del fuego del motor de cálculo de Estela 1.00 se asemeje al de Rothermel pero ejecutando una función más sencilla favoreciendo la velocidad de cálculo que se necesita para las celdas encendidas del AC. Se procedió de la siguiente manera, teniendo en cuenta el trabajo realizado en Italia (ver Anexo 6) se dio un peso a los modelos de combustibles, de forma tal, que el que presenta una ROS mayor tiene como peso el 80% respecto a los demás. En la Tabla 3.2 se muestra el detalle de la adaptación que se hizo para cada modelo.

Tabla 3.2.

Adaptación comparativa de los 13 modelos estadounidenses de Anderson para su implementación en Estela 1.00. En definitiva, aquí se propone que modelo de combustible propaga más rápido el fuego en condiciones homogéneas de combustible, sin desniveles en el terreno y sin vientos.

<i>Modelo de combustible</i>	<i>Designación</i>	<i>Peso asignado %</i>
1	Pastizal	60.0
2	Pastizal	27.0
3	Pastizal	80.0
4	Arbustal	58.0
5	Arbustal	14.0
6	Arbustal	25.0
7	Arbustal	15.0
8	Mantillo de bosque	1.2
9	Mantillo de bosque	6.0
10	Mantillo de bosque	6.0
11	Residuos de actividad forestal	5.0
12	Residuos de actividad forestal	10.0
13	Residuos de actividad forestal	10.0

3.2.8.2. Atenuación de la combustibilidad en la dirección de la propagación

Por un lado la elongación produce que un máximo total de cinco nuevos focos de incendio sean considerados en la dirección del frente de fuego. Y por otro lado, teniendo en cuenta que la posibilidad de que se produzcan nuevos focos más allá de la fuente irá disminuyendo, se considera una atenuación del riesgo con la distancia. Esta atenuación se consideró como una función del módulo del vector elongación, de tal manera, que se propone un comportamiento de spotting semejante en todos los modelos de combustibles.

En cierta forma lo que se propone aquí es disminuir la bondad en generar focos de incendios con la distancia a la fuente y a la vez, introducir como peso de esta disminución alguna función. La función propuesta fue x^{-2} con la cual se obtienen los siguientes resultados (Figura 3.25).

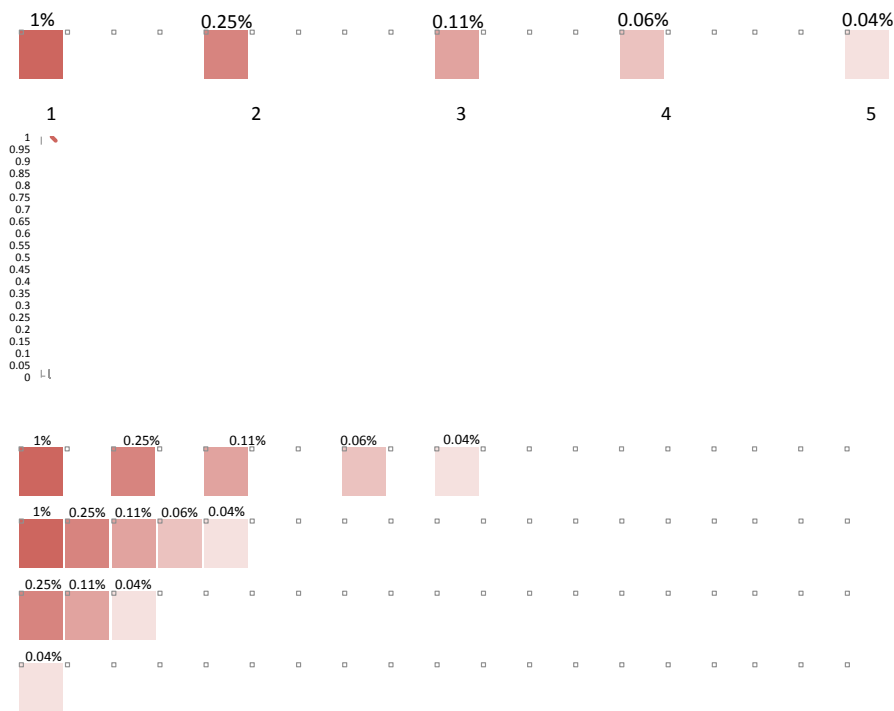


Figura 3.25. Atenuación de la combustibilidad en la dirección de la propagación. El módulo del vector elongación multiplicado por la resolución del pixel $e.e_r$ da como resultado una distancia y está representado por la celda más alejada con menor probabilidad de encender (0.04%). La primer fila de celdas, encima de la curva x^2 , representa el spotting y su distribución a lo largo de las celdas del AC y se consiguen dividiendo en 5 la distancia total de elongación. En la parte inferior de la curva se observan cuatro situaciones donde el vector elongación tiene valores cada vez menores. Se puede observar en las dos últimas situaciones como son almacenadas las bondades, de modo tal que la bondad que da menos posibilidades de encender la celda tiene prioridad.

3.2.9. Implementación

Se desarrolló la primer versión de un simulador de incendios de vegetación utilizando Autómatas Celulares (AC) y programándolo en el lenguaje IDL (Interactive Data Language). IDL es un lenguaje interpretado orientado al arreglo, análisis matemático y despliegue gráfico (WEB_Salvador). La principal ventaja es la implementación rápida del código y la portabilidad sobre distintas plataformas, es decir, un programa escrito en IDL bajo un sistema *Linux* debería correr sin problemas en *Windows* y *OS X* siempre y cuando se disponga del intérprete.

3.2.10. Estela 1.00

Estela 1.00 (Figura 3.26) es un simulador de incendios de vegetación estocástico, el cual fue desarrollado utilizando el modelo matemático de autómatas celulares descrito anteriormente. La propagación del fuego en *Estela 1.00* combina técnicas de spotting con bondad estadística para la aparición de nuevos focos de incendio. Para hacer uso de este código es necesario hacer una calibración de parámetros en

la zona geográfica que se pretende utilizarlo. El simulador tiene la posibilidad de evadir barreras cortafuegos cuando la intensidad de los vientos es grande lo que le permite simular, por ejemplo, una quema de pastizales cuando el fuego supera obstáculos como caminos, pircas o pequeños arroyos. Toda barrera cortafuego en Estela 1.00 es considerada un material no combustible el cual presenta una probabilidad de ser evadido en función a la dirección e intensidad de los vientos.



Figura 3.26. Presentación del software Estela 1.00, simulador para incendios de pastizales con motor de cálculo simplificado y sistema propagador basado en AC estocástico y con memoria.

3.2.10.1. Esquema de Funcionamiento

El simulador toma información de entrada que debe ser procesada como paso previo a la simulación. A medida que se generan los resultados, Estela 1.00, es capaz de mostrar algunos datos generales del incendio en tiempo de ejecución. Al finalizar el proceso se generan dos salidas, un *archivo de reportes* y una colección de *mapas con la evolución del incendio* (ver Figura 3.27).

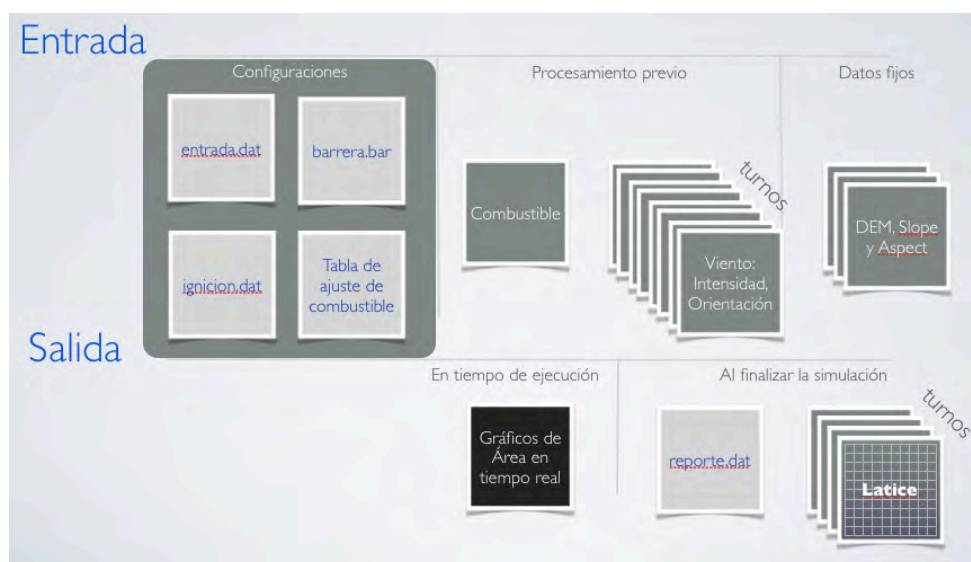


Figura 3.27. Esquema de de manejo de archivos de Estela 1.00.

Entrada de Datos

La entrada de datos está constituida por nueve archivos (Tabla 3.3) donde es posible realizar *configuraciones* del AC, pasar información que requiere un *procesamiento previo* y otro tipo de datos de entrada al que se denominó *datos fijos* como el DEM (elevación digital del terreno).

Tabla 3.3.
Archivos de entrada y un detalle resumido de cada uno.

Tipo de entrada	Archivo	Detalle
Configuraciones	<i>entrada.dat</i>	Este archivo contiene la dirección donde se encuentran los datos almacenados y donde serán guardados, los nombres de los archivos de entrada, datos espaciales y temporales de la escena en estudio, parámetros de configuración del AC como la configuración del modelo matemático y punto de ignición.
	<i>barrera.bar</i>	Las barreras cortafuegos actúan como máscaras. Ésta, conforma una matriz de unos salvo en las regiones donde existe una barrera (ceros). Se multiplica la matriz de barrera elemento a elemento con la matriz de combustible afectando directamente su combustibilidad.
	<i>ignicion.dat</i>	Existe más de una manera en pasar los puntos de ignición. (i) dar sólo un punto, (ii) una cruz alrededor del punto, (iii) los ocho vecinos ó (iv) pasar la matriz de <i>ignición.dat</i> que es, ni más ni menos, un mapa de zonas con combustible, con fuego y áreas quemadas.
	<i>ajuste_comb.dat</i>	Se trata de una tabla donde se guarda la combustibilidad de cada modelo de combustible. La combustibilidad de cada combustible queda definida por dos parámetros (i) un número del 0 al 1 que indica porcentaje donde el 1 corresponde al mejor combustible de la región, (ii) tiempo que dura encendido el combustible.
Procesamiento previo	<i>combustible.asc</i>	Los combustibles se categorizan con valores del 1 al 13 (como en los modelos de Anderson) pero esto no impide para nada la creación de nuevos modelos.
	<i>viento.dat</i>	El viento se representa por una colección de matrices. Cada una de las cuales recrea los vientos existentes en ese escenario en

distintas etapas de tiempo. La cantidad de matrices va en función a la cantidad de *turnos* del AC.

Datos fijos	<i>dem.asc</i>	Mapa de elevación del terreno en metros.
	<i>slope.asc</i>	Inclinación de la pendiente en grados sexagesimales.
	<i>aspect.asc</i>	Orientación de las pendientes en grados sexagesimales.

Salidas

La salida de datos se produce durante la simulación, con gráficas en pantalla, y se genera un archivo con reportes de datos varios del simulacro de incendio (ver Tabla 3.4). La ejecución del programa genera una variable en IDL que contiene una capa de *t* matrices (grillas del AC), tantas, como *turnos* se hayan definido para la simulación. Con esto es posible hacer un registro de la situación del fuego en distintos momentos y hasta es posible también, la generación de un video que muestra su propagación sobre el paisaje.

Tabla 3.4.
Archivos de salida y un detalle resumido de cada uno.

Tipo de entrada	Periférico de Salida	Detalle
En tiempo de ejecución	<i>(sólo salida a pantalla)</i>	Gráficos de área en tiempo real. <i>Modelos:</i> Se muestran dos curvas que muestran el comportamiento del modelo de comportamiento del fuego con (1) la pendiente y (2) con el viento. <i>Áreas y vientos:</i> (3) curva de área quemada en función del tiempo, (4) áreas quemándose en función del tiempo, (5) área afectada y (6) comportamiento de la intensidad promedio del viento en cada período del tiempo.
	<i>reporte.dat</i>	Es un archivo con un reporte general de todo el proceso de simulación. Se indica aquí la ubicación de todos los datos de entrada, orientación de la pendiente, inclinación del terreno, ajuste de combustibles, vientos, barreras cortafuego, ubicación de la imagen en UTM,

resolución espacial, los estados que utilizó el AC, la configuración del modelo matemático empleado, dimensiones de la grilla, datos sobre el combustible, la intensidad máxima del viento y un reporte de evaluación de daños con datos de quemado, quemándose y áreas afectadas por el fuego.

Ignición.dat Existe más de una manera en pasar los puntos de ignición. (i) dar sólo un punto, (ii) una cruz alrededor del punto, (iii) los ocho vecinos ó (iv) pasar la matriz de *ignición.dat* que es, ni más ni menos, un mapa de zonas con combustible, con fuego y áreas quemadas.

3.2.11. Resultados

3.2.11.1. Condiciones Extremas de Mucha Piedra y Vientos Intensos

El incendio en Parque Nacional Quebrada del Condorito, 12 de julio de 2009 tuvo su punto de ignición en UTM: 328932.00mE, 6501131.00mS y es un incendio complejo de recrear con los simuladores por presentar discontinuidad en los combustibles como se puede observar en la imagen satelital (Figura 3.28) y en la fotografía (Figura 3.29) que se ven a continuación

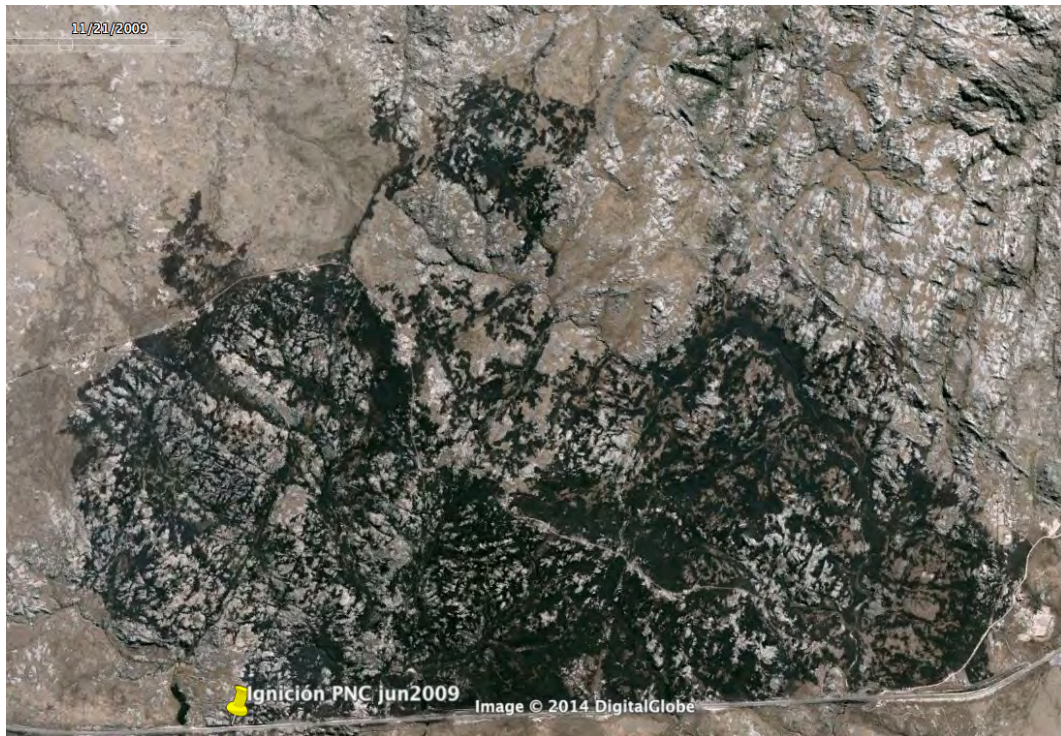


Figura 3.28. Ubicación del punto de ignición, es posible ver en esta imagen el intrincado camino del fuego entre el no combustible que dificultan las simulaciones de incendios en esta región cuando el combustible no presenta una distribución homogénea en el terreno. Imagen satelital (Image © 2014 DigitalGlobe, Google earth) 25 de agosto de 2009 (después del incendio).



Figura 3.29. Fotografía del punto de ignición en el Parque Nacional Condorito. El incendio se inició a las 15:00h en zona con pendientes y entre las piedras al costado de ruta nacional 20 (UTM: 328932.00m E, 6501131.00m S) donde indica la flecha.

Esta situación geográfica fue el escenario perfecto para probar la propagación de fuegos en zonas pedregosas. Lo que se hizo fue trabajar con un mapa de combustible modificado para exagerar la cantidad de combustible acentuando aun más la existencia de piedras. Esta información de mapas de combustibles sobreestimando los no combustibles y fue suministrada por *Laura Zalazar* (Zalazar, 2014) quien trabajó con imágenes SPOT de 10m de resolución espacial en la zona generando distintos mapas de combustibles en su tesis de maestría en

Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (AEARTE), IG-FaMAF de CONAE. Por otro lado las condiciones iniciales del incendio en el Parque Nacional Quebrada del Condorito (PNQC) fueron suministradas por el Guardaparque Germán Jaacks. La condición de los vientos para esa fecha fueron consultados a Andrés Lighezzolo también de la maestría AEARTE 2011 de IG-CONAE especializado en pronósticos del tiempo atmosférico.

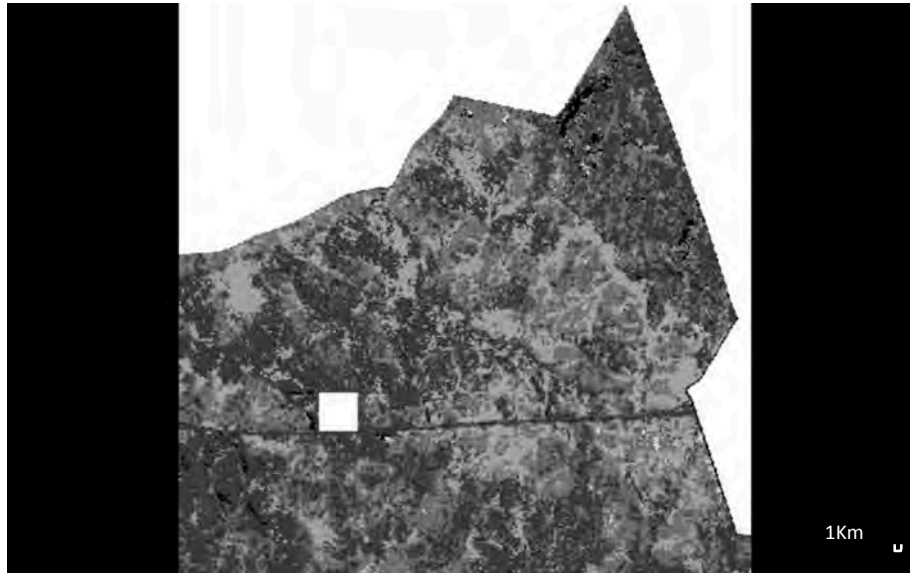


Figura 3.30. Zona de ignición representada por el cuadrado blanco al costado del camino en el Parque Nacional Quebrada del Condorito. La imagen representa una situación extrema para el simulador Estela 1.00 donde las piedras (no combustible) son color gris más oscuro. Es necesario considerar un área de ignición suficientemente grande para asegurarse de encender los pequeños parches de pastizales representados por los otros tonos de grises. El mapa de combustible suministrado por Biol. Laura Zalazar es una representación exagerada de la realidad en el cual se muestra suelo sin vegetación por exceso para los fines de esta demostración de propagación de fuegos mediante parches de vegetación entre las piedras.

En estas condiciones extremas de discontinuidad de combustibles el propósito fue realizar una propagación del fuego. Primero se intentó comenzar la ignición colocando en estado “encendido” a una celda que se correspondía al pixel donde se sabe que ocurrió la ignición. Pero el efecto promediado en el pixel entre los pastizales y piedras favorecía a las piedras. Esto hacía que el incendio no pudiera comenzar pues tratábamos de “encender piedras”. Incluso, moviendo de su lugar al punto de ignición era difícil comenzar la propagación por lo que, la técnica de ignición, pasó de ser un pixel a ser un área constituido por varios de ellos. Este conjunto de celdas encendidas representan un área quemada pasados varios minutos. En la figura anterior (Figura 3.30) se propone una región cuadrada para evaluar si existe una propagación. Una región de ese tamaño logra encender algunas células combustibles y el proceso de propagación de fuego de Estela 1.00 con técnicas de spotting toma vida. A continuación se visualiza una evolución temporal de un frente de fuego que se abre caminos entre celdas no combustibles (Figura 3.31 y 3.33).

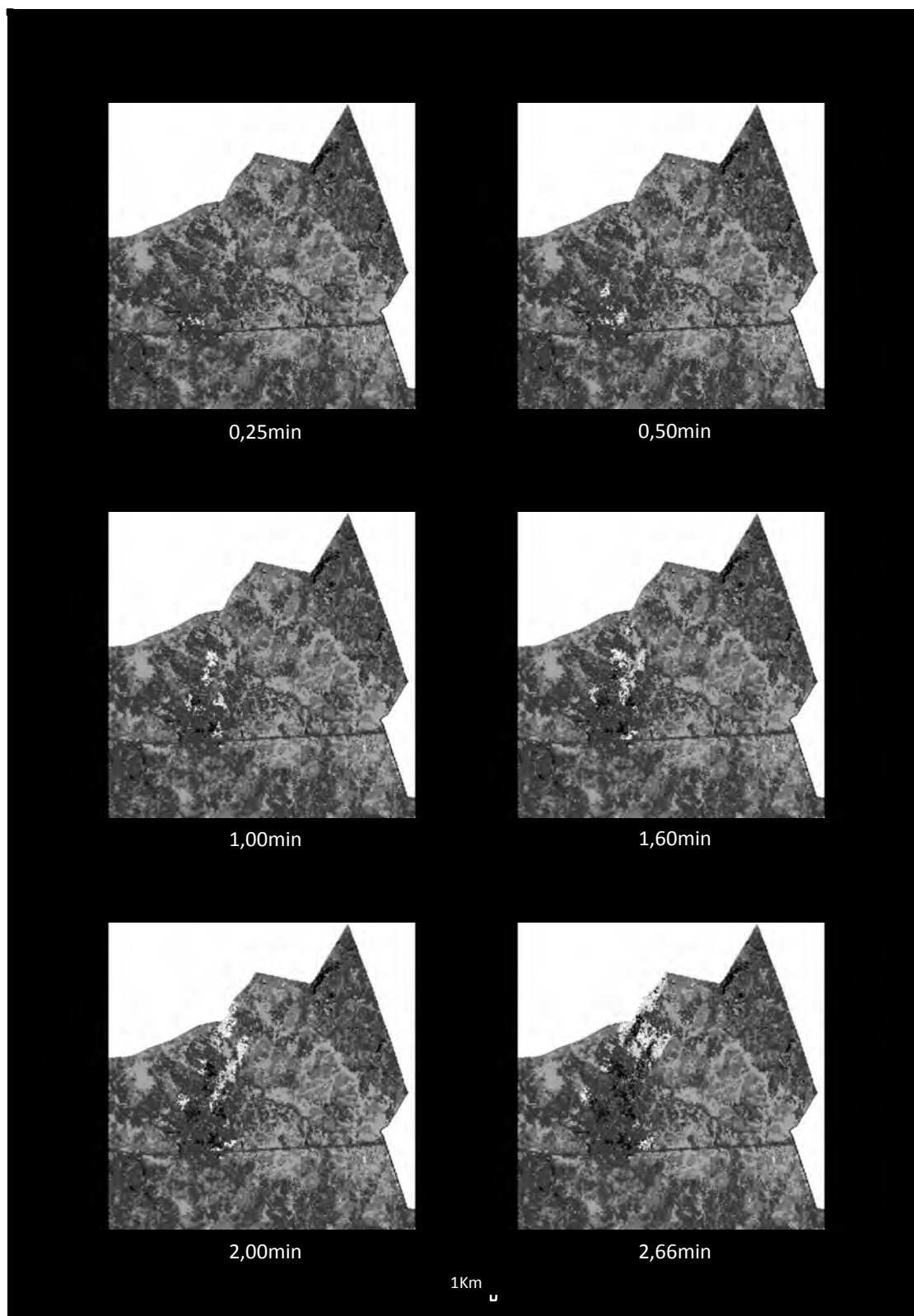


Figura 3.31. Secuencia con vientos intensos suroeste donde se visualizan en distintos momentos de la simulación del incendio los focos activos (puntos blancos dentro del parque), zonas quemadas (puntos negros), materia no combustible (gris oscuro) y modelos de combustible (otros tonos de grises).

El resultado final se visualiza en la figura a continuación (Figura 3.32).

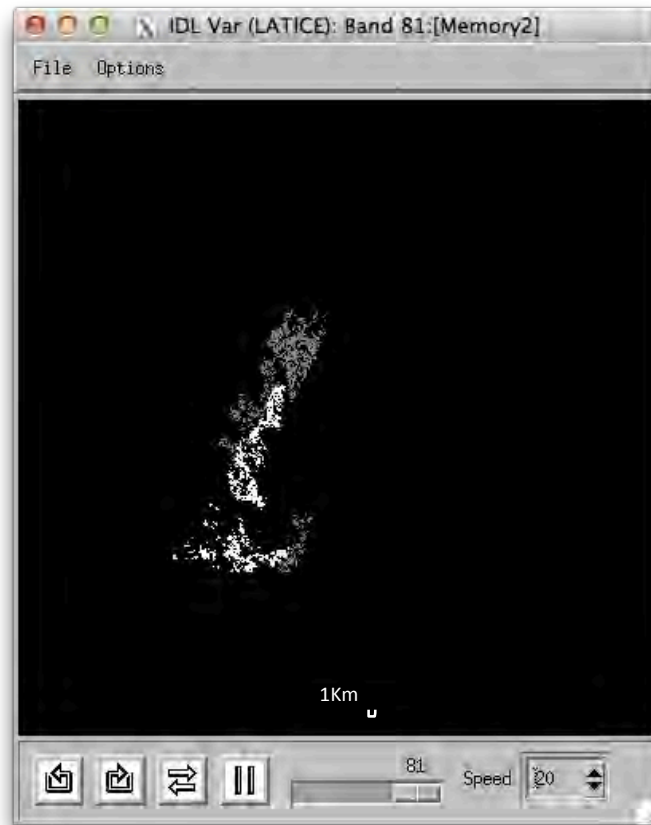


Figura 3.32. Resultado de la simulación. La parte blanca representa campo quemado y la gris fuegos activos.

En ella se observa el resultado de esta quema. Las regiones en gris muestran las celdas que aun se encuentran encendidas y las celdas en blanco son las que ya fueron quemadas y se encuentran apagadas. Es importante aclarar que esta simulación es un ejemplo a modo ilustrativo. Aquí se han modificado los combustibles para obtener situaciones extremas de propagación de frentes de fuego aún con discontinuidad en los combustibles y con vientos intensos. Por este motivo en esta simulación los resultados de los perímetros y áreas quemadas no van a coincidir con los de la realidad del día 12 de julio de 2009.

A continuación se ilustra el mismo comportamiento de fuego anterior pero visualizando solamente los fuegos activos y su expansión entre las piedras.

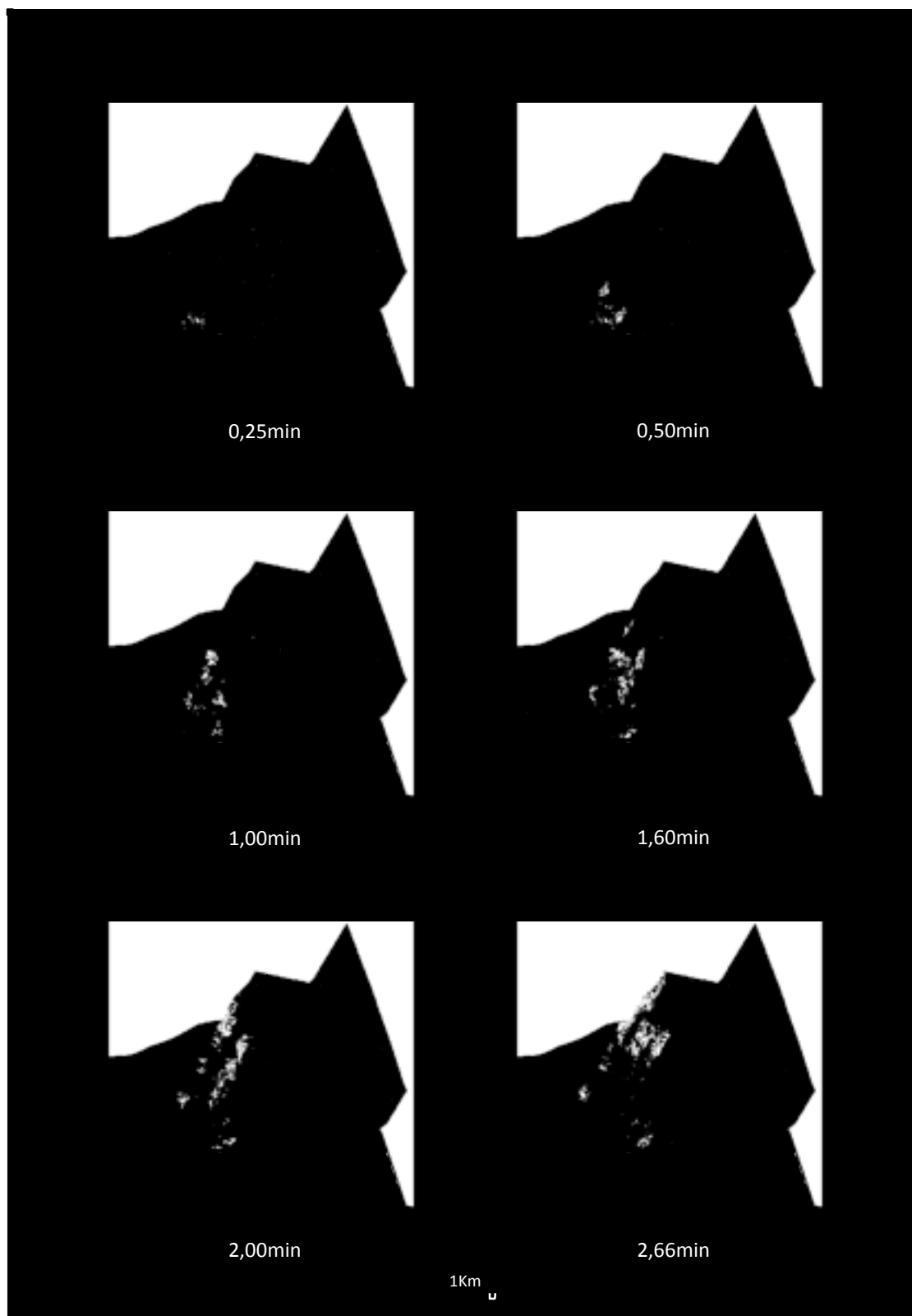


Figura 3.33. Secuencia donde se visualizan los focos activos en distintos momentos de la simulación del incendio. Al igual que en la Figura 3.31 el viento es suroeste.

3.2.11.2. Simulación del Incendio en la Región de Basilicata, Italia

Ahora tratamos de reproducir la realidad de un incendio de vegetación con las condiciones medioambientales y de combustibles. Con este fin elegimos el incendio de vegetación ocurrido en cercanía del pueblo Latrónico en la región de la Basilicata, Italia el día 22 de julio de 2007 del cual ya se habló en un capítulo 2 y se utilizó el simulador *FARSITE*.

Modelos de Combustibles y Barreras

En este incendio la intensidad del fuego no fue muy elevada. Los modelos de combustibles fueron suministrados por *Antonio Lanorte* (IMAA-CNR en Potenza, Italia) y son los mismos utilizados para las simulaciones con *FARSITE* del capítulo 2. Una vez ocurrido el fuego los bomberos actuaron inmediatamente atacándolo principalmente desde el lado este del escenario donde existe un camino de acceso bien definido en las imágenes de *Google Earth*. Esta última fue la barrera más importante, luego, al oeste, no se sabe muy bien si el fuego tuvo ataques directos pero se identificaron varios arroyos, tierras bajas y húmedas que pudieron actuar como barreras naturales para el avance de las llamas en esa dirección (ver Figura 3.34).

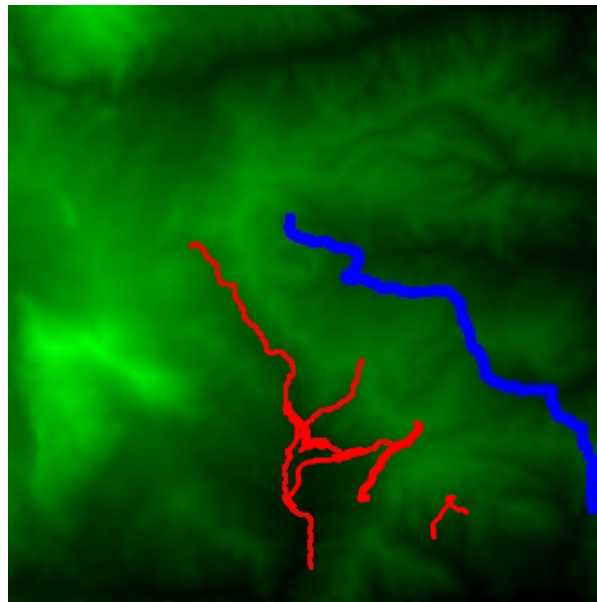


Figura 3.34. Visualización de las barreras cortafuegos sobre un fondo que representa el DEM (del inglés Digital Elevation Model, en español Modelo de Elevación Digital) del terreno, donde el verde más claro indica mayor altura. En azul se visualiza parte de un camino de montaña que actuó como barrera al ocurrir el incendio, en rojo se contempla la ubicación aproximada de arroyos que actuaron aparentemente como barreras en la zona oeste del escenario de fuego.

Comparaciones con *FARSITE* y la Realidad

Después de realizada la simulación se obtuvieron resultados con alguna semejanza al aspecto de la imagen satelital banda 3 (infrarrojo) de Aster (ver Figura 3.35.ii). Como es de esperar ninguna de ambas simulaciones “copia” con

exactitud la forma del área quemada. Debido a que se consideró en forma parcial el ataque del hombre y no se tiene con exactitud los vientos en ese momento del incendio. Pero si pudo ponerse en evidencia aspectos característicos de ese evento, por ejemplo, la inmediata propagación de las llamas hacia el *NOO*, el desarrollo del penacho hacia el *N*, etc. (ver Figura 3.35).

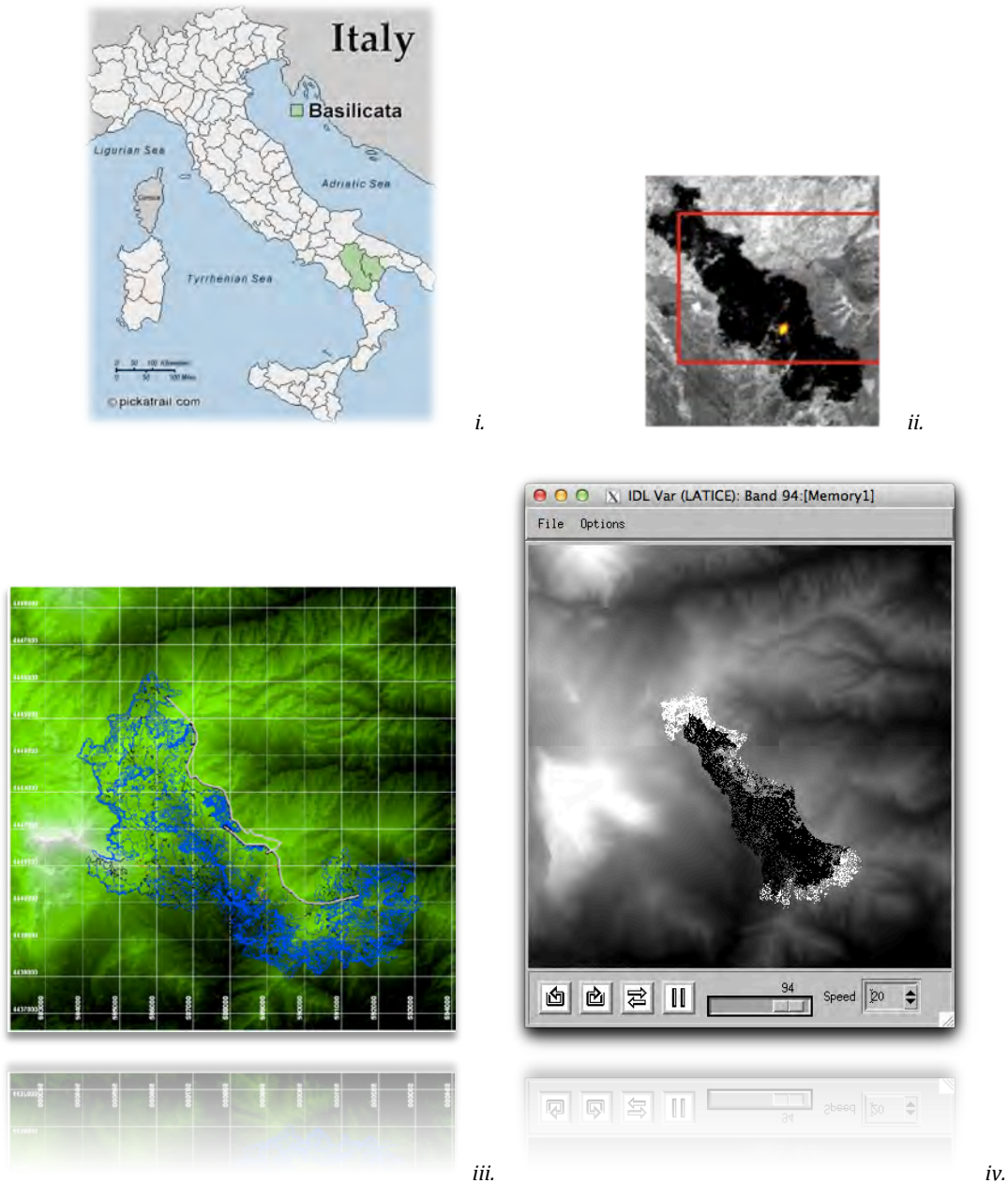


Figura 3.35. (i) Basilicata, región de Italia donde se realizaron las simulaciones. A modo ilustrativo se muestran tres escenarios: (ii) Imagen satelital en infrarojo del sensor ASTER donde se aprecia claramente la zona quemada después del incendio; (iii) simulación con FARSITE; y (iv) simulación hecha con Estela 1.00. Tener en cuenta que los simuladores no pudieron contemplar la actividad humana porque ésta información no fue disponible.

Las conclusiones y propuestas a trabajos futuros se exponen en Cap. 5 (ver apartados 5.1.2. y 5.2.2 respectivamente).

CAPÍTULO 4

MOTOR DE CÁLCULO Y PROBLEMAS NUMÉRICOS EN UN SIMULADOR CON PROPAGADORES ELÍPTICOS

4. MOTOR DE CÁLCULO CON PROPAGADOR ELÍPTICO

4.1. INTRODUCCIÓN¹²

En la actualidad se encuentra ampliamente difundido el simulador de incendios de vegetación FARSITE y varias de sus características han sido probadas en Cap. 2. Éste simulador, como otros que admiten propagación elíptico ondular (ver Tabla 1.14) no permiten tener acceso completo a sus códigos de programas. La accesibilidad completa al código de un propagador elíptico ondular nos permite explorar e introducir mejoras en los problemas numéricos comunes que se suelen presentar y que no siempre se encuentran bien documentados en los trabajos. Por este motivo y por la necesidad de disponer de un código modificable a propio gusto para su utilización —*a nivel local en principio y luego nacional*— se genera la necesidad de construir un simulador de incendios de vegetación que pueda ser modificado adaptándolo a las exigencias locales en función de los tipos de combustibles y de la disponibilidad de datos medioambientales. Utilizando propagadores elípticos ondulares se ataca, principalmente, la geometría perimetral de fuego en el avance de los incendios de vegetación y con ello surge el código de programa del simulador de incendios de vegetación *Elípticos 1.00* que se describe en éste capítulo. Los propagadores elípticos ondulares admiten la utilización de ecuaciones más complejas que en el caso de los autómatas celulares, simplemente, porque los propagadores elípticos la calculan un menor número de veces. Aquí, comenzaremos contando algunas características físicas y geométricas de los incendios para luego concluir en lo que fue el desarrollo de *Elípticos 1.00*. El conocimiento de las distintas características físicas y geométricas de los incendios de vegetación es importante para describir y entender su comportamiento. Existen distintas características físicas y geométricas que aportan información sobre el desarrollo del incendio. En conjunto, las que se tratarán aquí son: la altura, la longitud, la anchura y la inclinación de las llamas; el perfil de temperaturas, el tiempo de residencia y la velocidad de propagación; la forma y evolución del perímetro del incendio. Esta última es muy importante y será el punto de partida en lo que sigue a este capítulo para la obtención del propagador elíptico utilizado en el código del programa *Elípticos 1.00*. Estos parámetros físicos y geométricos influyen directamente en la capacidad de los medios de extinción y, por tanto, su predicción permite el diseño de estrategias de combate adecuadas. Por otra parte, la posibilidad de predecir estas variables permite evaluar las consecuencias y efectos de los incendios, los cuales, a su vez, son condición necesaria para

¹² Gran parte de la introducción fue extraída de «Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales» Josep Arnaldo Viger, Xavier Navalón Nonell, Elsa Pastor Ferrer, Eulàlia Planas Cuchi y Luís Zárate López. ISBN: 84-8476-120-7. Madrid 2004.

planificar las tareas de prevención. A continuación se describirán detalladamente las características geométricas de un incendio, en dos escalas diferentes: por una parte se sigue el desarrollo de todo el perímetro, y por otra se atiende al frente de fuego en particular. Además, se ven los parámetros físicos que merecen un tratamiento más detallado; por ello, se tienen especialmente en cuenta la intensidad lineal del frente del incendio, la velocidad de propagación, el tiempo de residencia y la distribución de temperaturas.

4.1.1. Morfología del Incendio

El estudio de la morfología del incendio de vegetación, desde su inicio hasta su estado final, permite plantear correctamente en todo momento el lugar y el ataque de las brigadas de extinción. En general, los incendios forestales no adoptan formas regulares, ya que su progresión está determinada por numerosos factores, tales como condiciones meteorológicas (dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad atmosféricas), topográficas (pendiente, orientación), ecológicas (disposición y especies vegetales) y sociales. No obstante, existen algunos patrones morfológicos que permiten identificar de manera orientativa, y en función de las condiciones mencionadas, la forma en que evolucionará el incendio.

—*Forma circular*: incendios que tienen lugar en terreno llano, con combustible homogéneo y sin viento.

—*Forma elíptica*: incendios con viento, combustible homogéneo y que se propagan en terreno llano o de pendiente regular.

—*Forma irregular*: incendios que se propagan bajo la influencia de vientos variables y/o combustibles heterogéneos y/o pendientes irregulares.

En cualquiera de estas morfologías, el contorno que dibuja el incendio puede ser dividido en distintos segmentos. La identificación de estos segmentos y el estudio de su comportamiento individual facilitan el análisis completo del incendio:

—*Frente del incendio*: parte del perímetro de incendio que avanza más rápidamente y con gran desprendimiento de calor. Su avance está determinado fundamentalmente por la topografía del terreno y el viento.

—*Cola del incendio*: zona opuesta del frente del incendio y más próxima a su origen, así como de la procedencia del viento. Es la parte que se propaga más lentamente de todo el perímetro.

—*Flancos del incendio*: partes del perímetro del incendio situadas entre la cola y el frente. En general, se forman paralelamente a derecha e izquierda de la dirección principal de propagación.

—*Dedos*: prolongaciones de áreas quemadas que se desarrollan detrás del frente de incendio. Se forman por un cambio en la dirección del viento o de la pendiente. Pueden desarrollar nuevos frentes de incendio.

—*Isla*: área localizada en el interior del perímetro del incendio, con presencia de restos de combustible sin quemar.

—*Entradas o bolsas*: discontinuidades del perímetro en las que el combustible no ha ardió.

—*Focos secundarios*: incendios que se producen fuera del perímetro principal, debido a la emisión de partículas combustibles incandescentes.

El análisis de las características físicas y geométricas del frente de llamas permite obtener información muy valiosa para la predicción de la evolución del incendio en todo su perímetro. La modelización de la evolución del incendio se trata en (4.1.4.).

4.1.2. Características Físicas de un Frente de Incendio

Cada una de las distintas características físicas nos proporciona parte de la información necesaria para predecir el comportamiento del frente de un incendio de vegetación. La intensidad lineal, la velocidad de propagación y el tiempo de residencia son algunas de las más importantes y estudiadas. Sin embargo, en el último punto se menciona una característica muy interesante y estudiada, pero desgraciadamente poco divulgada: la distribución de temperaturas en el frente de fuego.

Intensidad lineal y velocidad de propagación del frente de incendio

La *intensidad lineal del frente del incendio*, I_B , conocida también como la intensidad de Byram, se define como la cantidad de calor que se libera en el incendio por unidad de tiempo y de longitud de su frente. Debido a las relaciones de este término con los parámetros visibles de la llama, es la forma más común de medir la intensidad de un incendio. Es importante no confundir este concepto con los mecanismos de transferencia de calor. Byram (1959) desarrolló la siguiente expresión para medir la intensidad lineal del frente del incendio:

$$I_B = \Delta H_c \cdot m'_c \cdot v \quad [4.1]$$

donde,

I_B	<i>Intensidad lineal del frente de un incendio de vegetación (kW/m).</i>
ΔH_c	<i>Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg).</i>
m'_c	<i>Masa de combustible quemado por unidad de superficie (kg/m²).</i>
v	<i>Velocidad de avance del frente del incendio de vegetación (m/s).</i>

Tiempo de residencia del frente de la llama

Otra característica física especialmente relevante es lo que se conoce como tiempo de residencia del frente de la llama. Se define como el período de tiempo que un frente permanece en un punto concreto (Merrill y Alexander, 1987); determina, por tanto, la velocidad de dicho frente. Se trata de un parámetro difícil de medir ya que el combustible que arde es continuo en el espacio y dificulta el cálculo del tiempo en que la llama se encuentra actuando en un punto determinado.

A fin de estudiar el tiempo de residencia de la llama en un punto concreto, es importante conocer el tipo de combustible en que se propaga el incendio, ya que según sea éste se considerará un tiempo de residencia u otro. Si el combustible es homogéneo, este tiempo se denomina *tiempo de residencia de la llama en las partículas de combustible* (t_R), y se considera que, como todo el combustible es uniforme, el tiempo que tarda en arder una partícula, en presencia de llama, es el mismo tiempo que el frente está parado en ese punto (Anderson, 1969). Cuando el combustible es heterogéneo, este tiempo se denomina *tiempo de residencia del frente de la llama* (t_r); en este caso, al no ser uniforme el combustible, se trata del valor medio del tiempo que tardan en arder todas las partículas que forman dicho combustible en un punto determinado.

Los métodos para estimar el tiempo de residencia de la llama se basan en observaciones de incendios reales mediante fotografías y videos, o bien, a partir de la experimentación de incendios de laboratorio mediante túneles de viento o pruebas de campo, en mediciones del tiempo con termopares en la zona de propagación del incendio, los cuales proporcionan valores de temperatura en un punto fijo en función del tiempo.

Temperatura del frente de la llama

Existen numerosos estudios sobre la temperatura en incendios forestales; Trabaud (1992), por ejemplo, resume el trabajo de varios autores. A pesar del interés dedicado al estudio de esta variable, se considera que es uno de los parámetros más difíciles de medir en un gran incendio. La dificultad radica en que en un incendio de vegetación la temperatura varía permanentemente en el espacio y en el tiempo. Alexander (1982) observa que, una vez medida la temperatura en función del tiempo, se presenta el problema de la interpretación y aplicación de los datos obtenidos (puesto que esta variable no ha sido nunca correlacionada de modo que se le pueda dar una aplicación práctica, al contrario de lo que ocurre con la intensidad lineal). Dicho de otra manera, a pesar de que la temperatura es una de las características más fáciles de percibir en un incendio, su valor por sí mismo no lo caracteriza, y su aportación más valiosa se obtiene cuando se la relaciona con los mecanismos de transferencia de calor.

La temperatura depende del tipo, tamaño, distribución espacial y contenido hídrico del combustible, y de la velocidad del viento. Según la zona observada se registran unos u otros valores.

—*Temperatura del suelo*: depende del lecho orgánico y de la composición mineral del suelo. En general, el incremento de la temperatura es mínimo; en la bibliografía se encuentran valores para la superficie del suelo que se sitúan en el intervalo entre 250 y 300°C, bajando considerablemente a medida que se profundiza en las distintas capas del suelo. Trabaud (1992) indica temperaturas medias entre 50°C a partir de 5cm de profundidad, y ningún aumento de temperatura a partir de 10°C de profundidad. Desde el punto de vista de la propagación del incendio y de la lucha para vencerlo, la temperatura en el interior del suelo tiene poco interés.

—*Temperatura de la zona de combustible*: es la temperatura que se observa en el lecho de combustible, por delante de las llamas en el sentido de progresión del incendio. Básicamente, es una zona recalentada por radiación. Trabaud (1992) indica valores próximos a 500°C en zonas de garriga ¹³.

—*Temperatura de la zona de llamas*: los valores de esta zona del incendio se caracterizan por sus grandes y rápidas fluctuaciones. Trabaud (1992) las sitúa en el intervalo de 1.200 a 1.600°C. Por otra parte, Pyne *et al.* (1996) considera que los valores más frecuentes en un incendio real se encuentran en el intervalo de 700 a 980°C (sin embargo, en condiciones ideales de laboratorio se pueden situar entre 1.900 y 2.000°C).

—*Temperatura de la columna de convección*: por encima de la zona de combustión, las temperaturas varían ampliamente y decrecen muy rápidamente en función de la altura, aunque influyen también otros factores, como la intensidad del frente de llama, la altura de la vegetación, las condiciones ambientales y las posibles turbulencias. Como muestra de estas variaciones, Trabaud (1992) estima, en un incendio de garriga de 1,5m de altura, valores de 100°C a 6 m, de 280°C a 3m, y 1.000°C a nivel de la vegetación (1,5m).

4.1.3. Características Geométricas del Frente de Incendio

Según Alexander (1982) y Merrill y Alexander (1987), los diferentes parámetros geométricos que definen la llama de un frente de incendio son:

—*Altura de la llama (H)*: se define como la máxima extensión vertical media de las llamas del frente de incendio, medida desde la superficie del terreno hasta la punta de la llama.

—*Longitud de la llama (L_f)*: se define como la distancia existente entre la punta de la llama y el punto medio de su anchura.

—*Anchura de la llama (S_f)*: es la zona en la que se produce combustión con llama de forma continuada detrás del límite del frente del incendio.

—*Ángulo de la llama (ψ)*: es el ángulo formado por la llama del frente de incendio y la superficie del terreno.

Las características geométricas del frente de llamas son excelentes indicadores para el estudio del comportamiento de un incendio forestal. No sólo son un claro reflejo de cómo está progresando el incendio, sino que proporcionan datos indispensables para el cálculo de la radiación emitida por el frente. Así, determinan la configuración y la dimensión de la superficie radiante y permiten hacerse una idea sobre la emisividad de las llamas.

En muchos casos son estimables de forma visual, obviamente con un cierto margen de error. También pueden ser evaluadas mediante aparatos de captación de imagen visible e infrarroja (cámaras de video, fotografía y termografía) que, sin embargo, tampoco pueden ser consideradas como herramientas completamente

¹³ La garriga es un tipo de ecorregión formada por formaciones vegetales que surgen en los biomas de los bosques mediterráneos. Estas formaciones son el resultado de la degradación del chaparral y otras comunidades vegetales como bosques de quercineas provocadas por la acción del hombre: el sobrepastoreo y el fuego. Es un hábitat degradado que en ocasiones sustituye a los encinares y otros robledales quemados o talados.

fiables (Johnson, 1982) a este propósito. Por su importancia, las características geométricas de las llamas han sido ampliamente estudiadas y se han propuesto numerosas correlaciones para la obtención de su longitud, altura, anchura y ángulo. No obstante, su estudio no está ni mucho menos resuelto; por desgracia, no existen aún expresiones definitivas y concluyentes para la geometría de llamas en incendios de superficie, y mucho menos en incendios de copas.

Incendios de superficie

Los trabajos recogidos en la bibliografía se basan en pruebas de laboratorio y de campo. En general, los estudios analizan el frente de incendio, y las correlaciones obtenidas se suelen aplicar también a la cola del incendio —Nelson (1980) desarrolla una expresión para el frente y otra para la cola del incendio de vegetación—.

La mayoría de las ecuaciones utilizadas para la estimación de las variables geométricas son empíricas. Destaca la relación de Byram (1959) que, a pesar de haber sido desarrollada para un sólo tipo de combustible, sigue siendo utilizada actualmente y considerada un punto de referencia en los trabajos de investigación. No obstante, hay que señalar que también se han desarrollado modelos teóricos rigurosos para la descripción de las características de las llamas (Nelson, 1980; Albini, 1981).

Altura de la llama en incendios de superficie

La altura de la llama es uno de los parámetros más usuales para describir el comportamiento y la progresión de un incendio de vegetación. Está directamente relacionada con la velocidad de propagación del incendio, la cantidad de combustible y la velocidad del viento.

En general, se observa que la relación entre la altura de la llama y la velocidad de propagación tiene un comportamiento de tipo potencial, de la forma:

$$H = a \cdot v^b \quad [4.2]$$

siendo,

H *Altura de la llama (m).*

a, b *Coefficientes no dimensionales (-).*

v *Velocidad de propagación del frente del incendio (m/s).*

La altura de las llamas se reduce significativamente al incrementarse la velocidad del viento y, por otra parte, crece notoriamente con el aumento de la masa de combustible (la altura de la vegetación tiene aquí un importante papel) (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1.

Descripción de las posibles longitudes de llama y propuesta de ataque de incendio para diferentes intensidades lineales del frente de incendio.

Intensidad lineal (kW/m)	Longitud de llama (m)	Dificultad de control
< 350	< 1,2	Fácil
350 – 1700	1,2 – 2,4	Moderada
1700 – 3450	2,4 – 3,4	Muy difícil
> 3450	> 3,4	Imposible

Longitud de la llama en Incendios de superficie

La longitud de la llama es un parámetro que puede proporcionar una rápida estimación de la intensidad del incendio y, en consecuencia, ser un indicador para los trabajos de extinción (Rothermel, 1983) y de los efectos en la flora y en la fauna.

Rothermel (1983) relacionó longitudes de llama con intensidades lineales y con propuestas de extinción (ver Tabla 4.1) mediante la observación de incendios de superficie ocurridos en combustibles de vegetación modelizados por el mismo Rothermel. De los trabajos de extinción sugeridos en la tabla, Rothermel (1983) recomienda precaución, ya que en ningún caso fueron presentados como una guía para la seguridad de las brigadas de extinción.

En las Tablas 4.2 y 4.3 se recogen las ecuaciones más destacables de la bibliografía. Por otro lado, según Nelson (1980), las correlaciones empíricas obtenidas para la estimación de la longitud de la llama, son de la forma:

$$\frac{L_f}{S_f} = K \cdot \left[\frac{m''}{\rho_a \sqrt{g \cdot S_f}} \right]^n \quad [4.3]$$

donde,

- L_f Longitud de la llama (m).
- K Constante, depende del tipo de combustible (-).
- m'' Velocidad de consumo de combustible por unidad de área ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$).
- g Aceleración de la gravedad.
- ρ_a Densidad del aire ambiente (kg/m^3).
- n Exponente (-).

Tabla 4.2.

Ecuaciones para estimar la altura de las llamas en un incendio de vegetación de superficie.

Autor	Ecuación	Núm.	Observaciones
McArthur (1966)	$H = 13v + 0.24m_c - 2$	[4.4]	v en km/h y m_c en t/ha
Nelson (1980)	$H = I_B - \frac{47}{15444v}$	[4.5]	
Albini (1981)	$H = \frac{k I_B}{\eta \rho_c C_p T_a u_w}$	[4.6]	k es la fracción pirolizada de combustible, η es la fracción de aire que

			se incorpora a la llama, $\rho_c C_p T_a$ es el calor por unidad de volumen de aire, y u_w es la velocidad del viento en el medio de la llama
Alexander (1982)	$H = \text{sen } \psi L_f$	[4.7]	
Nelson y Adkins (1986)	$H = \frac{I_B}{385 u_w}$	[4.8]	

Tabla 4.3.

Ecuaciones para estimar la longitud de las llamas en un incendio de vegetación de superficie.

Autor	Ecuación	Núm.
Byram (1959)	$L_f = 0.0775 I_B^{0.46}$	[4.9]
Thomas (1963)	$L_f = \left[\frac{I_b}{229.97} \right]^{1.5}$	[4.10]
Nelson (1980)	Frente del incendio $L_f = \left[\frac{I_b}{511.07} \right]^{1.5}$ Cola del incendio $L_f = \left[\frac{I_b}{213.74} \right]^{1.5}$	[4.11]
Nelson y Adkins (1986)	$L_f = \left[\frac{I_b}{483.27} \right]^{2.03}$	[4.12]
Finney y Martin (1992)	$L_f = \left[H \frac{[\text{sen}(90 - \beta)]}{[\text{sen}(\psi - \beta)]} \right]$	[4.13]

Anchura de la llama en incendios de superficie

Según Wilson (1982), este parámetro, además de presentar grandes dificultades para una exacta determinación experimental, no ha sido definido con precisión y tampoco existe una definición estándar. A pesar de ello, desde el punto de vista teórico, representa una variable que complementa la caracterización de la llama y puede aportar información importante en el proceso de modelización. Se estudia por esta razón, resultando que la anchura de la llama está directamente relacionada con la velocidad de propagación del incendio —mediante una relación lineal (Trabaud, 1992)— y con la cantidad de combustible disponible y su grado de humedad.

La Tabla 4.4 recoge algunas ecuaciones que pueden emplearse para determinar dicho parámetro. De estas expresiones, la de Leicester (1985) proporciona valores muy elevados de anchura de la llama. La ecuación de Simard (1989) ha sido validada mediante resultados experimentales realizados por distintos autores (Anderson, 1966; Rothermel y Anderson, 1966; Brown, 1972).