

El Túnel de Viento del INIA-CIFOR como dispositivo experimental para el estudio de los incendios forestales

Madrigal J.^{*1}, Guijarro M.¹, Hernando C.¹

¹ INIA. Centro de Investigación Forestal. Departamento de Selvicultura y Gestión de los Sistemas Forestales. Laboratorio de Incendios Forestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal

Sostenible UVa-INIA.

*Autor para correspondencia: incendio@inia.es

Resumen

En el contexto de la investigación en materia de incendios forestales, los “túneles de viento” o “túneles de combustibilidad” constituyen una herramienta de gran utilidad para su análisis experimental. En esta nota técnica, se describe el Túnel de Viento del Laboratorio de Incendios Forestales del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA-CIFOR) y su aplicación al estudio de diversos aspectos de los incendios forestales. Se presentan asimismo los resultados obtenidos en los trabajos más recientes y las aplicaciones al sector forestal de los resultados experimentales obtenidos en relación con el (1) riesgo de inicio de incendio, (2) el comportamiento del fuego de superficie y el proceso de subida de fuego al dosel de copas, (3) el fuego de rescoldo en suelos y (4) la eficacia de productos químicos empleados en la lucha contra incendios forestales.

Palabras clave: *Combustibles forestales, Comportamiento del fuego, Modelización, Riesgo de inicio de incendio, Simulación, Transferencia de resultados de investigación.*

1. Introducción

Los túneles de viento son utilizados en diferentes disciplinas de la ingeniería para simular procesos reales o realizar experimentos a escala con un control detallado de las variables estudiadas. Los más conocidos son aquellos que simulan flujos del aire a través de objetos y materiales de cara a disminuir su rozamiento con el viento o evitar turbulencias indeseadas. Todos ellos constan de un sofisticado control del flujo de aire para lo cual es imprescindible la puesta en obra de una infraestructura en condiciones controladas y de laboratorio a cubierto. Sin embargo el fuego forestal presenta una importante peculiaridad en relación con el fuego en infraestructuras y edificaciones: la ausencia de confinamiento y la presencia de gran cantidad de oxígeno.

no disponible. Por tanto, en los ensayos de túneles confinados, al problema de escala se une la importante ausencia de la aireación de los combustibles, situación que ralentiza la combustión respecto a la realidad del monte. Para suplir esta situación se propusieron los túneles de viento al aire libre en los que se sacrifica el control del flujo de aire por unas condiciones más realistas de combustión de la vegetación. Los ensayos en estos túneles permiten realizar más cantidad de réplicas que en ensayos de campo en condiciones más controladas y con la posibilidad de medir más cantidad de variables con mayor precisión. Como inconveniente presentan los clásicos problemas de escala que impiden simular algunos fenómenos producidos en incendios forestales, como altas intensidades y columnas de convección. El Túnel de Viento del Laboratorio de Incendios Forestales de INIA-CIFOR está situado al aire libre y consta de un recinto y de un ventilador, y se complementa con un sistema electrónico de captación de temperaturas. El ventilador, destinado a crear un flujo de aire que simula la acción del viento en el recinto térmico, está controlado por un sistema electrónico que permite obtener valores de velocidad del viento comprendidas entre 1 y 7 m s^{-1} en el área central del recinto térmico. El sistema electrónico de captación de temperaturas está integrado por un *datalogger*, y termopares de tipo K y 1 mm de diámetro, que se sitúan en el recinto térmico en función de las características del complejo de combustible y de la finalidad de los ensayos realizados. Este dispositivo permite reproducir diferentes complejos de combustible forestal: hojarasca, herbáceas, matorral, restos de corta, tepes de suelo... reconstruyendo su

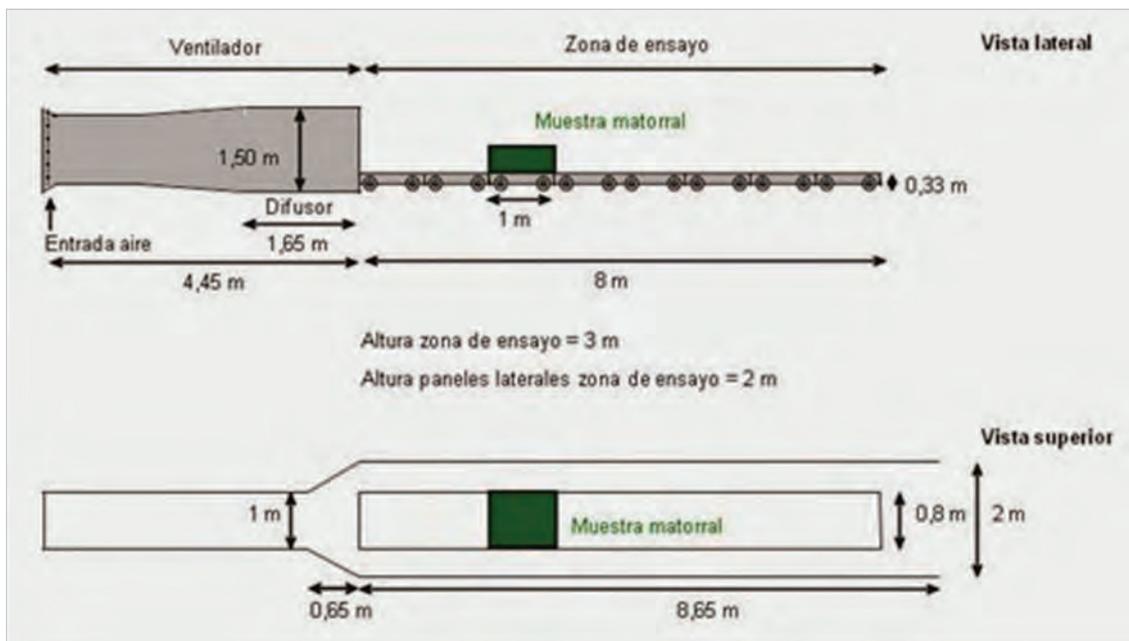


Figura 1. Sección transversal (arriba) y planta (abajo) del Túnel de Viento del INIA. El recinto térmico tiene 8 m de longitud y una sección transversal de 2 m x 3 m; su suelo está formado por ocho vagonetas independientes de 1 m x 0,8 m de superficie y 0,25 cm de altura, rellenas de arena, de modo que forman una superficie de 8 m x 0,8 m sobre el que se dispone el combustible a estudiar.

estructura original en campo o variando sus características (carga, humedad,...) dependiendo del objetivo de los ensayos.

El Grupo de Investigación de Incendios Forestales del INIA-CIFOR ha puesto a punto diferentes metodologías utilizando este dispositivo con objeto de obtener resultados experimentales relativos a varios aspectos clave de la lucha integral contra los incendios forestales. Los numerosos trabajos desarrollados en el Túnel de Viento han puesto de manifiesto que este dispositivo experimental permite obtener resultados de utilidad tanto en el ámbito de la investigación como de la gestión.

2. Riesgo de inicio de incendio

En estudios previos a pequeña escala se evaluó la inflamabilidad por foco de ignición puntual de cubiertas muertas procedentes de diferentes tratamientos selvícolas (Marino *et al.*, 2010) e implicadas en los saltos de fuego. Estos trabajos permitieron poner a punto el protocolo usado en túnel de viento. En estos ensayos, se reconstruyen los complejos de combustible presentes en la zona de estudio en una superficie de 1 m x 1 m (*Fig. 2*) (más detalles en Madrigal *et al.*, 2011, 2012b).

El foco de ignición puntual utilizado es un prisma de madera de pino de 2 cm x 2 cm x 1 cm, simulando una pavesa estándar, inflamado mediante un radiador eléctrico con potencia de calor constante (epirradiator) que se deja caer en el centro de la vagoneta donde se sitúa la muestra de matorral (*Fig. 2*). Para evaluar el riesgo de inicio de incendio y la inflamabilidad, durante los ensayos se registran los siguien-



Figura 2. Ensayo de riesgo de inicio de incendio en matorral, con detalle de la pavesa inflamada empleada como foco de ignición puntual.

tes parámetros: la frecuencia de ignición (%), el tiempo de ignición (s), la duración de la llama (s), la altura máxima de la llama (m) y la velocidad de propagación inicial (m s^{-1}). Además se monitoriza la temperatura mediante termopares situados a diferentes alturas y se evalúa el combustible consumido mediante diferencia de pesada antes y después del ensayo.

La probabilidad de ignición y el riesgo de inicio se pueden evaluar usando modelos logísticos de probabilidad de ignición (sí/no) o probabilidad de propagación inicial (propaga/no propaga).

Utilizando esta metodología se ha demostrado la evolución en el tiempo del riesgo de inicio y la inflamabilidad de complejos de combustible tras distintos tratamientos preventivos en Galicia (Marino *et al.*, 2011, 2012b) y se ha comparado su inflamabilidad a escala de complejo con la obtenida a escala de partícula (Madrigal *et al.*, 2012a). En complejos de combustible de *Ulex europaeus* (tojo) los modelos logísticos obtenidos predicen la probabilidad de que se produzca la ignición y/o propagación inicial en función del tiempo transcurrido tras la aplicación de quema prescrita y la humedad de los combustibles vivos y muertos. Se concluyó que los matorrales de tojo en Galicia tratados mediante quema vuelven a generar un riesgo de inicio similar a las zonas no tratadas entre 3 y 5 años tras la quema, lo que obliga a un tratamiento muy intensivo o la necesidad de combinar las quemas prescritas con pastoreo para controlar el rebrote del tojo. Este resultado se ha ratificado con los ensayos de inflamabilidad a diferentes escalas.

En el período 2011-2014 se han llevado a cabo una serie de ensayos para evaluar el riesgo de inicio de incendio en combustibles regenerados tras diferentes tratamientos de rehabilitación post-incendio en Galicia: mulching de paja y mulching+siembra frente al testigo sin tratar, 3 y 5 años tras el incendio. El objetivo es comprobar si la rehabilitación urgente tras incendio para evitar la erosión genera riesgo de incendio a corto y medio plazo en las zonas tratadas. Actualmente este estudio está en proceso, pero a nivel metodológico se puede adelantar que se llevaron a cabo más de 100 ensayos en 2012 y otros tantos en 2014, mostrando la versatilidad del túnel para realizar este tipo de estudios *ad hoc*, permitiendo la modelización del proceso y la comparación eficaz entre tratamientos.

3. Comportamiento del fuego en complejos de combustibles de superficie

En este tipo de estudios, se disponen los complejos de combustible de forma continua a lo largo del túnel para evaluar los diferentes parámetros de comportamiento del fuego (velocidad de propagación, altura, longitud y ángulo de llama, intensidad del frente de fuego, etc.) monitorizando el ensayo con termopares y visualmente en puntos de control a lo largo del túnel. En estos experimentos se introduce el factor "velocidad del viento", generado por el dispositivo, para analizar su influencia en el comportamiento del fuego de los complejos ensayados.

En los últimos 25 años se vienen realizando ensayos en una gran variedad de

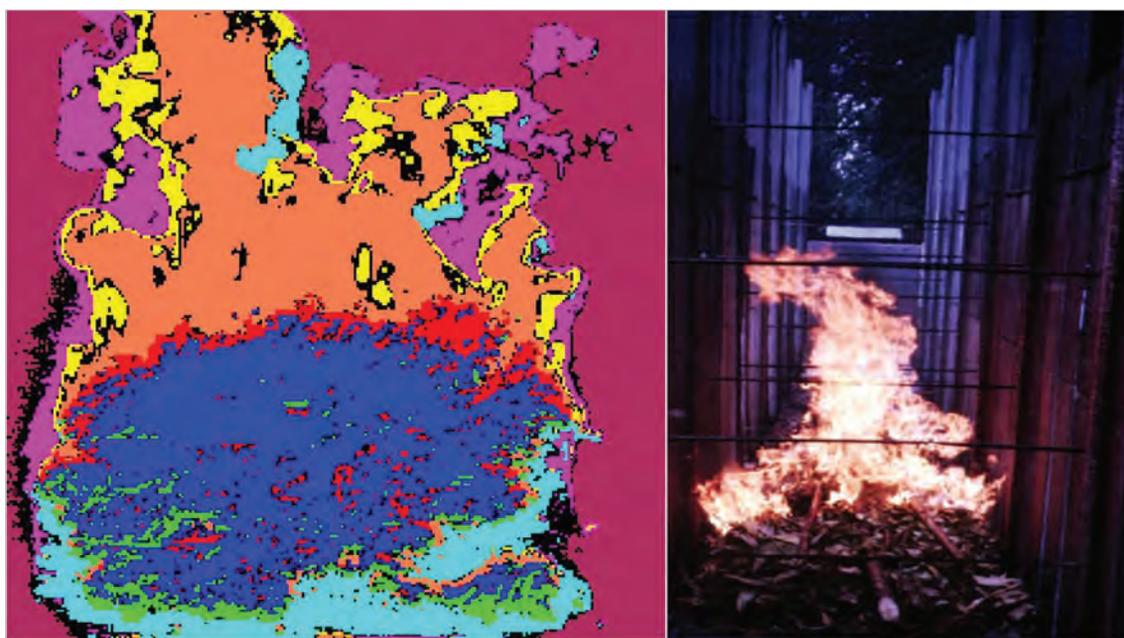


Figura 3. Clasificación de imagen IR (Fuente: LATIR de la Universidad Carlos III de Madrid) en un ensayo del Túnel de Viento del INIA

combustibles, desde los primeros ensayos sobre cubiertas de diferentes especies mediterráneas (Guijarro *et al.* 2004) hasta la comparación del comportamiento del fuego de complejos de combustible de matorral (Marino *et al.* 2008, 2012a, 2014). Algunos de los ensayos de cubiertas de *Pinus pinaster* y sobre matorral de carqueixa (*Pterospartium tridentatum*) han sido utilizados por el laboratorio LATIR de la Universidad Carlos III de Madrid para testar algoritmos de clasificación de imagen infrarroja (IR) que actualmente se pueden utilizar en equipos IR para visualización de incendios forestales (Guijarro *et al.* 2006).

Asimismo, se puede evaluar la interacción de las llamas con los troncos colocando una troza en una de las vagonetas del túnel (*Fig. 4*). Para conseguir este objetivo, se lleva a cabo un seguimiento de las temperaturas registradas, tanto en la superficie como en el cambium y en distintas posiciones en relación al tronco (barlovento/sotavento), mediante el empleo de termopares (Mendes-Lopes *et al.*, 2010). Los modelos de mínimos cuadrados parciales (PLS) se han mostrado de gran utilidad para modelizar y describir los fenómenos de comportamiento del fuego en túnel de viento, destacando las variables implicadas en el proceso (Madrigal *et al.*, 2011, Madrigal *et al.*, 2012b, Marino *et al.*, 2012a). Los efectos de interacción llama-tronco y la simulación en túnel de viento de este proceso, así como el control de las temperaturas en el exterior del tronco y a la profundidad del cambium, permiten comparar estos datos con resultados obtenidos en quemas prescritas y de esta forma mejorar las prescripciones para minimizar los daños en el arbolado, caracterizando mejor la resistencia al fuego de la especie estudiada. Las conclusiones de estos estudios podrían derivar en estudios de ecología del fuego ya que serían de aplicación a incendios de baja y media intensidad.



Figura 4. Ensayo de comportamiento del fuego de hojarasca e interacción con tronco. Se muestra la disposición antes del ensayo, la vista frontal con el efecto de la turbulencia de la llama a sotavento y la vista posterior con la interacción llama-tronco a barlovento (velocidad del viento 1 m s^{-1}). Más detalles en Madrigal *et al.*, 2011.

4. Comportamiento del fuego en el proceso de subida de fuego a las copas

En el contexto del Proyecto de Investigación INFOCOPAS se ha propuesto un protocolo de ensayo que permite evaluar la inflamabilidad del primer verticilo de la copa de un árbol y, en consecuencia, validar o mejorar los modelos existentes de subida de fuego a copas, basado en los conocimientos y metodologías anteriormente descritos (más detalles en Madrigal *et al.*, 2013).

En estos ensayos, se dispone a lo largo del túnel un complejo de combustible que genera un fuego de superficie, y una estructura para soportar ramas a 150 cm, 200 cm y 250 cm de altura sobre el nivel de las vagonetas (*Fig.5*). Además de las variables de comportamiento del fuego de superficie, se propone analizar la influencia de la geometría de llama en la inflamación de las ramas mediante análisis de imágenes tomadas en vista lateral. Las variables se completan con la estimación de la intensidad de reacción recibida por las ramas (medición de temperaturas de la columna de convección, mediante termopilas calibradas), la ignición de las copas (variable binaria sí/no), la duración de la llama en las ramas (t_r , en s) y la fracción de copa consumida (FCC, % de biomasa consumida). Todo ello supone un total de 100 variables por ensayo cuyo análisis conjunto obliga a usar modelos PLS, al contar con más variables que datos y estar todas ellas fuertemente autocorrelacionadas. Algunas de estas variables intervienen como inputs en los modelos utilizados normalmente para predecir la subida de fuego a las copas (Van Wagner 1977, Cruz *et al.*, 2004). En consecuencia, el protocolo propuesto puede ser usado para su validación en las condi-



Figura 5. Túnel de Viento del INIA en vista lateral donde se muestra la geometría y avance de la llama analizados con el programa ImageTool®. En rojo, la geometría de la llama procedente del fuego de superficie y en amarillo la generada en la copa. Se muestran los valores de longitud de eje mayor y menor de la llama, ángulo de llama (α) y los valores considerados para las variables CBH (altura de la primera rama viva) y FSG (discontinuidad entre matorral y copa).

ciones de contorno deseadas, siempre dentro de las limitaciones de escala del túnel de viento.

Los resultados muestran una adecuación moderada (60-75% de aciertos) de las predicciones de los modelos de subida a copas más utilizados (Van Wagner 1997 y Cruz *et al.*, 2004) pero un buen ajuste (85%) cuando se genera un modelo logístico usando las mismas variables usadas por Cruz *et al.* (2004) en el Experimento Internacional de Fuegos de Copa (International Crown Fire Modeling Experiment-ICFME) con datos de quemas de campo. Por tanto, el efecto de escala existe pero se puede considerar proporcional a lo ocurrido en campo, mostrando de nuevo que el túnel de viento puede ofrecer una valiosa información complementaria a la obtenida en campo, al menos en quemas de moderada intensidad. Se considera por tanto que los estudios de subida de fuego a copas con combustibles mediterráneos tienen una aplicación directa a la mejora de las prescripciones en la ejecución de quemas prescritas para disminuir la probabilidad de subida a copas. Asimismo, creemos que con los correspondientes coeficientes de escalado los modelos ajustados o al menos algunos de los fenómenos observados en el túnel como el tiempo de residencia de llama (Madrigal *et al.*, 2014) podrían ser aplicados en incendios reales.

5. Simulación de fuego de rescoldo

Se denomina fuego de rescoldo aquel que afecta a la materia orgánica del suelo y que se produce generalmente sin llama, con una velocidad de combustión muy lenta. Este tipo de fuego es el responsable de muchas reproducciones y es el causante de los mayores daños al suelo. Además genera una alteración severa del ciclo de nutrientes, desaparición de agregados y de gran parte del banco de semillas del suelo

que se acumulan en la capa de mantillo. Todo ello implica más riesgo de erosión con los episodios de lluvias de otoño e invierno siguiente al incendio y por tanto una menor probabilidad de recuperación de la vegetación.

Con el objeto de simular este proceso en el túnel de viento, se recogieron monolitos de suelo de 40 x 40 x 10 cm en pinares de *Pinus pinaster* de Galicia y de Cuenca, que se colocaron en el túnel a ras del suelo de las vagonetas, situándose encima una capa de restos de desrame de *P. pinaster*. Se procedió a su quema sin efecto del viento para generar una velocidad de propagación baja y forzando la aparición de combustión del mantillo y materia orgánica (fuego de rescoldo). Se colocaron termopares en la superficie de los monolitos, en la interfaz hojarasca-mantillo y a 2 y 5 cm

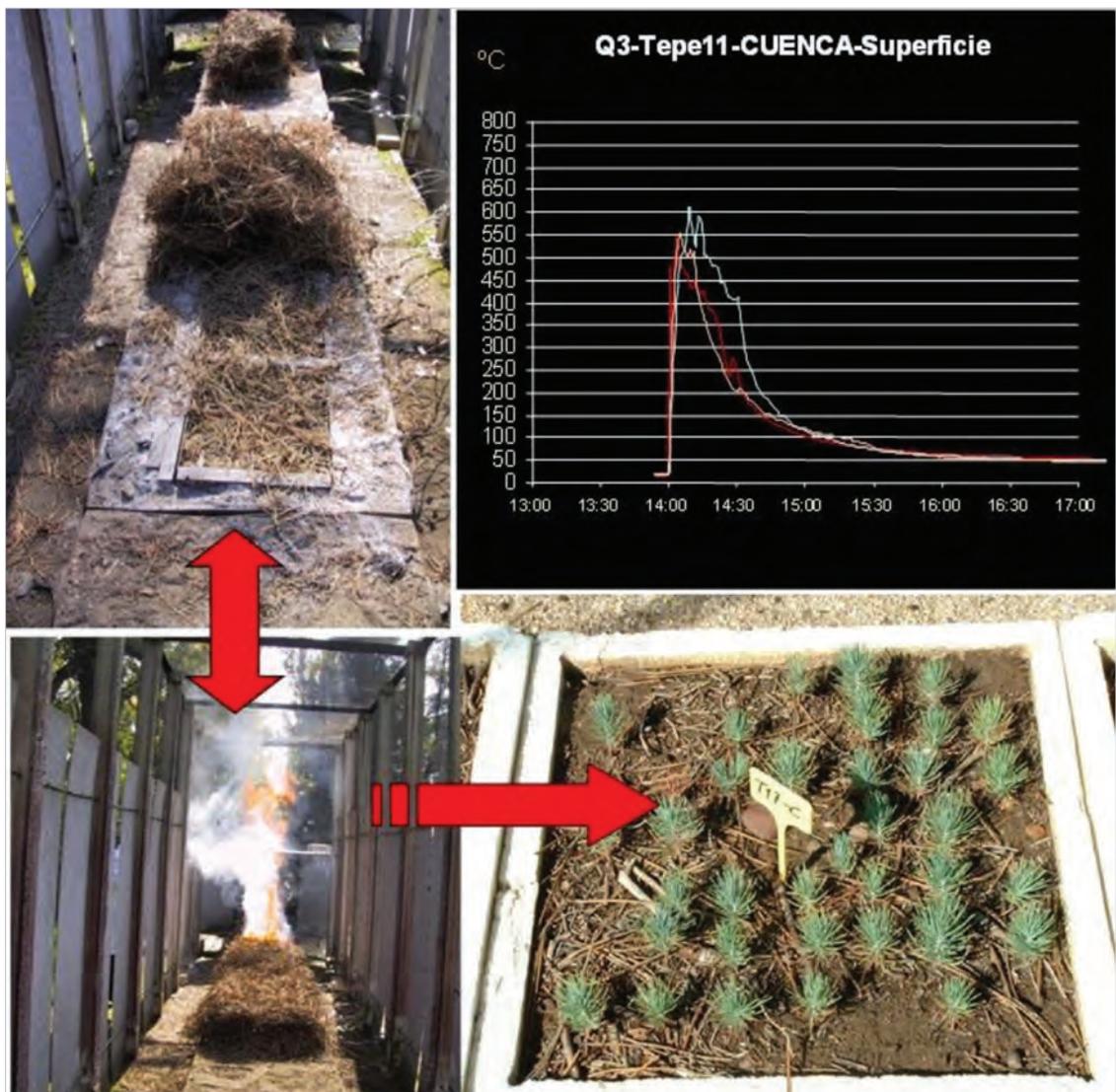


Figura 6. Ensayo de fuego de rescoldo en Túnel de Viento del INIA. Se muestran las temperaturas en el mantillo a lo largo del ensayo en un suelo con poca materia orgánica (Almodóvar del Pinar, Cuenca). Los monolitos quemados se sembraron para comprobar el efecto sobre la emergencia, mortalidad y crecimiento inicial de brinzales de *P. pinaster*.

bajo la capa de mantillo, para estimar el calentamiento del suelo durante el proceso. En suelos con poca materia orgánica el proceso solía prolongarse 5-6 horas, pero en suelo con abundante materia orgánica se llegó a monitorear hasta 48 horas de rescoldo, consumiendo más del 80% del peso inicial del monolito. Los resultados de estos experimentos mostraron de nuevo la capacidad del túnel para generar una situación más realista que la hasta ese momento presentada por otros científicos para simular este proceso en laboratorio (Certini, 2005), ya que la mayoría de los autores utilizan estufas de convección (muflas) que evidentemente ejercen un calentamiento totalmente diferente y con pocas similitudes con el fuego de rescoldo en un incendio o quema prescrita. Este estudio en colaboración con el CIF-Lourizán de la Xunta de Galicia dio lugar a varias publicaciones sobre los efectos del fuego de rescoldo simulado en el suelo y en la regeneración de *P. pinaster* (Madrigal *et al.*, 2010; Fontúrbel *et al.*, 2011).

Las aplicaciones de este tipo de estudios están relacionadas con la estimación de variables que permitan reducir la severidad en el suelo y las reproducciones de incendios. De igual manera, se considera que una comparación eficaz con datos obtenidos en campo durante quemas prescritas permitiría evaluar muchos procesos durante la quema y por tanto mejorar las prescripciones para minimizar los daños en el suelo y hacer recomendaciones sobre periodicidades (ciclo de nutrientes) y técnicas de encendido (a favor/en contra).

6. Evaluación de la eficacia de productos químicos usados en la lucha contra incendios

Existe una metodología desarrollada en mesa de quemas (Hernando *et al.*, 2009) para evaluar la eficacia de los productos químicos (espumas, retardantes de largo plazo como los fosfatos y nitratos) usados en la lucha contra incendios. El objetivo es conocer el aumento de eficacia en la extinción respecto al agua. El protocolo se basa en comparar el comportamiento del fuego de una cubierta de acículas sin tratar respecto a otra tratada, colocadas en una mesa de quemas soportada en una balanza. Este dispositivo mide el peso en continuo lo que permite conocer el cambio de tendencia de la combustión de la acícula tratada respecto al agua o respecto al producto ensayado. Debido a su simplicidad, se decidió aplicar esta metodología en túnel de viento para poder testar los productos a una escala intermedia. El túnel presenta el inconveniente de no tener células de carga con lo que no conocemos la velocidad de combustión y por tanto el cambio producido al ponerse en contacto con la zona tratada con el producto. Para evaluar este cambio de manera indirecta se colocan termopares a ambos lados de las zonas (tratada y no tratada) y en la interfaz de ambas, con lo que la temperatura de llama y la convección ofrece una estimación de la intensidad del fuego. Por tanto esta metodología tiene aplicación directa al desarrollo de productos químicos aplicados en la lucha contra incendios o en su caso a la evaluación de su eficacia en diferentes condiciones de viento, temperatura, dosis y concentraciones. En cualquier caso los ensayos de este tipo tienen un ca-

rácter comparativo y sus resultados no tendrían aplicación directa a la eficacia en campo debido a las bajas intensidades de trabajo y baja longitud del frente de llama que no puede ser superior al ancho de la vagoneta (80 cm).

7. Conclusiones

Se considera que las metodologías desarrolladas en los últimos años podrían ser transferibles al sector de la lucha contra incendios forestales con diversas aplicaciones:

- Caracterizar la inflamabilidad en modelos de combustible y vegetación en la Interfaz Urbano-Forestal (selección de especies y tipos de setos, mantenimiento...).
- Mejorar las clasificaciones actuales en los mapas de inflamabilidad a escala de paisaje, incluyendo la cuantificación de los parámetros que describen la combustión en diferentes condiciones de humedad y fenología de los combustibles (mapas dinámicos de inflamabilidad, mejora de índices de riesgo).
- Mejorar las prescripciones de quema (quema prescrita, quemas de ensanche, contrafuegos) y seguridad en las operaciones (conocimiento de la tasa de calor emitida, *Heat Release Rate*HRR).
- Caracterizar el potencial energético del matorral bajo copas: prevención de inicio y propagación de incendios de copa.
- En la toma de decisiones de ejecución de tratamientos preventivos (intensidad, periodicidad), incluidos aquellos dirigidos a la disminución del potencial de subida de fuego a copas.
- En la planificación de infraestructuras preventivas (potencial energético), para incrementar la seguridad de los combatientes y los residentes (Interfaz urbano-forestal).
- Para mejora de los modelos de propagación de fuego de superficie y de subida de fuego a copas.
- Mejorar las prescripciones de quema bajo arbolado (quema prescrita, quemas de ensanche, contrafuegos) sobre todo en relación al potencial de subida del fuego a copas y los daños al arbolado (interacción frente de llama-tronco).
- Para la mejora de la eficacia de productos químicos empleados en la lucha contra incendios.

8. Agradecimientos

Los resultados presentados en la presente nota técnica se han obtenido en el contexto de diferentes proyectos de investigación del Plan Nacional I+D de Recursos y Tecnologías Agrarias cofinanciados con fondos FEDER y en el de diversos proyectos europeos integrados de los diferentes programas marco de investigación de la UE. La presente recopilación se ha realizado en el contexto del proyecto MedWild-

FireLab de la ERANET FORESTERRA.

Agradecemos *in memoriam* a Antonio Arellano (CIF-Lourizán, Xunta de Galicia) su asistencia constante en la toma de datos de campo y envío de material a lo largo de más de 20 años de colaboración, labor sin la cual no hubiera sido posible la puesta a punto de gran parte de las metodologías y resultados presentados.

9. Bibliografía

- Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1–10.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E., Wakimoto, R.H., 2004. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *For. Sci.* 50 (5), 640-658
- Fontúrbel, T., Vega, J.A., Pérez-Gorostiaga, P., Fernández, C., Alonso, M., Cuiñas, P., Jiménez, E., 2011. Effects of soil burn severity on germination and initial establishment of maritime pine seedlings, under greenhouse conditions, in two contrasting experimentally burned soils. *Int J. Wildland Fire* 20(2), 209-222
- Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Madrigal, J., 2004. Modelización del comportamiento del fuego en los incendios forestales: modelos empíricos de predicción de la velocidad de propagación desarrollados en túnel de viento. *Cuadernos de la SECF* 18, 268-274
- Guijarro, M., Madrigal, J., Hernando, C., Díez, C., Dupuy, J.L., Vachet, P., Aranda, J.M., Meléndez, J., López, F., 2006. Comparison of temperatures measurements with thermocouples and infrared cameras. In: Viegas, D.X. (ed.), V Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. Figueira da Foz (Portugal). 27-30 Noviembre 2006. Elsevier, Amsterdam.
- Hernando C., Guijarro M., Madrigal J., 2009. Metodología para la determinación en laboratorio de la eficacia de los retardantes utilizados en la extinción de incendios forestales. *Montes* 96, 36-38.
- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., Vega, J.A., Fontúrbel, T., Pérez-Gorostiaga, P., 2010. Smouldering fire-induced changes in a Mediterranean soil (SE Spain): effects on germination, survival and morphological traits of 3-years-old *Pinus pinaster* Ait. *Plant. Ecol.* 208(2), 279-292
- Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Marino, E., 2011. Estimation of peak heat release rate of a forest fuel bed in outdoor laboratory conditions. *J. Fire Sci.* 29(1), 53-70
- Madrigal, J., Marino, E., Hernando, C., Guijarro, M., Díez, C., 2012a. Evaluation of the flammability of gorse (*Ulex europaeus* L.) managed by prescribed burning. *Ann. For. Sci.* 69 (3), 387-397
- Madrigal, J., Marino, E., Guijarro, M., Hernando, C., 2012b. Aplicaciones de la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) a la descripción de fenómenos de comportamiento del fuego estudiados en túnel de combustión. *Cuadernos de la SECF* 34, 147-151.
- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., Díez, C., Carrillo, C., 2013. Simulación de subida de fuego a copas en túnel de viento: resultados preliminares para la validación de modelos aplicados a la prevención de incendios. En: VI Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vitoria Gasteiz 10-14 junio 2013.
- Madrigal, J., Hernando, C., Guijarro, M., 2014. Procedimientos para la determinación de la

- inflamabilidad de combustibles implicados en los fuegos de copa. II Taller sobre Lecciones Aprendidas en Incendios Forestales. Córdoba 15-17 de enero de 2014.
- Marino, E., Guijarro, M., Madrigal, J., Hernando, C., Díez, C., 2008. Assessing fire propagation empirical models in shrub fuel complexes using wind tunnel data. In: De las Heras, J., Brebbia, C.A., Viegas, D., Leone, V., (eds.), *Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires*, Wit Press, UK.
- Marino, E., Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Fernández, C., 2010. Flammability descriptors of fine dead fuels resulting from two mechanical treatments in shrubland: a comparative laboratory study. *Int. J. Wildland Fire* 19 (3), 314-324.
- Marino, E., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., Díez, C., 2011. Fire hazard after prescribed burning in a gorse shrubland: implications for fuel management. *J. Environ. Manage.* 92, 1003-1011.
- Marino, E., Dupuy, J.L., Pimont, F., Guijarro, M., Hernando, C., Linn, R., 2012a. Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: a comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels. *J. Fire Sci.* 30(4), 277-299
- Marino, E., Hernando, C., Madrigal, J., Díez, C., Guijarro, M., 2012b. Fuel management effectiveness in a mixed heathland: a comparison of the effect of different treatments types on fire initiation risk. *Int. J. Wildland Fire* 21 (8): 969-979
- Marino, E., Hernando, C., Madrigal, J., Guijarro, M., .2014. Short-term effect of fuel treatments on fire behaviour in a mixed heathland: a comparative assessment in an outdoor wind tunnel. *Int. J. Wildland Fire* (en prensa DOI: 10.1071/WF13175)
- Mendes-Lopes, J.M., Ventura, J., Santos, N., Guijarro, M., Madrigal, J., Marino, E., 2010. Comparison of surface fire propagation studies at two laboratory scales: a case study of interaction with a tree trunk. In: Viegas, D.X. (ed.), V Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Figueira da Foz (Portugal). 27-30 Noviembre 2006. Elsevier, Amsterdam.
- Van Wagner, C. E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Can. J. For. Res.* 7: 23-34.