

SEILAF: simulación de incendios forestales para el entrenamiento virtual

Ortiz Rojas, J. ¹; Prieto Löfkrantz, A. ²; Alejo Teissière, I. ³, Rodríguez Leal, J. M. ⁴., Rodríguez y Silva, F. ⁵;
Villalba Indurria, D. ⁶

¹ Supervisor. INDRA. Mar Egeo 4, 28830. San Fernando de Henares, Madrid. Spain.

² Head of Simulation and Software Department. FADA-CATEC. Aerópolis, 41309. Sevilla. Spain.

³ Software Engineer. FADA-CATEC. Aerópolis, 41309. Sevilla. Spain.

⁴ Profesor. Universidad de Sevilla. Avda. Reina Mercedes 2,41012. Sevilla. Spain.

⁵ Profesor Doctor. Universidad de Córdoba. Campus Univ. de Rabanales, 14071. Córdoba. Spain.

⁶Head of Forest Training. SEILAF. Aerópolis, 41309. Sevilla. Spain.

ABSTRACT

SEILAF is a system designed for training, to simulate and research the wildfire fighting in a virtual and immersive 3D world. This tool have been designed and built by a consortium of foundations, companies and university: CITIC, FADA-CATEC, INDRA, UCO and FAASA. This Centre is at Aerópolis, near Seville airport in Andalucía, Spain.

It includes three interconnected simulators: a Bell 412/212 FTD level 3 flight simulator, a simulator platform to train the person on a fixed wing spotter, controlling the air traffic on fires, and a simulator to train the person in charge of the management of the global operation, all of them moving around in a visual environment that shows the scenario of a dynamic bushfire on realistic scenarios. The concept is absolutely revolutionary and new worldwide: it will be the first simulation facility that will integrate the real fire propagation with standard simulation devices for resources.

Key words: SEILAF, fire and smoke simulation, virtual training.

SEILAF es un sistema diseñado para el entrenamiento, la simulación y la investigación de la lucha contra incendios forestales en un mundo inmersivo virtual en 3D. Esta herramienta ha sido diseñada y construida por un consorcio de centros tecnológicos, empresas y universidad: CITIC, FADA-CATEC, INDRA, UCO and FAASA. El Centro SEILAF está ubicado en Aerópolis, cerca del aeropuerto de Sevilla en Andalucía, España.

El sistema consta de tres simuladores interconectados: Un simulador de vuelo de helicóptero Bell 412/212 FTD nivel 3, un simulador de aeronave de ala fija para entrenar las tareas de coordinador aéreo y un simulador de Puesta Avanzado de Mando donde se pueden entrenar el equipo de dirección técnica de extinción de un incendio forestal. Todo en ello en significativos escenarios realistas de alta resolución. La idea es absolutamente novedosa: será la primera vez que se integra un servidor de propagación de fuego con la acción modelada de los recursos de extinción en un entorno táctico.

Palabras clave: SELAF, simulación de fuego y humo, entrenamiento virtual.

INTRODUCCIÓN

La realidad virtual demanda cada vez más escenarios de mayor resolución y aproximaciones mucho más cercanas a los eventos que en ellos ocurren. En los entornos de simulación diseñados con el objeto de formar en capacidades todo tiene que tener una relación unívoca e inconfundible con la verdadera experiencia real. Sino entraríamos en el riesgo de estar realizando entrenamientos negativos o incrementando las trampas cognitivas, fomentando paradójicamente posibles resultados poco eficaces, incluso en extremo, inseguros.

La modelización no solo simplifica la realidad sino que la transforma. Por lo que procede ser muy cuidadoso para que el modelado no elimine o atenúe los fenómenos que son indicadores de un comportamiento extremo del fuego.

En nuestro caso, como se podrá ver en el último apartado, existían unos indicadores especificados a los que se les tenían que dar una respuesta válida, debiendo partir siempre de datos de condiciones atmosféricas y orográficas muy próximas a la realidad terreno. De esta forma, se precisó de un servidor de viento que previamente adaptará el viento en altura a todos los matices de la rugosidad topográfica para poder disponer de la riqueza multivariable de alineación de fuerzas de propagación.

El otro gran factor de propagación son los combustibles, modelizados y digitalizados en 3 dimensiones siguiendo la tipología de Rothermel. Rothermel estableció 13 modelos de combustibles para poder utilizar las fórmulas generadas en “Behave” para predecir el comportamiento del fuego forestal. Se han incluido zonas con tratamientos selvícolas, podándose y adaptando el diseño gráfico de los árboles de SpeedTree™, para transformarlos en modelos 11, un bosque intervenido con tratamiento selvícolas preventivos y restos de podas. SpeedTree™, <http://www.speedtree.com/> dispone de una galería de vegetación digital modelada en 3 D de gran realismo y susceptibilidad de modificación o adaptación a diversos fenotipos, estados (verde, en llama, quemada), poda o índice de verdor. Sus imágenes de vegetación se hicieron famosas por recrear los hábitats del planeta Pandora en la película Avatar.

Otro ejemplo de confluencia de la virtualidad con la realidad que podríamos citar sería los diversos modelos de matorral con su gradiente sérico, escala de adaptación a la sequía, de valor añadido. Así, en las laderas de solana o en los escenarios sureños podremos encontrar formaciones arbustivas más leñosas que los ubicados en posiciones más privilegiadas de aportes hídricos o menos insoladas.

Por último, siendo el paso más crítico, teníamos que transformar los datos de salida del servidor de fuego a imágenes dinámicas con una sola pero casi inalcanzable condición, que

fueran creíbles o al menos identificables con los fenómenos homólogos en la vida real. Además se planteaba, por primera vez en la historia, el reto de afrontar las reacciones del fuego ante las acciones de extinción. Todo ello unido a una lógica semiautomática de cada entidad táctica debiendo parametrizar los modelos dinámicos de cada maniobra.

Actualmente los sistemas en funcionamiento que se tienen como referencia en la utilización del fuego en mundos virtuales para el entrenamiento de combate de incendios forestales con aeronaves son principalmente dos; el utilizado en Valabre por la escuela de los bomberos franceses y el desarrollado por INDRA en el simulador para el 43 grupo del Canadair CL415.

Valabre, montó un entorno de simulación hace más de diez años. Con el objeto de tener un campo virtual para entrenar a los bomberos franceses en la lucha contra incendios forestales. Aun con las múltiples actualizaciones que han efectuado, el fuego, hasta hora, sólo es una representación visual de la llama con una imagen estática de humo. Suficiente para la realización de complejos ejercicios de rol-play organizacional donde los bomberos aprende a reaccionar y a trabajar en emergencias de incendios forestales coordinados y atendiendo a una cadena de mando.

El simulador del Canadair CL415 sólo dispone de imágenes de fuego coronadas por un humo negro dispuestas como objetivos donde hacer blancos en sus descargas de entrenamiento. La solución adoptada fue una salida visual suficiente para el entrenamiento en la operación de carga y descarga de los aviones anfibios. En EEUU existen soluciones similares para entrenar a pilotos de aviones de carga en tierra.

1 COMPONENTES DEL SISTEMA

La arquitectura del sistema la componen seis elementos principales.

1.1. Sala de servidores

Sala de servidores donde reside el cerebro del sistema. Dispone de 9 *racks*, un *rack* es un soporte metálico destinado a alojar equipamiento electrónico, informático y de comunicaciones, en forma de L, repletos de equipos COTS (Commercial off-the-shelf) productos estándar disponibles en el mercado, que garantiza el óptimo funcionamiento y control de cada elemento del sistema, así como un reemplazo rápido en caso de fallo.

El sistema que coordina todos los demás se denomina HOST y su funcionalidad es:

- Garantizar la simulación en tiempo real
- Gestionar los distintos comandos, modos y fases
- Sincronizar con todos los sistemas que componen los simuladores
- Ejecutar y realizar el ciclado correcto de modelos de simulación

Los tres simuladores se basan en el mismo hardware, partes tangibles del sistema y software, parte intangible o soporte lógico, y la principal diferencia radica en el número de elementos de cada sistema. Esto favorece la robustez de todo el sistema y reduce considerablemente el tiempo de respuesta ante una contingencia.



Fig. 1. Sala de equipos.

1.2. Simulador helicóptero Bell 412

Consta de una cabina de helicóptero B412, aeronave de ala rotativa, biturbina, de la casa Bell, con cuatro palas, comúnmente empleado en servicios de emergencias, rescates y extinción de incendios, totalmente instrumentada rodeada por un domo esférico de 3,25 metros de radio con un sistema de 6 proyectores sobre una base que se apoya en un sistema hidráulico de movimiento.

El simulador está diseñado para cumplir los requerimientos establecidos en la norma JAR FTD nivel 3, calificación del simulador para homologar las horas de vuelos en relación a las efectuadas en una aeronave real.



Figura 2. Simulador B412.

1.3. Simulador PMA (Puesto de Mando Avanzado)

La solución adoptada es un vehículo con todos los sistemas de comunicación simulados y una

estación meteorológica delante de un display de ocho metros donde dos proyectores de alta resolución proyectan el escenario virtual donde se desarrollan los ejercicios.

Desde el PMA (Puesto de Mando Avanzado) es donde el Director Técnico de Extinción (DTE) con su equipo de gestión de incidentes realizan una evaluación del incendio, consultan las predicciones meteorológicas, descubren oportunidades y prioridades de protección para elaborar un Plan de Acción de supresión, control o liquidación correspondiendo con las fases de evolución del propio incendio.



Figura 3. Simulador Puesto Avanzado de Mando (PMA).

1.4. Simulador COA (Coordinación Aérea)

En una cabina de un avión KingAir se ha dispuesto en dos monitores una serie de instrumentación de utilidad en la coordinación aérea. En este caso se ha utilizado un sistema de retroproyección que abarca todo el campo visual necesario para conseguir una perfeccionada inmersión en la coordinación y gestión de las operaciones aéreas.



Figura 4. Simulador Coordinador Aeronaves (COA).

1.5. Puestos de instructores

En el caso de los simuladores COA y PMA los puestos de instructores no están embarcados. Cada puesto de instrucción consta de un sistema de comunicación y tres monitores con las siguientes herramientas:

- IOS (Instructor Operation System). Interfaz que utiliza el instructor tanto para planificar como para ejecutar ejercicios.
 - En modo ejecución se pueden realizar las siguientes acciones.
 - Parar, cargar y ejecutar un ejercicio previamente definido en el planificador
 - Modificar las condiciones iniciales
 - Controlar la simulación (ejecución, pause, stop)
 - Seguir el estado del sistema y mensajes de instructor
 - Monitorizar y controlar:
 - Posición y parámetros de vuelo
 - Comunicaciones
 - Fallos
 - Entidades tácticas
 - Condiciones ambientales y visuales
 - Propagación incendio
 - Sesiones y marcas para realizar la evaluación posterior
 - En modo planificador el instructor puede realizar las siguientes operaciones
 - Parar, crear, eliminar y modificar ejercicios
 - Posición Inicial
 - Carga inicial
 - Averías preprogramadas (tiempo, evento condición)
 - Condiciones ambientales y visuales
 - Incendio
 - Entorno táctico
 - Editar maniobras
 - No hay distinción de tipo de simulador. Los ejercicios creados pueden ser ejecutados en cualquiera de los tres simuladores.
 - Mantenimiento de librerías
 - Base de datos de radioayudas
 - Base de datos de modelos
 - Usuarios
 - Waypoints & rutas
 - Zonas de interés (puntos de abastecimiento de agua, lagos, etc.)
 - Paquetes de datos (ambientales, visuales, posición, fallos, radioayudas)

1.6. Estacion de debriefing

El debriefing es la reunión posterior a una acción o a una misión en la que se extraen conclusiones de la misma. En ella se analiza el cumplimiento o no de los objetivos de la misión y se extraen conclusiones acerca de la actuación de todos sus participantes. Normalmente dichos participantes presentan sus informes sobre la acción realizada y se analiza el comportamiento del grupo y de cada individuo a fin de mejorar futuras acciones similares. Sirve por tanto para extraer conclusiones acerca de los puntos bien llevados a cabo y cuales han sido mal realizados o pueden mejorarse. Durante la reunión se presentan imágenes que han sido tomadas durante la acción. El debriefing como el briefing se realiza normalmente en base o en una sala para dicho efecto que dispone de medios audiovisuales, si bien, pueden realizarse pequeños briefings de emergencia o improvisados para planear estrategias de ataque o acción sobre el terreno de la misión.

Sistema donde se graba la evolución de las misiones, las comunicaciones de voz y las imágenes de las cámaras embarcadas en cada simulador. El sistema tiene una capacidad de almacenamiento online de hasta 500 horas de simulación.

2 SERVIDOR DE VIENTO LOCAL

La importancia que tiene el comportamiento del viento para el comportamiento del fuego hace necesario que SEILAF cuente con un software específico para el cálculo del flujo de viento en tiempo real, influido por la orografía del terreno en el que se va a realizar el entrenamiento y las condiciones de contorno especificadas por el vector de viento libre.

Hay que tener en cuenta los efectos derivados del viento al interactuar con el terreno, como pudiera ser el efecto de encauzamiento del viento en valles y cañones, o los efectos que se producen al tener grandes obstáculos, como pueden ser las montañas, en donde el viento sufre la atenuación en las áreas a sotavento o genera turbulencias localizadas alrededor de dicho obstáculo. Todos estos efectos son determinantes a la hora de modelar el comportamiento que va a tener el fuego. Se necesita el flujo de viento para que interactúe con él, de manera que éste se comporte con realismo, expandiéndose o incrementándose según la fuerza que ejerza el viento en las zonas donde se propaga.

Hasta el momento, los simuladores de vuelo nunca han tenido en cuenta el comportamiento complejo del viento sobre un terreno ni su interacción con el fuego. Los entrenamientos hasta la actualidad no contemplan las situaciones de riesgo que se puedan dar derivadas de estas condiciones atmosféricas utilizando, como mucho, un vector de viento libre fijo a aplicar en cualquier punto del escenario. En este caso, SEILAF se convierte en un sistema integral de entrenamiento para pilotos de helicópteros innovador en donde todos esos parámetros están cubiertos, siendo un referente en este ámbito.

Para hacer frente a estos objetivos, SEILAF cuenta con un aplicativo que se ejecuta como un servicio en una máquina dedicada exclusivamente a dichos cálculos.

A partir de los parámetros iniciales, que son: un vector inicial de velocidad de viento, un área

de terreno dada y el tiempo de la simulación en el que se hace efectivo el cambio de las condiciones de viento; el software comienza a calcular, en el mismo instante en que le llegue el comando, el modelado del flujo del viento para dichos parámetros. En la **Figura** se puede observar la trayectoria que tendrían las partículas expuestas al flujo de viento calculado por dicho software.

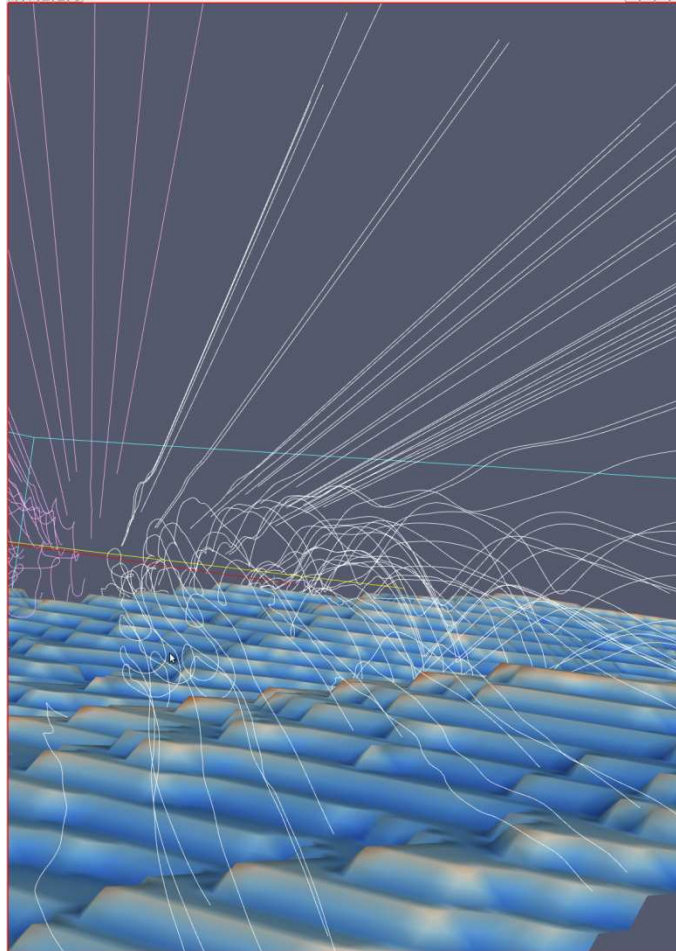


Figura 5. Ejemplo de la trayectoria de partículas como resultado del cálculo del flujo de viento

Desde hace más de 40 años, se están dando soluciones [1][2][3] pero, debido a la complejidad de la resolución de las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes, los modelados tardan del orden de días, semanas o, incluso, meses en poder completar el modelado, usando hardware específico, como superordenadores. En este proyecto, el tiempo de cálculo es crítico y no debe sobrepasar unos pocos minutos de duración.

En SEILAF, para conseguir un flujo de viento realista y ajustado en lo que a tiempo de cálculo se refiere, se utilizan métodos de mecánica de fluidos computacional (CFD), en concreto, se aplica el método de lattice-Boltzmann [4][5]. La aplicación de este método permite una alta paralelización de los cálculos [6], más velocidad de resolución al resolver las ecuaciones de Boltzmann en vez de las de Navier-Stokes (se demuestra que Boltzmann converge, con ciertas restricciones, a Navier-Stokes [4]), y una muy buena escalabilidad, siendo bastante veloz en dar un resultado dentro de los márgenes necesarios para un entrenamiento adecuado del piloto. En la **Figura**, se puede observar un ejemplo de cálculo del flujo de viento para un terreno dado, las medidas de velocidad del viento se dan en nudos.

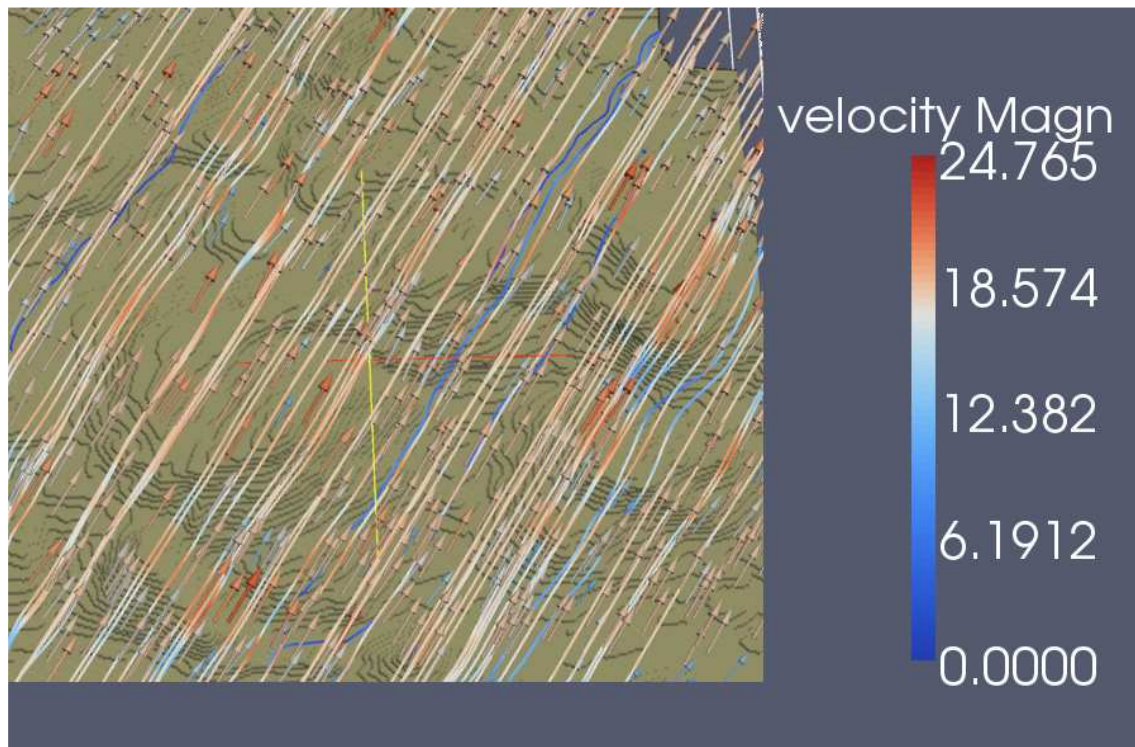


Figura 6. Cálculo del flujo de viento para un terreno dado y con un viento libre de veinte nudos.

La aplicación de cálculo de modelos de viento se ubica en una estación de trabajo de alta gama que posee 12 GB de RAM y 16 núcleos efectivos, lo que permite paralelizar el cálculo de los modelos para ahorrar el máximo tiempo. Con la configuración de uso de CPUs óptima y usando MPI (*Message Passing Interface*), se consigue que el nuevo modelo de viento esté calculado en torno a los dos minutos después de la llegada del comando que inicia un nuevo cálculo. Por lo tanto, se consigue el cálculo de flujo de viento para las regiones de terreno manejadas por el simulador en un tiempo muy breve, teniendo en cuenta las complejidades anteriormente citadas, siendo ésta la primera vez que se aplican técnicas de CFD para su utilización en simuladores de vuelo.

3 SERVIDOR DE FUEGO

SEILAF cuenta con un servidor de fuego específico para simular las condiciones de propagación de cualquier foco en ignición que bajo unas condiciones meteorológicas dadas, se estableciera en cualquier punto de un escenario geoespécífico.

Dicho servidor, ha sido desarrollado en base a criterios de dinámica de propagación del fuego que se desarrolla espacialmente, evolucionando sobre escenarios complejos, en los que se integran las características del terreno, la estructura, distribución espacial y combustibilidad de los ecosistemas forestales y los factores meteorológicos. Para ello ha sido necesario integrar las formas diferenciadas de la combustibilidad en tipos o modelos que respondiendo a un minucioso análisis de caracterización morfológica y volumétrica, recogen la cantidad, densidad, y compactación entre otras variables, de los combustibles finos, graduando de esta forma las condiciones de ignición según la disponibilidad de combustibles para la ignición.

Fundamentalmente el servidor de fuego proporciona información georreferenciada del avance

de las líneas de fuego, como expresión directa de la integración de las condiciones de la topografía, la meteorología y la heterogeneidad espacial de la combustibilidad en el territorio. Los resultados que proporciona al simulador de entrenamiento SEILAF, permiten reconocer en la proyección simulada del entorno visual, el aspecto y movimiento del fuego. La expresión de su dinamismo queda determinada por la velocidad de propagación, la dirección predominante de avance, y la longitud y dirección de la llama que resulta de la combustión de la vegetación que se produce por cada píxel, tanto para la evolución del fuego por superficie como por el dosel arbóreo. Internamente, los algoritmos de cálculo también proveen información en relación con la intensidad de reacción, calor por unidad de área, y la velocidad efectiva del viento, como resultado de la composición vectorial entre la influencia de la pendiente y la velocidad del viento adecuada verticalmente al centro de combustión del fuego en superficie y en el dosel arbóreo.

Los algoritmos de modelización de la dinámica de propagación incorporan módulos que permiten pronosticar las distancias de mayor probabilidad, en las que a partir de los frentes activos de fuego, se puedan llegar a generar nuevas condiciones de ignición por efectos de focos caloríficos, transportados por el efecto impulsor del viento y de la transmisión energética. La simulación matemática que permite pronosticar el desarrollo espacial del fuego resuelve tanto la propagación del fuego a nivel de los combustibles superficiales, como también a nivel del dosel arbóreo, ofreciéndose con ello un mayor ajuste hacia las condiciones reales en este tipo de fenómenos. La combustión ha sido tratada espacialmente de forma diferenciada, resolviendo el simulador de fuego las áreas que como resultado del movimiento del fuego, quedan determinadas como zonas en combustión, zonas en brasas, zonas quemadas y zonas no afectadas por el fuego. El servidor de fuego funciona en tiempo pseudo-real basándose en el modelo teórico de propagación “Visual Cardín” [13][14].

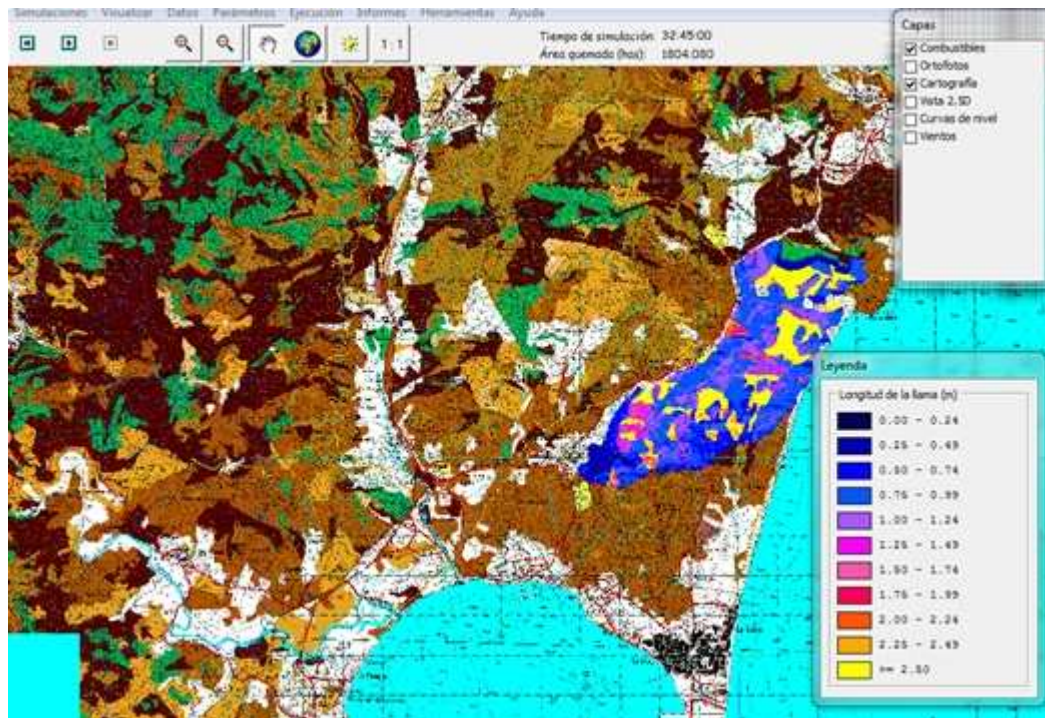


Figura 7. Imagen en dos dimensiones de la expansión del fuego generada y pronosticada mediante los algoritmos matemáticos integrados en el simulador de fuego

A partir de los antecedentes iniciales del modelo de propagación, se han incorporado en el contexto del simulador SEILAF, numerosas funcionalidades adicionales. De esta forma debido a los ajustes del modelo se pueden observar visualmente tamaños, colores y formas de llama y humo con un sentido físico de la dinámica de comportamiento del fuego. Además tiene respuesta a todas las acciones realizadas por cualquier tipo de elemento táctico en su tarea de extinción, incluso en la realización de quemas de ensanche y fuego técnico. En este sentido han sido incorporados en base a complejos algoritmos, herramientas capaces de simular los efectos de los descargas de volúmenes de agua y productos retardantes de la combustión, procedentes de elementos tácticos (medios aéreos de ala rotatoria, medios aéreos de ala fija y medios terrestres). De igual modo, también incluye el simulador de fuegos, un generador de condiciones convectivas directamente dependiente de la combustión y emisiones energéticas procedentes de las áreas en combustión.

La solución adoptada, en una breve descripción, pasa por relacionar la velocidad de subida de los gases derivados de la combustión, en función de la cantidad de energía calórica desprendida en julios por cada kilogramo de estructura vegetal consumida en el proceso de la combustión y la superficie de referencia unitaria que emite dicha energía. A partir de dicha variable e introduciendo el concepto de flotabilidad de la columna convectiva se determina la variable que engloba la diferencias de temperatura, interna y externa del penacho, la densidad del aire, el calor específico y la geometría volumétrica de la columna. La altura máxima de la columna tanto en presencia de viento como en ausencia el mismo es determinada por una función en la que la flotabilidad aporta la carga energética derivada de la combustión. Esta herramienta permite no sólo determinar las dimensiones asociadas a la verticalidad de la columna, sino también definir la dirección del desplazamiento de la misma y los pulsos vibratorios asociados con las turbulencias que generan las corrientes ascendentes de aire y

gases procedente del fuego. Tal efecto permite el entrenamiento de los pilotos en vuelos de aproximación al entorno entrópico de la vertical de las áreas afectadas por la evolución espacial del fuego.

En el ámbito más estrictamente informático, el servidor de fuego se ejecuta en una estación de trabajo de idénticas características a la del servidor de viento. Para aprovechar al máximo las prestaciones de esta estación, el software del servidor hace uso del entorno de programación OpenMP. OpenMP es una interfaz de programación de aplicaciones (API) para la programación multiproceso de memoria compartida en múltiples plataformas. Permite añadir concurrencia a los programas escritos en C, C++ y Fortran sobre la base del modelo de ejecución fork-join. Está disponible en muchas arquitecturas, incluidas las plataformas de Unix y de Microsoft Windows. Se compone de un conjunto de directivas de compilador, rutinas de biblioteca, y variables de entorno que influyen el comportamiento en tiempo de ejecución.

La base cartográfica utilizada en la simulación consiste en un mapa de combustibles vegetales de los distintos escenarios disponibles, así como de un Modelo Digital del Terreno a una resolución similar. Sobre el mapa de combustibles vegetales se representan todos los elementos incombustibles estáticos existentes en la zona, mientras que los elementos dinámicos (como cortafuegos y otras acciones de combate) se transmiten al servidor de fuego en tiempo real mediante mensajes UDP. User Datagram Protocol (UDP) es un protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas (Encapsulado de capa 4 Modelo OSI). Permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. Mediante configuración, se pueden modificar ciertas características de los combustibles, como por ejemplo la altura de los árboles, la altura a la base de las copas o la densidad de las mismas, que influyen directamente en el comportamiento del fuego por copas.

La resolución de la base cartográfica, rasterizada a píxeles de 5 x 5 metros, junto a un período de ciclo de simulación de tan sólo 1 segundo, proporciona una gran sensación de continuidad en la simulación. El intercambio permanente de mensajes UDP entre el servidor de fuego y el host transmite la evolución del comportamiento del fuego al resto de módulos del sistema. Esta alta resolución espacial, muy superior a la que puede representar el entorno visual (píxeles de 20 x 20 metros), es imprescindible para el correcto tratamiento de las acciones de combate.

Dentro del bucle de simulación que se ejecuta cada segundo (en tiempo pseudo-real), se ejecutan las siguientes acciones:

- Ignición de nuevos focos, si así se ha indicado desde el host mediante el correspondiente mensaje UDP.
- Estudio de los píxeles en combustión, para evaluar el posible paso de estado ardiendo a en brasa (si pasado el tiempo de residencia de llama), o de en brasa a quemado (si pasado el tiempo de residencia de brasa), tanto para la evolución del fuego por superficie como por el dosel arbóreo.

- Estudio de los cambios en la humedad de los píxeles afectados por descargas de medios aéreos o terrestres para tener en cuenta la evaporación del agua y de los retardantes empleados en la extinción. Recalcular las ecuaciones de propagación en caso de que se haya producido cambio en dicha humedad.
- Estudio de la posible propagación del fuego de superficie a los píxeles circundantes, así como de la posible propagación a fuego de copas (distinguiendo entre entorchamiento, fuego pasivo de copas y fuego activo de copas). En caso de encontrar píxeles incombustibles o acciones de combate, estudiar su impacto en la propagación (anchos de cortafuegos, incrementos de humedad de los píxeles debido a descargas,...).
- Estudio de la posible propagación del fuego de copas a los píxeles circundantes, dependiendo del tipo de propagación por copas (entorchamiento → sin propagación, fuego pasivo de copas → necesita de la existencia de fuego por superficie en el mismo píxel, y fuego activo de copas → evoluciona independientemente del fuego de superficie). Estudio de las acciones de combate de la misma manera que la indicada en la propagación del fuego por superficie.
- Creación del mapa de probabilidades de focos secundarios, en base a los píxeles en combustión, la probabilidad de generación de focos secundarios, la distancia máxima a la que se pueden producir dichos focos secundarios, y la susceptibilidad a la combustión de los píxeles afectados.
- Cálculo de la geometría de la columna de humo y de los pulsos vibratorios que se producen en la vertical de la zona incendiada.
- Transmisión de los resultados de los cálculos anteriores al host, mediante mensajes UDP.



Figura 8. Visor de pruebas del servidor de fuego. Los vectores morados marcan la dirección de la llama. Los colores del pixel el estatus de fuego.

4 GENERADOR DE IMÁGENES

Para la interacción entre servidor de fuego e interfaz visual se han definido los protocolos e interfaces de comunicaciones apropiados para comunicar el servidor de fuego y el resto de sistemas implicados.

4.1. Inicialización del fuego

Se proporciona al servidor de fuego la información sobre los materiales (tipos de combustible y terreno) de la zona elegida para la simulación y se refleja este área sobre un grid de celdas de un tamaño indicado por la interfaz de usuario, siempre dentro de unos valores límite y en una zona de orografía conocida y previamente estudiada. Este grid no será visible en tiempo de simulación, pero estará disponible como herramienta de Debug que nos sirve para comprobar la concordancia de los datos que envía el servidor de fuego y los que se representan visualmente.



Figura 9. Visor de grid de celdas.

4.2. Sistema de partículas

Las columnas de humo son sistemas de partículas con determinadas propiedades, caracterizados por diferentes *affectors*, un *affector* almacena la fórmula de como un nódulo cambia en el tiempo, los cuales determinan el tipo de humo a representar.

PROPIEDADES	DESCRIPCION
DENSIDAD / OPACIDAD	Cantidad de transparencia
ALTURA / LONGITUD	Longitud de la columna del humo
COLOR	Color del humo. En ocasiones se especifica el tono únicamente dependiendo del <i>affector</i>
CANTIDAD	Se mide en función de la extensión que ocupa el humo respecto del fuego que lo origina. Proporción entre tamaño del fuego y tamaño del humo (intensidad)

VIRULENCIA DE COMBUSTION	En función del combustible, el fuego arderá de forma más lenta o más virulenta, generando un humo más uniforme o abrupto (movimiento del humo)
DISPERSION	Es la dirección de las partículas del humo a partir de su inicio. Puede ser en una dirección o en múltiples, según el tipo de fuego y demás factores (patrón de comportamiento)
DETALLE INTERIOR	Si se aprecian siluetas o se muestra uniforme su interior (textura del humo)
DETALLE CONTORNO	Si se aprecian contornos sinuosos bien definidos o no
FORMA	Se entiende por forma del humo a las diferentes direcciones que toma el humo en su recorrido

Tabla 1. Propiedades visuales del humo.

4.3. Cambio de estado de la vegetación.

Los modelos de vegetación cambiarán a un estado “quemado” acorde al avance del fuego. Para ello, todos los árboles dentro de la zona del incendio han sido asignados previamente a la celda que ocupan sobre el terreno, de manera que al cambiar esta, los árboles que contiene cambien también. Para ello ha sido necesario reordenar los árboles en memoria y reestructurar la forma en que se accedía a ellos para optimizar el cambio individual entre un modelo y otro de árbol.

4.4. Definición de agentes extintores

Después de consultar a expertos en la materia, se han definido varios tipos de agentes, con sus propiedades y comportamientos sobre las zonas afectadas de terreno, estableciéndose 3 tipos de agente: Agua, retardante amónico y espuma.

4.5. Descarga de agentes extintores desde entidades tácticas aéreas

Una de las medidas contraincendios destacadas y objeto de entrenamiento serán las descargas aéreas de agentes extintores. Esto afectará a la superficie del incendio interactuando con las llamas y obteniendo el resultado apropiado para cada celda. Esta acción se verá reflejada en la interfaz visual con un efecto de descarga que varía en función del tipo de agente utilizado. La descarga de agua es otro efecto realizado a partir de sistemas de partículas, y se aplican los mismos criterios de ajuste que para el fuego y el humo.



Figura 10. Imagen de laboratorio de modelización descarga helicóptero con helibalde.

4.6. Evolución del incendio.

La evolución del incendio se refleja, además de con los efectos de fuego y humo con un efecto de terreno ardiendo, en brasa y quemado, utilizando una técnica de pintado sobre FrameBufferObject y proyectando el estado de cada celda sobre el grid definido. La arquitectura de “frame buffer object” (FBO) es una extensión de OpenGL para hacer flexible la malla de pantalla, incluyendo el rederizado de la textura. Capturando imágenes que normalmente podrían ser dibujadas en una pantalla, pueden ser utilizadas para una gran variedad de capas y post procesar efectos.

4.7. Acción de las entidades tácticas terrestres

De manera similar a las entidades aéreas, los vehículos terrestres realizarán descargas sobre zonas del terreno afectado.

La acción de las brigadas, un tipo de entidad táctica terrestre, se refleja en forma de zanjas sobre el terreno afectado, las llamadas líneas de defensa, o en ataque directo con batefuegos y en punta de lanza, incluso podrán realizar contrafuegos, quemas de ensanche o fuego técnico como herramienta de extinción.

Para reflejar el efecto en la interfaz visual con el usuario se utiliza la misma técnica que al quemar el terreno.



Figura 11. Diversos estados de coníferas según le afecta el fuego: quemada, chamuscada y verde.

5 COMPORTAMIENTO DEL FUEGO, DEL HUMO Y EL ENTRENAMIENTO

De los contenidos y objetivos formativos de cualquier nivel y posición, de los más fundamentales o los de más alto nivel, es el conocimiento para poder prever el comportamiento del fuego uno de las principales pilares para poder comenzar una labor profesional en los entornos de fuego forestal con eficacia y seguridad.

En consecuencia, se comprueba que los contenidos teóricos referidos a la temática precitada son tratados extensamente pero no así la aplicación práctica de estos y muchos menos su visualización en escenarios de fuego donde los combatientes tienen su gran reto de supervivencia a las llamas, al humo, a las largas horas de trabajo, para ganarle la batalla a un fuego siempre en inferioridad de condiciones donde la astucia y la predicción de sus movimientos son claves para poder ganar la partida.

El comportamiento del fuego proporciona la información de partida en el entorno táctico. Es decir, las operaciones estratégicas encaminadas al control y extinción de los perímetros de fuego, dependen del conocimiento de los escenarios por donde evolucionará el fuego y de los pronósticos de comportamiento. En esencia, la elaboración de los planes de ataque incluye la definición de objetivos y la selección de fórmulas de combate. Sin duda, la herramienta de entrenamiento que incluye el simulador SEILAF, recoge las posibilidades de entrenamiento en base de la definición de acciones de combate y las respuestas esperadas que la ejecución de las mismas generará en el fuego. Para ello se han generado algoritmos de gobierno que

permiten ofrecer respuestas a las distintas acciones de combate. Desde la minoración de los procesos de combustión por alteraciones de las reacciones de oxidación, tras el efecto directo del lanzamiento de líquidos extintores y su influencia en el cambio de la combustibilidad, hasta la opción de construcción de líneas de defensa y el ejercicio de contrafuegos y quemas de ensanche, han sido integrados con el fin de ofrecer un amplio abanico de herramientas de para la supresión del fuego.

5.1. Entorchamientos

La realidad de la dinámica de avance del fuego en los ecosistemas forestales, pone de manifiesto que en determinadas condiciones y dependiendo de la humedad de la vegetación viva localizada en el dosel arbóreo, así como de la transmisión verticalizada del efecto convectivo procedente del desplazamiento superficial del fuego, se pueden generar procesos que ante elevadas intensidades lineales de avance del fuego, se pueden generar fenómenos de entorchamientos individualizados de árboles, generándose avances pasivos o intermitentes del fuego a través de las copas. Esta realidad ha sido incluida en los mecanismos de avance del fuego.

5.2. Paveseo

Así como la definición de áreas potencialmente capaces de generar la ignición de nuevos focos de fuego, dependiendo ello, de la concurrencia de la energía térmica ascensional, la velocidad del viento en altura, el tipo de modelo de combustibles y el estado probabilístico de los combustibles frente a la ignición. El origen de las pavesas tiene siempre una posición privilegiada en el frente del incendio y la altura tomada cuando la columna de convección pasa de su desarrollo vertical a ser movida por el viento principal.



Figura 12. Ajustes visuales de los efectos de entorchamiento y paveseo

5. 3.Intensidad de llama

El parámetro de salida de intensidad de llama (kW/m) ha servido para diferenciar las zonas de cabeza o motor del fuego y geolocalizar en dichas celdas la base de las columnas de convección. El entorchamiento y el paso a fuego de copas se establecen según las ecuaciones de la intensidad crítica de copas (para el entorchamiento) y de la fracción de copa quemada (para determinar si el fuego de copas es pasivo o activo).

5.4. Columna de convección

5.4.1. Explica el estado evolutivo del incendio

La columna de convección responde al estado de desarrollo del incendio desde las fases iniciales de ignición de una pequeña columna de humo ascensional pasando por las etapas de desarrollo y máxima intensidad hasta los estados finales de contención, control y extinción.

5.4.2. Responde al tipo de combustible

Según el tipo de modelo de combustible el humo se verá afectado en su color y opacidad principalmente. Otros factores variables de los combustibles como la humedad de combustible vivo o la del combustible fino muerto también contribuyen a condicionar una respuesta diferente del humo siendo su dinámica más acelerada o en los efectos de torsión de la columna principal.

5.4.3. Responde al viento

Se ha considerado por defecto que el primer tramo ascensional de las partículas de humo salen con la misma dirección y sentido que la llama para afrontar un desarrollo vertical hasta confluir en la formación de la columna donde a cierta altura proporcionada por el servidor de fuego comienza a verse afectada por el viento en altura siendo este el único responsable de la dirección de su dispersión.

5.4.4. Responde a las acciones de extinción

El humo responde a las acciones de las entidades tácticas de extinción y de manera inmediata a las de ataque directo.

5.5. Tormentas y viento

El modelo atmosférico visual de SEILAF contempla la creación de tormentas con la visualización de rayos. Dicho efecto combinado con la herramienta de programación de cambios en la dirección del viento permite planificar ejercicios emulando los efectos de succión cuando se forma la tormenta y repulsión cuando comienza a descargar.



Figura 13. Pruebas y Validación diversos colores humo.



Figura 14. Pruebas visualización comportamiento de las partículas en la columna de convección.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la organización del Congreso Internacional de modelización computacional del Fuego la oportunidad y primicia de la exposición de la presente comunicación.

REFERENCES

1. A. Smith, «Calculation of Potential Flow About Arbitrary Bodies, Hess, J.L.,» 1967.
2. T. Lundgren, «Model equation for nonhomogeneous turbulence,» 1969.
3. L. Milne-Thomson, «Theoretical Aerodynamics,» *Dover Publications*, 1973.
4. S. a. D. Chen, «Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows,» 1998.
5. J. L. a. B. Chopard, «Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method,» 2008.
6. T. P. U. R. N. T. a. T. Z. Carolin Körner, «Parallel Lattice Boltzmann Methods for CFD Applications,» 2006.
7. A. Smith, «Calculation of Potential Flow About Arbitrary Bodies, Hess, J.L.,» 1967.
8. T. Lundgren, «Model equation for nonhomogeneous turbulence,» 1969.
9. L. Milne-Thomson, «Theoretical Aerodynamics,» *Dover Publications*, 1973.
10. S. a. D. Chen, «Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows,» 1998.
11. J. L. a. B. Chopard, «Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method,» 2008.
12. T. P. U. R. N. T. a. T. Z. Carolin Körner, «Parallel Lattice Boltzmann Methods for CFD Applications,» 2006.
13. Rodríguez y Silva, F., «A Forest Fire Simulation Tool for Economic Planning in Fire Suppression Management Models: An Application of the Arcar-Cardin Strategic Model», Proceedings of the symposium on fire economics, planning and policy bottom lines, USDA Forest Service. General Technical Report PSW-GTR-173, 1999.
14. Rodríguez y Silva, F., Molina Martínez, J.R., Martínez Carmona, J.F., «Manual técnico de aplicaciones informáticas para la defensa contra incendios forestales», Serie de publicaciones forestales, Laboratorio de Defensa contra Incendios Forestales, Universidad de Córdoba, MANPAI XXI, Córdoba, 2010.