

Integración de datos LiDAR en modelos físicos de comportamiento del fuego para la simulación y el estudio de incendios forestales en el bosque mediterráneo

Marina Simó-Martí, Pablo Crespo-Peremarch, Jesús Torralba, Juan Pedro Carbonell-Rivera, Luis Ángel Ruiz

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n 46022 España. msimmar@upv.es

Resumen: Los grandes incendios forestales han aumentado su intensidad y destructividad, así como su ocurrencia fuera de los meses de verano. El estudio y simulación del comportamiento del fuego en los terrenos forestales aparece como una tarea crucial para definir las estrategias de prevención y extinción de incendios. En este artículo se ha implementado una metodología que integra datos de densidad de masas arbustivas derivadas de nubes de puntos TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) en el modelo físico de comportamiento del fuego FDS (*Fire Dynamics Simulator*), con el propósito de analizar la influencia de la densidad de la vegetación en la velocidad de propagación del fuego en escenarios semirreales de matorral mediterráneo. Los escenarios semirreales se crearon a partir de individuos segmentados y voxelizados de especies de matorral mediterráneo. Estos modelos reales se obtuvieron del escaneo TLS de las parcelas de estudio localizadas en la Serra d'Espadà. Mediante las simulaciones 3D se ha evaluado la sensibilidad del comportamiento del fuego a las variaciones en la continuidad horizontal del estrato arbustivo. Los resultados han mostrado diferencias significativas en la velocidad de propagación del fuego y en la tasa de consumo de biomasa: $8.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ y $5.1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ en el escenario de menor continuidad, y $7.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ y $4.3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ en el de mayor continuidad. Los resultados obtenidos son preliminares pero precursores de un trabajo más amplio, en el que se podrá considerar una escala de estudio más cercana a un incendio forestal de dimensiones reales y donde se considere el estrato arbóreo.

Palabras clave: láser escáner terrestre, *Fire Dynamics Simulator*, continuidad horizontal, velocidad de propagación, tasa de consumo de biomasa.

Integration of LiDAR data into fire behaviour models to simulate and study Mediterranean forest wildfires

Abstract: Large forest fires have increased their intensity and destructiveness, as well as their occurrence outside the summer months. The study and simulation of fire behavior in forest lands appears as a crucial task to define strategies for fire prevention and suppression. In this paper we have implemented a methodology that integrates TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) point cloud-derived shrubs density data into the physics-based fire behavior model FDS (*Fire Dynamics Simulator*), in order to analyze the influence of vegetation density on the speed of fire spread in semi-real Mediterranean shrubland scenarios. Semi-real scenarios were created with individual Mediterranean shrubs models, previously segmented and voxelized. These real models were obtained from TLS in plots located in La Serra d'Espadà. We have evaluated fire sensitivity to horizontal shrub layer continuity variations by generating 3D simulations. Our results have shown significant differences in rate of spread and mass loss rate: $8.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ and $5.1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ for the lowest continuity scenario, and $7.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ and $4.3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ for the highest one. These results are also preliminary but precursors of a wider work, in which we could consider a scale of study closer to a wildfire of real dimensions and include the tree layer.

Keywords: terrestrial laser scanner, *Fire Dynamics Simulator*, horizontal continuity, rate of spread, mass loss rate.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los incendios forestales han ido tomando mayor protagonismo en el contexto del bosque mediterráneo. De factor ecológico natural ha pasado a ser un problema medioambiental. A pesar de que el número de incendios ocurridos en España ha disminuido, los grandes incendios forestales (GIF), aquellos que afectan a superficies >500 ha, han aumentado su intensidad y destructividad, así como su ocurrencia fuera de los meses de verano (López y López, 2019). En 2022 los GIF solamente supusieron el 0.54% del total de siniestros ocurridos durante el año (Área de Defensa contra Incendios Forestales, 2023), pero a su vez quemaron el 80.78% de la superficie total afectada.

Las causas de este cambio en el régimen de incendios son diversas. Por un lado, el cambio climático ha exacerbado las condiciones que propician las igniciones del combustible forestal. Por otro lado, tanto la acumulación de vegetación leñosa como su continuidad se han incrementado en las últimas décadas debido a las políticas de conservación y el abandono del medio rural. Todo ello contribuye al aumento de la superficie forestal susceptible de desencadenar grandes incendios.

Ante este contexto, el estudio y simulación del comportamiento del fuego en los terrenos forestales y, sobre todo, en los bosques del arco mediterráneo, aparece como una tarea crucial para definir las estrategias de prevención y extinción de incendios forestales. Actualmente

existen diversidad de modelos físicos operativos capaces de generar simulaciones de incendios, como por ejemplo FARSITE incorporado en FlamMap, o FIRETEC y BehaviorPlus (Morvan, 2011). Entre ellos también se encuentra el software FDS (*Fire Dynamics Simulator*), cuya extensión *Wildland-Urban Interface* permite modelizar el fuego en 3D en contextos forestales con gran nivel de detalle (Mell *et al.*, 2011). Este último modelo requiere de la introducción de datos de la estructura forestal en tres dimensiones, los cuales pueden adquirirse de manera masiva con los sistemas de teledetección de láser escáner (LiDAR; *Light Detection and Ranging*) y procesarse posteriormente.

En este artículo se ha generado una metodología que integra datos de densidad de masas arbustivas derivados de nubes de puntos TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) en el modelo físico de comportamiento del fuego FDS, con el propósito de analizar la influencia de la densidad de la vegetación en la velocidad de propagación del fuego en escenarios semirreales de matorral mediterráneo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en el Parque Natural de *La Serra d'Espadà* (provincia de Castelló) aproximadamente en las coordenadas 39.96° N y 0.41° O. La vegetación de la zona es la característica del bosque mediterráneo, con predominio de pinares de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Aiton, ocasionalmente acompañados de *Quercus suber* L. En las parcelas de estudio se encuentran formaciones de matorrales de *Cistus albidus* L., *Genista scorpius* (L.) DC., *Calicotome sp.*, *Quercus coccifera* L., *Lavandula stoechas* L., *Daphne gnidium* L., *Ruscus aculeatus* L., *Salvia rosmarinus* Schleid. y *Pistacia lentiscus* L.

2.2. Datos de campo y TLS

En cada parcela se midió la posición de cada árbol y arbusto sobre el terreno mediante GPS y mediciones topográficas clásicas en noviembre de 2019. El modelo de GPS utilizado durante la campaña de campo fue un Leica GNSS 1200 con una precisión RTK de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ y $\pm(20 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ en horizontal y vertical, respectivamente. Además, la estación total para las mediciones topográficas clásicas fue una Topcon GTS-229 con una precisión de $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ y una precisión angular de 9".

Los datos TLS se registraron empleando un escáner láser 3D Trimble TX8. Este dispositivo emite una longitud de onda de 1.500 nm, un campo de visión (FOV) de 360°×317°, una precisión angular de 80 μrad y un error sistemático de alcance inferior a 2 mm. Dado el reducido tamaño de las parcelas experimentales (10 m × 10 m), se realizó un único barrido situado en el centro de la parcela. Esto condujo a una densidad media de puntos de 8571 puntos·m⁻². En cada parcela se posicionaron al menos tres objetivos esféricos que se georreferenciaron mediante mediciones topográficas clásicas al mismo tiempo que se recogían los datos de campo. Posteriormente, las nubes de

puntos TLS se georreferenciaron en el software Trimble RealWorks© v10.4 con una precisión media de 0.031 m.

2.3. Metodología

La metodología seguida se explica a continuación:

1. Adquisición de datos de campo mediante el escaneo de la zona de interés con TLS e identificación de la posición de los árboles y arbustos.
2. Una vez georreferenciados las nubes de puntos TLS, se identificaron los puntos del suelo con los que se generó el modelo digital del terreno (MDT) de cada parcela. Posteriormente, el MDT se empleó en la normalización de las alturas de la nube de puntos.
3. Segmentación manual de cada individuo a partir de su posición.
4. Voxelización de las nubes de puntos segmentadas a una resolución de 0.2 m. Los valores de los vóxeles se calcularon a partir de la proporción entre el número de retornos del propio vóxel y el número total de retornos de la planta segmentada.
5. Cálculo del valor de biomasa a nivel de planta segmentada y vóxel. La biomasa a nivel de planta se calculó a partir de ecuaciones alométricas por especie (Casals *et al.*, 2016) y las dimensiones medidas sobre la nube de puntos segmentada. Para el cálculo de biomasa a nivel de vóxel se multiplicó la biomasa a nivel de planta por el valor de cada vóxel correspondiente con la proporción de retornos a nivel de planta segmentada, calculada en el punto anterior.
6. Cálculo del valor de *bulk density* (biomasa/volumen aparente ocupado, kg·m⁻³) a nivel de vóxel a partir de los valores de biomasa y los volúmenes de cada vóxel.
7. Creación de librerías con los modelos de plantas segmentadas y voxelizadas con los valores de *bulk density*.
8. Creación de escenarios aleatorios en formato de entrada para FDS (.bdf). Estos escenarios se generaron a partir de los modelos reales segmentados y voxelizados, y según los parámetros introducidos por el usuario como especie, densidad de pies por especie, altura de copa, o dimensiones.
9. Definición, generación y ejecución de las simulaciones en el software FDS.
10. Cálculo y análisis de las variables de comportamiento del fuego: velocidad de propagación en la dirección de avance (*Rate of Spread*, RoS), biomasa total consumida y tasa de consumo de biomasa (*Mass Loss Rate*, MLR). El valor de RoS medio de cada escenario se obtuvo a partir del RoS de 3 perfiles longitudinales (franjas de 3 m de ancho en la dirección X y 40 m de largo en la dirección Y). En los perfiles, uniformemente distribuidos (Figura 3a) para generar una muestra representativa y reducir el efecto borde del escenario, se midió la posición del frente del fuego por unidad de tiempo. El RoS se calculó como la pendiente de la curva ajustada a dicha relación (Figura 3d).

2.4. Modelo de simulación de incendios

Para el desarrollo de las simulaciones se ha empleado el modelo físico de comportamiento del fuego FDS,

desarrollado por el *National Institute of Standards and Technology* de Estados Unidos (NIST). Se trata de un modelo de dinámica de fluidos computacional cuyo modelo numérico está basado en simulaciones del tipo *large Eddy*. FDS permite analizar el comportamiento del fuego en escenarios 3D a altos niveles de resolución. Además, es un software que se encuentra en continuo desarrollo y validación (McGrattan, *et al.*, 2023b). Para la visualización de los resultados se ha utilizado el programa de visualización *Smokeview* (SMV).

2.5. Escenarios de simulación

Los escenarios semirreales de simulación se han configurado a partir de los modelos individuales de las especies de matorral *Quercus coccifera*, *Salvia rosmarinus*, *Genista scorpius* y *Cistus albidus*. Se han establecido escenarios de 20 m × 40 m de superficie con 5 grados de continuidad horizontal a partir de varios intervalos de fracción de cubierta, FCC (Tabla 1). La continuidad horizontal se define como el grado de proximidad o conectividad horizontal entre los combustibles de una masa forestal, que afecta a la capacidad de propagación del fuego (Drury, 2020).

Una vez configurados los escenarios, se ha procedido a realizar las simulaciones con una serie de parámetros comunes a todos ellos, que se describen a continuación: (i) El tiempo de simulación se estableció en 100 segundos; (ii) la humedad de combustible de las especies de matorral se fijó en un 14% para asegurar la ignición del combustible (Mell *et al.*, 2009); (iii) se estableció un viento constante de 5 m·s⁻¹ (18 km·h⁻¹) para facilitar la propagación en el estrato arbustivo; y (iv) se seleccionó un modelo de estrato herbáceo estándar y constante, en concreto el modelo de combustible de *Rothermel-Albini* número 2 incluido en FDS (McGrattan *et al.*, 2023a).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones realizadas se muestran en la Tabla 1, en concreto los valores medios de cada variable de comportamiento del fuego calculada.

Tabla 1. Parámetros descriptivos de cada escenario y resultados obtenidos en las simulaciones (consumo de biomasa (%), RoS (m·min⁻¹) y MLR (kg·s⁻¹).

Escenario	Parámetros		Resultados		
	Continuidad	FCC (%)	Consumo de biomasa (%)	MLR media (kg·s ⁻¹)	ROS media (m·min ⁻¹)
Esc-I	Muy baja	22	42.3	5.1	8.6
Esc-II	Baja	40	48.1	5.3	7.3
Esc-III	Intermedia	60	39.8	5.7	8.4
Esc-IV	Alta	80	51.0	7.0	7.9
Esc-V	Muy Alta	>90	50.4	7.4	4.3

La evolución del consumo de biomasa de los 5 escenarios puede observarse en las Figuras 1 y 2. Los casos con menor presencia de estrato arbustivo contrastan altamente con los más densos. La tasa de consumo de biomasa (MLR) es más constante y con valores similares en los escenarios 1 y 2, pues el comportamiento del fuego está dominado en

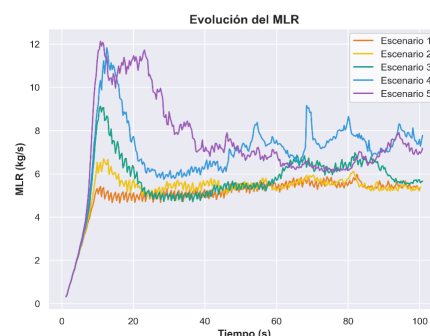


Figura 1. Evolución de la biomasa total seca (en kg) de cada escenario durante la simulación.

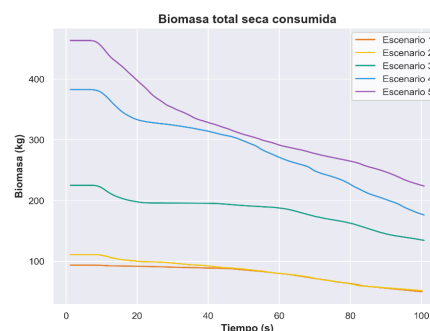


Figura 2. Evolución de la tasa de consumo de biomasa total, MLR (en kg·s⁻¹) en cada escenario.

mayor medida por el estrato herbáceo que por la presencia de matorral. En los casos 4 y 5, la mayor continuidad horizontal y mayor densidad de matorral, provoca mayor fluctuación en el MLR debido al comportamiento errático del fuego (Figura 2), junto con un incremento notable de pérdida de biomasa.

Respecto al RoS, la Tabla 1 muestra unos valores más elevados para los escenarios con menor FCC. Resultados similares aparecen en el estudio de Atchley *et al.* (2021), y pueden ser debidos a la interacción del viento con la vegetación y el fuego. El RoS aumenta porque hay menos vegetación arbustiva que impida el flujo de viento a nivel de superficie. Sin embargo, al analizar separadamente cada escenario, tanto cualitativamente (visualización de la simulación) como cuantitativamente (valores instantáneos de RoS), se puede apreciar que detrás de este valor medio de RoS existe un comportamiento bastante fluctuante en cada escenario. En el presente artículo solo se ha presentado como ejemplo el escenario de continuidad intermedia (Figura 3). En la Figura 3.b, puede observarse que el avance difiere en cada uno de los perfiles, siendo el perfil 1 (línea verde) el que mantiene una velocidad prácticamente constante, mientras que en los otros dos perfiles el fuego se queda rezagado y ralentiza su avance a partir del segundo 60. La presencia de matorral afecta a la propagación del fuego y en cada zona el avance se ve afectado, variando así su velocidad, con avances y retrocesos en el frente del fuego. Este comportamiento se acentúa en los escenarios de mayor continuidad (4 y 5).

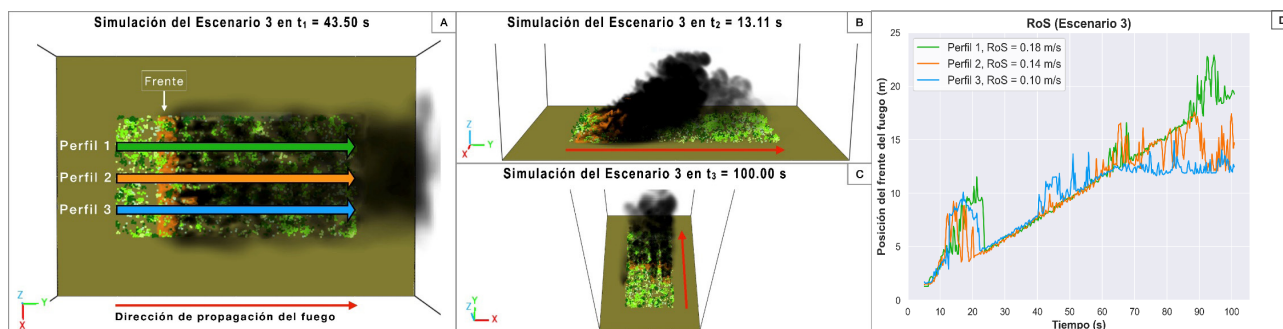


Figura 3. a) b) c) Visualización de la simulación del Escenario 3 (Continuidad intermedia) desde tres perspectivas y en tres momentos diferentes (t_1 , t_2 y t_3). d) Velocidad de propagación del fuego (RoS) en 3 perfiles longitudinales del Escenario 3. En el eje X se ha representado el tiempo de simulación (s), y en el eje Y la posición (m) del frente del fuego en la dirección Y del escenario. De este modo se representa el avance del frente desde el punto de inicio de la ignición (posición 0 m) hasta su máximo avance.

En futuros trabajos, y con el objetivo de realizar un estudio más extenso y completo del comportamiento del fuego en escenarios semirreales, sería necesario aplicar una serie de mejoras a las simulaciones. En primer lugar, incrementar el tiempo de simulación, así como las dimensiones de los escenarios para conseguir una modelización de incendios a una escala mayor y más cercana a la realidad. En ambos casos, se requeriría necesariamente un aumento de la capacidad computacional del hardware utilizado para ejecutar los procesos, de lo contrario el tiempo real empleado en cada proceso se dilata demasiado. En segundo lugar, aumentar el grado de detalle de la caracterización de las especies vegetales, clasificando los vóxeles de cada planta en función de su fracción (hojas, ramas de distintos tamaños y tronco) y asignando así un valor de biomasa más específico a cada vóxel. Por último, incorporar otras variables de estructura, como pueden ser la fragmentación 3D o incluir especies arbóreas en los escenarios para evaluar la continuidad vertical, es decir, la conectividad de los combustibles de la superficie del suelo y la copa de los árboles. De esta manera, se generarían escenarios con variaciones importantes en la altura de la base de copa y la altura del matorral.

4. CONCLUSIONES

Realizados el análisis y la discusión de los resultados, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

1. La metodología seguida permite integrar de manera eficiente los datos de masas arbustivas derivados de la nube de puntos TLS en el modelo FDS, lo que permitirá analizar el comportamiento del fuego de forma más precisa.
2. La propagación del fuego presenta sensibilidad ante las variaciones en la continuidad horizontal del estrato arbustivo, afectando significativamente a su comportamiento; y reflejándose en la simulación.
3. Los resultados del presente estudio son preliminares pero precursores de un estudio más amplio en el que se considerarán más variables, complejidad y extensión.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la ayuda PRE2021-099526 y el proyecto I+D+I PID2020-

117808RB-C21 financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por FSE+ “Invierte en tu Futuro”.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Área de Defensa contra Incendios Forestales. 2023. *Los Incendios Forestales en España: 1 enero–31 diciembre 2022 (Avance Informativo)*. Madrid.
- Atchley, A.L., Linn, R., Jonko, A., Hoffman, C., Hyman, J.D., Pimont, F., Sieg, C., Middleton, R.S. 2021. Effects of fuel spatial distribution on wildland fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire*, 30, 179. <https://doi.org/10.1071/WF20096>
- Casals, P., Valor, T., Besalú, A., Molina-Terrén, D. 2016. Understorey fuel load and structure eight to nine years after prescribed burning in Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management*, 362, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.050>
- Drury, S. 2020. Fuel Continuity. En Manzello, S. (ed.), *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, pp. 1-3. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_239-1
- López, A., López, M. 2019. *Los Incendios Forestales en España. Decenio 2006-2015*. Madrid.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, Vanell, M., Mueller, E. 2023. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. Gaithersburg, MD.
- McGrattan, K.B., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., Mueller, E. 2023. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation*. Gaithersburg, MD.
- Mell, W., Mcnamara, D., Forney, G.P., Hoffman, C.M. 2011. Computer modelling of wildland-urban interface fires. *Fire & Materials*, 531-544.
- Morvan, D. 2011. Physical Phenomena and Length Scales Governing the Behaviour of Wildfires: A Case for Physical Modelling. *Fire Technology*, 47, 437-460. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0160-2>